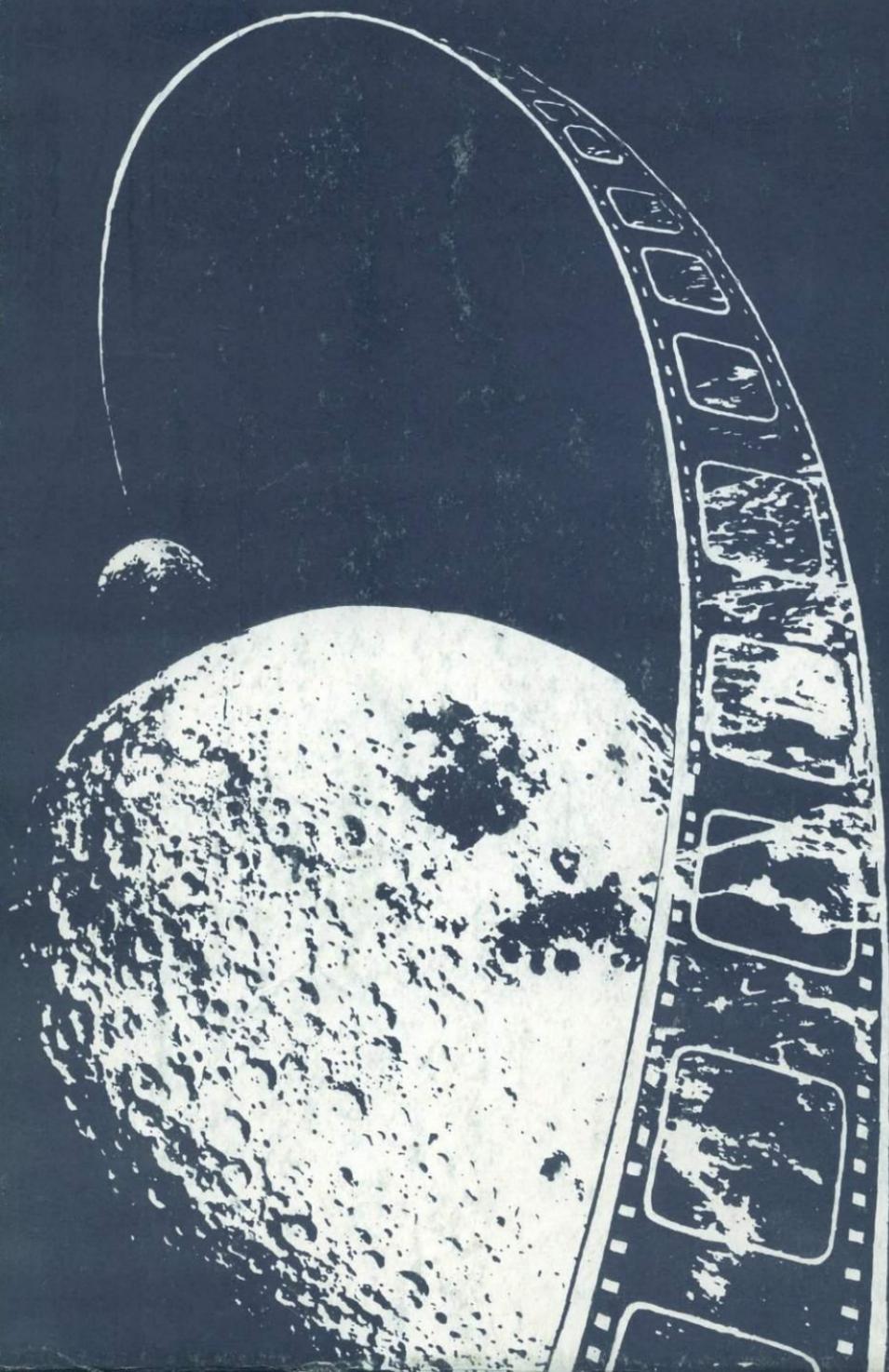


Б. Ф. ФЕДОРОВ
В. Д. ПЕРМЯКОВ

КОСМИЧЕСКОЕ
ФОТОГРАФИРОВАНИЕ



КОСМИЧЕСКОЕ ФОТОГРАФИРОВАНИЕ

Б.Ф. ФЕДОРОВ
В.Д. ПЕРМЯКОВ



Б.Ф.ФЕДОРОВ,
В.Д.ПЕРМЯКОВ

КОСМИЧЕСКОЕ
ФОТОГРАФИРОВАНИЕ



Б.Ф. ФЕДОРОВ,
В.Д. ПЕРМЯКОВ

КОСМИЧЕСКОЕ ФОТОГРАФИРОВАНИЕ

528.7:523.

Фотографирование
и его автоматизация

Космическое
фотографирование
и обработка изображений

Теория и практика
эксплуатации фотоаппаратуры

1092
2601



МОСКВА
«НЕДРА»
1978



Федоров Б. Ф., Пермяков В. Д. Космическое фотографирование. М., «Недра», 1978. 351 е.

Современный этап космических исследований характеризуется решением круга актуальных задач, которые имеют важное значение в различных областях деятельности человека — среди них и изучение природных ресурсов из космоса. В этом деле наибольшее количество информации обеспечивает фотографическая съемка. Однако до сих пор специальной литературы, посвященной этому вопросу, было мало.

В данной книге помещен материал, посвященный основам автоматического фотографирования и методам фотографирования из космоса. В первой части книги изложены устройство механизмов и методы расчета деталей и узлов автоматического фотоаппарата, предназначенного для фотографирования из космоса. Во второй — рассмотрены особенности космического фотографирования, даны схемы и устройство различных видов аппаратуры, рассмотрены вопросы обработки фотoinформации. Третья часть посвящена правилам эксплуатации фотоаппаратуры.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся разработкой и эксплуатацией космической фотоаппаратуры, а также для студентов высших и средних учебных заведений аэрофотогеодезического профиля.

Табл. 15, ил. 95, список лит.— 72 назв.

20702—255
Ф 043(01)—78 115—78

© Издательство «Недра», 1978

Современный этап космических исследований характеризуется широким фронтом работ и значительной их глубиной. Это стало возможным в первую очередь благодаря успехам советской космонавтики, практическое применение которой началось с момента, когда межпланетная автоматическая станция «Луна-3» сфотографировала невидимую часть нашего естественного спутника и передала на Землю по телевидению изображение. Глобальные съемки Луны («Луна-3», «Зонд-3», «Лунар-Орбитер») позволили получить ее полный картографический образ и определить сходство и различие в топографическом и геологическом строении видимого и обратного полушарий.

Глобальные съемки Земли с помощью аппаратуры «Метеор» и «Тирос» обеспечили создание постоянной космической системы, которая передает на наземные пункты изображения облачности, позволяющие существенно повысить достоверность прогнозов погоды.

Фотографирование и передача на Землю детальных изображений Марса и Венеры, осуществленные советскими и американскими автоматическими станциями, позволили получить новые данные о природе этих планет и сделать следующий шаг в развитии сравнительной планетологии.

Исследования земной поверхности в различных участках спектра, выполненные космическими кораблями «Восток», «Союз», «Джемини», показали, что космическое фотографирование является эффективным методом изучения природы Земли в народнохозяйственных целях. Созданы специальные космические системы («Скайлаб», «Салют»), позволяющие проводить комплекс исследований, среди которых важное место занимает

космическое фотографирование земной поверхности и звездного неба, в том числе спектрально-зональное, многозональное и инфракрасное фотографирование.

Большое значение в проведении этих исследований приобретает концентрация усилий ученых ряда стран для решения народнохозяйственных задач. Примером тому является эксперимент «Радуга», выполненный (по решению правительств Советского Союза и ГДР) в рамках программы «Интеркосмос», позволивший получить сотни фотографий Земли в различных участках спектра с помощью разработанной советскими и немецкими специалистами фотоаппаратуры.

Исследование поверхности Земли и планет проводится различными методами, а также и средствами получения изображений (фотография, телевидение, фототелевидение, тепловидение, радиолокация и т. п.), каждое из которых обеспечивает получение полезной информации. Вместе с тем специалистам хорошо известно, что фотопленка остается пока непревзойденным носителем информации по плотности записи, т. е. по числу элементов изображения (или двоичных единиц), регистрируемых на единице площади поверхности. Кроме того, фотоаппаратура, устанавливаемая на космических носителях, обеспечивает получение информации со значительных районов. К тому же получаемые одновременно шесть снимков в различных участках спектра существенно облегчают последующее дешифрирование. Все это ведет к тому, что космическому фотографированию будет принадлежать ведущая роль в изучении поверхности Земли и планет.

При получении первоначальных сведений о поверхности объекта (Луна, Марс, Венера) используют фототелевизионную аппаратуру, которая функционально состоит из двух блоков: фотографического, обеспечивающего экспонирование и обработку носителя информации, и телевизионного, обеспечивающего считывание

информации. Обе части имеют между собой тесную конструктивную связь, обусловленную единым носителем информации — фотопленкой. Этот метод дает возможность передавать изображение исследуемого объекта непосредственно во время съемки или, как говорят, в естественном масштабе времени, если позволяет энергетический потенциал линии связи. Если энергетический потенциал недостаточен, то изображение передается через некоторый (определенный) интервал времени.

Рассмотрению двух важнейших методов исследования поверхности Земли и планет — фотографическому и фототелевизионному — и посвящена данная книга, в которой фотографическому методу как основополагающему уделено главное внимание.

Возможности космического фотографирования довольно велики. Об этом говорит тот факт, что появились такие новые научные направления, как космическая метеорология и космическая геология. Первое направление позволяет повысить достоверность прогнозов погоды, изучить распределение снежного покрова и динамику его образования, изучить водные запасы и циркуляцию облачности по всей поверхности Земли и т. п. Второе — широко использовать результаты космического фотографирования для исследования природных ресурсов Земли, составления геологических и геоморфологических карт Земли и планет.

Космическому фотографированию присущи следующие три вида интеграции: территориальная, факторная и динамическая. Территориальная интеграция позволяет получить на одном снимке изображения обширной площади, в том числе и отдаленных районов, обеспечивая геометрическую и оптическую непрерывности изображения.

Факторная интеграция позволяет на одном снимке получить совмещенное изображение различных элементов геосферы, например осуществить вертикальную

интеграцию компонентов природной среды, включая атмосферу, или наблюдать один и тот же участок поверхности в различных участках спектра, в том числе в видимом и инфракрасном.

С помощью динамической интеграции можно прослеживать отдельные природные явления в разные промежутки времени по изображениям одних и тех же территорий, последовательно полученным одними и теми же системами. Все это обеспечивает исследователей комплексной информацией о природных ресурсах.

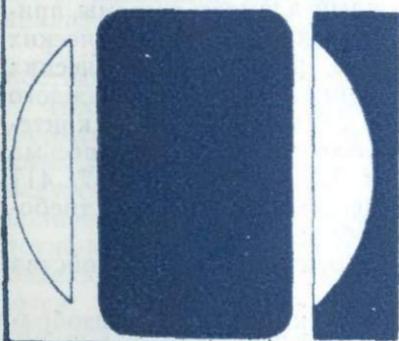
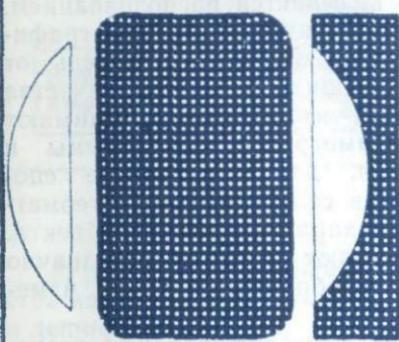
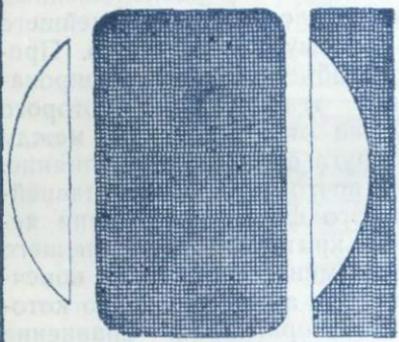
Таким образом, можно заметить, что при космическом фотографировании получают огромное количество информации в виде фотографических снимков, которая нуждается в соответствующей обработке и дешифрировании. В настоящее время пока еще преобладают визуальные методы дешифрирования, которые требуют большого числа квалифицированных специалистов и значительного времени на обработку фотоинформации. Весьма перспективен метод автоматической обработки фотоинформации. Развитие автоматизации идет по двум путям — использования ЦВМ для обработки изображений и использования корреляционных методов и устройств.

Автоматизации обработки изображений в данной книге уделяется определенное внимание.

В предлагаемой книге рассмотрены теоретические основы космического фотографирования, его особенности, принципы построения автоматической фотоаппаратуры, методы оценки и повышения качества изображения, методы дешифрирования и автоматической обработки фотоинформации, а также особенности эксплуатации космической фотоаппаратуры.

Часть первая

ОСНОВЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ФОТОГРАФИРОВАНИЯ



Система космического фотографирования предназначена для запечатления объектов, расположенных на поверхности Земли и планет, с целью дальнейшего изучения их по фотографическому изображению. Процесс получения изображения объектов фотографирования включает разнообразные этапы, схема которого представлена на рис. 1.1. Все этапы связаны между собой и оказывают друг на друга определенное влияние. Это влияние многообразно и поэтому одной из главных задач теории космического фотографирования является определение единого критерия, позволяющего оценивать влияние каждого элемента системы на конечный результат — на фотоснимок как документ, по которому проводится исследование оригинала. Сравнение оригинала с изображением называется распознаванием. Установлено, что опознание объекта по его фотографическому изображению зависит в первую очередь от свойств изображения, получивших название качества изображения. Под качеством изображения понимают свойство, определяемое параметрами фотосистемы и условиями фотографирования, характеризующее способность изображения нести в себе сведения о геометрических и фотометрических характеристиках объекта. Под критерием качества понимают величину, однозначно характеризующую качество изображения и его изменение.

Изучение схемы процесса фотографирования позволяет сделать вывод, что каждый элемент системы приводит к искажению геометрических и фотометрических параметров объекта вследствие различия физических явлений, лежащих в основе функционирования каждого из элементов. В связи с этим задача отыскания критерия качества является не только важной, но и весьма сложной. Анализ ряда работ [20, 29, 30, 31, 37, 41] позволяет сформулировать следующие основные требования к критерию качества изображения:

- 1) должен однозначно характеризовать свойства изображения и их изменение;
- 2) быть применимым для оценки качества изображения каждого элемента и фотопроцесса в целом;

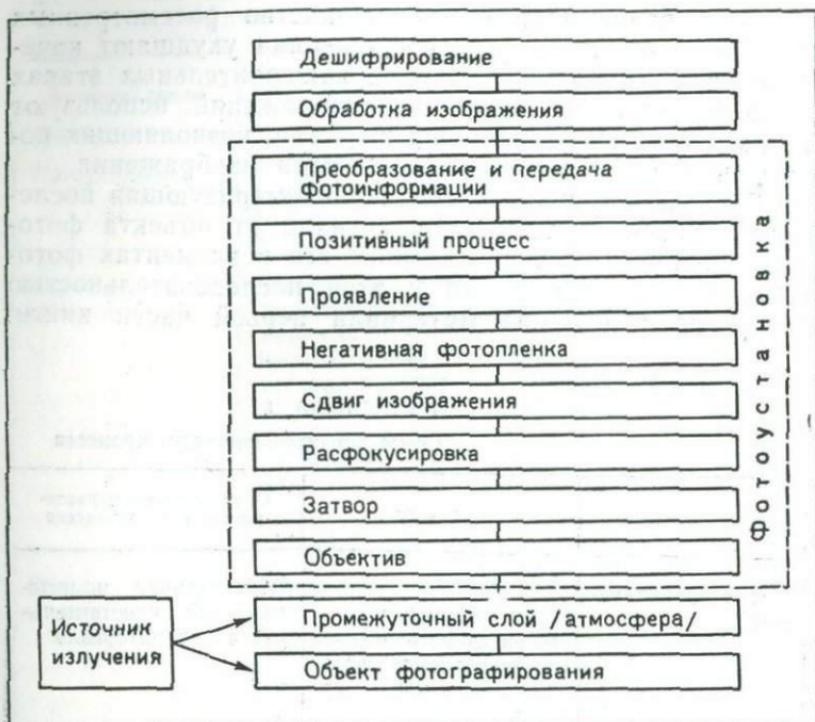


Рис. 1.1. Схема звеньев фотопроцесса

3) быть однозначным в оценке связи критерия качества изображения и свойств фотоснимка (измерительных и дешифровочных);

4) позволять использовать критерий качества для анализа и синтеза фотографирующей системы;

5) позволять фиксировать с требуемой чувствительностью изменение качества изображения.

Поскольку в настоящее время отсутствует критерий качества, который удовлетворял бы всем рассмотренным требованиям (хотя работы в этом направлении ведутся интенсивно), то пока считается, что наиболее полное представление о качестве изображения дает частотно-контрастная характеристика. А наиболее употребительными критериями качества изображения являются: разрешающая способность, добротность, эквивалентная полоса пропускания, информационная емкость,

Опыт показывает, что большинство рассмотренных элементов процесса фотографирования ухудшают качество изображения, поэтому на заключительных этапах фото процесса, при обработке изображений, используют ряд методов для повышения качества, позволяющих повысить дешифровочные возможности изображения.

В табл. 1 приведена схема, характеризующая последовательность прохождения сигнала от объекта фотографирования и преобразование его в элементах фотосистемы. В соответствии с этой последовательностью построено изложение материала первой части книги.

ТАБЛИЦА 1

Схема фотографического процесса

Элемент схемы	Параметр	Определяемые характеристики фото процесса
Источник излучения	Энергия Поток излучения Интенсивность потока излучения (сила света) Энергетическая яркость Спектральная плотность потока излучения Спектральная яркость	Спектральная и интегральная чувствительности фотоматериала
Объект фотографирования	Коэффициент отражения Спектральный коэффициент отражения Яркость или освещенность Контраст Размер	Экспозиция Фотоматериал Ширина спектра пространственных частот
Промежуточный слой (атмосфера)	Коэффициент прозрачности Спектральный коэффициент прозрачности Светорассеяние (дымка) Содержание паров воды и газов	Изменения яркости; контраста; прозрачности

Элемент схемы	Параметр	Определяемые характеристики фотопроцесса
Фотоустановка	Коэффициент передачи колебаний АЧХ ФЧХ	Линейные и угловые колебания Стабилизация оптической оси Разворот на угол сноса
Объектив	Ортоскопичность Светосила Виньетирование Светопропускание Светораспределение Угол поля зрения Коэффициент передачи контраста	Разрешающая способность Светораспределение Масштаб фотографирования Добротность системы Изменение контраста изображения Искажение изображения
Затвор	Физическая выдержка Диапазон выдержек Оптический к. п. д. Величины перекрываемого светового диаметра	Распределение световой энергии Сдвиг изображения Неравномерность экспозиции по полю Искажения изображения
Расфокусировка	Кружок рассеяния	Величина расфокусировки
Сдвиг изображения	Линейное смещение изображения	Величина сдвига изображения
Негативная фото-пленка	Спектральная чувствительность Светочувствительность Деформация	Экспозиция Разрешающая способность Ошибки выравнивания
Проявление и позитивный процесс	Время обработки Способ обработки Характер обработки	Оптическая плотность изображения Контраст изображения Разрешающая способность

Продолжение табл. 1

Элемент схемы	Параметр	Определяемые характеристики фотопроцесса
Преобразование и передача фотоинформации	Количество и качество фотоинформации	Оценка информационных потерь Расчет полосы пропускания Расчет времени передачи информации
Обработка изображения Дешифрирование	Степень ухудшения качества Критерии опознавания	Повышение контраста Оконтуривание Опознавание объектов Определение координат объектов

Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ
СВЕТОТЕХНИКИ

1.1. Природа и характеристики оптических излучений

Для того чтобы правильно рассчитать элементы фотографической системы, необходимо знать свойства источника излучения, которым освещается объект фотографирования. Таким может быть либо естественный, например Солнце, либо искусственный источник излучения. Излучение, имеющее электромагнитную природу, является одной из форм энергии и обладает корпускулярно-волновыми свойствами. Корпускулярный характер излучения проявляется при испускании и поглощении света, когда имеют место элементарные акты взаимодействия излучения и вещества, а волновой характер — в явлениях дифракции и интерференции. Электромагнитное излучение занимает чрезвычайно широкий диапазон спектра (рис. 1.2); на нашем рисунке от десяти километров до 10^{-12} м. Разумеется, это границы графика, но не самой шкалы электромагнитных волн, которую можно представить себе продолженной по обе стороны.



Рис. 1.2. Диапазон спектра электромагнитного излучения

Из всего многообразия видов излучений в дальнейшем будет рассматриваться только так называемое оптическое излучение, т. е. излучение, длины волн которого расположены в диапазоне от 10^{-8} до $3,4 \cdot 10^{-4}$ м, включающее области ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучений. Наибольшее значение для космического фотографирования имеет видимое излучение, а в последнее время приобретает и инфракрасное.

Как всякое электромагнитное колебание излучение можно характеризовать частотой ν , длиной волны λ и скоростью распространения c . Связь между основными величинами излучения определяется соотношениями:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}; \quad \nu = \frac{c}{T},$$

где $c = 2,998 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в пустоте, T — период колебаний.

Видимое излучение — это излучение, воспринимаемое глазом человека, занимает довольно узкий диапазон: от 0,38 до 0,77 мкм. В этом диапазоне спектра используются квантовые параметры: величина энергии кванта (фотона) ϵ и импульс кванта (фотона) P_ϕ , которые связаны между собой соотношениями:

$$\epsilon = h\nu; \quad \lambda_\phi = \frac{h}{P_\phi},$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка.

Излучение в узком интервале длин волн ($\Delta\lambda \rightarrow 0$) называют монохроматическим. Оно воспринимается как имеющее одну длину волны. Длина волны монохроматического излучения, проходящего через различные среды, изменяется в зависимости от показателя преломления среды в соответствии с выражением

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n},$$

где λ и λ_0 — соответственно длины волн излучения в среде с показателем преломления n и в вакууме.

Энергия излучения и производные от нее характеристики измеряются в энергетических или эффективных (применительно к приемнику излучения) величинах, которые используются во всем оптическом диапазоне спектра. Однако для видимого диапазона, когда в качестве приемника излучения выбран глаз, используют светотехнические характеристики. Хотя исторически сложилось так, что первыми были введены в практику светотехнические величины, однако эффективные величины более удобны для общей оценки свойств излучения. В связи с этим необходимо знать взаимосвязь между ними.

Энергия излучения, как и любой другой вид энергии, измеряется в джоулях, калориях, электрон-вольтах. Распределение энергии во времени является мерой интенсивности оптического излучения или потоком излучения. Распределение потока излучения в каком-либо направлении характеризуется энергетической силой света — силой излучения. Интенсивность потока излучения, испускаемого излучающей поверхностью в определенном направлении, характеризуется энергетической яркостью. Величина потока излучения, испускаемого с единицы площади излучающей поверхности во всех направлениях, характеризуется энергетической светимостью (излучательной способностью). Для оценки воздействия излучения на входную часть фотосистемы пользуются энергетической освещенностью, которая характеризует поверхностную плотность падающего потока.

Спектральный состав излучения со сплошным спектром характеризуется спектральной плотностью потока излучения и др. Формулы, описывающие основные энергетические характеристики и связь между ними, даны

в табл. 2. По этим формулам можно рассчитать основные энергетические характеристики излучения, зная его закономерности. Эти закономерности выявлены и описаны для теплового излучателя, который принят в качестве эталонного.

1.2. Основные законы излучения

Тепловые источники излучения в природе являются наиболее распространенными. При нагревании вещества его молекулы приходят в непрерывное колебательное, вращательное и поступательное движение, в результате которого возникает излучение со сплошным спектром. Процесс превращения тепловой энергии в электромагнитную называют температурным излучением. Если тепловой излучатель имеет наибольшую мощность излучений при данной температуре для всех длин волн, то его называют полным излучателем. Таким излучателем может быть абсолютно черное тело (АЧТ), примером которого является отверстие полого шара. Тепловой источник, используемый в качестве эталонного, представляет практический интерес по двум причинам: во-первых, силу его излучения можно рассчитать теоретически, во-вторых, при данной температуре он излучает максимальное количество энергии.

Закон Стефана — Больцмана. Он устанавливает связь интегральной излучательной способности абсолютно черного тела с его собственной температурой

$$R(T) = \sigma T^4,$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12}$ Вт/см²·К⁴ — универсальная постоянная Стефана.

Закон Планка. Устанавливает зависимость спектральной плотности энергетической светимости АЧТ от длины волны и температуры по формулам

$$r(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1},$$

$$c_1 = 2\pi hc^2; \quad c_2 = \frac{hc}{K_8},$$

где $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка; c — скорость света в вакууме; $K_8 = 1,3805 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; $c_1 = 3,74 \cdot 10^4$ Вт·мкм/см² = $3,74 \cdot 10^{-12}$ Вт·см²; $c_2 = 1,438 \cdot 10^4$ мкм·К.



ТАБЛИЦА 2

Связь между характеристиками излучения

Основные характеристики	Связь между характеристиками		Обозначения
Поток излучения	$\Phi = \frac{dW}{dt};$ $\Phi = \frac{W}{t};$	$\Phi = \pi BA$	W — энергия
Энергетическая сила света (сила излучения)	$I = \frac{d\Phi}{d\omega};$ $I = \frac{\Phi}{\omega}$	$dI_{\beta} = BdA \cos \beta$ $I_{\beta} = BA \cos \beta$	ω — телесный угол
Энергетическая яркость	$B_{\beta} = \frac{dI_{\beta}}{dA \cos \beta}$ $B_{\beta} = \frac{I_{\beta}}{A \cos \beta}$	$B = \frac{R}{\pi}$	A — площадь излучающей поверхности β — угол между нормалью к излучающей поверхности и данным направлением
Энергетическая светимость (плотность излучения)	$R = \frac{d\Phi}{dA};$ $R = \frac{\Phi}{A}$	$R = \pi B$	A — площадь освещаемой поверхности L — расстояние от источника до поверхности
Энергетическая освещенность	$E = \frac{d\Phi}{dA};$ $E = \frac{\Phi}{A}$	$E = \frac{I}{L^2} \cos \beta$	
Спектральная плотность потока	$\Phi_{\lambda} = \frac{\Delta\Phi(\lambda)}{\Delta\lambda}$	$\Phi = \int_0^{\infty} \Phi_{\lambda} d\lambda$	$\Delta\lambda$ — ширина спектра, в котором сосредоточено излучение
Относительная спектральная плотность потока	$\Phi(\lambda) = \frac{\Phi_{\lambda}}{\Phi_{\lambda_{\max}}}$		

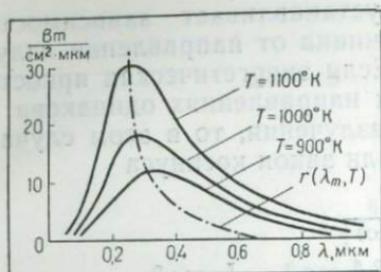


Рис. 1.3. Функции спектральной плотности энергетической светимости АЧТ.

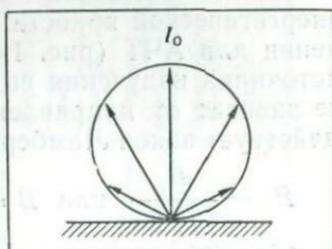


Рис. 1.4. Ламбертовское излучение

Закон смещения Голицина — Вина. Устанавливает связь между длиной волны, соответствующей максимальному значению лучеиспускательной способности АЧТ, и его температурой

$$r(\lambda_m, T) = 1,315 \left(\frac{T}{1000} \right)^5, \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{мкм}.$$

Из формулы видно, что увеличение температуры АЧТ ведет к перемещению максимума его излучения в сторону коротких длин волн.

Закон Кирхгофа. Устанавливает связь между лучеиспускательной и поглощательной способностями тел

$$\frac{R'(T)}{\alpha'(T)} = \frac{R(T)}{\alpha(T)} = \text{const} = R(T).$$

Он гласит следующее. Отношение энергетической светимости $R'(T)$ тела при температуре T к его поглощательной способности $\alpha'(T)$ является для всех тел величиной постоянной, равной энергетической светимости $R(T)$ АЧТ при той же температуре, и зависит только от температуры.

На рис. 1.3 показаны функции спектральной плотности энергетической светимости АЧТ при различных значениях температуры. Хорошо видно, как по мере роста температуры увеличивается площадь подынтегральной функции, что следует из закона Планка. Видно, что максимальное значение излучения по мере роста температуры смещается справа налево, т. е. в область более коротких длин волн.

Закон Ламберта. Он устанавливает зависимость энергетической яркости источника от направления излучения для АЧТ (рис. 1.4). Если энергетическая яркость источника излучения во всех направлениях одинакова и не зависит от направления излучения, то в этом случае действует закон Ламберта, или закон косинуса

$$B_{\beta} = \frac{dI_{\beta}}{dA \cos \beta} \quad \text{или} \quad B = \frac{I_{\beta}}{A \cos \beta};$$

$$dI = B dA \cos \beta \quad \text{или} \quad I_{\beta} = BA \cos \beta = I_0 \cos \beta,$$

по которому сила излучения поверхности пропорциональна косинусу угла излучения β между нормалью и рассматриваемым направлением.

1.3. Светотехнические характеристики и связь их с энергетическими

Основой для построения данных характеристик является чувствительность глаза, под которой понимают величину, характеризующую степень воздействия видимого излучения различных длин волн на средний человеческий глаз, равную отношению светового потока данного монохроматического излучения к лучистому потоку этого излучения. В этом случае под световым потоком понимают мощность энергии излучения, оцениваемую по ее воздействию на глаз человека. В качестве эталона светового потока, равного 1 лм, принят поток АЧТ с площади излучающей поверхности, равной $0,5305 \text{ мм}^2$ при $T=2042^{\circ} \text{ К}$ (температура затвердевания платины). Световая энергия W представляет собой меру энергии излучения, оказывающей воздействие на глаз. В случае постоянного потока $W=Pt$. В случае переменного потока световая энергия определяется соотношением

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt,$$

где t — время испускания (поглощения) потока.

Пространственная плотность светового потока, равная отношению светового потока к величине телесного угла, в котором равномерно распределено излучение, называется силой света. Сила света, равная 1 лм·ср, называется канделой. Основной единицей измерения

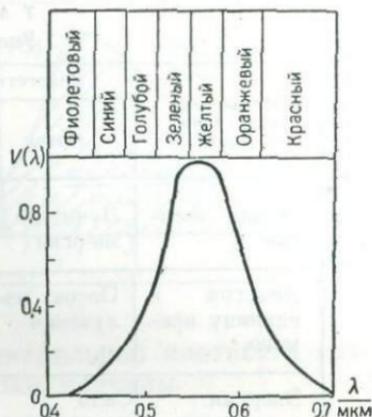


Рис. 1.5. Спектральная чувствительность глаза

яркости является 1 кд/м^2 — это яркость светящейся поверхности площадью 1 м^2 при силе света в 1 кд. За единицу освещенности принят люкс. Освещенность в 1 лк создается в том случае, когда световой поток в 1 лм равномерно распределен на площади 1 м^2 , перпендикулярной к падающим лучам. За единицу светимости принят 1 лм/м^2 — это светимость, при которой с площади 1 м^2 испускается световой поток 1 лм.

В табл. 3 приведены энергетические и световые единицы измерения. В ряде случаев один и тот же поток, монохроматический или сложного состава может быть выражен как поток энергии (в ваттах) или как световой поток (в люменах). Связь между ними устанавливается следующим образом.

Видимое излучение занимает диапазон от 0,38 до 0,77 мкм, что обусловлено чувствительностью глаза. Однако глаз в этом диапазоне реагирует на монохроматическое излучение с различными длинами волн неодинаково. Как видно из рис. 1.5, максимальная чувствительность глаза имеет место на длине волны, равной 0,555 мкм. Если единице мощности монохроматического потока излучения с длиной волны λ соответствует световой поток $K(\lambda)$, численно равный спектральной чувствительности глаза, то монохроматическому потоку $\Phi(\lambda)$ будет соответствовать однородный световой поток $F(\lambda)$, определяемый зависимостью

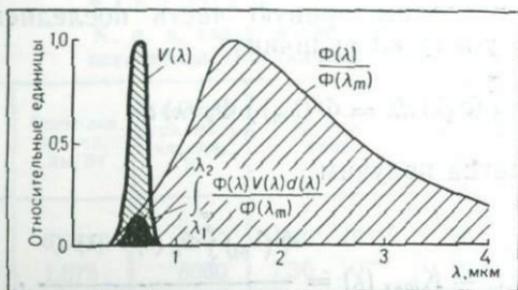
$$F(\lambda) = \Phi(\lambda) K(\lambda).$$

Т А Б Л И Ц А 3

Энергетические и световые единицы

Энергия	Наименование величины	Энергетическая		Светотехническая	
		Поток	Единица измерения	Поток	Единица измерения
Излучаемая	Общая энергия	Лучистая энергия	Вт · с	Световая энергия	лм · с
	Энергия в единицу времени	Поток излучения	Вт	Световой поток	лм
	Энергия в единицу времени на единицу телесного угла	Сила излучения	Вт/ср	Сила света	кд
	Энергия в единицу времени с единицы поверхности	Плотность излучения	Вт/см ²	Светимость	лм/м ²
	Энергия в единицу времени на единицу телесного угла с единицы поверхности	Энергетическая яркость	Вт/м ² ср	Яркость	кд
	Энергия на единицу подведенной мощности	Выход излучения	—	Световая отдача	лм/Вт
Падающая	Энергия на единицу площади в единицу времени	Энергетическая освещенность	Вт/м ²	Освещенность	лк
	Энергия на единицу площади	Количество энергетического освещения	Вт · с/м ²	Количество освещения	

Рис. 1.6. К расчету доли излучения от эталонного источника, воспринимаемого глазом



Переходя к функциям спектральной плотности потока излучения и светового потока, получим

$$f(\lambda) d\lambda = \Phi(\lambda) K(\lambda) = \Phi(\lambda_m) \Phi_0(\lambda) K(\lambda) d\lambda,$$

где

$$f(\lambda) d\lambda = dF(\lambda),$$

$\Phi_0(\lambda)$ — функция спектральной плотности в относительных единицах.

Световой поток для сложного излучения, обусловленный этим потоком излучения, определяется выражением

$$F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} dF(\lambda) = \Phi(\lambda_m) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_0(\lambda) K(\lambda) d\lambda.$$

Подставляя отношение

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_{\max}(\lambda)},$$

известное под названием функции относительной видности глаза, получим

$$F = K_{\max}(\lambda) \Phi(\lambda_m) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) \Phi_0(\lambda) d\lambda.$$

Чтобы найти значение $K_{\max}(\lambda)$, пользуясь параметрами излучателя, принятого за эталон, построим графики функции относительной видности глаза и спектральной плотности потока излучения эталонного излучателя в относительных единицах (рис. 1.6). Легко заметить, что глаз воспринимает из этого потока лишь незначительную долю. Чтобы определить ее, умножим

и разделим правую часть последнего выражения на одну и ту же величину

$$\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda = \Phi(\lambda_m) \int_0^{\infty} \Phi_0(\lambda) d\lambda$$

и тогда получим

$$F = K_{\max}(\lambda) = \frac{\Phi(\lambda_m) \int_0^{\infty} \Phi_0(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\Phi(\lambda_m) \int_0^{\infty} \Phi_0(\lambda) d\lambda} \cdot \int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda =$$

$$= K_{\max}(\lambda) \frac{\int_0^{\infty} \Phi_0(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_0(\lambda) d\lambda} \cdot \int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda.$$

В этом выражении интеграл в числителе представляет собой поток излучения эффективный для глаза при условии, что чувствительность глаза одинакова во всем диапазоне спектра и равна максимальной. Выражение $\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda$ характеризует весь сложный поток излучения Φ , падающий на глаз. А выражение

$$\eta = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_0(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_0(\lambda) d\lambda}$$

называют коэффициентом полезного действия (к. п. д.) глаза, или коэффициентом использования глазом потока излучения данного источника. Совершенно очевидно, что к. п. д. глаза для источников с различной температурой различен. Подсчитаем его численные значения для ряда температур (табл. 4). Тогда имеем

$$F = K_{\max}(\lambda) \eta \Phi.$$

По известным параметрам эталонного излучателя получим

$$\Phi_{\text{эТ}} = \xi A \sigma T^4 = 0,527 \text{ Вт.}$$

ТАБЛИЦА 4

К. п. д. глаза и световая отдача источников с различной температурой.

Температура излучателя, К	К. п. д. глаза	Световая отдача, лм/Вт	Температура излучателя, К	К. п. д. глаза	Световая отдача, лм/Вт
1500	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,0970	5500	$1,30 \cdot 10^{-1}$	88,8
2000	$2,45 \cdot 10^{-3}$	1,675	6000	$1,36 \cdot 10^{-1}$	92,8
2500	$1,20 \cdot 10^{-2}$	8,20	9000	$1,14 \cdot 10^{-1}$	77,80
3000	$3,09 \cdot 10^{-2}$	21,10	12 000	$8,90 \cdot 10^{-2}$	60,80
3500	$5,57 \cdot 10^{-2}$	38,00	15 000	$5,83 \cdot 10^{-2}$	39,80
4000	$8,10 \cdot 10^{-2}$	55,30	20 000	$3,06 \cdot 10^{-2}$	20,90
4500	$1,03 \cdot 10^{-1}$	70,50	40 000	$5,37 \cdot 10^{-3}$	3,67
5000	$1,19 \cdot 10^{-1}$	81,30	60 000	$2,64 \cdot 10^{-3}$	1,81

Зная эталон люмена, найдем к. п. д. глаза $\eta_{\text{эт}} = 0,00278$, и тогда

$$K_{\text{max}}(\lambda) = \frac{F}{\eta_{\text{эт}} \Phi_{\text{эт}}} = 683 \text{ лм/Вт.}$$

Таким образом, для произвольного излучателя напишем зависимость

$$F = \Phi \eta_p \cdot 683 \text{ лм,}$$

$$\Phi = \frac{F}{683 \eta_p} \text{ Вт,}$$

где η_p — к. п. д. глаза по излучению реального источника.

1.4. Понятие о пространственно-частотных характеристиках излучения

Информация, которую несет в себе излучение, содержится в трех видах спектров: электромагнитном, временном и пространственном. Электромагнитный спектр устанавливает зависимость между излучением и длиной волны, на которой оно совершается. Временной — показывает, каким образом излучение меняется во времени. Эти спектры хорошо изучены и в фотографии ими пользуются давно. В последнее время все шире начинают использовать понятие пространственного спектра

и его характеристики, поскольку они позволяют, начиная от источника излучения и кончая изображением, проследить влияние каждого элемента фотосистемы на потерю и искажение информации. Пространственно-частотный спектр представляет собой совокупность пространственных частот, несущих информацию о габаритных характеристиках источника излучения. Известно, что если считать временные и спектральные характеристики постоянными, то такие характеристики источника излучения, как суммарный поток излучения и энергетическая сила света, определяются размерами излучающей поверхности.

Можно представить любую периодическую функцию как одномерную, так и двухмерную, в том числе и функцию энергетической яркости, удовлетворяющей условиям Дирихле, в виде одномерного или двухмерного ряда Фурье, а непериодическая функция может быть описана одномерным или двухмерным интегралом Фурье. Физически это означает, что заданное распределение яркости может быть получено сложением яркостей, распределенных по синусоидам и косинусоидам, которые имеют положительные и отрицательные полупериоды и различаются между собой на целую величину, но могут быть сдвинуты по фазе. Описание двухмерной функции яркости в виде интеграла Фурье подразумевает суммирование яркостей, распределенных по гармоническим составляющим, периоды которых различаются на бесконечно малую величину. Представление двухмерной функции яркости в виде ряда или интеграла Фурье позволяет ввести новое чрезвычайно емкое понятие пространственно-частотного спектра яркости, которое будет широко использовано при рассмотрении вопросов прохождения информации через фотографические системы.

Пусть функция яркости задана в виде, представленном на рис. 1.7. Представим ее в виде двухмерного ряда Фурье в комплексной форме

$$B(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} b_{n,m} e^{2\pi j \left(\frac{n}{X}x + \frac{m}{Y}y \right)},$$

$$\text{где } b_{n,m} = \frac{1}{XY} \int_{-X/2}^{X/2} \int_{-Y/2}^{Y/2} B(x, y) e^{-2\pi j \left(\frac{n}{X}x + \frac{m}{Y}y \right)} dx dy.$$

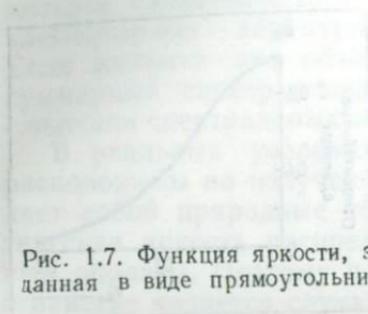
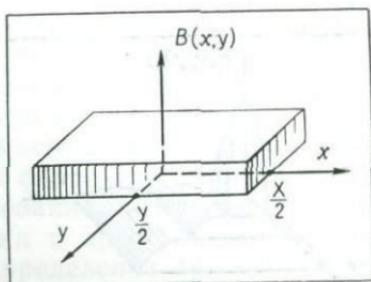


Рис. 1.7. Функция яркости, заданная в виде прямоугольника



Если

$$\vartheta_x^n = n \frac{1}{X} = n\vartheta_x;$$

$$\vartheta_y^m = m \frac{1}{Y} = m\vartheta_y,$$

то

$$b_{n,m}(\vartheta_x, \vartheta_y) = \vartheta_x \vartheta_y \int_{-X/2}^{X/2} \int_{-Y/2}^{Y/2} B(x, y) e^{-2\pi j(\vartheta_x x + \vartheta_y y)} dx dy.$$

Последнее выражение показывает, что $b_{n,m}$ является комплексной функцией пространственных частот. Модуль этой функции называется амплитудным значением гармонической составляющей ряда, а совокупность модулей — амплитудным пространственно-частотным спектром функции $B(x, y)$, т. е.

$$|b_{n,m}(\vartheta_x, \vartheta_y)| = |f(j\vartheta_x, j\vartheta_y)| = f(\vartheta_x, \vartheta_y).$$

Отношение мнимой части функции к действительной характеризуют сдвиг данной гармоники, а зависимость фазы гармоники от частоты дает фазово-частотный спектр. Так как в общем случае энергетическая яркость объекта фотографирования является непериодической функцией, то

$$B(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} e^{2\pi j(\vartheta_x x + \vartheta_y y)} d\vartheta_x d\vartheta_y \times$$

$$\times \iint_{-\infty}^{\infty} B(x, y) e^{-2\pi j(\vartheta_x x + \vartheta_y y)} dx dy.$$

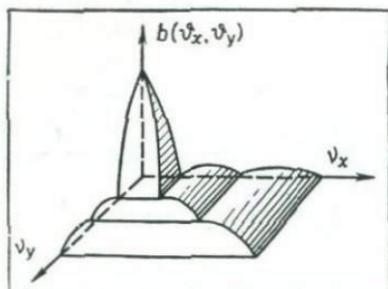


Рис. 1.8. Двухмерный спектр функции яркости

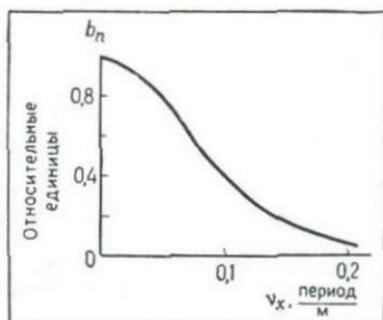


Рис. 1.9. Одномерный спектр лезного массива

Зависимость вида

$$b(j\vartheta_x, j\vartheta_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} B(x, y) e^{-2\pi j(\vartheta_x x + \vartheta_y y)} dx dy$$

представляет собой спектральную плотность функции $B(x, y)$ и является прямым преобразованием Фурье от этой функции. Выражение функции энергетической яркости через ее спектр является обратным преобразованием Фурье

$$B(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} b(j\vartheta_x + j\vartheta_y) e^{2\pi j(\vartheta_x x + \vartheta_y y)} d\vartheta_x, d\vartheta_y$$

В дальнейшем под спектральной плотностью функции $B(x, y)$ будем понимать абсолютное значение спектральной плотности. Размерность двумерной спектральной плотности энергетической яркости $b(j\vartheta_x, j\vartheta_y)$ имеет вид

$$\frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{м}^2} / \left(\frac{\text{период}}{\text{м}^2} \right)^2$$

Полученный в результате расчетов двухмерный спектр представлен на рис. 1.8. Вид спектра зависит от положения объекта фотографирования относительно системы координат. Можно показать, что если центр объекта смещается по оси x на расстояние a_1 , а по оси y на расстояние a_2 , то нормированный спектр такого объекта будет представлен равенством

$$b'_n(\vartheta_x, \vartheta_y) = b_n(\vartheta_x, \vartheta_y) e^{2\pi j(\vartheta_x a_1 + \vartheta_y a_2)}$$

которое свидетельствует о появлении сдвига фаз для элементарных двухмерных волновых составляющих. Если имеются два объекта фотографирования, то их суммарный спектр можно получить путем векторного сложения спектральных составляющих.

В реальных условиях объекты фотографирования расположены на излучающем фоне. Этот фон представляет собой природные образования, у которых энергетическая яркость распределена в пространстве случайным образом. Поэтому и распределение яркости в пространстве является случайной функцией координат пространства. Для решения задачи существующие фоны разбивают на ряд множеств и вводят характеристики, описывающие каждое из них. Распределение яркости в каждом множестве в зависимости от пространственных координат представляет собой реализацию для данного члена множества. Наличие большого числа реализаций для каждого множества позволяет установить характеристики, присущие именно данному множеству как случайной двухмерной функции. В качестве примера на рис. 1.9 приведен одномерный спектр лесного массива.

Двухмерный пространственно-частотный спектр яркости фона достаточно полно характеризует свойства большинства множеств фона. Это позволяет определить среднее квадратическое отклонение неравномерности яркости и вычислить оптимальные параметры фотографической системы в соответствии с выбранным критерием.

1.5. Источники излучения

Источники излучения применительно к космическому фотографированию можно разбить на два класса: естественные и искусственные. В естественных источниках (Солнце, планеты, звезды, атмосфера и т. п.) излучение является результатом протекания в них природных процессов. Искусственные — созданы человеком для различных целей, их можно подразделить на эталонные и технические. Эталонные источники (АЧТ, эталонные лампы) предназначены для градуирования аппаратуры и приборов. Технические — для излучения, концентрации и передачи энергии (оптические квантовые генераторы, лампы-вспышки и др.).



Рис. 1.10. Спектральный состав излучения Солнца

Опыт показывает, что искусственные источники в космическом фотографировании играют лишь вспомогательную роль: при тарировке и исследовании фотоаппаратуры, при измерении расстояний до фотографируемых объектов. Главную же роль играет такой естественный источник, как Солнце. Именно оно дает необходимую освещенность объектам при космическом фотографировании (Земли, Луны, планет).

Солнце представляет собой плотное ядро, окруженное газовой оболочкой. Температура верхних слоев Солнца равна примерно 6000°K . Энергетическая светимость Солнца составляет $6,2 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$. Поскольку Солнце удалено от Земли на расстоянии $149\,000\,000 \text{ км}$, то в соответствии с законом квадратов расстояний можно подсчитать энергетическую освещенность возле Земли. За пределами атмосферы, на площадке, перпендикулярной к направлению распространения излучения, энергетическая освещенность составляет $E = 1350 \text{ Вт/м}^2$. Эта величина часто называется солнечной постоянной. Общая же величина потока излучения, испускаемого Солнцем, составляет $3,8 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$. За пределами земной атмосферы создаваемая Солнцем освещенность составляет примерно $135\,000 \text{ лк}$, а на земной поверхности в средних широтах около $100\,000 \text{ лк}$. При расчетах фотоаппаратуры Солнце как излучатель можно принимать за АЧТ, у которого функция спектральной плотности потока излучения определяется температурой $T = 6000^{\circ}\text{K}$. Спектральный состав излучения Солнца

ТАБЛИЦА 5
Спектральная солнечная постоянная

Длина волны, мкм	Спектральная солнечная постоянная		Длина волны, мкм	Спектральная солнечная постоянная	
	Вт/см ² ·мкм	%		Вт/см ² ·мкм	%
0,34	0,111	3,8	0,54	0,198	29,0
0,36	0,116	5,47	0,58	0,187	33,9
0,38	0,123	7,29	0,60	0,181	37,2
0,40	0,154	9,03	0,65	0,162	43,3
0,44	0,203	14,4	0,70	0,144	48,8
0,48	0,216	20,6	0,75	0,127	53,7
0,50	0,197	23,5	0,80	0,113	57,9

ТАБЛИЦА 6
Характеристики планет

Планета	Диаметр, км	Солнечная постоянная		Освещенность от Солнца, лм/м ²
		Кал/см ² ·мин	По отношению к Земле	
Меркурий	4 840	12,7	6,7	90,1
Венера	12 400	3,6	1,9	25,8
Земля	12 756	1,9	1,0	13,5
Марс	6 780	0,82	1/23	5,8
Юпитер	143 640	0,07	1/27	0,5
Сатурн	120 500	0,021	1/91	0,15
Уран	53 400	0,0052	1/368	0,037
Нептун	49 600	0,0021	1/904	0,015
Плутон	13 000	0,0012	1/1570	0,0088

представлен на рис. 1.10, а в табл. 5 представлены величины спектральной солнечной постоянной для Земли [20]. Хорошо видно, что величина спектральной солнечной постоянной (энергия, падающая на единицу площади, перпендикулярно к солнечным лучам) зависит от длины волны. Следовательно, даже при равномерной чувствительности фотоматериала (представим такой идеальный случай) его засветка излучением с различными длинами волн вызовет различное почернение черно-белого фотоматериала. При цветном фотографировании с этим эффектом следует считаться особо.

В табл. 6 приводятся основные характеристики планет солнечной системы, которые могут потребоваться

при расчете космических фотографических систем. Планеты делятся на две группы, отличающиеся друг от друга по массе, химическому составу, скорости вращения и количеству спутников. К первой группе относят Землю, Венеру, Марс и Луну, которые имеют одинаковый химический состав. Ко второй группе относят Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Их массу в основном составляет водород и его соединения с углеродом и азотом.

1.6. Взаимодействие потока излучения со средами

При взаимодействии со средами поток ослабляется, за исключением оптически неравновесных сред, используемых в лазерах, и видоизменяется. При переходе из одной среды в другую происходит отражение и преломление потока, часть которого в свою очередь либо рассеивается на частицах среды, либо поглощается ими. На рис. 1.11 изображены составляющие потока при его взаимодействии со средой. Баланс потоков определяется соотношением

$$\Phi(\lambda) = \Phi_p(\lambda) \Phi_n(\lambda) = \Phi_p(\lambda) + \Phi_{\alpha p}(\lambda) + \Phi_{\alpha n}(\lambda) + \Phi_{\tau}(\lambda).$$

Если разделить все члены этого выражения на его левую часть, то получим

$$1 = \frac{\Phi_p(\lambda)}{\Phi(\lambda)} + \frac{\Phi_{\alpha p}(\lambda)}{\Phi(\lambda)} + \frac{\Phi_{\alpha n}(\lambda)}{\Phi(\lambda)} + \frac{\Phi_{\tau}(\lambda)}{\Phi(\lambda)}$$

или, что то же самое,

$$1 = \rho(\lambda) + \alpha_p(\lambda) + \alpha_n(\lambda) + \tau(\lambda).$$

Приведенные здесь коэффициенты называются спектральными коэффициентами отражения, рассеяния, поглощения и пропускания соответственно. При рассмотрении сложного потока по аналогии имеем

$$1 = \rho + \alpha_p + \alpha_n + \tau.$$

Напишем формулы для коэффициентов: отражения

$$\rho = \frac{\Phi_p}{\Phi} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_p(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_0(\lambda) d\lambda};$$

Рис. 1.11. Составляющие потока при его взаимодействии со средой

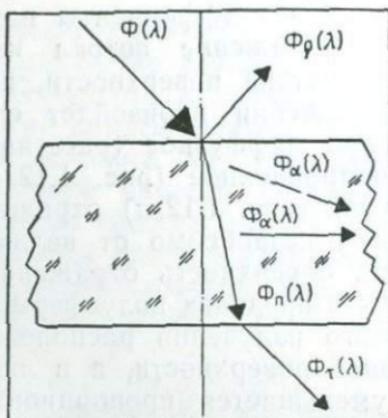
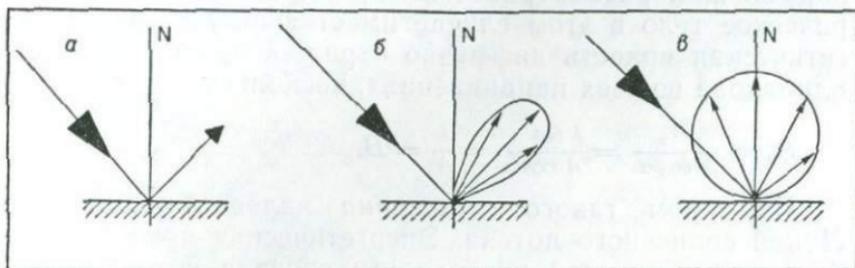


Рис. 1.12. Характер отражения потока от поверхности



рассеяния

$$\alpha_p = \frac{\Phi_{ap}}{\Phi} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{ap}(\lambda) \alpha_p(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_0(\lambda) d\lambda};$$

поглощения

$$\alpha_{п} = \frac{\Phi_{ап}}{\Phi} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{ап}(\lambda) \alpha_{п}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_0(\lambda) d\lambda};$$

пропускания

$$\tau = \frac{\Phi_{\tau}}{\Phi} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{\tau}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_0(\lambda) d\lambda}.$$

Эти коэффициенты называются интегральными.

Отражение потока излучения. В зависимости от характера поверхности, на которую падает поток, при отражении произойдет его перераспределение. Различают диффузное (рассеянное) (рис. 1.12, в) диффузно-направленное (рис. 1.12, б) и направленное (зеркальное) (рис. 1.12, а) отражение. При диффузном отражении независимо от величины угла падения излучения на поверхность отраженное излучение распространяется в пределах полусферы. Максимальная сила отраженного излучения расположена по нормали к отражающей поверхности, а в любом другом направлении она уменьшается пропорционально косинусу угла между нормалью и рассматриваемым направлением. Фотометрическое тело в этом случае имеет форму шара. Энергетическая яркость диффузно отражающей поверхности одинакова во всех направлениях, поскольку

$$B_{\alpha} = \frac{I_{\alpha}}{A \cos \alpha} = \frac{I \cos \alpha}{A \cos \alpha} = \frac{I}{A} = B.$$

Примером такого отражения является отражение Луной солнечного потока. Энергетическая яркость диффузно отражающей поверхности связана с энергетической освещенностью зависимостью

$$B = \frac{E}{\pi} \cdot \rho.$$

В практике космического фотографирования часто используют такое понятие, как альbedo, под которым понимают отношение светового потока, отраженного от матовой поверхности во всех направлениях, к световому потоку, упавшему на данную поверхность в нормальном направлении. Значения сферических альbedo для планет солнечной системы следующие [20]:

Планета	Альbedo
Меркурий	0,07
Венера	0,59
Земля	0,29
Марс	0,15
Юпитер	0,44
Сатурн	0,52
Уран	0,45
Нептун	0,52
Плутон	0,14

Для оценки отражательной способности объектов, поверхности которых в большинстве случаев обладают свойствами направленно-диффузного и диффузного отражений, чаще пользуются коэффициентом яркости. Коэффициент яркости это величина, характеризующая пространственное распределение яркости отражающей поверхности, равная отношению яркости данной поверхности в заданном направлении к яркости идеально рассеивающей поверхности с коэффициентом отражения, равным единице, и освещенной так же, как и данная поверхность $r = \frac{B}{B_0}$.

В качестве идеального рассеивателя обычно принимают поверхности, обладающие равномерно рассеивающим отражением для всех длин волн спектра (например, гипсовая пластинка, пластинка, покрытая барием). Следует различать спектральный коэффициент яркости, характеризующий отражательную способность объекта для монохроматического излучения данной длины волны, и интегральный коэффициент яркости, характеризующий отражательную способность объекта для сложного потока. Значения этих коэффициентов [66] приведены в табл. 7. Пользуясь табл. 7, можно вычислить весьма важные для космического фотографирования величины контраста яркости между объектами, имеющими одинаковую освещенность, но различные коэффициенты яркости. Под контрастом яркости понимают отношение разности между яркостью объекта и фона к яркости фона. В случае, когда яркость объекта меньше яркости фона, разность яркости условно считается отрицательной

$$K = \frac{B_0 - B_{\phi}}{B_{\phi}}$$

Пример. Определить контраст яркости в видимом излучении между поверхностью сухого шоссе и фоном (зеленый луг, хвойный лес, сухая степь, песок)

$$K_1 = \frac{0,32 - 0,64}{0,064} = 4,05; \quad K_3 = \frac{0,32 - 0,1}{0,1} = 2,1;$$

$$K_2 = \frac{0,32 - 0,04}{0,04} = 7,0; \quad K_4 = \frac{0,32 - 0,2}{0,2} = 6,0$$

Хорошо видно, что одно и то же шоссе в зависимости от того, где оно расположено, имеет различный контраст яркости. Следовательно, и его демаскирующие свойства также будут различны. Это хорошо проявится на фотоснимках.

Пример. Определить контраст яркости между поверхностью сухого шоссе и фоном (зеленый луг, хвойный лес, сухая степь, песок) в инфракрасной области спектра для $\lambda = 0,9$ мкм. Получим $K_1 = 0,61$; $K_2 = 0,51$; $K_3 = 0,42$; $K_4 = 0,47$.

Заметно значительное снижение контраста и уменьшение демаскирующих свойств.

ТАБЛИЦА 7

Интегральные коэффициенты яркости объектов при рассеянной дневной освещенности

Объект	Коэффициент	Объект	Коэффициент
Луг зеленый, скошенный	0,065	Кирпич красный	0,20
Луг зеленый, суходольный	0,070	Известняк светлый	0,40
Луг зеленый, сочный	0,064	Плита бутовая	0,35
Луг выжженный	0,14	Свежая побелка	0,90
Степь желтая сухая	0,10	Старая побелка	0,70
Всходы зеленые	0,055	Щебень гранитный	0,17
Посев зрелый	0,15	Крыша железная (красная)	0,13
Жнивьё	0,10	Крыша деревянная (дранка)	0,15
Моховое болото	0,15	Снег свежий	1,00
Лес лиственный летом	0,05	Снег средней свежести	0,90
Лес лиственный осенью	0,15	Снег тающий	0,8
Лес хвойный	0,04	Лед речной	0,35
Лес лиственный зимой	0,07	Бульжная мостовая сухая	0,20
Песок белый сухой	0,20	Бульжная мостовая мокрая	0,09
Песок белый мокрый	0,10	Дорога песчаная сухая	0,20
Песок желтый сухой	0,15	Дорога песчаная мокрая	0,07
Песок красный	0,10	Дорога супесчаная сухая	0,09
Почва супесчаная сухая	0,13	Дорога суглинистая сухая	0,21
Почва супесчаная мокрая	0,06	Дорога черноземная сухая	0,08
Почва суглинистая сухая	0,15	Шоссе сухое	0,32
Почва суглинистая мокрая	0,06	Шоссе мокрое	0,11
Почва черноземная сухая	0,03	Тес свежий сосновый	0,50
Почва черноземная мокрая	0,02	Тес старый посеревший	0,14
Солома	0,15	Океан (Атлантический)	0,035
Бревенчатая стена	0,20	Море	0,068

Если два объекта, имеющие коэффициенты яркости r_1 и r_2 , освещаются прямыми солнечными лучами под углами α_1 и α_2 , то используют такое понятие, как интервал яркостей

$$U = \frac{r_1 \cos \alpha_1 E}{r_2 \cos \alpha_2 E} = \frac{r_1 \cos \alpha_1}{r_2 \cos \alpha_2}.$$

Здесь E — освещенность горизонтальной поверхности.

При равенстве углов α имеем $U = \frac{r_1}{r_2}$. Обычно сопоставляют предельные значения r для данного ландшафта, т. е. яркость наиболее светлой и темной деталей. Учитывая только типичные детали, следует иметь в виду, что в реальном ландшафте объекты могут находиться в тени и на солнце и что они могут быть расположены под различными углами к источнику света. Анализ табличных данных позволяет сделать вывод, что интервал яркостей может меняться в пределах от 1:10 до 1:50.

Ослабление потока в однородной среде. Проходя через однородную среду, поток как поглощается, так и рассеивается. Это приводит к его ослаблению. Закономерности ослабления установим применительно к монохроматическому излучению (рис. 1.13). Предполагая, что частицы среды ослабляют поток независимо, изменение его величины на толщину слоя dl можно представить в виде

$$d\Phi(\lambda, l) = -\alpha(\lambda) \Phi(\lambda, l) dl,$$

где $\alpha(\lambda)$ — коэффициент ослабления монохроматического потока.

Разделив переменные, получим

$$\frac{d\Phi(\lambda, l)}{\Phi(\lambda, l)} = -\alpha(\lambda) dl.$$

И окончательно после интегрирования

$$\oint(\lambda, L) = \Phi(\lambda, 0) e^{-\alpha(\lambda)L},$$

где $\alpha(\lambda)$ характеризует суммарное ослабление потока частицами среды как за счет рассеяния, так и за счет ослабления, т. е.

$$\alpha(\lambda) = \alpha_p(\lambda) + \alpha_n(\lambda).$$

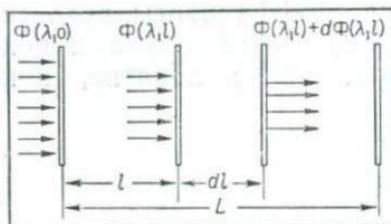
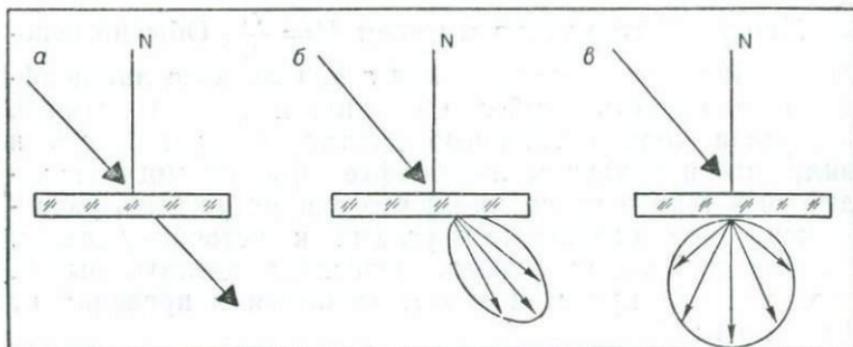


Рис. 1.13. Расчет ослабления потока в однородной среде

Рис. 1.14. Характер пропускания потока средой



Для сложного потока имеем

$$\hat{\phi}(\lambda, L) d\lambda = \hat{\phi}(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)L} d\lambda.$$

Интегрируя по λ , получим

$$\Phi = \int_0^{\infty} \hat{\phi}(\lambda, L) d\lambda = \int_0^{\infty} \hat{\phi}(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)L} d\lambda.$$

Для участка спектра видимого диапазона, который нас интересует больше всего, имеем

$$\Phi = l^{-\alpha L} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \hat{\phi}(\lambda) d\lambda = \Phi' e^{-\alpha L}.$$

Обозначая

$$e^{-\alpha(\lambda)} = \tau_\lambda; \quad e^{-\alpha} = \tau,$$

получим

$$\Phi(\lambda, L) = \Phi(\lambda, 0) \cdot \tau_1^L(\lambda); \quad \Phi = \Phi' \tau_1^L,$$

где $\tau_1(\lambda)$ и τ_1 — коэффициенты пропускания потока слоем единичной длины, т. е.

$$\tau(\lambda) = \tau_1^L(\lambda) = \frac{\Phi(\lambda, L)}{\Phi(\lambda, 0)}; \quad \tau = \tau_1^L = \frac{\Phi(L)}{\Phi(0)}.$$

Общее пропускание среды может быть представлено произведением коэффициентов

$$\tau(\lambda) \tau_p(\lambda) \tau_n(\lambda); \quad \tau = \tau_p \tau_n,$$

где $\tau_p(\lambda)$ и τ_p — соответственно спектральное и интегральное пропускание среды при учете потерь на рассеяние, $\tau_n(\lambda)$ и τ_n — то же самое, но при учете потерь на поглощение.

Пропускание потока различными материалами. Характер картины пропускания потока материалами аналогичен характеру отражения потока. Пропускание делится на направленное (рис. 1.14, а), диффузно-направленное (рис. 1.14, б) и диффузное (рис. 1.14, в). При направленном пропускании величина и форма пространственного угла, в пределах которого распространяется поток, остаются без изменения, составляющая рассеянного излучения отсутствует. Коэффициент пропускания в этом случае равен $\tau = \frac{\Phi_\tau}{\Phi_0}$. Направленное пропускание характерно для большинства оптических элементов фотографических приборов.

Диффузно-направленное пропускание характерно увеличением пространственного угла, в пределах которого распространяется вышедший из среды поток, по сравнению с величиной угла, в пределах которого распространяется падающий на среду поток.

При диффузном пропускании сила излучения прошедшего среду потока подчиняется закону косинуса и не зависит от угла, под которым падает на среду лучистый поток. Следовательно,

$$B_\alpha = \frac{I_\alpha}{S \cos \alpha}; \quad I = I_\alpha \cos \alpha; \quad B_\alpha = \frac{I_0 \cos \alpha}{S \cos \alpha} = B_0.$$

$$\tau = \frac{\Phi_\tau}{\Phi_0} = \frac{I_0 \pi}{ES} = \frac{\pi B_0}{E}.$$

Эти формулы позволяют вычислить яркость пропускающей поверхности, если известны коэффициенты пропускания и облученности ее. Вводится коэффициент

яркости пропускающей среды, под которым понимается отношение наблюдаемой яркости пропускающей среды к яркости среды, обладающей диффузным пропусканием и имеющей коэффициент пропускания $\tau=1$ при условии одинаковой освещенности обеих сред. В этом случае

$$r_{\tau} = \frac{\pi B_{\tau}}{E},$$

а для сред, обладающих диффузным пропусканием, $r_{\tau} = \tau$. При диффузно-направленном пропускании коэффициент яркости может быть больше единицы. В фотографии наравне с коэффициентом пропускания пользуются такой физической величиной, как плотность среды $D = \lg \frac{1}{\tau}$. Эта величина используется при анализе плотности негативов и является одной из основных величин в сенситометрии — науке о чувствительности фотоматериалов.

Если имеются две среды, обладающие избирательным пропусканием, то их общий интегральный коэффициент пропускания вычисляется по формуле

$$\tau_{\text{общ}} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{0\lambda} \tau_{1\lambda} \tau_{2\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{0\lambda} d\lambda}.$$

или

$$\tau_{\text{общ}} = \tau_1 \tau_2,$$

где τ_1 , τ_2 — интегральные коэффициенты пропускания первой и второй сред соответственно по отношению к потокам

$$\int_0^{\infty} \Phi_{0\lambda} d\lambda \quad \text{и} \quad \int_0^{\infty} \Phi_{0\lambda} \tau_{1\lambda} d\lambda.$$

1.7. Прохождение излучения через атмосферу Земли и планет

Краткие сведения об атмосфере. Состав компонентов газов, входящих в атмосферу планет [20], приведен в табл. 8, где указана также приведенная толщина слоя в нормальных условиях. Поскольку атмосфера Земли представляет наибольший интерес при космическом фотографировании, то ее состав рассмот-

ТАБЛИЦА 8
Состав атмосферы планет

Наименование	Состояние видимой поверхности	Атмосфера	
		Компоненты	Приведенная толщина слоя, см
Земля	Твердая	N ₂	625 000
		O ₂	168 000
		CO ₂	220
		CH ₄	1,2
		N ₂ O	0,4
		O ₃	0,3
Марс	Твердая	CO ₂	440
		N ₂ O	220
		CH ₄	10
		C ₂ H ₂	2
		NH ₃	2
		C ₂ H ₄	1
		O ₃	0,05
		SO ₂	0,003
Венера	Облачная	CO ₂	100 000
		CO	100
		N ₂ O	100
		CH ₄	20
		NH ₃	4
		C ₂ H ₂	3
		C ₂ H ₆	1
Меркурий	Твердая	Ag, K, Xe	Незначительное количество
Юпитер	Облачная	CH ₄	15 000
		NH ₃	700
Сатурн	Облачная	CH ₄	35 000
		NH ₃	250
		O ₃	0,1
		SO ₂	0,01
Уран	Облачная	CH ₄	220 000
		O ₃	0,1
		SO ₂	0,01

Наименование	Состояние видимой поверхности	Атмосфера	
		Компоненты	Приведенная толщина слоя, см
Нептун	Облачная		370 000
Плутон	Неизвестно		—

рен более подробно. Как показали исследования, содержание составляющих в атмосфере следующее:

Азот	624600	Углекислый газ	300	Неон	4,2
Кислород	167600	Неон	14,6	Водород	0,4
Аргон	7440	Криптон	0,8	Вода	10000

Таким образом, атмосферу можно считать средой, состоящей из смеси газов и водяного пара со взвешенными в ней частицами: капельками воды, пыли и др. Азот — 78% и кислород — 21% являются основными постоянными составляющими приземного слоя воздуха. Данные, полученные с помощью ракет и искусственных спутников Земли (ИСЗ), показывают, что до высот порядка 100 км атмосфера по своему составу остается в основном азотно-кислородной, а с увеличением высоты давление и плотность атмосферного воздуха изменяются по экспоненциальному закону. При дальнейшем увеличении высоты атмосфера по своим параметрам постепенно приближается к параметрам межпланетного газа. Поскольку основная масса атмосферы (99,9%) сосредоточена в слое ниже 50 км, то ослаблением излучения на высотах более 50 км и выше можно пренебречь.

Содержание паров воды в атмосфере зависит от ряда причин и колеблется в пределах от $2 \cdot 10^5$ Па (2 мм рт. ст.) до $10 \cdot 10^5$ Па (10 мм рт. ст.), а это соответствует абсолютной влажности воздуха 2,3 до 9,9 г/м³. Основное количество водяного пара сосредоточено возле Земли в слое толщиной примерно 5 км и резко падает с дальнейшим повышением высоты.

Распространение излучения в атмосфере и космосе. При прохождении через атмосферу поток испытывает

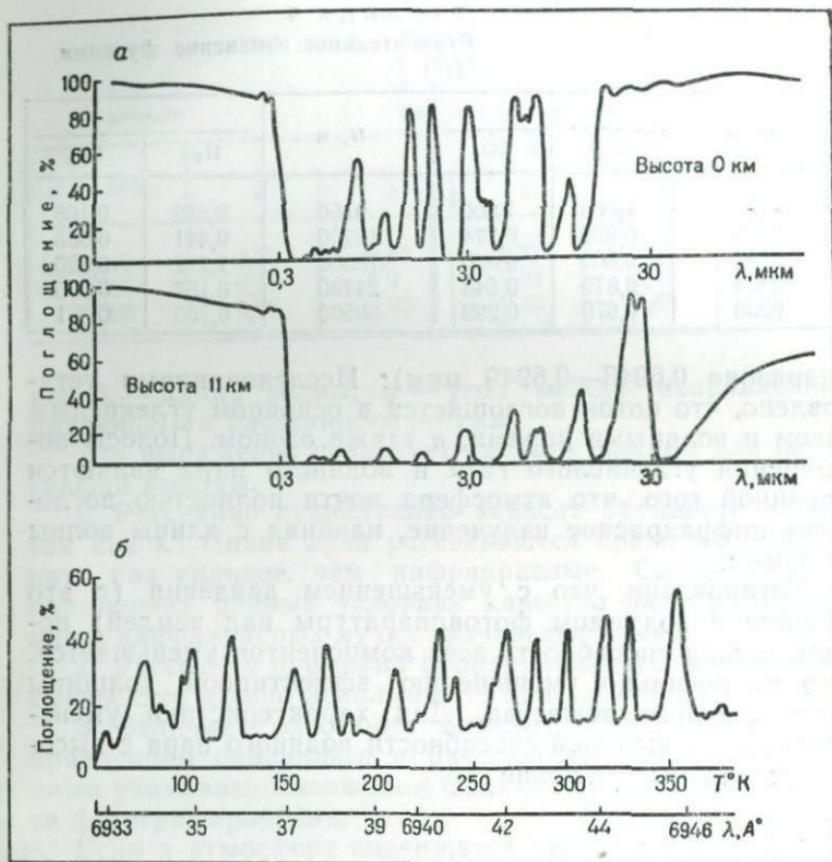


Рис. 1.15. Поглощение потока атмосферой Земли

двойное воздействие: поглощение и рассеивание молекулами различных газов, водяным паром, твердыми частицами. При этом ослабление излучения за счет рассеяния происходит плавно в зависимости от длины волны, а за счет поглощения — носит селективный характер. Характер селективного поглощения потока атмосферой Земли проиллюстрирован на рис. 1.15. Измерения выполнены аппаратурой с различной разрешающей способностью: на рис. 15, а приведен график для аппаратуры низкой точности (в диапазоне от 0,5 до 14 мкм), на рис. 15, б — для аппаратуры высокой точности (в

ТАБЛИЦА 9
Относительное изменение функции
 $f(H)$

$H, \text{ м}$	$\omega_{\text{эф}}/\omega_{\text{н}}$		$H, \text{ м}$	$\omega_{\text{эф}}/\omega_{\text{н}}$	
	H_2O	CO_2		H_2O	CO_2
0	1,000	1,000	9150	0,552	0,168
1220	0,920	0,774	12200	0,441	0,085
2135	0,869	0,660	18300	2,272	0,020
3500	0,819	0,548	24400	0,167	0,005
6000	0,670	0,299	30500	0,105	0,001

диапазоне 0,6943—0,6949 мкм). Исследованиями установлено, что поток поглощается в основном углекислым газом и водяными парами, а также озоном. Полосы поглощения углекислого газа и водяного пара являются причиной того, что атмосфера почти полностью поглощает инфракрасное излучение, начиная с длины волны в 14 мкм.

Установлено, что с уменьшением давления (а это связано с подъемом фотоаппаратуры над землей) поглощающая способность всех компонентов уменьшается. Это равносильно уменьшению эффективной толщины поглощающего вещества. Для характеристики уменьшения поглощающей способности водяного пара с высотой напомним выражение

$$\frac{\omega_{\text{эф}}}{\omega_{\text{н}}} = f(H),$$

где $\omega_{\text{эф}}$ — эффективная величина толщины эквивалентного слоя осажденного водяного пара, лежащего на пути распространения потока, приведенной по поглощающей способности к водяному пару приземного слоя атмосферы, $\omega_{\text{н}}$ — реальная толщина слоя водяного пара.

Эти зависимости наглядно представлены в табл. 9.

Если рассматривать идеальный случай (атмосфера состоит только из газов), то интенсивность рассеяния характеризуется выражением

$$\frac{P_S}{P_0} = \frac{k(n^2 - 1)Nv^2}{(n^2 + 2)\lambda^4} (1 + \cos^2\varphi),$$

где n — показатель преломления рассеивающих частиц; N — число частиц в единице объема; v — объем части-

Т А Б Л И Ц А 10
Изменение коэффициента прозрачности
в вертикальном направлении
в зависимости от высоты
фотографирования

λ , мкм	H, км				
	1	3	6	10	100
0,45	0,95	0,87	0,77	0,63	0,54
0,55	0,96	0,9	0,84	0,79	0,74
0,65	0,97	0,92	0,89	0,85	0,81

цы; λ — длина волны; φ — угол между направлением падающего и рассеянного потока.

Это выражение позволяет сделать важные для фотографии выводы.

1. Рассеяние существенно зависит от длины волны, так как λ^4 . Синие лучи рассеиваются примерно в двадцать раз сильнее, чем инфракрасные. Следовательно, при прочих равных условиях качество фотографирования в инфракрасных лучах значительно выше.

2. Рассеяние примерно пропорционально массе атмосферы. Это можно использовать при расчетах.

3. Величина рассеяния зависит от угла между направлением падающего и рассеянного потока. Необходимо учитывать положение Солнца относительно объекта фотографирования.

Если в атмосфере содержатся частицы с размерами, большими длины волны падающего света (пылевые образования на Земле и Марсе), то индикатриса рассеянного излучения отступает от идеальной, она приобретает более вытянутую форму, и сглаживается различие в степени рассеяния лучей с разной длиной волны. Для космического фотографирования важно учитывать яркость дымки, образующейся при рассеивании. Яркость дымки связана с высотой Солнца, с наличием рассеивающих частиц, число которых существенно зависит от высоты, с размером частиц. Все это очень усложняет расчеты. У земли яркость дымки равна нулю, а максимальной величины она достигает на границе атмосферы, что соответствует полной яркости неба в данном направлении. Полагая освещенность в тени равной яркости небосвода, можно с грубым приближением

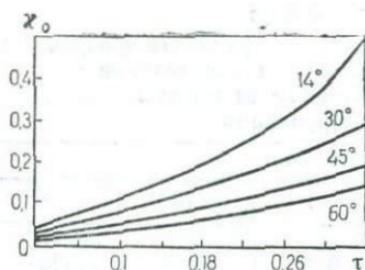


Рис. 1.16. Характер изменения коэффициента задымленности

определить яркость дымки для заданной высоты по формуле

$$\beta_H = \beta_0 (1 - l^{-0,13H}),$$

где β_H , β_0 — соответственно яркости дымки для заданной высоты H и всей толщи атмосферы.

В космической фотографии при расчетах, связанных с учетом влияния дымки, используют коэффициент задымленности

$$x_0 = \frac{\beta_H}{B_0 \tau},$$

где τ — коэффициент пропускания данного слоя атмосферы, B_0 — яркость абсолютной белой поверхности, расположенной горизонтально в плоскости ландшафта.

Прозрачность атмосферы в вертикальном направлении определяют из выражения (табл. 10)

$$T = 10^{-\tau_0},$$

где τ_0 — оптическая масса всей атмосферы.

Характер изменения коэффициента задымленности представлен на рис. 1.16.

Влияние слоя атмосферы на качество фотографирования. Таким образом, можно заметить, что при фотографировании между объектом и фотоаппаратом может находиться значительный слой атмосферы той или иной планеты. Этот слой характеризуется: неравномерной оптической плотностью, селективным пропусканием потока, наличием воздушных потоков, изменением температуры и давления с изменением высоты фотографирования, рефракцией световых лучей, воздушной дымкой.

Световой поток, проходя через оптически неоднородную мутную среду, перераспределяет свою энергию по

различным направлениям, а также частично отклоняется от первоначального направления. Степень ослабления потока увеличивается с увеличением как высоты фотографирования, так и концентрации рассеивающих частиц в атмосфере. Все это будет влиять на понижение контраста объектов фотографирования. Степень снижения контраста может оказаться настолько значительной, что детали объектов перестанут различаться. Поэтому необходимо принимать соответствующие меры. Такими мерами являются использование светофильтров и переход в более длинноволновую область.

Глава 2. ОСНОВЫ ФОТОГРАФИЧЕСКОГО
ПРОЦЕССА
И ЕГО АВТОМАТИЗАЦИЯ

2.1. Сущность фотографического процесса

Фотография — это способ получения на светочувствительных слоях под действием света и дополнительной химической обработки изображений объектов. При космическом фотографировании изображения объектов на светочувствительном слое получают на борту космического аппарата, а химическую обработку производят либо на земле, либо также на борту аппарата.

В общем случае для объективного воспроизведения изображений, получаемых из космоса, фотография должна обеспечивать передачу перспективной формы объекта, распределения яркостей и цветов объекта. Современная космическая фотография успешно справляется с решением всех этих задач.

Весь процесс получения фотографического изображения распадается на ряд этапов. Прежде всего необходимо спроектировать на светочувствительный слой действительно оптическое изображение объекта. Это обеспечивается оптической системой фотоаппарата, т. е. его объективом. Помимо объектива в любой фотоаппарат входят светонепроницаемая камера, затвор и

кассета, а также ряд вспомогательных устройств и механизмов: фокусирующее устройство, устройство смены светофильтров, экспонетрическое устройство и др.

При открывании затвора оптическое изображение воздействует на светочувствительный слой и в нем возникают невидимые для глаза изменения, которые носят название скрытого изображения. Для получения видимого изображения светочувствительный слой подвергают химической обработке в проявляющем растворе.

Первичное изображение является негативным, в нем фотографическое изображение характеризуется передачей яркостей, обратной действительной картине. Нормальную передачу яркостей получают вторичным перепечатыванием первичного изображения. Для негативных изображений используются светочувствительные слои на прозрачной подложке, для конечного изображения — на непрозрачной. Получение позитивного изображения выполняется с помощью контактной или проекционной печати. Обработка светочувствительных слоев принципиально ничем не отличается от обработки негативного материала. Таким образом, схема получения стойкого, позитивного фотографического изображения складывается из следующих основных этапов: получения оптического изображения, скрытого изображения, негативного процесса, печатания и позитивного процесса. Все эти этапы стремятся максимально автоматизировать.

2.2. Фотоматериалы и их характеристики

Светочувствительные слои наносятся на прозрачную и непрозрачную подложки вполне определенным образом. На рис. 2.1 показано строение черно-белой негативной фотопленки. Толщина сухого светочувствительного слоя составляет примерно 0,01 мм. В этом слое зерна-кристаллы галогенного серебра распределяются в 20—40 ярусов, величина зерен около 1 мкм. Размеры зерен определяют степень чувствительности слоя к свету. Второй эмульсионный слой, как правило, более высокочувствителен, чем первый. Иногда для повышения чувствительности слоя в него вводят примеси — сенсибилизаторы, — благодаря которым получают слои

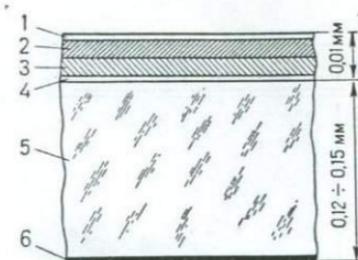


Рис. 2.1. Строение черно-белой негативной фотопленки:

1 — защитный слой, 2 — второй эмульсионный слой, 3 — первый эмульсионный слой, 4 — подслоя, 5 — целлулоидная основа, 6 — противореальный слой

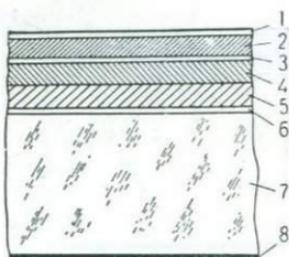


Рис. 2.2. Строение цветной негативной фотопленки:

1 — защитный слой, 2 — несенситизированный эмульсионный слой, 3 — желтый фильтровый слой, 4 — ортохроматический эмульсионный слой, 5 — панхроматический эмульсионный слой, 6 — подслоя, 7 — целлулоидная основа, 8 — противореальный слой

различной спектральной чувствительности. Фотопленка, предназначенная для цветной фотографии (рис. 2.2), содержит три светочувствительных слоя, обладающих разной спектральной чувствительностью. Самый нижний слой чувствителен к красным лучам, выше его находится слой, реагирующий на зеленые лучи. Над ними, за фильтровым, лежит слой, реагирующий на синие лучи.

Фотопленка, предназначенная для спектрозональной съемки, (рис. 2.3) имеет два чувствительных слоя. В них введены компоненты (красители), которые при проявлении экспонированной пленки окрашивают фотоизображения в различные цвета. Как правило, в инфракрасный слой вводится компонент, дающий синезеленый цвет, в панхроматический — компонент, дающий пурпурное изображение. В этом случае на космических снимках не обеспечивается передача естественных цветов природных объектов, но зато на них природные объекты, имеющие самые незначительные различия в окраске, изображаются контрастно, так как введение указанных компонент подчеркивает цветовой контраст, облегчая последующее дешифрирование объектов. Строение черно-белой фотобумаги показано на рис. 2.4. Фотоматериалы с целью определения их характеристик подвергают испытаниям. В процессе полного

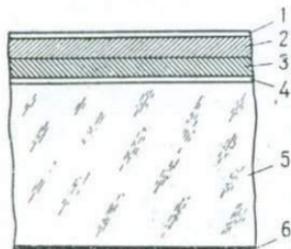


Рис. 2.3. Строение спектральной пленки:

1 — защитный слой, 2 — инфракрасный эмульсионный слой, 3 — панхроматический эмульсионный слой, 4 — подслои, 5 — целлюлозная основа, 6 — противоореальный слой

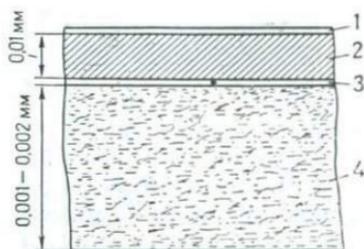


Рис. 2.4. Строение черно-белой бумаги:

1 — защитный слой, 2 — эмульсионный слой, 3 — баритовый слой, 4 — бумажная подложка

сенситометрического испытания фотоматериалов [5, 11, 13] определяют следующие основные величины:

1) светочувствительность — общая S (по отношению к белому свету) и эффективная $S_{эф}$ (по отношению к свету, прошедшему через цветные светофильтры);

2) коэффициент контрастности γ ;

3) фотографическую широту L ;

4) оптическую плотность вуали D_0 .

Для более полной оценки свойств фотоматериалов могут определяться и такие величины, как полезный интервал экспозиций L_g , полезный интервал плотностей ΔD_g и некоторые другие. Кроме сенситометрического, фотоматериалы подвергают также резольвометрическому испытанию, определяя разрешающую способность R и резольвометрическую широту L_R . Наконец, фотоматериалы исследуют также и на структуру почернений, образующихся в их фотослоях, которая оценивается или зернистостью G , или величиной их гранулярности.

Свойства фотоматериалов обычно оценивают по графикам зависимости от времени проявления $t_{пр}$ следующих сенситометрических величин:

$$S = f_1(t_{пр}); \quad \gamma = f_2(t_{пр});$$

$$L = f_3(t_{пр}); \quad D_0 = f_4(t_{пр}).$$

Графики указанных зависимостей позволяют найти оптимальный режим химико-фотографической обработки испытуемого фотоматериала, соответствующий дости-

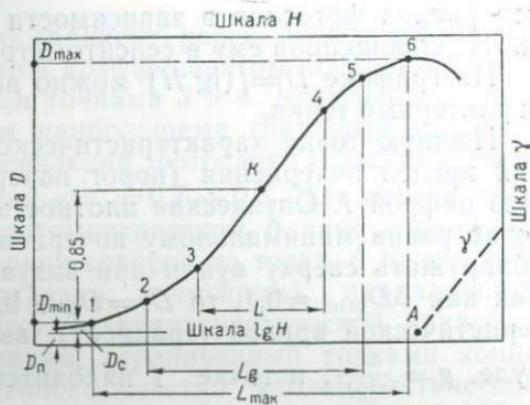


Рис. 2.5. Характеристическая кривая черно-белой негативной пленки

жению некоторой величины коэффициента контрастности γ (или среднего градиента), светочувствительности S и т. д.

В процессе общесенситометрического испытания фотоматериала сначала получают несколько сенситограмм (не менее трех), отличающихся только временем их проявления $t_{пр}$. Сенситограммой называют ряд почернений, полученных на фотослое испытуемого фотоматериала в результате воздействия на него различных по величине экспозиций H (количеств освещения). После экспонирования в сенситометре испытуемый фотоматериал подвергают строго регламентированной химико-фотографической обработке.

Затем измеряются диффузные оптические плотности почернений на полях проявленных сенситограмм с помощью прибора, называемого денситометром.

На основе результатов измерения оптических плотностей D почернений полей сенситограмм и вычисленных значений соответствующих этим почернениям экспозиций H получают таблицу взаимосвязи между величинами D и H , используемую для построения графика зависимости $D=f(\lg H)$, называемого характеристической кривой испытуемого фотоматериала. Этот график получают на специальном сенситометрическом бланке, примерный вид характеристической кривой черно-белой негативной фотопленки показан на рис. 2.5.

Характеристическая кривая наглядно показывает закономерность изменения оптической плотности

почернения фотослоя в зависимости от величины экспозиции, сообщенной ему в сенситометре.

На графике $D=f(\lg H)$ можно выделить следующие характерные точки.

Нижшую точку характеристической кривой или нижний предел почернения (порог почернения), обозначенную цифрой 1. Оптическая плотность почернения в этой точке равна минимальному почернению, которое можно обнаружить сверху вуали при визуальном наблюдении. Так как $\Delta D_{\min} \approx 0,1$, то $D_1 = D_0 + 0,1$. Крутизна характеристической кривой (градиент), вычисляемая по формуле, $g = \frac{dD}{d \lg H}$, в точке 1 находится в пределах $g_1 = 0, 2, \dots, 0, 3$.

Высшая точка характеристической кривой или верхний предел почернения обозначена цифрой 6. Оптическая плотность в этой точке D_6 , равная D_{\max} — наибольшая возможная оптическая плотность почернения при данных условиях проявления.

Интервал экспозиции, ограниченный верхним и нижним пределами почернения фотослоя, называется полным интервалом экспозиций L_{\max} .

Цифрами 2 и 5 обозначены точки, градиент g_1 в которых равен минимальному полезному градиенту g_{\min} — наименьшему градиенту, отвечающему возможности получения фотографического изображения. Величина $g_{\min} = 0, 3, \dots, 0, 4$, а оптическая плотность в точке 2 равна примерно $D_0 + 0,2$. Превышение почернения над вуалью, равное 0,2, уверенно обнаруживается при визуальном наблюдении. Интервал экспозиций, ограниченный точками минимального полезного градиента в верхнем и нижнем участках характеристической кривой, называется полезным интервалом экспозиций L_g . Можно считать, что интервал L_g ограничивает рабочую зону (часть) характеристической кривой, которой соответствует полезный интервал плотностей ΔD_g . Средний градиент g в пределах рабочей зоны характеристической кривой равен $g = \frac{\Delta D}{L_g}$. Таким образом, по шкале $\lg H$ слева от точки 2 расположена область недодержки, а справа от точки 5 — область передержки.

Характеристическая кривая негативных фотоматериалов в средней части имеет прямолинейный участок,

в пределах которого градиент равен наибольшей величине g_{\max} и называется коэффициентом контрастности γ . Этот участок выделен точками 3 и 4. Коэффициент контрастности γ равен наибольшему градиенту g_{\max} при данном времени проявления фотослоя. Практика показывает, что отношение $\bar{g}/\gamma = 0,7 \div 0,8$. Для определения значения γ на сенситометрическом бланке справа нанесена шкала, в сторону которой из точки A проводится прямая линия (показана пунктиром), параллельная прямолинейному участку характеристической кривой.

Интервал экспозиций, ограниченный точками конца и начала прямолинейного участка характеристической кривой, называется фотографической шириной L . Этот интервал также называют интервалом нормальных, или «правильных» экспозиций.

Следует иметь в виду, что фактическая оптическая плотность почернения участков фотоизображения является суммой плотностей почернения фотослоя $D_{\text{фс}}$ и подложки (основы) $D_{\text{п}}$, т. е. $D_{\text{фи}} = D_{\text{фс}} + D_{\text{п}}$. Оптическая плотность вуали D_0 равна разности плотностей неэкспонированного участка фотослоя и подложки. Последняя представляет собой оптическую плотность неэкспонированного и непроявленного фотоматериалов, отфиксированных совместно с сенситограммой. Светочувствительность S , выражаемая в условных единицах, есть величина, обратно пропорциональная экспозиции H , создающей на фотослое после его обработки определенный фотографический эффект, принятый за критерий светочувствительности, т. е.

$$S = \frac{k}{H_{\text{кр}}},$$

где k — постоянная, $H_{\text{кр}}$ — экспозиция, соответствующая выбранному критерию светочувствительности.

В качестве критерия светочувствительности можно выбирать определенную оптическую плотность, или градиент, а также и другие величины. В зависимости от выбранного критерия светочувствительности для одного и того же фотоматериала получаются различные численные значения светочувствительности S . Однако значения светочувствительности S , по какому бы критерию они не определялись, будут в равной степени соответствовать светочувствительности данного фотоматериала,

если сенситограмму начать проявлять ранее, чем достигнет определенного значения коэффициент контрастности γ или средний градиент \bar{g} .

Различают общую светочувствительность S и эффективную $S_{\text{эф}}$; поскольку $S_{\text{эф}} < S$, то при использовании светофильтров в процессе съемки это обстоятельство надо учитывать. Отношение общей светочувствительности S к эффективной $S_{\text{эф}}$ называется кратностью светофильтра q . Величина q показывает, во сколько раз необходимо увеличить выдержку при съемке со светофильтром, чтобы компенсировать уменьшение светочувствительности фотоматериала по отношению к световым лучам, прошедшим через данный светофильтр. Следует отметить, что кратность светофильтра зависит от области спектральной чувствительности фотоматериала.

Величина общей светочувствительности S черно-белых фотоматериалов общего назначения определяется по формуле

$$S = \frac{10}{H_{D_S=D_0+0,85}}$$

Следовательно, за критерий светочувствительности принята оптическая плотность почернения D_S , превышающая плотность вуали D_0 на 0,85 единиц плотности.

Числом светочувствительности называют общую светочувствительность фотоматериала, соответствующую оптимальному времени проявления, при котором достигается рекомендуемое значение коэффициента контрастности.

Числовые значения сенситометрических величин округляют до некоторых рекомендуемых стандартами или другими документами. Так, например, светочувствительность должна выбираться из следующего ряда, составляющего геометрическую прогрессию со знаменателем, равным $\sqrt{2}$; 1; 1,4; 2; 2,8; 4; 5,5; 8; 11; 16; 22; 32; 45; 65; 90; 130; 180 и т. д.

Разрешающая способность фотослоя R . Разрешающая способность определяется максимальным числом раздельно передаваемых фотослоем параллельных штрихов, приходящихся на 1 мм оптического изображения и имеющих одинаковую ширину с промежутками

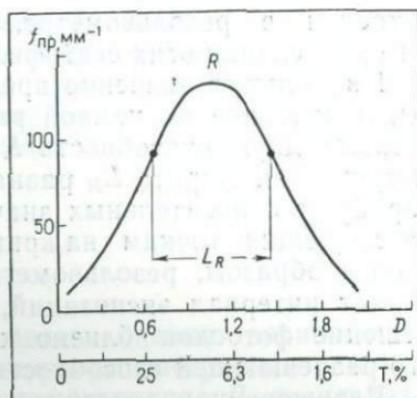


Рис. 2.6. Кривая разрешения фотоматериала

между ними. Величину R фотоматериала определяют проекционным способом, получая фотоизображение стандартной испытательной таблицы (штриховой миры), содержащей несколько групп параллельных штрихов (полос) различной частоты. Экспонирование фотослоя при фотопечати изображения миры на испытуемый фотоматериал осуществляется при различных экспозициях H , для чего используется комплект нейтрально-серых светофильтров. Для этих целей служит специальный прибор, резольвометр, снабженный набором микрообъективов с различной числовой апертурой. Масштаб уменьшения изображения миры в проекционном резольвометре должен быть не менее 1 : 30.

После экспонирования и химико-фотографической обработки на испытуемом фотоматериале получают фотоизображения миры разной степени почернения, составляющие резольвограмму. Рассматривая резольвограмму с помощью микроскопа, находят в каждом фотоизображении миры группу штрихов, имеющих наивысшую частоту $f_{пр}$ и отчетливо различимых (в такой группе легко сосчитать полное число штрихов). Затем на специальном бланке строят график зависимости предельно разрешенной частоты $f_{пр}$ от логарифма экспозиции H . Примерный вид графика такой зависимости показан на рис. 2.6. При построении кривой разрешения по оси абсцисс откладывают или значения оптической плотности D нейтрально-серых светофильтров, используемых для изменения экспозиции H при экспонировании

фотослоя в резольвометре, или общие коэффициенты пропускания этих светофильтров.

Наибольшее значение предельно разрешенной частоты, полученное на кривой разрешения, принимается за разрешающую способность R фотоматериала. Резольвометрическая широта L_R равна разности значений D (логарифмов относительных значений экспозиций H), соответствующих точкам на кривой разрешения с $f_{\text{пр}} = 0,8R$. Таким образом, резольвометрическая широта L_R определяет интервал экспозиций, в пределах которого разрешение фотослоя близко к максимальному, равному его разрешающей способности R .

Разрешающая способность фотоматериала, полученная при экспонировании фотослоя белым светом, обозначается R , а найденная за цветными светофильтрами — $R_{\text{ж}}$, R_0 , $R_{\text{к}}$ и т. д.

Почернение, образующееся в фотослое в результате проявления микрокристаллов AgBr , обладающих или активными центрами скрытого изображения, или центрами вуали, состоит из отдельных серебряных зерен (частиц). Это приводит к флуктуации оптической плотности почернения на равномерно засвеченном и проявленном участках фотослоя, называемой зернистостью фотопочернения. Зернистая структура почернений становится заметной при больших увеличениях фотоизображений (например, при проекционной фотопечати).

При использовании фотоматериала для регистрации различной видеоинформации с последующим ее «считыванием» (например в фототелевизионных системах) зернистость фотопочернений приводит к появлению пространственного «фотографического шума», снижающего возможность обнаружения мелких малоконтрастных деталей в фотоизображениях.

Находят применение два метода оценки зернистости фотопочернений. Первый метод (проекционный) основан на том, что при больших увеличениях фотоизображений их макрозернистость становится заметной для наблюдателя. С помощью специального проекционно-увеличительного прибора, называемого гранулометром, на глянцевой фотобумаге печатают при различных увеличениях изображение поля сенситограммы, имеющего определенную оптическую плотность (чаще $D=0,5 + 0,05$). Пределы изменения масштаба увеличения: от

2,5^x до 30^x. По гранулограмме, полученной после химико-фотографической обработки фотобумаги, определяют предельное увеличение $\beta_{\text{пр}}$, при котором зернистость почернения становится заметной для глаза. Этот полусубъективный метод позволяет оценивать зернистость по формуле

$$G = \frac{100}{\beta_{\text{пр}}}.$$

Второй, более точный метод оценки зернистости, основан на объективном измерении почернения с помощью регистрирующего микрофотометра. В результате получают кривую изменения оптической плотности почернения в пределах равномерно экспонированного участка фотоизображения. При этом зернистость оценивается величиной гранулярности, определяемой как среднее квадратическое отклонение оптической плотности микроучастка почернения от среднего значения оптической плотности в пределах всего участка фотоизображения. Исследования показывают, что оба метода оценки зернистости фотопочернений являются практически равноценными.

Для оценки зернистости цветофотографических фотоматериалов применяется преимущественно проекционный метод. Цветные фотоизображения имеют в 2,5—3 раза меньшую зернистость, чем черно-белые негативные фотоизображения.

Спектральная чувствительность фотографических слоев. Галоидные соли серебра в чистом виде имеют максимальную чувствительность к области коротковолновых ультрафиолетовых лучей. Они реагируют также на видимые фиолетовые и синие лучи и совершенно нечувствительны к лучам с большой длиной волны.

Если сравнить спектральную чувствительность фотографического слоя, содержащего только галоидные соли серебра, со спектральной чувствительностью человеческого глаза (рис. 2.7), то оказывается, что фотослой не может передать правильную относительную яркость цветов. В связи с этим в фотографическую эмульсию вводят специальные органические красители, расширяющие границы спектральной чувствительности фотослоя. Эти красители получили название оптических

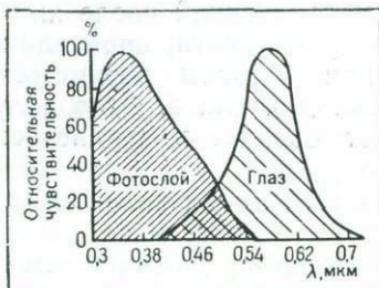


Рис. 2.7. Спектральные чувствительности глаза и фотослоя

сенсibilизаторов, а способ их применения именуется сенсibilизацией фотографического материала.

Область чувствительности фотослоя постепенно расширялась и в настоящее время простирается до 1,3—1,4 мкм. Основными органическими красителями являются: арирозин (до 0,600 мкм), пинацианел (до 0,720 мкм), криптоционин (до 0,820 мкм), неоцианин (до 0,900 мкм), ксеноционин (до 1,100 мкм), тетра- и пентакарбоцианины (до 1,300 мкм).

Таким образом, современная фотографическая эмульсия может быть приготовлена со спектральной чувствительностью в значительно большем диапазоне длин волн, чем область чувствительности человеческого глаза.

Фотографические эмульсии могут быть подвергнуты сенсibilизации в процессе их изготовления. В настоящее время несенсibilизируются лишь диапозитивные пластинки, позитивные пленки и фотобумага для черно-белой фотографии; все остальные фотоматериалы изготавливаются сенсibilизированными.

Все негативные фотографические слои в зависимости от примененных для сенсibilизации красителей, а значит, по области приобретенной спектральной чувствительности, разделяются на следующие типы:

1) несенсibilизированная с границей чувствительности 0,51 мкм. Такая эмульсия применяется для изготовления черно-белых фотобумаг, позитивных фотопластинок и фото- и киноплёнок;

2) ортохроматическая (ортохром) с границей сенсibilизации до 0,59 мкм. Эта эмульсия чувствительна к двум зонам спектра: сине-фиолетовой и желто-зеленой, причем к сине-зеленым лучам (длина волны от 480

до 0,53 мкм) чувствительность эмульсии ортохром пониженная, т. е. имеет место провал чувствительности;

3) изоортохроматическая (изоортохром) с такой же границей сенсibilизации, как и у ортохроматической, но примерно с одинаковой чувствительностью ко всем длинам волн от 0,4 до 0,59 мкм;

4) панхроматическая (панхром) с границей сенсibilизации до 0,68—0,7 мкм, имеющая пониженную чувствительность (провал) в сине-зеленой зоне спектра;

5) изопанхроматическая (изопанхром) с границей сенсibilизации, как и у панхрома, но с одинаковой чувствительностью ко всем длинам волн от 0,4 до 0,7 мкм. Такая эмульсия используется для приготовления черно-белых негативных фото- и кинопленок;

6) изохроматическая (изохром) с границей сенсibilизации не более 0,64 мкм при одинаковой чувствительности ко всем длинам волн;

7) инфрахроматическая (инфрахром) с границами сенсibilизации рабочей зоны от 0,65 до 1,15 мкм. Такая эмульсия используется для приготовления фотоматериалов, предназначенных для съемки в красных и инфракрасных лучах.

Существуют несколько типов инфрахроматических материалов, которые обозначаются по положению максимума добавочной чувствительности, например, «Инфра 750», «Инфра 800», «Инфра 960» и т. д. Инфрахроматические фотоматериалы применяются в спектрофотографии.

На рис. 2.8 показаны спектрограммы различных фотографических материалов. Спектрограммы дают качественную характеристику светочувствительности, но не везде правильно воспроизводят относительную светочувствительность в функции длины волны.

Для использования эффекта сенсibilизации все сенсibilизированные материалы необходимо применять со светофильтрами. Снимки, сделанные на разных материалах без светофильтров, будут мало отличаться друг от друга. Роль светофильтров сводится к отсечению коротковолновых лучей: зеленых для ортохрома, зеленых и желтых для панхрома и всего видимого участка спектра для инфрахрома.

Помимо сенсibilизации различают еще явление гиперсенсibilизации. Путем гиперсенсibilизации удается

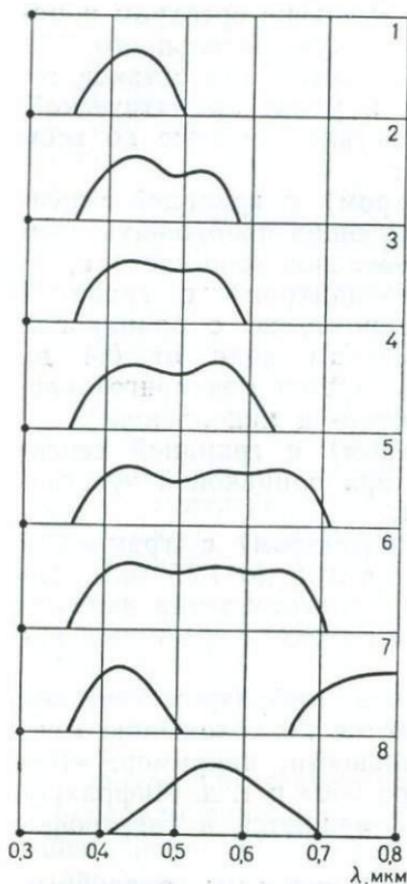
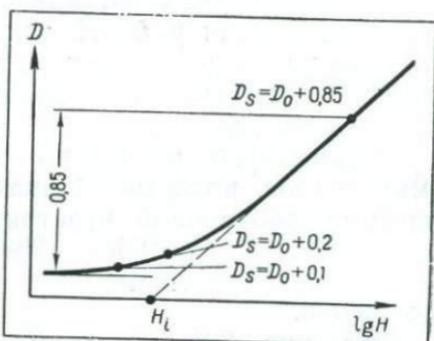


Рис. 2.8. Спектрограммы фотоматериалов:

1 — несенсибилизированного; 2 — ортохроматического; 3 — изоортохроматического; 4 — изохроматического; 5 — панхроматического; 6 — изопанхроматического; 7 — инфрахроматического; 8 — спектральная чувствительность глаза

Рис. 2.9. К определению исходных точек в сенситометрических системах



значительно повысить светочувствительность фотографического материала. Однако такой материал обладает очень ограниченной сохраняемостью и поэтому гиперсенсибилизация производится только перед съемкой.

Сенситометрические системы. Применяют несколько систем оценки фотографических свойств светочувствительных слоев. Не останавливаясь подробно на рассмотрении каждой системы, познакомимся только с методикой определения общей светочувствительности S в каждой системе.

Английская система. Эта система предложена в 1890 г. Хертером и Дриффильдом. В качестве

критерия светочувствительности в этой системе принята точка инерции i , являющаяся точкой пересечения продолжения прямолинейного участка характеристической кривой с осью абсцисс (рис. 2.9).

Формула для определения светочувствительности S_i в этой системе имеет вид:

$$S_i = \frac{10}{H_i},$$

где S_i — в градусах X и Д; H_i — экспозиция, соответствующая точке инерции (инерция фотослоя).

Немецкая система DIN (введена в 1934 г.). Согласно нормали DIN 4512—1961 светочувствительность в данной системе определяется по формуле

$$S_{\text{DIN}} = 10 \lg \frac{1}{H_{D_S=D_0+0.1}},$$

где S_{DIN} выражается в DIN.

За критерий светочувствительности в системе DIN принята величина оптической плотности D_s , соответствующая порогу почернения фотоматериала. При изменении числа светочувствительности на 3 DIN светочувствительность изменяется (увеличивается или уменьшается) в два раза.

Американская система ASA (введена в 1947 г.). В соответствии с нормалью ASA 2,5—60 светочувствительность определяется в единицах ASA по формуле

$$S_{\text{ASA}} = \frac{0,8}{H_{D_S=D_0+0.1}}.$$

Отечественная система (введена в 1945 г.). Согласно действующим в настоящее время стандартам, определение общей светочувствительности производится при критерии $D_s = D_0 + 0,85$ (черно-белые негативные и позитивные фотоматериалы, а также цветные негативные фотоматериалы) и $D_s = D_{\text{min}} + 0,9$ или $D_{\text{min}} + 0,85$ (соответственно черно-белые обрабатываемые и цветные обрабатываемые фотоматериалы).

Международной организацией по стандартизации ИСО (International Organization for Standardization) предложен проект сенситометрической системы для введения ее во всех странах мира.

В связи с различием в методике оценки светочувствительности фотоматериалов, присущим каждой сенситометрической системе и приводящим поэтому к получению разных значений чисел светочувствительности S , часто возникает задача по установлению соотношений между значениями S , полученными в разных системах. Решение этой задачи было бы существенно облегчено, если бы во всех системах придерживались единой методики получения характеристических кривых. Так как это не имеет места, то получить точные соотношения между числами светочувствительности практически невозможно. Поэтому все существующие таблицы перевода значений S являются приближенными.

Можно рекомендовать следующие приближенные соотношения:

1) между числами светочувствительности S , определяемыми при критериях $D_S = D_0 + 0,85$ и $D_S = D_0 + 0,2$,

$$S_{0,2} = S_{0,85} \cdot 10^{\frac{0,65}{\gamma} - 0,92};$$

2) между числами S_i и $S_{0,85}$

$$S_i = S_{0,85} \cdot 10^{\frac{D_0 + 0,85}{\gamma}};$$

3) между числами S_{DIN} и S_{ASA}

$$S_{DIN} = 10 \lg 1,25 S_{ASA};$$

4) между числами $S_{0,2}$ и S_{DIN}

$$S_{0,2} = 0,65 \text{ antilog } 0,1 S_{DIN}.$$

2.3. Светофильтры

Для использования дополнительной чувствительности фотографического материала в области сенсбилизации применяются светофильтры, устанавливаемые или перед объективом, или между объективом и светочувствительным слоем, которые и служат для поглощения лучей определенной области спектра. Основным видом светофильтров, применяемым в фотографической практике, являются светофильтры из стекла.

По своим свойствам все светофильтры разделяются на монохроматические, селективные, субтрактивные и



Рис. 2.10. Спектральные кривые светофильтров:
 1 — ЖС-16; 2 — ЖГ-18; 3 — ОС-12; 4 — ОС-14; 5 — КЕ-14

компенсационные. Спектральные кривые этих типов светофильтров представлены на рис. 2.10. На графиках по оси ординат отложены плотности фильтров, а по оси абсцисс — длины волн света.

Монохроматические светофильтры служат для выделения из спектра узкой области лучей; селективные — пропускают более широкую зону лучей, они широко применяются в цветной фотографии, в аэрофотографии, космической фотографии; субтрактивные — задерживают только узкую часть спектра; компенсационные — служат для выравнивания действия отдельных лучей, исправления цветопередачи. Желтые светофильтры, находящие широкое применение в фотографической практике, можно отнести к числу компенсационных.

Съемочные светофильтры являются частью оптической системы фотоаппарата; светофильтр должен представлять собой плоскопараллельную пластинку, однородную по своей массе. Требования к параллельности сторон светофильтров возрастают с увеличением фокусного расстояния объектива фотоаппарата. Клиновидность фильтров не должна превышать $3'$, а отступление от плоскости $3-5$ колец. Это требование особенно существенно для светофильтров, устанавливаемых при съемке перед объективом фотоаппарата. Установка светофильтра перед светочувствительным слоем вызывает слишком жесткие требования к однородности и чистоте стекла и поэтому является невыгодной. Кроме того,

ТАБЛИЦА II
Характеристики светофильтров [29]

Светофильтр Сорт стекла	D_{λ_0} $d = 6$ мм	$\lambda_{пр}$	К	Кратность			Цвет фильтра
				Изопан- хром	Панхром тип 6	Инфра	
ЖС-16	0,12	470	0,8	—	—	—	Светло-желтый
ЖС-18	0,12	510	1,0	1,8	1,6	1,5	Темно-желтый
ОС-12	0,12	550	1,2	3,0	2,0	2,0	Светло-оранжевый
ОС-14	0,14	580	1,2	5,7	2,8	2,0	Темно-оранжевый
КС-14	0,16	640	1,2	8	4,6	5,0	Красный

введение светофильтра в сходящийся пучок лучей сильно изменяет положение фокальной плоскости объектива.

Включение светофильтра отодвигает фокальную плоскость объектива на величину, равную

$$\Delta f = \frac{n-1}{n} d,$$

где n — показатель преломления света стекла фильтра; d — толщина светофильтра.

Приближенно можно считать, что Δf составляет одну треть толщины стекла фильтра. Применение светофильтров при съемке должно быть предусмотрено уже при расчете объектива фотоаппарата, так как положение фокальных плоскостей одного и того же объектива для лучей различных длин волн может изменяться. Это особенно существенно, например, при переходе от съемки в видимых лучах спектра к съемке в инфракрасных лучах (табл. 11).

При съемке через фильтр приходится увеличивать выдержку, так как фильтр поглощает часть лучей; величина поглощения зависит от спектральных свойств фильтра. Увеличение выдержки обуславливается также свойствами светочувствительного слоя. Из рассмотренного видно, что эффективная светочувствительность фотослоя — это чувствительность его к лучам, прошедшим данный светофильтр. Отношение общей светочувствительности к эффективной называется кратностью светофильтра q

$$q = \frac{S}{S_{\phi}}.$$

Кратность светофильтра выражается числом, показывающим, во сколько раз должна быть увеличена выдержка при съемке с данным фильтром по сравнению с выдержкой при съемке без светофильтра.

Например, для пленки панхром тип 10 кратность q будет равна: для фильтров ЖС-18 — 1,8; ОС-12 — 2,0; ОС-14 — 2,8; КС-14 — 4,0. Следует иметь в виду, что значения кратности светофильтров в большей степени зависят от спектрального состава источника света. Поэтому значения кратностей вычисляются точно только для определенных, конкретных условий.

Этим же объясняется невозможность сравнения кратностей фильтров для аэропленки и других негативных материалов, поскольку светочувствительность у них определяется различным критерием.

2.4. Съёмочный процесс при космическом фотографировании

Для получения фотографического изображения светочувствительный слой должен быть подвергнут действию света или, говоря иначе, проэкспонирован. Величина экспозиции, т. е. количество света, действующее на слой при фотографировании, определяется произведением продолжительности действия света и интенсивности освещения отдельных участков оптического изображения.

Экспозиция — это продолжительность освещения светочувствительного слоя. Экспозиция будет определена правильно, если после проявления получится хорошее фотографическое изображение. Таким образом, продолжительность освещения зависит в основном от интенсивности освещения отдельных участков изображения и от светочувствительности фотографического слоя.

Интенсивность освещения отдельных участков изображения определяется силой дневного света; степенью отражения света объектами съемки и их цветом; наличием и величиной воздушной дымки; относительным отверстием объектива, его прозрачностью, а также светофильтром, применяемым при съемке.

Освещенность объектов съемки зависит от положения Солнца относительно горизонта Земли или планеты. Высота Солнца над горизонтом определяется географической широтой места фотографирования, временем года и временем суток.

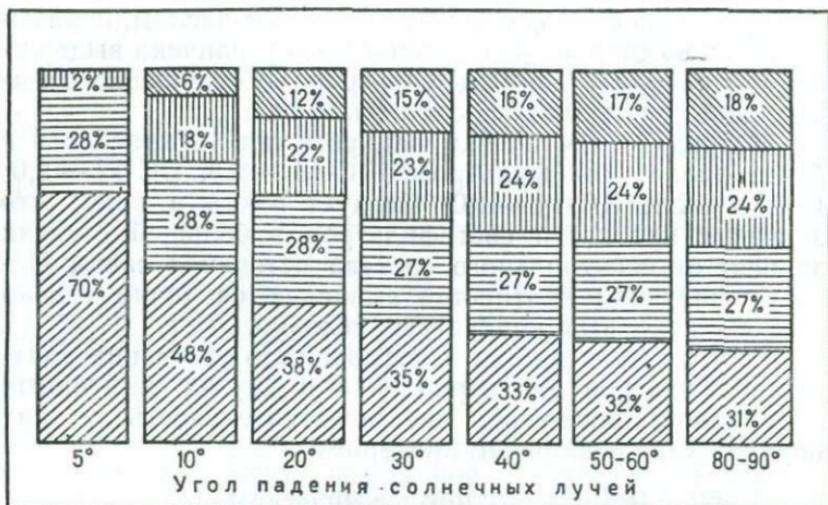


Рис. 2.11. Распределение спектрально-го состава солнечной радиации

Изменение освещенности и спектрального состава солнечной радиации в зависимости от времени суток для земных условий нашего полушария представлено на рис. 2.11 (табл. 12).

Максимальной силы солнечный свет достигает в июне, минимальной — в декабре. Сила света достигает максимума в полдень, до полудня и после него она равномерно уменьшается. Однако сила дневного света в боль-

ТАБЛИЦА 12
Освещенность земной поверхности

Угол падения солнечных лучей	Освещенность, тыс люкс	Освещенность прямым светом, %	Освещенность рассеянным светом, %
0	0,5	0,0	100
5,0	4,2	36,0	64,0
10,0	10,4	56,0	44,0
15,0	17,7	64,0	36,0
20,0	25,0	71,0	29,0
30,0	41,8	77,0	23,0
40,0	57,8	80,0	20,0
50,0	77,0	82,0	18,0
60	97,4	84,0	16,0

шой мере зависит от состояния атмосферы Земли или планеты. Например, облака, закрывающие небо, будут в значительной степени изменять силу дневного света. Опыт фотографии наземных объектов показывает, что наибольшая освещенность объектов наблюдается при белых редких облаках, отражающих солнечный свет и увеличивающих его интенсивность. Увеличение облачности до значительной при сохранении других условий вызывает увеличение времени выдержки до $3\times$ и более раз.

Количество света, отраженного от объектов съемки и падающего в объектив фотоаппарата, зависит также от отражательной способности этих объектов, их цвета, взаимного положения солнца и фотоаппарата, удаления объектов от аппарата, состояния атмосферы и, наконец, от характеристик самого объектива.

Различие в значениях коэффициентов отражения объектов съемки настолько значительно, что не учитывать его никак нельзя. Чистый снежный покров отражает $\sim 80\%$ падающего на него светового потока, а пашня — только около 7% ; деревянные постройки отражают 40% , а лес только 5% и т. д. Мокрые поверхности отражают почти в два раза меньше света, чем сухие; это обстоятельство также необходимо учитывать при определении выдержки.

Получение фотографического изображения зависит не только от количества света, отраженного от объекта, но и его цветности, так как фотослой различно реагирует на лучи различных цветов. Различие в цветах передается на негативах черно-белой фотографии различием яркостей.

Учитывая преобладающую цветность объектов съемки, можно выбором сорта фотографического материала и светофильтра добиться получения наилучшего фотографического изображения, когда соотношение погрешностей участков изображения будет соответствовать визуальному восприятию яркостей цветных объектов. С помощью светофильтра можно добиться искусственного увеличения почернений участков, которые не будут соответствовать визуальному соотношению яркостей цветных объектов. Это оказывается возможным благодаря изменению коэффициентов отражения от объектов для лучей различных длин волн и позволяет, например,

при съемке в красных или инфракрасных лучах получить изображения таких объектов, которые в видимых лучах на общем фоне не выделяются. На этом принципе основана многозональная фотография, при которой съемка одной и той же местности производится дважды: например, на ортохроме с желтым фильтром и на инфрахроме с красным фильтром. Вследствие различия в коэффициентах отражения для одних и тех же объектов в лучах различной длины волны фотографическое изображение может позволить выявить ряд таких объектов, которые оказались бы незамеченными по одному снимку. Одновременное получение 6—8 снимков в разных участках спектра еще более повышает эффект многозонального фотографирования.

Таким образом, многозональная фотография представляет собою фотографирование одной многообъективной или комплектом синхронизованных фотокамер с разными комбинациями фотопленок и светофильтров, дающих зональные изображения в разных спектральных интервалах одних и тех же участков ландшафта.

Применение светофильтров решает еще одну очень важную задачу при фотографировании: светофильтры обеспечивают съемку через значительную толщину воздуха, т. е. при больших расстояниях между аппаратом и объектом съемки. Это обстоятельство особенно важно для воздушного и космического фотографирования, при выполнении которого удаление фотоаппарата от объектов съемки может измеряться десятками и сотнями километров.

Земная атмосфера представляет собой для проходящего через нее света мутную среду, содержащую большое число частиц водяного пара, дыма и пыли. Молекулы воздуха также частично рассеивают свет, пронизывающий атмосферу. Рассеянный в атмосфере свет при значительной ее толщине создает впечатление свечения воздуха, которое именуется «воздушной дымкой». Цвет дымки зависит от размеров частиц, которые преобладают в атмосфере. При чистой атмосфере наблюдается только молекулярное рассеяние, при котором коэффициент рассеяния обратно пропорционален четвертой степени длины волны света. Коротковолновые лучи видимого спектра рассеиваются интенсивнее длинноволновых, и дымка при молекулярном рассеивании имеет голубой

оттенки. Этим же явлением объясняется и голубой цвет неба.

С увеличением размеров рассеивающих частиц, особенно когда они становятся больше длин волн света, закон молекулярного рассеивания нарушается, начинают рассеиваться и другие лучи видимого участка спектра и дымка приобретает другую окраску.

Установлено, что в среднем слой атмосферного воздуха пропускает 45% фиолетовых, 78% желтых, 89% красных и 93% инфракрасных лучей. Недостающая часть лучей поглощается и рассеивается атмосферой, делая ее источником излучения.

При съемке на яркость объекта накладывается яркость дымки и вследствие этого понижается контраст фотографируемых объектов. Кроме того, через значительные толщи воздуха от объекта к фотоаппарату легче доходят длинноволновые, чем коротковолновые лучи спектра.

Фотографические слои несмотря на сенсбилизацию имеют обычно большую светочувствительность в области естественной чувствительности галоидного серебра. Поэтому свечение дымки будет оказывать интенсивное воздействие на светочувствительный слой. Если объектив фотоаппарата перекрыть фильтром, отсекающим свечные дымки, то на фотослой попадут только длинноволновые лучи, и влияние дымки будет локализовано. При этом фотослой должен обладать соответствующей примененному фильтру спектральной чувствительностью. Подбирая фотографические слои и соответствующие светофильтры, можно значительно повышать контраст фотографируемых объективов, а значит и увеличивать дальность фотографирования. Хорошие результаты по устранению влияния дымки дают инфрахроматические фотоматериалы с красными фильтрами. Однако следует иметь в виду, что не всегда через дымку могут пройти длинноволновые лучи. Очень часто применение фильтров не дает ожидаемых результатов, поэтому необходимо выбирать такое время для съемки, когда дымка имеет наименьшую интенсивность. Наименьшая дымка обычно наблюдается в утренние часы. Атмосфера прозрачна также после дождя: При фотографировании Луны, у которой отсутствует атмосфера, а следовательно, нет и дымки, контраст фотографируемых объектов очень

велик, и это следует учитывать, подбирая соответствующие фотоматериалы.

Существенное значение на величину выдержки оказывают также свойства объектива фотоаппарата. Чем больше его относительное отверстие и прозрачность, тем при прочих равных условиях требуется меньшая выдержка для получения одинаковых снимков. Помимо указанных факторов, на величину выдержки влияет также степень чувствительности фотографического слоя, применяемого при съемке в сочетании с определенным светофильтром.

Величина выдержки может быть определена различными путями. Например, выдержку можно определить методом расчета, пользуясь экспонометрическими формулами. Однако такой способ является громоздким и не находит широкого практического применения. Существуют многочисленные экспонометрические таблицы, которыми пользуются при съемке для определения величины выдержки. Определение величины выдержки производится по таким таблицам в несколько приемов. Величина выдержки определяется в определенной последовательности по отдельным таблицам, из которых находят коэффициент, учитывающий значение конкретного фактора на выдержку. По этим таблицам последовательно учитываются: вид фотографирования, высота Солнца, состояние неба, чувствительность фотослоя, кратность фильтра и относительное отверстие объектива.

Для упрощения расчета выдержки таблицы часто заменяются специальными номограммами. При космическом фотографировании находят применение фотоэлектрические экспонометры, представляющие собою фотоэлемент, который позволяет определить интегральную яркость фотографируемых объектов. Фотоэлектрический экспонометр позволяет определять значение выдержки только в момент съемки.

2.5. Автоматизация фотопроцесса

Космическое фотографирование в большинстве случаев предполагает полную автоматизацию фотопроцесса. И хотя известно, что присутствие экипажа на борту космического аппарата [8] повышает возможности активного поиска интересных объектов, делает более

гибким управление работой фотоаппаратуры при выполнении программы, однако тенденция автоматизировать большинство этапов фотопроцесса сохраняется при пилотируемых полетах. Полная автоматизация этапов фотопроцесса становится просто необходимой при получении фотоизображений других планет.

Задача полной автоматизации решена для первых двух этапов: получение оптического изображения и скрытого изображения. Автоматизация негативного процесса, печатания и позитивного процесса решена только применительно к наземным условиям, и то далеко не полностью.

Рассмотрим отдельные разработки, направленные на автоматизацию фотопроцесса, после получения скрытого изображения. Одна из первых разработок направлена на выполнение одноступенчатого процесса обработки фотоматериала, в ходе которой осуществляется одновременно негативный и позитивный процессы. В установке, схема которой приведена на рис. 2.12, используются две ленты — негативной и позитивной фотобумаги. Негативная лента, являющаяся высокочувствительной фотобумагой, намотана на катушку 1 и защищена снаружи несколькими витками ракордной ленты из неактивной бумаги. Позитивная лента изготовлена из несветочувствительной баритованной бумаги с нанесенным на нее лаковым приемным слоем, в котором растворены мельчайшие частицы металлического серебра.

Перед каждым кадром между негативной и позитивной лентами уложена капсула с пастообразными проявляющим и фиксирующим составами (рис. 2.13). После экспонирования светочувствительного слоя кадра негативной фотобумаги обе ленты (негативная и позитивная) протягиваются между двумя валиками, в результате чего пастообразный состав, содержащийся в капсуле, распределяется очень равномерно между эмульсионным слоем негативной ленты и лаковым слоем позитивной. Поскольку в обрабатываемой пасте содержатся и проявляющий, и фиксирующий составы, то в светочувствительном слое негативного материала, на тех участках, на которые подействовал свет, начинает образовываться металлическое серебро. На участках, не подвергшихся действию света, будет происходить процесс растворения бромистого серебра под действием фикси-

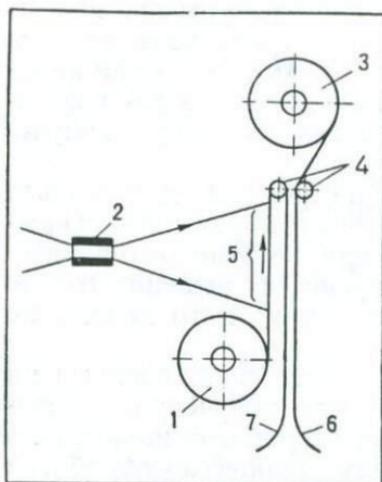


Рис. 2.12. Одноступенчатый процесс обработки фотоматериала:
 1 — катушка с негативной бумагой; 2 — объектив; 3 — катушка с позитивной фотобумагой; 4 — прижимные валики; 5 — экспонируемый кадр; 6 — обработанный позитив; 7 — обработанный негатив

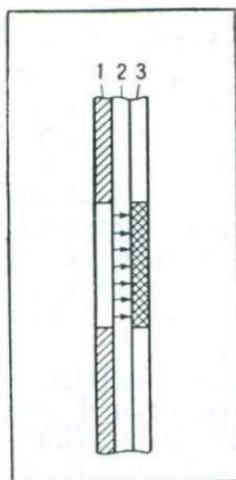


Рис. 2.13. Схема процесса обработки:
 1 — светочувствительный слой негативной бумаги; 2 — слой обрабатывающего состава; 3 — приемный слой позитивной бумаги

рующих солей, находящихся в пасте. Растворенное бромистое серебро, проникая в лаковый слой позитивной бумаги, благодаря имеющимся в пасте проявляющим веществам и частицам металлического серебра, восстанавливается в металлическое серебро, оседающее на лаковом слое позитива. Одноступенчатый процесс проявления использовался и при обработке фотопленки. Однако исследование кинетики процесса одновременного проявления и фиксирования показало, что осуществление его в условиях невесомости требует сложного технологического оборудования [39], исключающего загрязнения проявочных изображений продуктами взаимодействия раствора с эмульсионным слоем пленки, в частности серебром. Было также установлено, что процесс требует труднодостижимой жесткой регламентации режима смачивания эмульсионного слоя раствором.

В американской космической фотолаборатории «Лунар Орбитер» [57] был применен автоматизированный процесс «Бимат», основанный на использовании проявляюще-фиксирующих лент. Этот процесс прост, удобен

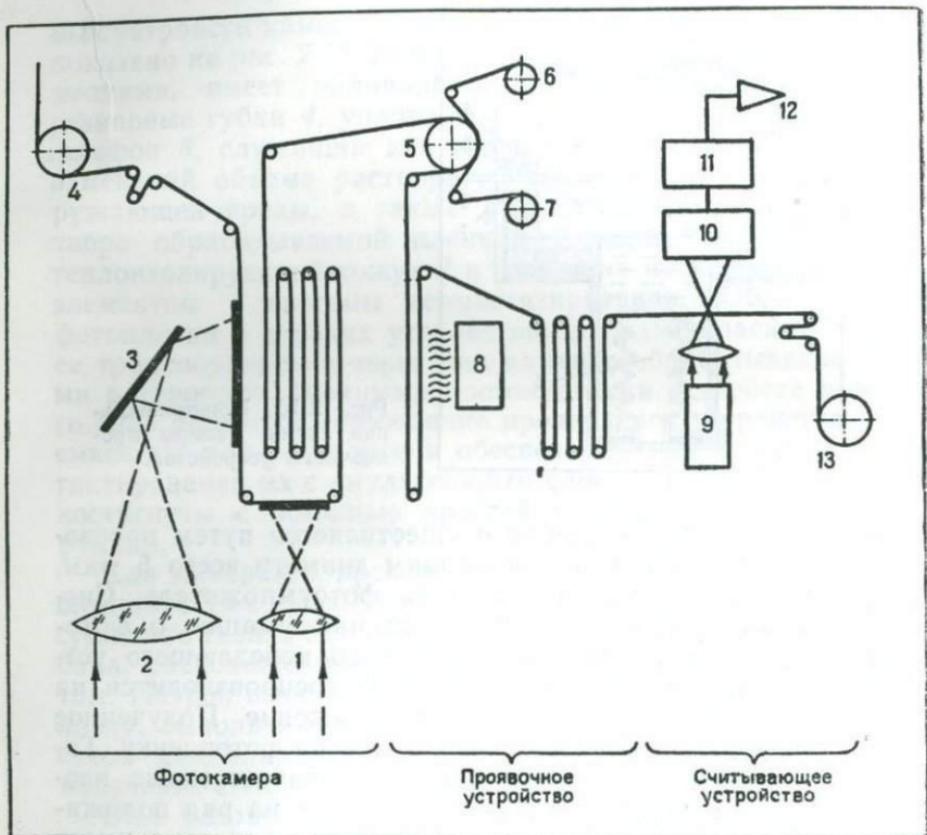


Рис. 2.14. Схема бортовой автоматической фотоаппаратуры для картографирования поверхности Луны:

1 — короткофокусный объектив; 2 — длиннофокусный объектив; 3 — зеркало; 4 — кассета с фотопленкой; 5, 7 — приемо-подающие кассеты системы «Бимат» с проявляюще-фиксирующей лентой; 6 — проявочный барабан; 8 — подогреватель для сушки фотопленки; 9 — сканирующее устройство; 10 — фотоумножитель; 11 — усилитель; 12 — антенна для передачи сигналов на Землю; 13 — приемная кассета для обработанной и считанной фотопленки

и не требует для своего осуществления сложного оборудования (рис. 2.14). Проявочная фотопленка поступает в устройство обработки, где прижимается к лентам, имеющим слой желатины, пропитанной проявочно-фиксирующим составом. Этим обеспечивается ее проявление и фиксирование. После этого фотопленка сушится, а затем подается в считывающее устройство.

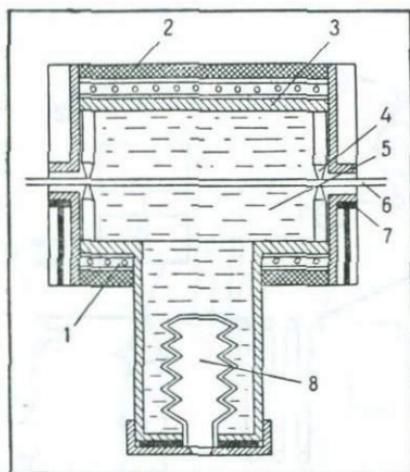


Рис. 2.15. Принципиальная схема камеры проявочного устройства.

Считывание изображения осуществляется путем просвечивания пленки лучом, имеющим диаметр всего 5 мкм, который затем направляется на фотоумножитель. Сигнал с фотоумножителя, несущий информацию о фотоизображении, посредством бортового передающего устройства передается на Землю, где воспроизводится на экране кинескопа в видимое изображение. Полученное изображение снова фотографируется на фотопленку. Таким образом были получены высококачественные изображения поверхности Луны. Несмотря на ряд положительных свойств, эта автоматизированная система имеет ряд недостатков. Во-первых, обрабатывающие пасты имеют ограниченную сохраняемость, особенно при повышенных температурах. Во-вторых, при большой длине обрабатываемой пленки масса носителя пасты-ленты становится такой большой, что выгоднее иметь на борту устройство для нанесения раствора на пленку без ленты. Процесс применим для обработки только специальных типов пленок с получением при этом строго определенных их параметров. Это не удовлетворяет требованию универсальности системы.

Малогабаритные автоматические проявочные устройства [3, 4, 39] были разработаны для советских космических аппаратов «Марс-1», «Зонд-4», «Луна-12». В них проявление пленки осуществлялось в жидких или вязких концентрированных растворах с применением проявоч-

ных устройств камерного типа. Устройство такой камеры показано на рис. 2.15. Камера, герметизированная уплотнениями, имеет цилиндрический корпус 3; ножевые резиновые губки 4, уплотняющие камеру с раствором 5; сальфон 8, служащий для компенсации температурных изменений объема раствора, избыточного давления окружающей среды, а также регулирующий вынос раствора обрабатываемой пленкой. Камера заключена в теплоизолирующий кожух 2 и снабжена нагревательным элементом 1 системы термостатирования. Обработка фотопленки 6 в таких устройствах производилась путем ее транспортировки через ряд камер с обрабатывающими растворами. Важными достоинствами устройств этого типа являются совмещение проявочного устройства с емкостью для растворов и обеспечение надежного контактирования их с эмульсионным слоем пленки, которые достигнуты с помощью простой и экономичной конструкции.

Для камерного проявления была разработана упрощенная схема сушки — без принудительной циркуляции сушащего газа. Устройство состояло из сушильного барабана, расположенного у поверхности патрона с сорбентом. Патрон имеет радиальные отводные каналы и оболочку, выполненную из материала, обладающего свойством капиллярной абсорбции. Все это обеспечивало получение стеклования эмульсионного слоя.

Был разработан специальный процесс обработки, обеспечивающий стабильное получение заданных параметров пленки в условиях невесомости после длительного (несколько месяцев) хранения в бортовых условиях и не требующий жесткой регламентации температурного и временного режимов.

Разработанные принципы построения проявочного устройства и процессы химико-фотографической обработки пленки позволили в полной мере учесть особенности космической фотографии, такие, как действие на пленку проникающей радиации, влияние невесомости, влияние вибрации и ускорений. Созданная аппаратура при малых массах, габаритах и энергетических затратах обеспечивает полную автоматизацию процессов обработки и отличается высокой надежностью. Рассмотрим основные технические характеристики вариантов проявочных устройств.

Параметр	Марс-1	Зонд-3
Сухая масса конструкции, г	4100	540
Масса растворов, г	540	84
Масса сорбента, г	460	57
Длина обрабатываемой пленки, м	5,7	1,0
Ширина пленки, мм	70	25,4
Допустимый метраж обрабатываемой пленки (без изменения показателей), м	15	7,0
Диапазон скоростей обработки, мм/мин	20—60	10—40
Средний потребляемый ток (при $U = 14$ В), А	1,5	1,0

Создание фототелевизионных космических систем позволило не только полностью автоматизировать фото-процесс, но и включить (на этапе обработки информации) ЭВМ в контур автоматизированной системы. Схема такой системы [63, 64, 67] приведена на рис. 2.16. Она включает ЭВМ, осуществляющую управление работой всей системы, фотокамеру, электронно-лучевую трубку, магнитные барабаны и синхронизатор. Система использовалась для обработки информации, получаемой со спутника «Лунар-Орбитер». Эта информация записывалась в аналоговой форме на магнитную ленту, а затем переписывалась вместе с временными отметками на специальную 35-миллиметровую фотопленку. Дальнейшая обработка этой записи проводилась в три этапа. На первом этапе осуществлялось преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму, на втором — коррекция цифровой записи, на третьем — обработка откорректированных данных на ЭВМ.

На первом этапе весьма важно правильно выбрать частоту квантования сигнала, во избежание недопустимой потери информации. Ее выбрали равной 0,555 МГц. Один элемент квантования соответствовал $4,1 \times 3,5$ мкм на фотопленке, что при высоте полета в 46 км над поверхностью Луны составляло 30 см на местности. Устройство для преобразования аналоговой записи изображения в цифровую обеспечивало 64 уровня оптической плотности изображения. Цифровые данные для кратковременного хранения записывались на высокоскоростной магнитный барабан, а затем переписывались на магнитную ленту. После коррекции записанные данные подвергались обработке на ЭВМ, а затем фиксировались на фотобумаге, 35-миллиметровой фотопленке или отображались на экране электронно-лучевой трубки. Все это

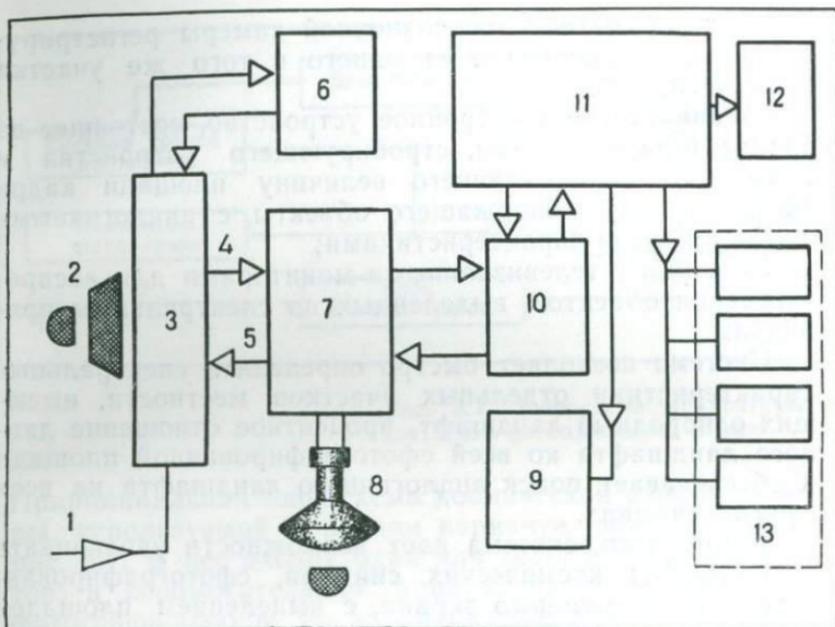


Рис. 2.16. Автоматизированная система обработки фотонформации:

1 — входной сигнал; 2 — оператор; 3 — входное устройство; 4 — запись видеосигналов; 5 — воспроизведение видеосигналов; 6 — блок передачи временных сигналов; 7 — блок управления данными; 8 — индикатор на электронно-лучевой трубке и регистрирующая фотокамера; 9 — блок записи на магнитную ленту; 10 — синхронизатор; 11 — ЭВМ; 12 — прочие блоки; 13 — магнитные барабаны

позволило не только получить довольно высококачественные фотоснимки, но и, пользуясь аналитическим графопостроителем, провести точную фотограмметрическую обработку снимков и составить по ним крупномасштабную топографическую карту.

В работе [67] приведена схема системы автоматизированной обработки результатов спектрозонального фотографирования, основными частями которой являются:

1) цветная телевизионная камера, которая при помощи сканирующего устройства считывает и производит радиометрические измерения участков изображения, зафиксированных на цветном спектрозональном снимке (или на трех аналогичных черно-белых диапозитивах с различной спектральной чувствительностью и полученных с разными светофильтрами). И в том, и в другом

случаях на выходе телевизионной камеры регистрируются три видеосигнала от одного и того же участка местности;

2) аналоговое электронное устройство, состоящее из анализатора признаков, стробирующего устройства и сумматора, показывающего величину площади кадра (в процентах), содержащего объекты с аналогичными спектральными характеристиками;

3) экран с телевизионными мониторами для воспроизведения объектов, выделенных по спектральным признакам.

Система позволяет быстро определить спектральные характеристики отдельных участков местности, имеющих однородный ландшафт, процентное отношение данного ландшафта ко всей сфотографированной площади и обеспечивает поиск аналогичного ландшафта на всех других снимках.

Кроме того, система дает возможность увеличивать изображения космических снимков, сфотографированных с телевизионного экрана, с выделением площадей однородного ландшафта, переводить оптическое изображение в цифровую форму и обрабатывать полученную информацию, представляя результаты обработки в виде сводных справочных таблиц [67].

Глава 3. УСТРОЙСТВО И РАСЧЕТ МЕХАНИЗМОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ФОТОАППАРАТА

3.1. Схема автоматического фотоаппарата и назначение основных механизмов

Фотоаппарат является основной частью аппаратуры, предназначенной для фотографирования из космоса. Эта аппаратура используется в двух вариантах: либо с доставкой фотопленки на Землю, либо с обработкой фотопленки на борту космического фотоаппарата и последующей передачей изображения по радиоканалу.



Рис. 3.1. Блок-схема аппаратуры с доставкой фотопленки на Землю

Принципиальная блок-схема космической фотоаппаратуры, используемой в первом варианте, представлена на рис. 3.1. В нее входит один или несколько фотоаппаратов и вспомогательная аппаратура, обеспечивающая фотографирование по заданной программе [69, 70] и доставку контейнера с пленкой на Землю. Блок-схема аппаратуры, используемой во втором варианте, включает один или несколько фотоаппаратов и программно-командный блок, а также блоки считывания изображения и передачи изображения на Землю (рис. 3.2).

Рис. 3.2. Блок-схема аппаратуры с обработкой фотопленки на борту



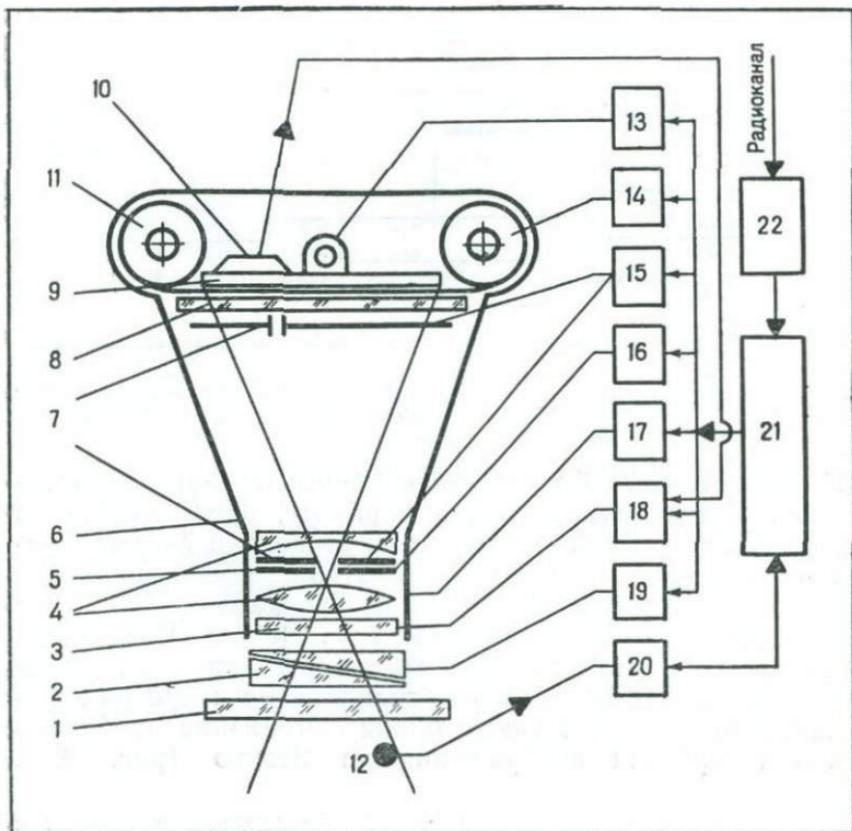


Рис. 3.3. Схема автоматического фотоаппарата:

1 — защитное стекло; 2 — клиновой компенсатор сдвига; 3 — светофильтр; 4 — объектив; 5 — диафрагма; 6 — камера; 7 — шторный затвор; 8 — предметное стекло; 9 — прижимной стол; 10 — датчик автоматической фокусировки; 11 — катушка с пленкой; 12 — датчик освещенности объекта; 13 — механизм выравнивания фотопленки; 14 — механизм протяжки фотопленки; 15 — механизм управления затвором; 16 — механизм управления диафрагмой; 17 — механизм автоматической фокусировки; 18 — механизм смены светофильтров; 19 — механизм компенсации сдвига изображения; 20 — автоматический экспозиметр; 21 — командно-программное устройство; 22 — приемное устройство команд управления

Последние блоки, как правило, состоят из быстродействующей проявочной машины, аппаратуры преобразования негативного изображения в электрические сигналы, радиотелевизионной аппаратуры передачи изображения на Землю.

Блочно-принципиальная схема космической аппаратуры представлена на рис. 3.3. Она включает [54] собственно фотоаппарат (или несколько фотоаппаратов) и обеспечивающие механизмы. Таким образом, космическим фотоаппаратом можно назвать автоматический оптико-механический прибор с управлением от программно-командного блока, предназначенный для фотографирования поверхности планет с больших высот.

Фотоаппарат имеет следующие основные узлы: светонепроницаемую камеру, являющуюся корпусом аппарата и защищающую фотопленку от воздействия постороннего света и другого облучения; фотографический объектив, с помощью которого проектируется изображение объекта на светочувствительный слой фотоматериала; фотографический затвор, отмеривающий время экспонирования при фотографировании; кассету, в которой помещается фотоматериал. Автоматическая работа фотоаппарата обеспечивается целым рядом механизмов и устройств, важнейшее из которых — командно-программное устройство, задающее режим работы фотоаппарата.

Корпус фотоаппарата. Корпус изготавливается из легких алюминиевых сплавов, обладающих малой плотностью и большой прочностью (электрона, силумина, дюралю). В корпусе фотоаппарата размещаются светофильтры, объектив, затвор, механизм автоматической установки диафрагмы и выдержки. Корпус подвержен воздействию окружающей температуры, что приводит к изменению фокусного расстояния в соответствии с температурным коэффициентом линейного расширения металла α . При расчетах необходимо учитывать возможную расфокусировку, используя следующее выражение

$$\Delta f = \alpha (t^\circ - t_0^\circ) f;$$

где t° — температура воздуха в носителе, t_0° — температура, при которой определены постоянные фотоаппарата.

Приведем температурные коэффициенты линейного расширения некоторых сплавов.

Силумин	$2,3 \cdot 10^{-5}$	Электрон	$2,6 \cdot 10^{-5}$
Дюралюминий	$2,0 \cdot 10^{-5}$	Бронза	$1,7 \cdot 10^{-5}$
Инвар	$1,7 \cdot 10^{-6}$		

Фотографический объектив. Объектив является одним из важнейших узлов, в значительной мере опреде-

ляющим качество получаемого изображения. От его размеров зависят размеры и масса фотоаппарата в целом. Объектив состоит из нескольких линз и зеркал. Он должен иметь высокую светосилу, незначительные aberrации, обеспечивать наибольший контраст оптического изображения в фокальной плоскости.

Фотографический затвор. Затвор обеспечивает требуемое время экспонирования и устанавливается либо между линзами, либо перед фотопленкой. Он должен обладать способностью за время выдержки пропустить через объектив возможно большее количество световой энергии.

Кассетная часть фотоаппарата. Она обеспечивает помещение фотоматериала, а также его транспортировку и выравнивание. Кассетная часть состоит из подающей и наматывающей катушек, предметного стола и прижимного стола, а также приводов. Обычно кассетная часть выполняется съемной. Расчет количества фотопленки, наматываемой на катушку, производится по формуле

$$L = k \frac{\pi}{\delta} (r_k^2 - r_0^2),$$

где δ — толщина фотопленки; r_0 и r_k — соответственно начальный и конечный радиусы намотки, k — коэффициент плотности намотки пленки.

Обеспечивающие механизмы. Механизм выравнивания фотопленки 13 (см. рис. 3.3), необходимость которого очевидна, так как хранящаяся в катушках пленка при разматывании стремится принять прежнюю форму, т. е. скручивается. Это приводит к тому, что пленка будет лежать не в плоскости прижимной рамки, и изображение получится нерезким. Величина кружка нерезкости, характеризующая изображение какого-либо точечного объекта, может быть рассчитана по формуле

$$\delta = x \frac{D}{f},$$

где x — отставание пленки от плоскости прижимной рамки; D — действующее отверстие; f — фокусное расстояние.

В случае если допустимая нерезкость $\delta_{\text{доп}} = k$, можно определить необходимую точность выравнивания пленки, используя соотношение

$$x \leq \frac{k}{\frac{D}{f} \cdot R_c},$$

где R_c — разрешающая способность фотосистемы; k — коэффициент, определяющий требования к качеству выравнивания.

Выравнивание пленки осуществляется либо натяжением, либо прижатием ее к предметному столу механическим или пневматическим способом.

Механизм протяжки пленки 14 (см. рис. 3.3) предназначен для замены экспонированного участка пленки незэкспонированным. Это обеспечивается приводом, управляющим наматывающей катушкой, и измерительным валиком. Механизм протяжки за время одного цикла работы должен отмерить и перемотать вполне определенное количество пленки. Длина транспортируемого участка l_k определяется углом поворота φ_k и радиусом тянущего звена r , т. е. наматывающей катушки или измерительного валика

$$l_k = r\varphi_k.$$

Так как радиус наматывающей катушки в процессе работы увеличивается, то регулируют длину кадра, как правило, по углу поворота измерительного валика, что позволяет сохранить промежуток между кадрами неизменным по всей длине пленки. Современные фотоаппараты работают по импульсной схеме, т. е. все операции по подготовке очередного кадра выполняются в течение времени $T_{\text{ц}}$, которое меньше интервала съемки $T_{\text{в}}$. После перемотки очередного кадра механизм протяжки останавливается. Поскольку запас пленки делается большим, а время цикла протяжки весьма коротким, то необходимо компенсировать большие инерционные усилия. С этой целью используют механизмы с накоплением пленки. Два накопителя — на входе и на выходе экспонетрического окна — дают возможность обеспечить движение пленки в импульсном режиме лишь для небольшого ее участка. Поэтому инерционные усилия, действующие на пленку, невелики, и это исключает ее механическое повреждение.

Механизм управления затвором 15 включает в себя привод, обеспечивающий взведение затвора, устройство для обеспечения заданных выдержек, спусковое устройство. Этот механизм предназначен для пропускания светового потока в заданный промежуток времени к светочувствительному слою.

Механизм управления диафрагмой 16 (см. рис. 3.3) состоит из датчика и привода, обеспечивающего перемещение объектива вдоль оптической оси до совмещения плоскости наилучшего изображения с плоскостью светочувствительного слоя. В принципе для выработки управляющего сигнала могут использоваться как изображения ландшафта, так и стандартные тест-объекты, встроенные в фотоаппарат (работающие по внутреннему эталону). Работа этих механизмов аналогична работе глаза, который находит плоскость наилучшего изображения объекта, непрерывно изучая распределение энергии в изображении при различных расфокусировках. Механизм состоит из сканирующего элемента со структурой, соответствующей предельно разрешимой детали изображения, устройства, обеспечивающего сканирование изображения по глубине, приемника излучения, логической схемы обработки полученного сигнала.

Механизм смены светофильтров 18 состоит из диска или кассеты с набором фильтров и шагового двигателя, обеспечивающего автоматическую смену фильтров по получаемым командам.

Механизм компенсации сдвига изображения 19 (см. рис. 3.3) предназначен для компенсации углового и линейного смещений изображения во время экспонирования, возникающих из-за изменения пространственного положения носителя и приводящих к понижению качества изображения. Сдвиг изображения точек местности относительно краев прижимной рамки (или чувствительного слоя) возникает из-за движения космического аппарата по орбите с линейной скоростью, вращения планеты, изменения высоты полета, изменения углов тангажа, рыскания и крена. Однако наибольшая погрешность вызывается движением космического аппарата по орбите и поэтому все механизмы, как правило, конструируются с расчетом компенсации линейного сдвига изображения, в принципе уменьшить

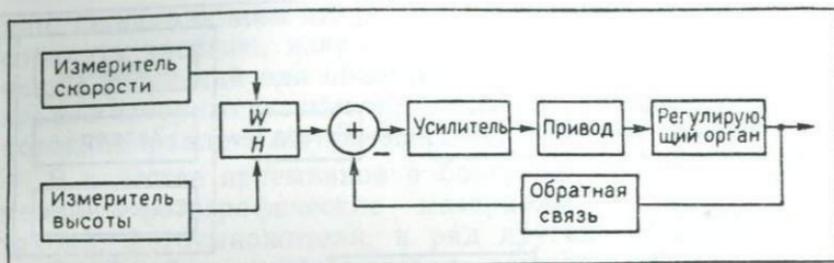


Рис. 3.4. Блок-схема управления механизмом компенсации сдвига изображения

влияние которого можно либо уменьшением выдержки, либо уменьшением скорости изображения. Уменьшение выдержки не всегда приемлемо, поэтому принимаются меры по уменьшению скорости изображения относительно фотопленки.

Допустимая величина относительной декомпенсации может быть рассчитана по формуле

$$\xi_{\text{доп}} = \frac{H}{2R_c W t_0},$$

где H — высота носителя над планетой; R_c — разрешающая способность фотосистемы; f — фокусное расстояние; t_0 — выдержка.

Блок-схема механизма компенсации линейного сдвига изображения приведена на рис. 3.4. Данная схема обеспечивает соблюдение равенства скорости изображения и скорости компенсации, которые определяются высотой и скоростью носителя, а также фокусным расстоянием оптической системы. Вид регулируемого органа зависит от способа компенсации — это либо оптические клинья, либо измерительный валок механизма протяжки фотопленки. Требования к точности определения исходных данных V и H , а также к системе управления обусловлены характеристиками качества изображения фотосистемы и требованиями к фотоинформации.

Автоматический экспозиметр 20 предназначен для получения оптимальной оптической плотности негатива, которая определяется экспозицией, т. е.



Рис. 3.5. Блок-схема автомата экспозиции

произведением освещенности фотослоя на величину выдержки. Для поддержания заданного значения экспозиции необходимо знать независимые от фотоаппарата переменные: освещенность ландшафта и его средний коэффициент отражения или яркости, а также коэффициент пропускания атмосферы. В соответствии с этим регулирование экспозиции осуществляется либо по освещенности, либо по яркости ландшафта. В качестве датчика в этом случае используется фотозлемент 12 (см. рис. 3.3). Блок-схема регулирования экспозиции приведена на рис. 3.5. Для поддержания нужной экспозиции изменяют либо действующее отверстие, либо выдержку затвора, либо меняют светофильтры.

Командно-программное устройство 21 (см. рис. 3.3) предназначено для включения и выключения фотоаппаратов и поддержания требуемого темпа работы. Это устройство работает либо автономно по заранее разработанным программам, либо с участием космонавтов (а также по командам с Земли).

3.2. Фотографические объективы

Оптические системы, применяемые в бортовой аппаратуре искусственных спутников Земли и космических аппаратов, весьма разнообразны как по принципиальным схемам и оптическим свойствам, так и по конструк-

ции. Однако общим является их основное назначение — собирать энергию, излучаемую или отражаемую источником излучений или объектом наблюдения, и, преобразуя ее в изображение или определенной формы лучистый поток, направлять на приемник излучений.

В качестве приемников в бортовой аппаратуре применяют фотографические материалы, телевизионные трубки, фотоумножители, и ряд других устройств.

Основной задачей, которая решается в различных видах бортовой аппаратуры с помощью оптических систем, является воспроизведение изображения объекта наблюдения в определенном масштабе, с целью последующей его регистрации с помощью фотографических или телевизионных устройств.

Оценка свойств, качества и эффективности действия оптических систем может быть успешно проведена только с помощью ряда специальных характеристик. Опыт фотографического приборостроения и эксплуатации фото- и фототелевизионной аппаратуры дает основание [18] разделить все используемые для этого характеристики на следующие группы: габаритные, энергетические, абберационные, пространственно-частотные или передаточные, технико-экономические и эксплуатационные.

Габаритные характеристики определяют основные оптические свойства и параметры системы, такие, как положение и размер изображения, характер и степень воздействия на проходящие через систему пучки лучей, величину и форму поля зрения системы и др.

Характеристики этой группы определяют так называемые «оптические габариты», а именно, длину системы, световые (рабочие) диаметры ее основных оптических элементов и их взаимное расположение, величину и знаки фокусных расстояний линзовых компонентов и др.

Энергетические характеристики определяют свойства оптической системы как преобразователя лучистой энергии. Применительно к системам, работающим в видимом диапазоне электромагнитного спектра, их называют светотехническими. От этой группы

характеристик зависит количество лучистой энергии, пропускаемое оптической системой и используемое для формирования изображения, а также ее распределение в плоскости изображения. Совокупность основных габаритных и энергетических характеристик определяет такой важный параметр системы, как ее дальность действия.

Аберрационные характеристики служат для оценки качества изображения в зависимости от габаритных характеристик системы и конструктивных параметров ее оптических деталей, таких, как взаимное положение, радиусы кривизны, толщина и сорт оптического материала. Аберрационные характеристики позволяют определить, насколько оптическая система искажает направление и спектральный состав проходящих пучков лучей, что в конечном счете позволяет оценить разрешающую способность реальной системы, характер и величину искажений размеров и формы изображения.

Пространственно-частотные характеристики начали использовать в практике проектирования и испытания фотографических систем сравнительно недавно, в связи с быстрым развитием автоматических и полуавтоматических систем космической техники. Разработка теории и методов применения этой группы характеристик для оценки оптических систем вызвана необходимостью согласования их выходных параметров, определяющих свойств и качество изображения с характеристиками электронных систем усиления и последующей обработки полученной информации. Этим объясняется большая аналогия в терминах и методах расчета между аппаратом пространственно-частотных характеристик и теорией автоматического регулирования.

Эти характеристики находят все более широкое применение для испытания автоматической фотоаппаратуры и оценки качества фотографических изображений.

С помощью пространственно-частотных характеристик определяют изменение разрешающей способности оптических систем и качество получаемых изображений в зависимости от условий сканирования (или движения объекта), степени и характера изменения контраста, влияния неоднородностей фонов и других факторов, со-

державших изменение частотно-временных условий формирования изображения.

Технико-экономические и эксплуатационные характеристики позволяют оценить качество, надежность и экономичность конструктивного оформления, эффективность данной аппаратуры в процессе эксплуатации, а также методы проверки и контроля ее параметров.

Основные характеристики всех рассмотренных выше групп определяются при разработке технических условий на новую фото- и фототелевизионную аппаратуру и составляют содержание технического задания на ее проектирование.

В современной космической фотографической технике применяются объективы, состоящие из большого числа линз (иногда до 8). Увеличение числа линз объективов вызывается стремлением улучшить характеристики объектива как оптической системы и особенно качества, даваемого объективом изображения. В отношении качества изображения к фотографическим объективам предъявляются более жесткие требования, чем к объективам телескопических систем. Это объясняется тем, что недостатки объектива зрительной системы могут быть частично компенсированы следующими за объективом оптическими системами, включая глаз человека. Что касается фотографического объектива, то изображение, даваемое им, запечатлевается светочувствительным слоем одновременно по всему полю и не может быть в дальнейшем исправлено. К тому же на снимке погрешности изображения более заметны, чем при наблюдении визуально. Эти обстоятельства обуславливают высокие требования к фотообъективам как оптическим системам. Применение фотографии столь широко и многообразно, что несмотря на значительные успехи современной оптической техники в области расчета фотографических объективов, не может быть создан один такой объектив, который удовлетворял бы всем видам съемок. Таким образом, в зависимости от особенностей и требований того или иного вида съемок применяются фотографические объективы различных типов (ортоскопические, широкоугольные, телеобъективы и т. д.).

Фотографические объективы принято характеризовать:

— фокусным расстоянием f' ;

— относительным отверстием $q = \frac{D}{f'}$;

— полем зрения $2W$;

— глубиной резкости;

— качеством изображения (исправлением аберраций и разрешающей силой).

Фокусное расстояние объектива определяет масштаб снимка, что особенно важно знать при космической съемке, выполняемой с измерительной целью. Чем больше фокусное расстояние объектива, тем больше масштаб снимка. Так, например, масштаб снимка равен

$$\frac{1}{m} = \frac{f'}{H},$$

где H — значение высоты фотоаппарата над средней уровневой поверхностью.

Из оптики известно, что линейное увеличение простой оптической системы равно (опуская знаки)

$$\beta' = \frac{l'}{l} = \frac{f'}{x},$$

где l' — величина изображения предмета; l — величина предмета; f' — фокусное расстояние объектива; x — расстояние от предмета до передней фокальной плоскости объектива (можем считать от объекта съемки до объектива).

Таким образом, величина линейного увеличения и есть масштаб снимка $\beta' = \frac{l'}{m}$.

Увеличение фокусного расстояния объектива фотоаппарата увеличивает и масштаб снимка. Увеличение высоты, с которой производится фотографирование, в современных условиях потребовало для сохранения прежних масштабов снимков значительного увеличения фокусных расстояний фотообъективов (до 1500—3000 мм).

Применение объективов с большими фокусными расстояниями сопряжено с явлением дефокусировки вследствие влияния изменения температуры и давления окру-

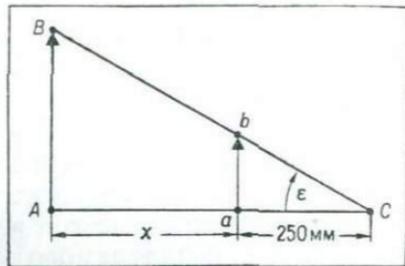


Рис. 3.6. К определению расстояния наилучшего зрения

жающей среды. При работе с фотоаппаратом в различных условиях приходится учитывать расфокусировку.

Для того чтобы при рассматривании снимка изображение предмета было видно под тем же углом, под которым наблюдается сам объект невооруженным глазом (с расстояния съемки), фокусное расстояние объектива фотоаппарата должно быть равно расстоянию наилучшего зрения, т. е. 250 мм. Это очевидно из следующего рассуждения.

На рис. 3.6 в точке C помещен глаз наблюдателя, где AB — объект съемки; ab — величина его изображения на снимке. Удаление этого изображения от глаза 250 мм. При наблюдении предмета и его изображения под одним углом справедливо равенство

$$\frac{AB}{x+250} = \frac{ab}{250} \quad \text{или} \quad \frac{ab}{AB} = \frac{250}{x+250},$$

но

$$\frac{ab}{AB} = \frac{l'}{l} = \frac{f'}{x+250} = \frac{250}{x+250}.$$

Таким образом, f' объектива должно быть равно 250 мм.

Если $f' = 1000$ мм, это означает, что рассматривание фотоснимков, полученных таким образом, будет равносильно наблюдению объектов съемки в прибор с четырехкратным увеличением.

Относительным отверстием фотографического объектива называется отношение величины его действующего отверстия к фокусному расстоянию $q = \frac{D}{f'}$.

Под действующим отверстием фотографического объектива понимается входной зрачок фотообъектива,

т. е. изображение действующей диафрагмы через объектив в обратном ходе лучей. Если диафрагма устанавливается за линзами или между линзами объектива, а так обычно и бывает, то величина действующего отверстия и величина диафрагмы отличаются друг от друга.

Величина относительного отверстия фотообъектива определяет его светосилу, т. е. способность создавать на экране изображение той или иной яркости. Яркость изображения, создаваемого объективом, пропорциональна квадрату его действующего отверстия и обратно пропорциональна квадрату расстояния от объектива (как источника света) до изображения, т. е. квадрату фокусного расстояния. Если светосилу объектива обозначить через E , то

$$E = \tau_{об} \frac{D^2}{f'^2} = \tau_{об} q^2,$$

где $\tau_{об}$ — коэффициент пропорциональности; q^2 — квадрат относительного отверстия.

Все объективы делят по величине относительного отверстия на четыре группы:

- 1) малосветосильные $q < 1 : 9$;
- 2) нормальные от $1 : 9$ до $1 : 6,3$;
- 3) светосильные от $1 : 5,8$ до $1 : 3,5$;
- 4) сверхсветосильные $q > 1 : 2,8$.

Часто фотообъективы имеют диафрагмы, позволяющие изменять величину действующего отверстия, тогда на оправе диафрагмы наносится шкала относительных отверстий объектива. Пользуясь этой шкалой, можно изменять светосилу и другие важные характеристики объектива.

В фотообъективах применяются диафрагмы следующих типов: вставные — это латунные пластинки с круглыми отверстиями различного диаметра; вращающийся диск с отверстиями, или револьверная диафрагма, при установке одного из отверстий которой против объектива диск поворачивается на некоторый угол и закрепляется. Другие отверстия находятся вне поля зрения; присовые (рис. 3.7) — состоят из ряда эбонитовых латунных или стальных лепестков, форма которых ограничена дугами кругов.

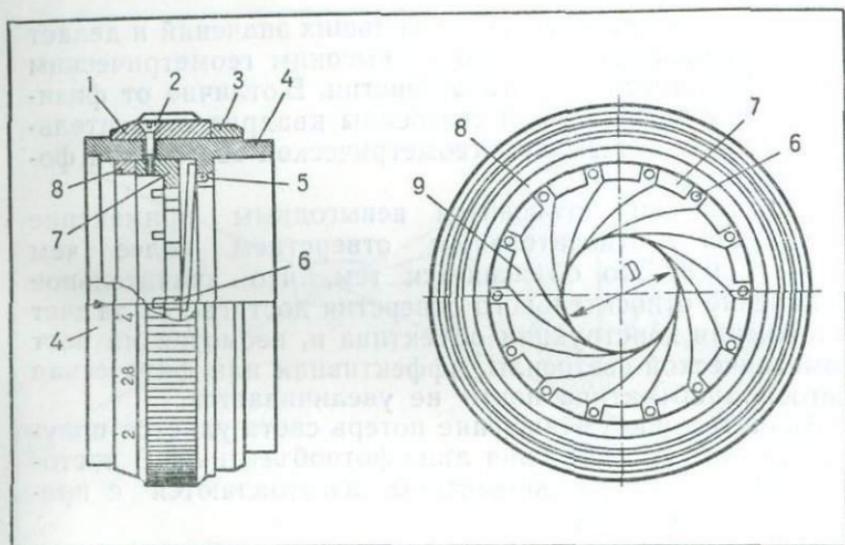


Рис. 3.7. Схема конструкции ирисовой диафрагмы:

1 — установочное кольцо; 2 — винт; 3 — резьбовое кольцо; 4 — корпус; 5 — осевой штифт; 6 — ведущий штифт; 7 — крышка; 8 — резьбовое кольцо; 9 — лепесток

Ирисовая диафрагма является универсальной. Подвижное кольцо в ней несет индекс, а неподвижное — шкалу относительных отверстий объектива.

Разбивка шкал диафрагм производится по определенной системе.

В настоящее время принят ряд: 1 : 0,7; 1 : 1; 1 : 1,4; 1 : 2; 1 : 2,8; 1 : 4; 1 : 5,6; 1 : 8; 1 : 11 и т. д.

При переходе от одного деления шкалы к другому обеспечивается соотношение светосил, равное двум. Таким образом, уменьшая диафрагму на одно деление шкалы, необходимо увеличить время экспонирования, при других равных условиях, вдвое.

Коэффициент пропорциональности $\tau_{об}$, входящий в выражение для светосилы фотообъектива, характеризует ослабление светового потока в линзах объектива и является коэффициентом пропускания. Величина коэффициента пропускания зависит от числа линз объектива, сорта стекла и характера обработки поверхностей линз. Таким образом, учет потерь света производится коэффициентом пропускания, характеризующим физическую

светосилу, который достигает больших значений и делает подчас бесполезной погоню за высоким геометрическим значением относительного отверстия. В отличие от физической или эффективной светосилы квадрат относительного отверстия называют геометрической светосилой фотообъектива.

Практически становится невыгодным применение объективов с относительным отверстием более чем $1:9 \div 1:0,8$. Это объясняется тем, что значительное увеличение относительного отверстия достигается за счет усложнения конструкции объектива и, несмотря на рост геометрической светосилы, эффективная или физическая светосила объектива почти не увеличивается.

Значительное уменьшение потерь света удастся получить за счет просветления линз фотообъектива. В настоящее время все фотообъективы изготавливаются с просветленной оптикой.

Поле зрения фотографического объектива характеризуется размерами не всего изображения, которое может быть построено объективом на экране, а той его частью, в пределах которой изображение получается наиболее резким и равномерно освещенным. Эта часть изображения используется при фотографировании и ею определяется наибольший размер диагонали кадра. Поле зрения измеряется углом 2β (рис. 3.8) между лучами, проведенными из задней узловой точки объектива к краям поля зрения.

В некоторых источниках допускается другая трактовка величины поля зрения. Под полем зрения понимают все изображение, которое строится объективом, а не его полезную часть. Для характеристики полезной части изображения вводятся понятия — поле изображения и угол изображения. Мы будем придерживаться терминологии, аналогичной принятой для телескопических систем.

В зависимости от величины угла поля зрения все фотообъективы можно разделить на объективы с малым полем зрения (до 40°); с нормальным полем зрения (от 40 до 60°); широкоугольные, с полем зрения ($>60^\circ$).

Создание широкоугольных объективов наталкивается на значительные трудности, так как с удалением точек от центра снимка резко снижается освещенность поля.

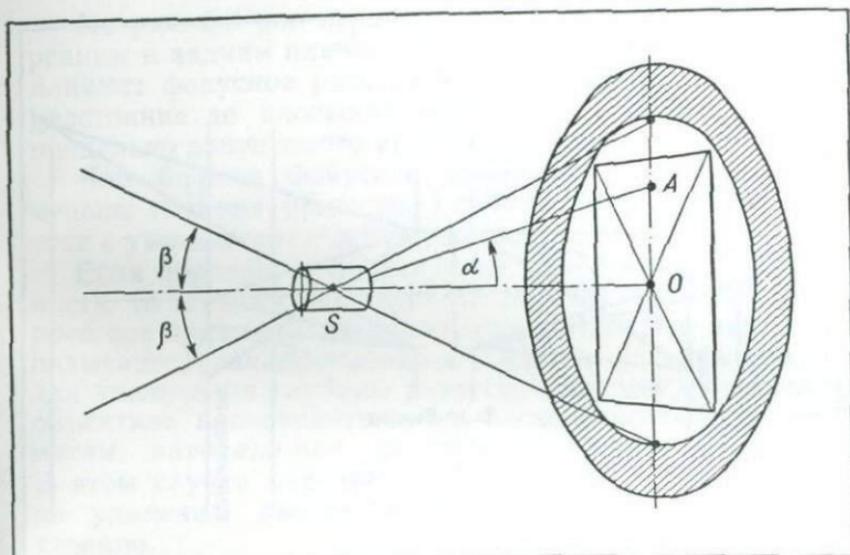


Рис. 3.8. Поле зрения фотоаппарата

На рис. 3.8 показана точка A , лежащая вне центральной части снимка. Светоактивность для точки A , удаленной от центра снимка, уменьшается в $\cos^4\alpha$ раз, т. е. $I = I_0\cos^4\alpha$. Такое понижение освещенности на краю поля зрения ограничивает развитие и применение широкоугольной оптики. Несмотря на это угол поля зрения современных широкоугольных объективов достигает 150° и более.

Большие заслуги в области создания советских широкоугольных светосильных объективов принадлежат доктору технических наук М. М. Русинову. Им созданы уникальные широкоугольные фотообъективы типа «Руссар», намного опередившие достижения иностранной оптики. М. М. Русинову удалось создать объективы, для которых падение освещенности на краю поля зрения пропорционально кубу косинуса угла падения, а не его четвертой степени.

Глубина резкости фотографического объектива характеризует свойство объектива изображать достаточно резко объекты, различно удаленные по глубине друг от друга. Плоскости резкого изображения или картинной плоскости фотообъектива соответствует в про-

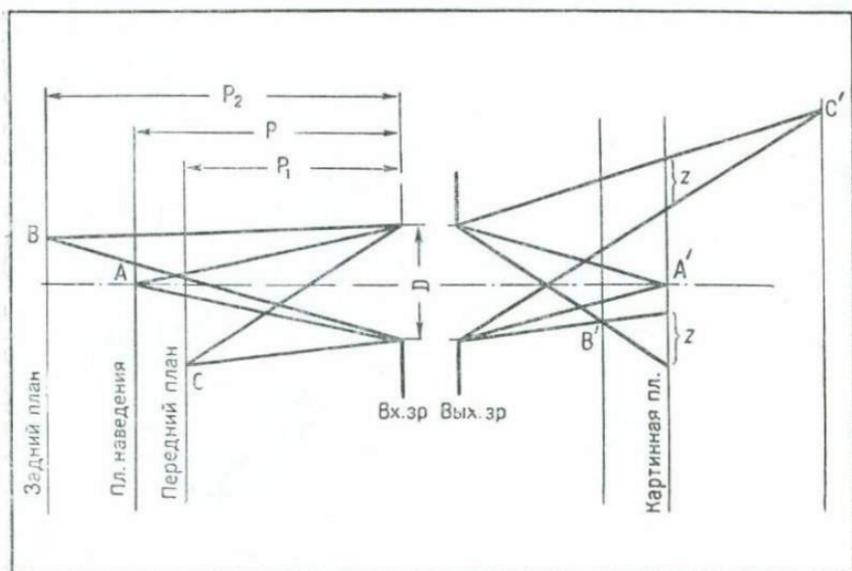


Рис. 3.9. Определение глубины резкости

странстве объектов единственная сопряженная плоскость, которая называется плоскостью наведения или установки. Все точки объектов, лежащие в плоскости наведения, изображаются точками в картинной плоскости. Точки объектов, которые находятся позади или впереди плоскости наведения, изобразятся на светочувствительном слое в виде кружков рассеяния (рис. 3.9).

Очевидно, если размеры кружков рассеяния не будут превосходить величин, разрешаемых глазом человека, то они будут восприниматься точками. Для нормального глаза угловой размер такого кружка равен $1'$, что соответствует при наблюдении с расстояния 250 мм линейной величине несколько меньше 0,1 мм.

Таким образом, благодаря несовершенству глаза на фотографическом снимке удастся изобразить достаточно резко точки предметов, расположенные в некотором удалении за и перед плоскостью наведения. *Расстояние, в пределах которого все предметы, независимо от удаления, будут изображаться объективом резко, называется глубиной резкости.*

На рис. 3.9 оно ограничено двумя плоскостями — передним и задним планом. На величину глубины резкости влияют: фокусное расстояние, действующее отверстие, расстояние до плоскости наводки и, наконец, диаметр предельно допустимого кружка рассеяния.

Чем больше фокусное расстояние объектива, тем меньше глубина резкости. Глубина резкости увеличивается с уменьшением действующего отверстия.

Если произвести фокусировку объектива на бесконечность, то всегда существует расстояние, начиная с которого все предметы изображаются резко. Это расстояние называется *гиперфокальным*. Опытным путем установлено, что для увеличения глубины резкости выгоднее фокусировку объектива производить не на бесконечность, а по предметам, находящимся на гиперфокальном расстоянии. В этом случае передний план находится от объектива на удалении, равном половине гиперфокального расстояния.

Гиперфокальное расстояние P_r может быть определено по формуле

$$P_r = \frac{f'^2}{zn}, \text{ мм,}$$

где f' — фокусное расстояние объектива, мм; z — диаметр кружка рассеяния, мм; n — знаменатель относительного отверстия.

Границы глубины резкости P_1 и P_2 могут быть определены по следующим формулам

$$P_1 = \frac{P(P_r + f')}{P_r + P};$$

$$P_2 = \frac{P(P_r + f')}{P_r - P},$$

где P — расстояние до снимаемого объекта; P_r — гиперфокальное расстояние для данной диафрагмы.

Качество изображения, даваемое фотообъективом, определяется величиной остаточных аберраций и его разрешающей силой.

Сферическая аберрация для фотообъективов, как и для объективов телескопических систем, характеризуется значениями ее продольной и поперечной составляющей. Наличие сферической аберрации у фотообъектива приводит к тому, что точка изображается объективом в

виде кружка рассеяния, диаметр которого определяется поперечной сферической aberrацией. С увеличением значения сферической aberrации уменьшается разрешающая сила фотообъектива и сильно ухудшается качество изображения. Опыт показывает, что величина кружка рассеяния в изображении, даваемом фотообъективом с наиболее употребительным фокусным расстоянием, не должна быть более 0,1 мм. Для объектива с относительным отверстием 1:4,5 величина продольной сферической aberrации в этом случае будет равна 0,5—0,6 мм для лучей, входящих в объектив на высоте $0,7h$, где h — высота крайнего луча от оси системы.

Исправление сферической aberrации объектива еще не устраняет размытости изображения точки, расположенной вне оси системы. Для безaberrационного построения изображения точек, лежащих вне оси системы, объектив должен удовлетворять условию синусов. Нарушение этого условия приводит к aberrации комы, которая резко размывает изображения точек в наклонных лучах. Исправление комы у фотообъективов должно производиться особенно тщательно. Остаточная aberrация комы обычно не должна превышать 0,1 мм.

Aberrация астигматизма в фотообъективах проявляется в том, что плоскость, перпендикулярная к оптической оси, изображается бесконечно узкими пучками в виде двух кривых поверхностей, одна из которых называется меридиональной, а другая сагиттальной. Эти поверхности обычно не совпадают друг с другом и отклоняются от фокальной плоскости. Для характеристики значения астигматизма у фотообъектива строят графики зависимости положения фокусов меридиональных и сагиттальных лучей от угла входа пучка в систему.

На рис. 3.10 представлены графики астигматизма двух фотообъективов. На графиках по оси ординат отложены величины углов, а по оси абсцисс — отклонения фокусов меридиональных и сагиттальных лучей от фокальной плоскости объектива. На рис. 3.10, а показаны кривые для фотообъектива неисправленного в отношении астигматизма, а на рис. 3.10, б — кривые для объектива, у которого нет астигматизма при угле $2\beta = 27^\circ$, а для других углов он сведен к минимуму.

При устранении астигматизма очень важно не только приблизить друг к другу меридиональную и сагитталь-

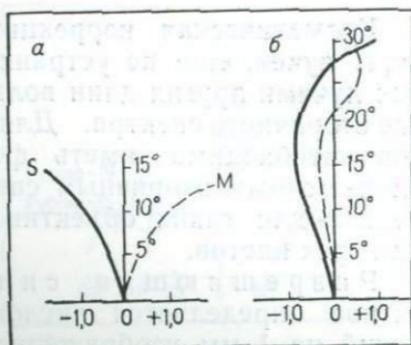


Рис. 3.10. Графики астигматизма

ную поверхности, но и добиться незначительного их отклонения от фокальной плоскости, т. е. устранить кривизну изображения.

Фотообъективы, исправленные в отношении астигматизма, называются анастигматами.

Важным условием, которому должно удовлетворять фотографическое изображение, является сохранение полного подобия объекта и изображения по всему полю, или так называемое условие ортоскопии. Нарушение ортоскопичности происходит вследствие аберрации, которая называется дисторсией. Устранение дисторсии очень важно для фотографических объективов, особенно для объективов, применяемых в фотограмметрических работах, при космической съемке и репродукционных работах.

Дисторсия фотографических объективов сильно изменяется от перемещения плоскости наводки, вследствие этого объективы должны всегда применяться при тех линейных увеличениях, для которых они рассчитаны.

Фотообъективам свойственны также хроматические аберрации. Устранение хроматических аберраций обычно достигается подбором стекол с различными дисперсиями. При этом хроматическая аберрация положения устраняется для двух лучей, например $S_{T'}$ (фиолетовая линия водорода $\lambda = 0,434,1$ мкм) и D (желтая линия натрия, $\lambda = 0,589,3$ мкм). Хроматическая коррекция может быть выполнена и для других лучей. Например, объективы, предназначенные для съемки на фотослоях, чувствительных к красным и инфракрасным лучам, коррегируются для лучей с длинами волн $\lambda = 0,810$ мкм и $\lambda = 0,589,3$ мкм.

Хроматическая коррекция, выполненная для одной пары лучей, еще не устраняет окрашивания изображения лучами других длин волн. Это явление носит название вторичного спектра. Для производства цветных снимков необходимо иметь фотообъективы с предельно уменьшенным вторичным спектром. Хроматическая коррекция для таких объективов должна быть выполнена для трех цветов.

Разрешающая сила фотографического объектива определяется числом раздельно различаемых линий на 1 мм изображения, полученного в картинной плоскости с помощью объектива. Разрешающая сила в большей мере связана с качеством изображения; чем выше последнее, тем больше и разрешающая сила.

Величина теоретической разрешающей силы фотообъективов определяется из дифракционной теории света так же, как и для объективов телескопических систем.

Практическая разрешающая сила объектива значительно ниже. Она определяется фотографированием специальной миры на светочувствительный слой с очень мелкозернистой эмульсией. То поле миры, на котором еще различимы отдельные элементы ее штрихов, определяет практическую разрешающую силу фотообъектива. Обычно большинство объективов дает лучшее разрешение в центре поля зрения, а с удалением от центра разрешающая сила уменьшается. Поэтому при определении разрешающей силы миры фотографируется различными участками поля зрения, а затем строится график разрешающей силы.

На рис. 3.11 приведены графики разрешающей силы ряда фотообъективов.

Иногда удается достигнуть равномерного распределения разрешающей силы по полю зрения. Это, например, относится к совершенному советскому широкоугольнику Руссар-19, рассчитанному М. М. Русиновым.

Если произвести съемку объективом, обладающим разрешающей силой, равной разрешающей способности фотослоя, то суммарное разрешение фотографической системы (объектив фотослой) будет в полтора раза меньше каждого из них.

Для полного использования разрешающей способности фотослоя необходимо, чтобы разрешающая способ-

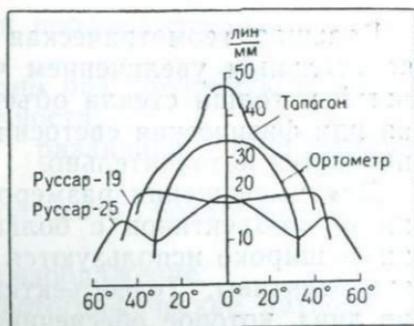


Рис. 3.11. Графики разрешающей силы

ность объектива по крайней мере в четыре раза превосходит разрешающую способность фотографического материала.

Опыт показывает, что при разрешающей способности фотосля $100 \frac{\text{лин}}{\text{мм}}$ суммарная разрешающая способность будет равна при

$$R_{об} = 200 \frac{\text{лин}}{\text{мм}} - 86 \frac{\text{лин}}{\text{мм}};$$

$$R_{об} = 100 \frac{\text{лин}}{\text{мм}} - 63 \frac{\text{лин}}{\text{мм}};$$

$$R_{об} = 50 \frac{\text{лин}}{\text{мм}} - 39 \frac{\text{лин}}{\text{мм}};$$

$$R_{об} = 25 \frac{\text{лин}}{\text{мм}} - 22 \frac{\text{лин}}{\text{мм}};$$

$$R_{об} = 10 \frac{\text{лин}}{\text{мм}} - 10 \frac{\text{лин}}{\text{мм}}.$$

Обратимся к классификации современных фотографических объективов. Все их можно разделить на следующие четыре группы: универсальные; широкоугольные, светосильные; телеобъективы.

К группе универсальных объективов относятся анастигматы с относительным отверстием $1:3,5 \div 7$ и с полем зрения до 60° . Широкоугольные объективы являются более поздним достижением оплотехники чем универсальные. К ним относятся объективы с полем зрения, большим $60-70^\circ$.

К числу светосильных объективов относятся объективы с относительным отверстием, большим $q=1:3,5$.

Большая геометрическая светосила c^2 достигается значительным увеличением числа отражающих поверхностей и толщи стекла объективов. Поэтому эффективная или физическая светосила их, с учетом потерь, увеличивается незначительно.

Для уменьшения размеров фотокамер при применении фотообъективов с большими фокусными расстояниями широко используются в современной фотографии телеобъективы. Телеобъектив имеет такое расположение линз, которое обеспечивает вынесение задней главной плоскости объектива вперед, в сторону пространства предметов. Относительное отверстие телеобъективов не превышает $q=1:4,5$, а поле зрения $2\beta=30^\circ$. Телеобъективы могут быть выполнены и в виде зеркально-линзовых систем.

Зеркально-линзовые объективы не дают хроматизма и при сравнительно небольших габаритах позволяют получить большие фокусные расстояния. В таблице (прил. 3) приведены основные характеристики современных фотообъективов.

3.3. Затворы фотоаппаратов

Затвор является одним из основных элементов всякого фотографического аппарата. Роль затвора сводится к регулированию экспозиции.

В общем случае выбор продолжительности экспонирования или выдержки зависит от назначения фотоаппарата, условия освещения объектов, светочувствительности фотослоя, светосилы объектива и других причин. Так, например, при наличии относительной скорости между объектом съемки и фотоаппаратом величина выдержки будет определяться также допустимым сдвигом изображения, который произойдет за время экспонирования. Фотоаппараты, предназначенные для съемки при больших освещенностях, должны обеспечивать экспонирование фотослоя весьма непродолжительное время. Для перекрывания доступа света к светочувствительному слою в этих аппаратах применяются затворы в виде специальных механических устройств.

Затвор должен удовлетворять [16] следующим основным требованиям:

обеспечивать изменения продолжительности освещения;

повторять сколько угодно раз требуемую выдержку с достаточной степенью точности;

надежно работать в различных температурных условиях;

за время работы пропускать возможно большее количество света;

не вносить искажения в изображение.

По месту установки фотографические затворы делятся на предобъективные, междулинзовые и устанавливаемые у светочувствительного слоя.

По конструктивному оформлению все фотозатворы можно разделить на щелевые или шторно-щелевые; жалюзи; центральные.

Щелевые затворы пропускают свет к светочувствительному слою через щель, выполненную чаще всего в светонепроницаемой шторке, пробегающей с определенной скоростью через световой поток. В свою очередь они разделяются на затворы, у которых шторка со щелью располагается в непосредственной близости от светочувствительного слоя, и на затворы, располагаемые у объектива.

Затворы жалюзи устанавливаются главным образом между линзами и представляют собой ряд узких лепестков, поворачивающихся при экспонировании фотослоя вокруг осей перпендикулярных к направлению светового потока. Когда плоскости лепестков совпадают с направлением оптической оси объектива, затвор полностью открыт. Наибольшее распространение получили затворы жалюзи с параллельно расположенными лепестками.

Центральные затворы пропускают свет с помощью лепестков, которые начинают открывать отверстие от центра и у центра сходятся при закрывании затвора.

Таким образом, при работе любого затвора световое отверстие не открывается и не закрывается мгновенно, доступ света к фотослою подчиняется определенному закону.

Фотозатворы принято характеризовать следующими основными параметрами:

диапазоном времени экспонирования;

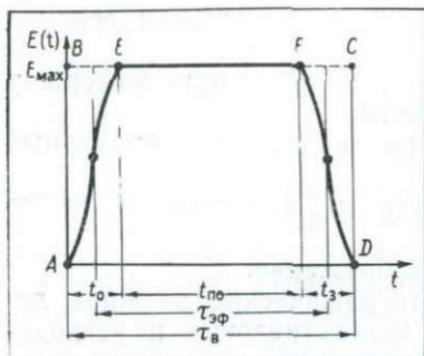


Рис. 3.12. График работы фотозатвора

оптическим коэффициентом полезного действия (коэффициентом светоотдачи); световым отверстием.

При работе затвора различают фактическое и приведенное время экспонирования.

Фактическое время экспонирования $\tau_{\text{ф}}$ определяется временем прохождения светового потока через затвор.

Приведенное время экспонирования $\tau_{\text{пр}}$ — время, в течение которого идеальный затвор пропускает столько же световой энергии, сколько и исследуемый. На затворах обычно указывается фактическое время экспонирования. Для съемки в различных условиях освещенности и на материалах различной светочувствительности затворы имеют несколько установок времен экспонирования. Отношение максимального времени экспонирования к минимальному называют диапазоном времени экспонирования.

Оптическим коэффициентом полезного действия фотозатвора называется отношение количества световой энергии, прошедшей через затвор к одной, определенной точке светочувствительного слоя, к тому количеству световой энергии, которое за время работы затвора мог бы пропустить идеальный затвор.

Если бы затвор открывался мгновенно и так же мгновенно закрывался, то график его работы можно было бы представить прямоугольником $ABCD$ (рис. 3.12). Однако реальный затвор требует некоторого времени, в течение которого открывается и закрывается доступ света к светочувствительному слою. В период открывания и закрывания к фотослою поступает количество света, ограниченное на графике кривыми AE и FD .

В результате реальный затвор пропустит через объектив световой поток, описываемый кривой $A E F D$. Отношение площадей $A E F D$ и $A B C D$ даст величину оптического к. п. д. затвора, т. е.

$$\eta = \frac{\text{пл. } A E F D}{\text{пл. } A B C D}.$$

Соотношение между приведенным и фактическим временем экспонирования также равно η , поэтому

$$\tau_{\text{пр}} = \tau_{\text{ф}} \eta.$$

Как следует из графика, фактическое время экспонирования складывается из периодов открытия τ_1 , полного открытия τ_0 и закрытия затвора τ_2 , т. е.

$$\tau_{\text{ф}} = \tau_1 + \tau_0 + \tau_2.$$

Оптический к. п. д. затвора зависит от оптических к. п. д. его фаз. Если оптический к. п. д. фазы открытия затвора обозначить через η_1 , закрытия через η_2 , то учитывая, что оптический к. п. д. фазы полного открытия равен единице, можем написать

$$\eta = \frac{\tau_1 \eta_1 + \tau_0 + \tau_2 \eta_2}{\tau_{\text{ф}}}.$$

Если допустить, что периоды открытия и закрытия и оптические к. п. д. этих периодов работы затвора равны друг другу, то можно, преобразовав последнее выражение, записать

$$\eta = 1 - 2(1 - \eta_1) \frac{\tau_1}{\tau_{\text{ф}}}.$$

Из этой зависимости следует, что оптический к. п. д. затвора зависит от оптического к. п. д. открытия и отношения времени открытия и экспонирования. Чем больше оптический к. п. д. открытия (закрытия) и чем меньше время открытия (закрытия), тем больше оптический к. п. д. всего затвора. Рассмотрим особенности различных типов фотографических затворов.

Шторно-щелевой затвор состоит из светонепроницаемой шторки, укрепленной на двух параллельных валиках: заводном и наматывающем. В заводном валике помещается рабочая пружина затвора, один конец которой связан с телом валика, а другой — прикреплен к корпусу аппарата. При подготовке затвора к работе

шторка со щелью наматывается на валик и закручивает пружину заводного валика. В заведенном состоянии затвора пружина натягивает валик со шторкой, и, если отпустить наматывающий валик, то шторка быстро перемогается на заводной валик и своей щелью пробежит мимо светочувствительного слоя. Для повторного экспонирования необходимо вновь перемотать шторку с заводного валика на наматывающий. Для того чтобы предохранить фотослой от засветки через щель, в момент взвода затвора либо щель закрывается предохранительной светонепроницаемой шторкой, либо объектив перекрывается специальным клапаном. По окончании завода отверстия вновь открываются.

Выдержка, или время, в течение которого свет действует на фотослой в данной его точке, определяется шириной щели h и скоростью движения шторки ϑ , т. е.

$$t = \frac{h}{\vartheta}.$$

Для изменения времени экспонирования можно либо изменить натяжение рабочей пружины, а значит, и скорость пробегания щели, либо изменить ширину щели.

Поскольку щель шторного затвора может быть взята достаточно узкой, то время экспонирования может быть очень коротким, до $\frac{1}{1000}$ и даже $\frac{1}{2000}$ с (такие выдержки недоступны для других типов затворов). Помимо этого достоинства шторный затвор характеризуется еще очень высоким оптическим к. п. д., который достигает (при расположении шторки у фотослая) 90% и более.

Основными недостатками шторного затвора являются следующие.

Щель затвора обладает неравномерной скоростью движения при его срабатывании. Это обстоятельство требует либо специальных приспособлений для уравнивания скорости шторки, либо приводит к изменению времени экспонирования отдельных точек изображения.

Время экспонирования отдельной точки фотослая и всего фотослая кадра различно. Очевидно, что при длине фотослая l время на экспонирование всего кадра T будет равно

$$T = \frac{l - 2h}{\vartheta}.$$

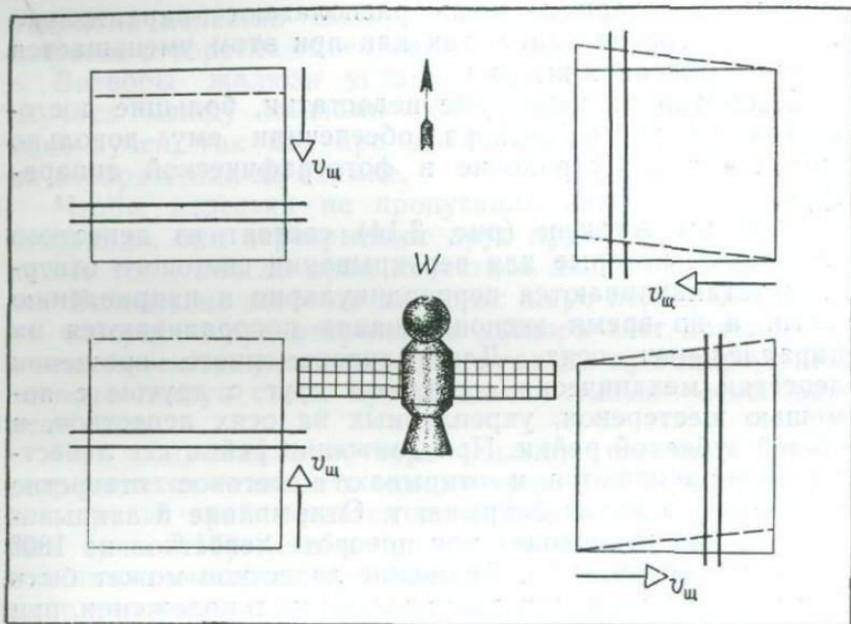


Рис. 3.13. Искажения размеров и формы объекта, вносимые шторным затвором

Если фотографируются подвижные объекты, то за время пробегания щели от одного края кадра к другому изображение может сместиться, и произойдет искажение. Это необходимо учитывать при работе с аэрофотоаппаратами, так как они всегда используются для съемки в процессе движения. Характер вносимого шторным затвором искажения будет зависеть от отношения направления движения шторки к направлению и скорости полета. Если направления скоростей движения шторки и аппарата будут совпадать, изображение будет растянуто; направлены в разные стороны — изображение укоротится. Если движение шторки перпендикулярно к направлению движения аппарата, возникает угловое искажение: вместо квадрата на местности на снимке изобразится параллелограмм. Сказанное проиллюстрируем рис. 3.13, на котором стрелками указано направление движения шторки со щелью. Если кадр имеет форму прямоугольника, то для уменьшения искажения,

вносимого затвором, щель располагают параллельно большей стороне кадра, так как при этом уменьшается время пробегания шторки.

Несмотря на некоторые недостатки, большие достоинства шторного затвора обеспечили ему довольно широкое распространение в фотографической аппаратуре.

Затворы жалюзи (рис. 3.14) состоят из лепестков (ламелей), которые для перекрытия светового отверстия устанавливаются перпендикулярно к направлению света, а во время экспонирования поворачиваются на параллельных осях. Для одновременного вращения лепестки механически соединены друг с другом с помощью шестеренок, укрепленных на осях лепестков, и общей зубчатой рейки. При движении рейки все лепестки поворачиваются и открывают световое отверстие объектива, а затем закрывают. Открывание и закрывание затвора происходит при повороте лепестков на 180° в одном направлении. Вращение лепестков может быть или непрерывным, или с остановкой их в положении, при котором плоскости лепестков параллельны оптической оси. В последнем случае оптический к. п. д. будет больше за счет появления фазы полного открытия затвора. При этом следует иметь в виду, что даже при полном

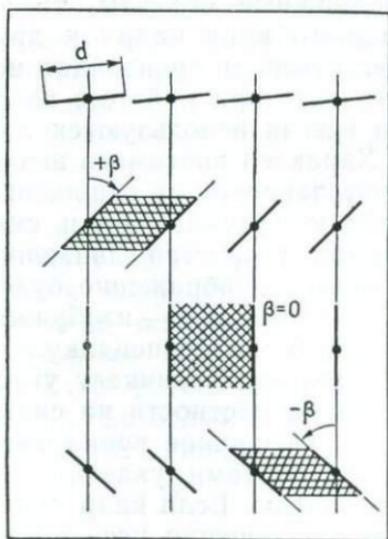
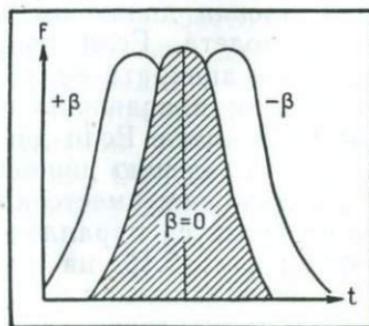


Рис. 3.14. Схема затвора типа жалюзи

Рис. 3.15. График действия затвора жалюзи



открытии лепестки частично (на 2—7%) перекрывают световое отверстие объектива.

Затворы жалюзи устанавливаются в большинстве случаев между линзами объектива, в параллельном ходе лучей, так как при этом исключается появление их изображения на снимке.

Чтобы лепестки не пропускали света в закрытом состоянии, они перекрывают друг друга на 20—40% и, кроме того, иногда края лепестков делаются изогнутыми. Вследствие того что лепесток шире перекрываемого им отверстия, при открывании затвора свет появляется с некоторым запозданием. Точно так же при закрывании затвора доступ света прекращается раньше остановки лепестков.

При открывании затвора жалюзи световой поток устремляется сначала к одному краю кадра, в то время как другой край остается некоторое время неосвещенным (рис. 3.15). Чтобы при работе затвора жалюзи не возникало искажения изображения, как при работе шторного затвора, из-за неодновременности экспонирования всех точек изображения, конструкция лепестков делается такой, чтобы конец экспонирования одних крайних точек изображения совпадал с началом экспонирования точек противоположного края. Это достигается тем, что крайние лучи поля зрения, проектирующие изображение, не задерживаются лепестками, когда они раскрывают световое отверстие. Опыт показывает, что при поле зрения $2\beta < 70^\circ$ затворы жалюзи не вносят искажения в изображение.

Затворы жалюзи за счет сильного диафрагмирования лепестками боковых лучей вносят заметное изменение в освещенность изображения. Неравномерность освещения изображения происходит в перпендикулярном к расположению лепестков затвора направлении и наиболее характерна для затворов прерывного действия. Вследствие этого явления затворы жалюзи применяются для объективов с небольшим полем зрения $2\beta = 25 \div 40^\circ$.

Оптический коэффициент полезного действия затворов жалюзи ниже, чем у шторных, и редко достигает 70—80%.

Существенными достоинствами затворов жалюзи являются простота их конструкции и надежность в ра-

боте. Благодаря небольшим моментам инерции лепестков затворы жалюзи успешно используются для перекрывания больших световых отверстий при сравнительно небольших усилиях рабочих пружин. Например, для получения времени экспонирования в $\frac{1}{300}$ с в цент-

ральном затворе со световым отверстием около 130 мм потребуется усилие пружины около 208 кгс. В затворе жалюзи эта же экспозиция достигается усилием пружины всего в 12 кгс. Эти достоинства затвора типа жалюзи обеспечили широкое его применение в фотоаппаратах, используемых в космосе.

Наиболее совершенным типом затвора, открывающим световое отверстие от центра и обеспечивающим одновременное экспонирование всех точек изображения, является центральный.

Центральные затворы устанавливаются между линзами объектива в параллельном ходе лучей. Простейший центральный затвор состоит из двух лепестков, вращающихся вокруг осей, вынесенных за световое отверстие и параллельных оптической оси объектива (затвор «ножницы»). Наиболее совершенным является многолепестковый центральный затвор, обеспечивающий наиболее симметричное открытие и закрытие светового отверстия.

Лепестки центрального затвора кинематически связаны друг с другом и при работе затвора поворачиваются одновременно.

По характеру движения лепестков центральные затворы делятся на два типа: прямого действия, в которых за время экспонирования лепестки совершают весь цикл открывания и закрывания затвора, вращаясь в одном направлении, и возвратного действия, в которых лепестки при экспонировании за один цикл, открывая и закрывая затвор, совершают колебательное движение. Лепестки у затворов прямого действия имеют форму диска с вырезанным сектором; у затворов возвратного действия — сектор. Очертания кромок лепестков делаются такими, при которых достигается наибольший оптический к. п. д. затвора при наименьшем возможном моменте инерции движущихся частей.

Размеры лепестков центральных затворов соизмеримы со световыми отверстиями и поэтому при значи-

тельных отверстиях вызывают существенное увеличение моментов инерции движущихся частей и требуют больших усилий для приведения затвора в действие. В связи с этим недостатком применение центральных затворов ограничено сравнительно небольшими световыми диаметрами и там, где это допустимо, используются другие типы затворов.

При срабатывании затвора лепестки открывают световое отверстие не сразу, а после некоторого разгона. Точно так же они не сразу останавливаются после закрывания отверстия. Это необходимо для того, чтобы лепестки открывали и закрывали отверстие при больших угловых скоростях. После закрывания отверстия происходит гашение кинетической энергии движущихся частей затвора. Для амортизации удара при остановке механизмов затвора служит пневматический регулятор. Он же служит для изменения времени экспонирования затвора.

Оптический коэффициент полезного действия центральных затворов колеблется в пределах от 0,6 до 0,8.

Существенным недостатком центральных затворов является значительное увеличение мощности двигателей с ростом световых отверстий, что ограничивает возможность широкого применения таких затворов для объективов с большими световыми диаметрами.

Необходимо, чтобы фотозатворы имели определенное время экспонирования светочувствительного слоя. Эта характеристика затворов является одной из основных, однако методом расчета нельзя предусмотреть все тонкости, от которых зависит время срабатывания затвора. Поэтому для каждого аэрофотоаппарата приходится определять фактическое время экспонирования с помощью специальных приборов и, если оно не соответствует требуемым значениям, производить регулировку.

3.4. Камеры, кассеты и кассетные механизмы фотоаппаратов

Камера состоит из корпуса и жесткого конуса, связанного с корпусом болтами. В конусе камеры жестко крепится объектив с затвором. Объектив предварительно фокусируется относительно светочувствительного

слоя на резкость изображения бесконечно удаленных предметов. Положение фотослоя относительно объектива фиксируется прикладной рамкой, к которой в момент экспонирования он прижимается. Прикладная рамка обычно в свою очередь прикрепляется к корпусу фотокамеры.

При установке объектива в конусе добиваются наилучшего распределения резкости изображения по всему полю кадра. Удаление фотослоя от задней узловой точки объектива при наилучшей резкости изображения и принимается за фокусное расстояние камеры и используется при съемочных расчетах.

В процессе эксплуатации фотоаппаратов возможно нарушение фокусировки объектива и вследствие этого получение нерезких снимков. Одной из причин, вызывающих изменение расстояния между задней узловой точкой объектива и плоскостью прикладной рамки, является изменение температуры окружающей среды. В заводских условиях фокусировка объектива осуществляется при комнатной температуре ($+18 \div +20^\circ$). При съемке температура может изменяться. В длиннофокусных фотоаппаратах такое изменение температуры может вызвать нерезкость изображения.

Допустимой величиной кружка нерезкости изображения нужно считать $\delta = 0,05$ мм. В связи с этим приходится учитывать влияние изменения температуры на величину фокусного расстояния камеры и принимать специальные меры для его устранения. А также учитывать, что изменение температуры влияет не только на металл камеры, но и на оптику объектива, вызывая изменение величины его фокусного расстояния.

Установлено, что фокусное расстояние камер, предназначенных для фотограмметрических целей, при установке должно выдерживаться и сохраняться с точностью $\pm 0,03 \div 0,05$ мм.

Прикладная рамка камеры снабжается четырьмя координатными марками, которые обычно располагаются по середине сторон рамки и служат для определения главной точки снимка, лежащей на пересечении прямых, соединяющих противоположные марки. Если в фотоаппарате применено для выравнивания пленки стекло, координатные марки наносятся непосредственно на стекле путем травления.

Помимо координатных марок на снимок необходимо спроектировать показания счетчика кадров, циферблата часов, уровня и других приборов. Проектирующие системы располагаются по углам корпуса камеры и их фокусировка осуществляется относительно плоскости прикладной рамки. Освещение шкал приборов в момент экспонирования производится специальными электрическими лампочками.

В корпусе камеры располагаются двигатели механизмов (электромоторы). Крепление двигателей отдельно от камеры усложняет монтаж фотоаппаратов и нарушает работу амортизаторов, на которых крепится камера. В качестве двигателей современных фотоаппаратов применяются исключительно электромоторы. Моторы питаются постоянным током от бортовой сети.

Для передачи движения от электромотора к механизмам фотоаппарата — затвору, кассетной части, счетчику и другим вспомогательным приборам, а также для включения и выключения мотора в течение цикла работы аппарата служит распределительный механизм. Между мотором и распределительным механизмом находится редуктор обычно червячного типа, понижающий число оборотов мотора в несколько сот раз ($200 \div 600$). Распределительный механизм содержит основной вал, который делает один оборот за цикл, передавая движение ко всем механизмам.

Кассеты и кассетные механизмы фотоаппаратов. Работа фотоаппарата, находящегося в космосе, автоматизирована. Работа механизмов кассеты фотоаппарата при производстве каждого снимка должна обеспечить замену экспонированного участка пленки новым, остановку пленки, если съемка производится кадровым фотоаппаратом, ее передвижение с определенной скоростью — при съемке щелевым фотоаппаратом — и выравнивание пленки в фокальной плоскости объектива при экспонировании.

Протаскивание, остановка и выравнивание пленки производятся от одного привода механизмами транспорта и выравнивания.

Необходимость в выравнивании пленки вызывается тем, что пленка продолжительное время находится в намотанном состоянии и при разматывании старается снова скрутиться. Из-за значительных размеров кадра

пленка, помимо скручивания, способна еще провисать под действием собственной массы. Отставание пленки в момент экспонирования от плоскости и несовпадение поверхности фотослоя пленки с фокальной плоскостью объектива вызывают потерю резкости и ортоскопичности снимка. Для получения доброкачественных снимков в момент экспонирования прибегают к выравниванию пленки механическим или пневматическим способом.

Механический способ выравнивания осуществляется либо натяжением пленки вдоль оси ленты (одновременно принимая меры, чтобы она не коробилась в поперечном направлении), либо путем прижатия пленки к плоскопараллельному стеклу. Более совершенным является метод выравнивания путем прижатия пленки к плоскопараллельному стеклу. В этом способе для выравнивания служат стекло, укрепленное в корпусе камеры с расчетом, чтобы его наружная плоскость совпадала с фокальной плоскостью объектива, и прижимная доска, служащая для прижатия пленки в момент экспонирования к стеклу. Точность выравнивания этим способом зависит от сорта пленки и удельного давления на нее при выравнивании.

Плоскопараллельное стекло, расположенное между объективом и светочувствительным слоем, вносит изменение в положение фокальной плоскости камеры, искажает изображение и увеличивает потери светового потока, идущего от объекта съемки.

При установке стекла положение фокальной плоскости камеры смещается в сторону от объектива на величину, приблизительно равную одной трети его толщины.

Чем под большим углом падает луч на стекло, тем значительней величина искажения изображения. Только луч, перпендикулярный к поверхности стекла, не вносит искажения. Устранить этот недостаток можно, если при расчете оптической системы взять параметр, равный параметру системы: объектив плюс выравнивающее стекло.

Пневматический способ выравнивания заключается в том, что пленка в момент экспонирования либо прижимается к поверхности прижимной доски избыточным давлением, либо присасывается к доске за счет создания разрежения в пространстве между плен-

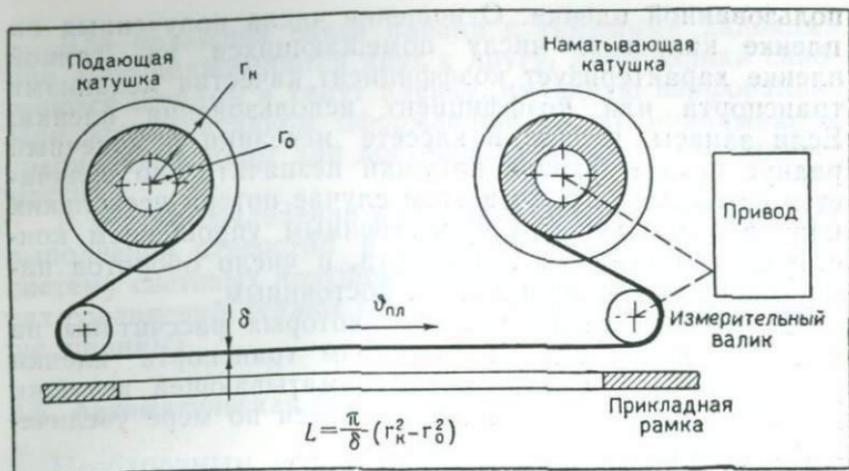


Рис. 3.16. Схема механизма транспорта фотопленки

кой и доской. И в том, и в другом случае поверхность прижимной доски покрывается неглубокими канавками, а в теле доски делают отверстия для отвода воздуха.

Перемотка пленки с подающей катушки кассеты осуществляется специальными механизмами *транспорта пленки* (рис. 3.16), которые представляют собой либо наматывающую катушку, либо тянущие измерительные валики.

Механизм транспорта пленки должен сменить заснятый кадр и подвести к световому отверстию камеры свежий участок пленки. Размеры кадров одинаковы и постоянны, поэтому на приемную катушку необходимо наматывать на каждый цикл одинаковое количество пленки. Если бы диаметр приемной катушки не возрастал по мере увеличения наматываемой на нее пленки, то эту задачу можно было бы решить, задав в каждом цикле наматывающей катушке равное число оборотов. Фактически размеры наматывающей катушки непрерывно возрастают и при одинаковых углах ее поворота она наматывает все большее количество пленки. Если начальный радиус катушки принять таким, при котором происходит наматывание одного кадра (при постоянном угле поворота), то к концу перемотывания между кадрами будет оставаться значительное количество неис-

пользованной пленки. Отношение числа полученных на пленке кадров к числу помещающихся на данной пленке характеризует коэффициент качества механизма транспорта или коэффициент использования пленки. Если запасы пленки в кассете невелики и конечный радиус наматывающей катушки незначительно отличается от начального, то в этом случае потеря нескольких кадров оправдывается существенным упрощением конструкции механизма транспорта, и число оборотов наматывающей катушки делают постоянным.

В фотоаппаратах, катушки которых рассчитаны на большую длину пленки, механизм транспорта пленки усложняют и число оборотов наматывающей катушки делают переменным, уменьшающимся по мере увеличения ее диаметра.

Изменение числа оборотов наматывающей катушки производится двумя способами: линейного регулирования, в котором используется длина протягиваемой пленки, и радиального регулирования — рассчитывается по величине радиуса наматывающей катушки. Первый способ как более совершенный и менее сложный нашел широкое распространение.

Принцип линейного способа регулирования заключается в том, что при перемотке пленка вращает без проскальзывания легкоподвижный измерительный валик. Валик делает строго определенное число оборотов при заданной длине пленки и регулирует движение наматывающей катушки через систему рычагов: тормозит или отключает ее ведущую полуось от механизма кассеты. С началом нового цикла катушка вновь включается, и процесс повторяется.

Несмотря на простоту такого способа регулирования, он дает хорошие результаты и весьма надежен в эксплуатации.

Перемотку определенного участка пленки выполняют с помощью тянущих измерительных валиков, которые за каждый цикл делают строго одинаковое число оборотов. Наматывающая катушка при этом не тянет пленку, а только принимает ее; это достигается тем, что фрикционная муфта, связывающая ее с ведущим механизмом кассеты, обеспечивает проскальзывание катушки, которая наматывает только поданную мерными валиками пленку.

Для надежной связи пленки с тянущими валиками они либо поджимаются друг к другу, либо валики снабжаются шипами и тянут пленку, имеющую перфорацию. При конструктивном оформлении кассет принимаются специальные меры для достижения их светонепроницаемости.

В местах сочленений кассеты и камеры, а также при выполнении отверстий в корпусе кассеты применяются систему световых ловушек и лабиринтов. Обычно в местах соединений делают глубокие пазы (в 5—6 раз больше ширины).

3.5. Автоматическая фокусировка фотокамеры

Необходимым условием получения высококачественного фотографического изображения является совмещение плоскости наилучшего изображения объектива с плоскостью светочувствительного слоя.

Принцип устройства автоматической фокусировки для выработки управляющего сигнала позволяет использовать как изображения объектов съемки, так и стандартные тест-объекты, встроенные в фотоаппарат.

Принцип работы системы автоматической фокусировки можно [15] пояснить на примере системы Optag (рис. 3.17). Объектив создает изображение произвольного объекта, которое сканируется при помощи растровой решетки, имеющей непрозрачные и прозрачные полосы. Решетка модулирует световой поток, который затем падает на катод фотоэлемента. Ток фотоэлемента усиливается и переменная составляющая его измеряется.

Максимум амплитуды переменного тока соответствует совмещению плоскости наилучшего изображения с плоскостью модулятора (растровой решетки). При смещении плоскости модулятора относительно плоскости изображения амплитуда переменной составляющей уменьшается.

Недостатком системы Optag является то, что она не чувствительна к знаку рассогласования. Поэтому была создана модифицированная (рис. 3.18) система, в которой изображение поочередно модулируется двумя модуляторами, расположенными: один перед плоскостью изображения, а второй после нее. Практически

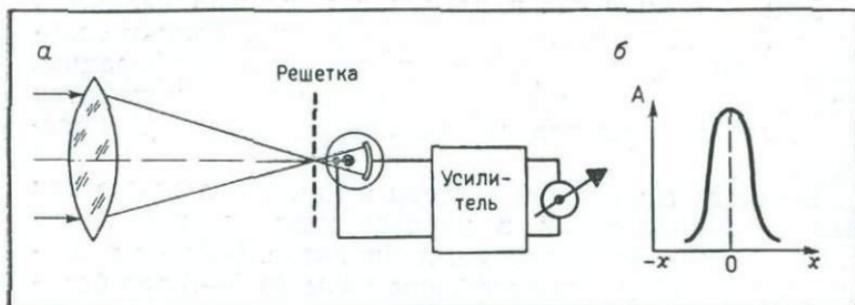
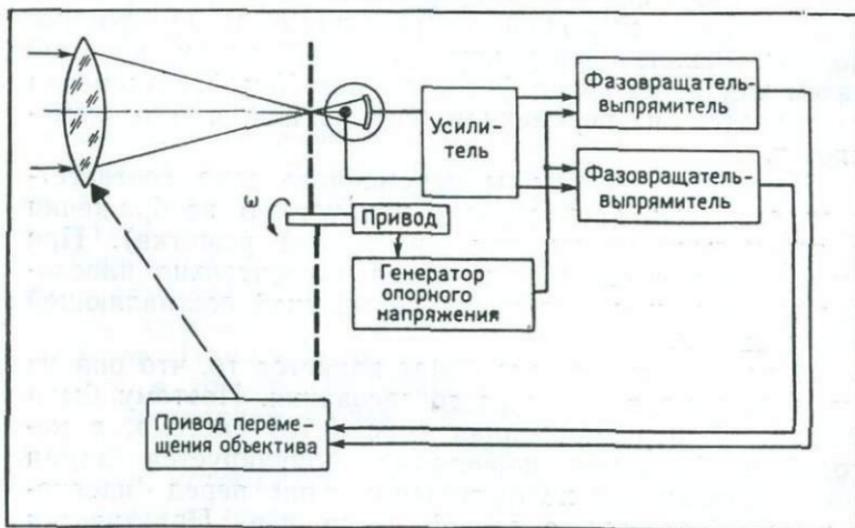


Рис. 3.17. Схема системы автоматической фокусировки

модулятор выполнен в виде тонкого диска, у которого штрихи на одной половине круга нанесены по одной стороне, а на второй — по другой стороне.

Если плоскость изображения находится посередине между модуляторами, как показано на рис. 3.18, то сигналы фотоэлемента при модуляции первой и второй половинами диска одинаковы, а суммарный сигнал равен нулю. При смещении плоскости изображения в любую

Рис. 3.18. Схема автоматической фокусировки, чувствительная к знаку рассогласования



сторону вдоль оптической оси сигнал на выходе усилительно-преобразовательной схемы устройства будет отличен от нуля, а его полярность будет зависеть от знака дефокусировки. Этот сигнал используется для управления приводом, перемещающим объектив до устранения имеющейся дефокусировки.

Идеи системы Optar использованы во многих системах автоматической фокусировки независимо от того, используются ли для фокусировки объекты съемки или же внутренние тест-объекты. В качестве примера можно привести систему автоматической фокусировки фотоаппарата, выпущенного фирмой Perkin Elmer Corp [15] (рис. 3.19).

Принцип работы системы состоит в следующем. Изображение фотографируемого объекта, образованное объективом фотокамеры, при помощи системы зеркал отклоняется к неподвижной щели, за которой находится фотоумножитель. Щель находится на эквивалентном фокусном расстоянии от объектива. Перед щелью помещен оптический клин, вращающийся относительно оси параллельной главной оптической оси объектива. Клин, вращаясь, изменяет фокусировку изображения. Если в течение одного полуоборота клина изображение расфокусируется в одном направлении, то в следующем полуобороте — в обратном, и т. д. Такое устройство позволяет анализировать изображение по обе стороны от плоскости щели. Если плоскость изображения совпадает с плоскостью пленки, то расфокусировки при последовательных полуоборотах будут одинаковыми по величине и противоположны по знаку, а следовательно, суммарный сигнал равен нулю. Если плоскость изображения не совпадает с плоскостью пленки, то суммарный сигнал отличен от нуля и используется для включения электродвигателя, который перемещает объектив до устранения дефокусировки.

Очевидным недостатком системы является требование, чтобы объект состоял из высококонтактных мелких деталей. В противном случае чувствительность систем снижается. Так, например, в лабораторных условиях точность системы была оценена в 0,025 мм, а при летных испытаниях она была значительно ниже. Это объясняется тем, что земная поверхность не обладает достаточным числом высококонтрастных мелких площадок,

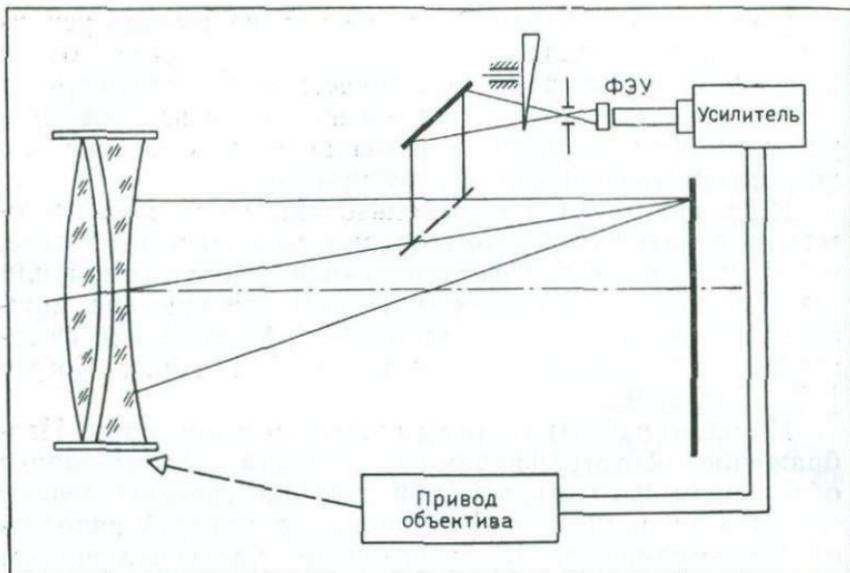


Рис. 3.19. Схема автоматической фокусировки фирмы Perkin Elmer Corpor

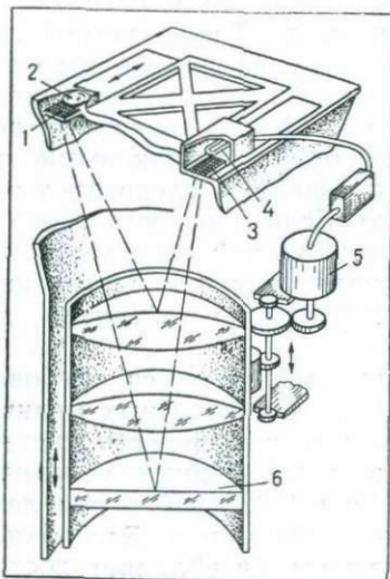


Рис. 3.20. Схематический разрез камеры фотоаппарата KS-25 с системой автоматической фокусировки:

1 — предмет-решетка; 2 — источник света; 3 — сканирующие решетки; 4 — приемник излучения; 5 — двигатель; 6 — отражатель

необходимых для определения плоскости наилучшего изображения.

В качестве примера системы автоматической фокусировки, использующей внутренний тест-объект, можно привести систему фотоаппарата KS-25 фирмы Fairchild Camera (рис. 3.20).

В фокальной плоскости объектива этого фотоаппарата находится решетка с прозрачными и непрозрачными штрихами, за которой располагается источник инфракрасного излучения. Излучение от источника проходит через решетку, объектив, отражается от плоского отражателя, вторично проходит через объектив, создавая автоколлимационное изображение решетки.

Сканирование автоколлимационного изображения производится двумя аналогичными тест-объекту решетками, размещенными симметрично относительно фокальной плоскости и находящимися в постоянном возвратно-поступательном движении.

Если автоколлимационное изображение находится в фокальной плоскости, т. е. посередине между сканирующими решетками, то фотометр покажет равенство сигналов, поступивших от первой и второй решеток. При смещении автоколлимационного изображения это равенство нарушится, и сигнал рассогласования будет подан на двигатель, который переместит объектив в положение точной фокусировки. Точность фокусировки в этом устройстве оценена в 0,025 мм.

В настоящее время системы автоматической фокусировки интенсивно разрабатываются для специальной фотоаппаратуры. Обзор различных методов и устройств автоматической фокусировки изложен в работе [15].

3.6. Механизмы компенсации сдвига изображения

Влияние движения носителя на сдвиг изображения. Вследствие переносного движения носителя фотоаппаратуры в инерциальном пространстве и относительного движения его в связанной системе координат происходит перемещение точек оптического изображения в плоскости фотоматериала за время экспонирования и имеет место сдвиг изображения, вызывающий нерезкость.

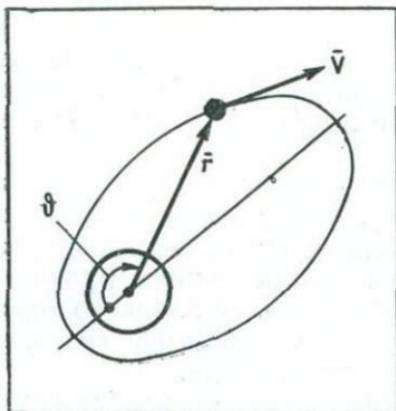


Рис. 3.21. Движение носителя фотоаппаратуры

Движение носителя в инерциальном пространстве подчиняется законам Кеплера — эллиптической теории летательных аппаратов. В небесной механике она носит название задачи двух тел. Эта теория говорит о том, что траектория представляет собой плоскую кривую, причем эта плоскость в инерциальном пространстве неподвижна и содержит притягивающий центр.

Одним из основных уравнений данной теории является уравнение орбиты, которое имеет вид (рис. 3.21)

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \vartheta},$$

где p — фокальный параметр, e — эксцентриситет, ϑ — истинная аномалия, угол, отсчитываемый от перигейной точки до радиус-вектора r , определяющего положение носителя на орбите.

Из уравнения орбиты можно получить выражения для трансверсальной v_τ и радиальной v_r скорости носителя $\vartheta_\tau = r\dot{\vartheta}$, $\vartheta_r = \dot{\vartheta}$,

$$v_\tau = \sqrt{\frac{\pi}{p}} (1 + e \cos \vartheta);$$

$$v_r = \sqrt{\frac{\pi}{p}} e \sin \vartheta.$$

Следовательно, при движении носителя фотоаппаратуры по орбите происходит перемещение его относи-

тельно поверхности Земли или планет и изменение высоты.

Движение носителя в связанной системе отсчета относительно центра масс описывается уравнениями, полученными на основе теоремы динамики системы об изменении момента количества движения

$$\frac{d}{dt} \bar{k} = \sum_{i=1}^n M_i,$$

где

$$\bar{k} = A p \bar{x}_0 + B q \bar{y}_0 + C r \bar{z}_0;$$

$$\left(\frac{d}{dt} k \right)_{\text{абс}} = \left(\frac{d}{dt} \bar{k} \right)_{\text{лок}} + \bar{\Omega} \times \bar{k};$$

$$\left(\frac{d}{dt} k \right)_{\text{лок}_{x_1}} = A p; \quad \left(\frac{d}{dt} k \right)_{\text{лок}_{y_1}} = B q; \quad \left(\frac{d}{dt} k \right)_{\text{лок}_{z_1}} = C r;$$

$$\bar{\Omega} \times \bar{k} = \begin{vmatrix} \bar{x}_0 & \bar{y}_0 & \bar{z}_0 \\ p & q & r \\ A p & B q & C r \end{vmatrix} = (C - B) q r \bar{x}_0 + (A - C) r p \bar{y}_0 + \\ + (B - A) p q \bar{z}_0;$$

$$\left. \begin{aligned} A \dot{p} - (C - B) q r &= \sum M_{x_i} \\ B \dot{q} - (A - C) p r &= \sum M_{y_i} \\ C \dot{r} - (B - A) p q &= \sum M_{z_i} \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

Система уравнений (3.1) описывает движение носителя фотоаппаратуры относительно центра масс в случае, если распределение масс неизменно во времени.

Здесь p, q, r — проекции абсолютной угловой скорости на оси связанной системы координат; $\bar{x}_0, \bar{y}_0, \bar{z}_0$ — орты связанной (орбитальной) системы координат; A, B, C — моменты инерции носителя относительно осей связанной системы координат.

Таким образом, при наличии возмущающих и управляющих моментов относительно связанной системы координат происходит угловое движение носителя, а вместе с ним и установленной на нем фотоаппаратуры.

Основным перемещением изображения является линейное вследствие трансверсальной составляющей скорости носителя

$$\delta_r = v_r \frac{l}{H} t, \quad (H = r - R_0).$$

На местности это соответствует перемещению

$$\Delta_r \cong v_r t,$$

и при $t_{\text{ср}} = 1/150$ с, $v_r = 8000$ м/с получим $\Delta_r = = 8000 \cdot 1/150 \approx 60$ м, что недопустимо для снимков.

При малых $t_{\text{ср}}$ мало меняется ϑ , и при условии $\sin \vartheta = \vartheta$ величиной радиальной составляющей скорости v_r можно пренебречь.

При колебаниях носителя относительно осей тангажа и крена также происходит смещение точек изображения. Данные колебания вносят одинаковые искажения во взаимно перпендикулярные направления в плоскости фотоматериала, но линейные перемещения по полю зависят от расстояния до оси связанной системы координат.

Запишем уравнение для сдвига изображения при отклонении носителя относительно оси тангажа

$$r = f \operatorname{tg} \theta; \quad v_\theta = \frac{dr}{dt} = \frac{f}{\cos^2 \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = f(1 + \operatorname{tg}^2 \theta) \dot{\theta};$$

$$\delta_\theta = v_\theta t, \quad \text{тогда}$$

$$\delta_\theta = f(1 + \operatorname{tg}^2 \theta) \dot{\theta} t.$$

Для главной точки ($\theta = 0$) величина сдвига изображения определяется

$$\delta_\theta = f \dot{\theta} t.$$

На местности это соответствует перемещению

$$\Delta_\theta = \delta_\theta m = \delta \frac{H}{f} = H(1 + \operatorname{tg}^2 \theta) \dot{\theta} t. \quad (3.2)$$

Аналогичные выражения будут для канала крена.

При колебаниях носителя в горизонтальной плоскости возникает также смещение изображения, зависящее от расстояния точки изображения от оси вращения,

$$\delta_{\psi} = r\dot{\psi}t = f \operatorname{tg} \theta \dot{\psi}t.$$

На местности это соответствует перемещению

$$\Delta_{\psi} = H \operatorname{tg} \theta \dot{\psi}t. \quad (3.3)$$

Полагая равными углы $\theta = \psi$ и угловые скорости $\dot{\theta} = \dot{\psi}$, сравним отклонения Δ_{θ} и Δ_{ψ} . Для этого напишем отношение зависимостей (3.2) и (3.3), т. е.

$$\frac{\Delta_{\theta}}{\Delta_{\psi}} = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \theta}{\operatorname{tg} \theta},$$

откуда найдем

$$\Delta_{\theta} \operatorname{tg} \theta = \Delta_{\psi} (1 + \operatorname{tg}^2 \theta)$$

или $\Delta_{\theta} \gg \Delta_{\psi}$ при малых θ ; так как

$$\Delta_{\theta} \operatorname{tg} \theta \approx \Delta_{\psi}.$$

Анализ причин, вызывающих сдвиг, показывает, что наибольший вес в сдвиге изображения имеют трансверсальная v_x составляющая скорости носителя и его колебания относительно осей тангажа и крена. Данный сдвиг изображения определялся исходя из правил геометрии.

Практически физический сдвиг всегда меньше расчетного. Это объясняется сложным процессом фотографического воспроизведения в динамике

$$\Delta_{\phi} = k_{\phi} \Delta_{\psi},$$

где Δ_{ϕ} — фактический сдвиг; $k_{\phi} = 0,25 \div 0,9$ — коэффициент, зависящий от контраста объектов, яркости, геометрической формы и других причин.

Анализ способов компенсации сдвига изображения. Линейный сдвиг может быть компенсирован как линейным, так и угловыми способами.

Линейные способы компенсации основаны на поступательном смещении изображения или пленки за изображением. К ним относятся:

перемещение пленки со скоростью, равной скорости изображения;

перемещение изображения в обратном полету направлении путем смещения объектива со скоростью $v_{из}$.

Угловые способы компенсации основаны на восстановлении положения оптического изображения путем поворота проектирующих лучей, к ним относятся:

поворот фотоаппаратуры вокруг оси, перпендикулярной к его оптической оси в направлении, обратном полету;

поворот проектирующих пучков зеркалом или призмой;

поворот проектирующих пучков одно- или двухклинковыми компенсаторами.

Линейные способы компенсации сдвига изображения.

Способы линейной компенсации основаны на том, что скорость всех точек фотоматериала (или изображения) должна быть одинаковой, тогда при плановой фотографии принципиально можно достичь полной компенсации сдвига.

1. Способ линейной компенсации сдвига на пленке, движущейся со скоростью

$$v_{пл} = v_{из} = v_{\tau} \frac{1}{m} = v_{\tau} \frac{f}{H}$$

в направлении движения носителя.

Во время экспонирования пленка начинает движение со скоростью компенсации $v_k = v_{\tau} \frac{f}{H}$, а затем остаток кадра перематывается со скоростью транспортировки $v_m = \text{const}$ (рис. 3.22).

Время $T = T_k + T_m$ носит название времени цикла. В зависимости от высоты траектории H величина скорости компенсации различна. Транспортировка осуществляется с постоянной скоростью. Движение пленки производится от двух приводов, причем привод компенсации должен быть регулируемым. Нетрудно заметить, что T_k и T_m — переменные.

Достоинствами этого способа являются отсутствие методической ошибки и дополнительных оптических систем.

Недостатки способа: сложность выравнивания пленки, возможность повреждения поверхности пленки при движении, значительное усложнение механизмов кассе-

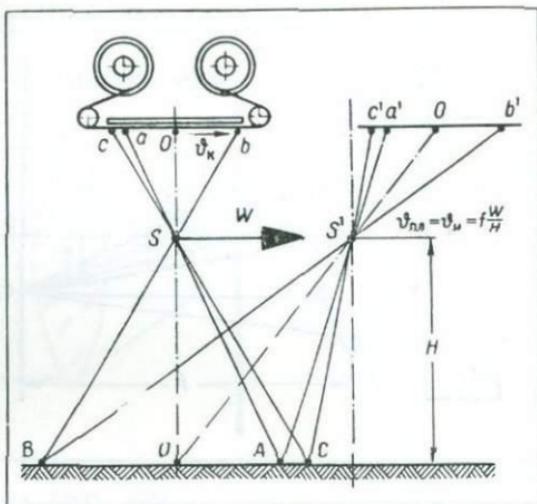


Рис. 3.22. Способ компенсации линейного сдвига изображения перематкой пленки

ты, большие динамические нагрузки на механизм транспортировки при изменении скорости транспортировки, неравномерность скорости движения пленки вследствие инерционности и неполная компенсация сдвига.

Указанные недостатки ограничивают применение этого способа.

2. Компенсация сдвига методом перемещения объектива в направлении, обратном полету, со скоростью, равной скорости движения изображения. Способ очень трудно реализовать ввиду сложности конструктивного выполнения узла перемещения.

Практического применения данный способ компенсации сдвига изображения не нашел.

Угловые способы компенсации сдвига изображения.
1. Поворот фотоаппаратуры вокруг бинормали к оптической оси фотоаппарата. Угол поворота равен

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{v_{\tau}}{H} t.$$

Достоинства данного способа заключаются в простоте конструкции устройства, отсутствии дополнительных потерь света, качественном выравнивании пленки.

Недостатки способа: методическая ошибка компенсации, сложность плавного поворота большой массы фотоаппарата, необходимость синхронизации движения с выдержкой, необходимость реверса движения.

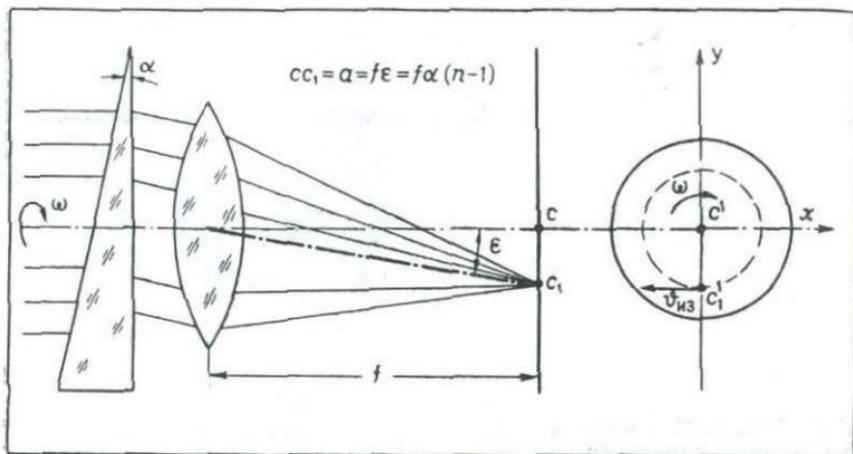


Рис. 3.23. Схема одноклиновой компенсации

2. Поворот проектирующих лучей зеркалом или призмой. Поворотом зеркала вокруг бинормали к плоскости орбиты производится поворот проектирующих пучков. Данный способ аналогичен повороту корпуса фотоаппаратуры относительно бинормали к плоскости орбиты, но угол φ здесь вдвое меньше

$$\varphi' = \frac{\varphi}{2} = \text{arctg} \frac{v_z}{2H} t.$$

Достоинства способа в простоте конструкции, хорошем выравнивании пленки, в том, что колебательное движение совершают небольшие массы; небольшие потери света.

Его недостатки: изображение получается зеркальным (обратным), это вызывает необходимость в его оборачивании, не исключена вибрация зеркала, сложность синхронизации вращения зеркала и скорости движения носителя.

3. Способ одноклиновой компенсации. При установке одного вращающегося клина имеем (рис. 3.23)

$$\varepsilon = \alpha(n-1); cc_1 = a = f\varepsilon = f\alpha(n-1),$$

где a — расстояние, на которое смещается центральная точка.

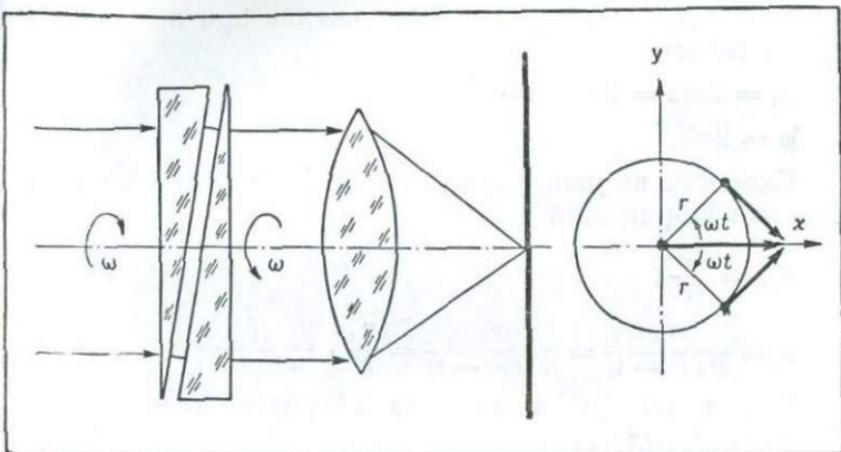


Рис. 3.24. Схема двухклиновой компенсации

Если точка проектируется лучами, расположенными под углом β к оптической оси, то смещение будет

$$a = f\varepsilon (1 + \operatorname{tg}^2\beta).$$

Другими словами, в этом случае $a = var$ для точек, расположенных в поле зрения, и возникает методическая ошибка компенсации, как и в случае поворота камеры.

Достоинства способа состоят в простоте конструкции и малых габаритах, достаточно точной компенсации, и ненарушении выравнивания пленки.

Недостатки способа: вектор скорости компенсации все время меняет направление и поэтому за время выдержки возникает ошибка, т. е. имеется методическая ошибка компенсации.

4. Способ двухклиновой компенсации (рис. 3.24). Два клина с одинаковыми углами α разворачиваются в разные стороны на одинаковые углы $(+\varphi$ и $-\varphi)$.

Для двухклинового компенсатора скорость компенсации будет

$$v_k = 2a\omega \sin \omega t.$$

Пользуются максимальным значением скорости компенсации $v_k(\varphi=90^\circ)$ $v = 2a\omega$, причем такая скорость

может быть только в одном положении при полном обороте клиньев

$$v_k = 2\omega f \varepsilon = 2\omega f \alpha (n - 1);$$

$$\omega = 2\pi N.$$

Скорость компенсации должна быть равна скорости сдвига изображения

$$v_{из} = \frac{v_\tau f}{H}.$$

$$\omega = \frac{v_k}{2f\alpha(n-1)} = \frac{v_\tau}{H^2\alpha(n-1)} = \frac{v_\tau}{H} \cdot \frac{1}{2\alpha(n-1)}.$$

Время выдержки и число оборотов должны быть кратными числами

$$\omega T = 2\pi N.$$

$$T = \frac{l_x(1-q_x)}{f} \cdot \frac{H}{v_\tau};$$

$$\omega = \frac{2\pi N}{T} = \frac{2\pi N f}{l_x(1-q_x)} \cdot \frac{v_\tau}{H}.$$

Откуда можно определить α клина

$$\alpha = \frac{l_x(1-q_x)}{4\pi f(n-1)N}.$$

Сравнения методов компенсации сдвига изображения. Эффективность того или иного метода компенсации сдвига изображения может быть выражена коэффициентом компенсации

$$\xi = \frac{S}{S_k},$$

где S — величина приведенного сдвига при отсутствии компенсации; S_k — величина приведенного сдвига с применением компенсации.

Приведенный сдвиг при отсутствии компенсации S определяется выражением

$$S = v_\tau t,$$

где v_τ — истинная трансверсальная скорость носителя, которая отличается от расчетной на величину

$$\Delta v = v_\tau - v_{\tau p}.$$

Тогда

$$S = (v_{\tau_p} - \Delta v) t = v_{\tau_p} t \left(1 + \frac{\Delta v}{v_{\tau_p}} \right).$$

Величину приведенного сдвига изображения после применения компенсации можно определить исходя из $\Delta v_{\text{пл}} = v_{\text{из}} - v_{\text{пл}}$ рассогласования в скоростях движения изображения и пленки

$$S_{\text{к}} = \frac{\Delta v_{\text{пл}}}{m} t = \frac{\Delta v_{\text{пл}}}{f/H} t.$$

Скорость изображения определяется выражением

$$v_{\text{из}} = m v_{\tau} = \frac{l}{H} v_{\tau}.$$

Скорость пленки исходя из расчетных значений высоты H_p и скорости v_{τ_p} движения носителя определится по формуле

$$v_{\text{пл}} = m_p v_{\tau_p} = v_{\tau_p} \frac{f}{H_p},$$

тогда

$$\begin{aligned} \Delta v_{\text{пл}} &= v_{\tau} \frac{f}{H} - v_{\tau_p} \frac{f}{H_p} = f \left(\frac{v_{\tau}}{H} - \frac{v_{\tau_p}}{H_p} \right) = \\ &= f \left(\frac{v_{\tau_p} + \Delta v}{H_p + \Delta H} - \frac{v_{\tau_p}}{H_p} \right). \end{aligned}$$

Приведенный сдвиг при компенсации

$$S_{\text{к}} = v_{\tau_p} t \left(\frac{\Delta v}{v_{\tau_p}} + \frac{\Delta H}{H_p} \right).$$

Коэффициент компенсации ξ будет

$$\xi = \frac{S}{S_{\text{к}}} = \frac{1 + \frac{\Delta v}{v_{\tau_p}}}{\frac{\Delta v}{v_{\tau_p}} + \frac{\Delta H}{H_p}}.$$

Чем больше коэффициент компенсации ξ , тем выше качество снимков. При $\Delta v \rightarrow 0$ и $\Delta H \rightarrow 0$ имеем $\xi \rightarrow \infty$.

3.7. Командные приборы фотоаппаратов

Для дистанционного управления и контроля работы фотоаппаратов служат специальные командные приборы, которые предназначаются для:

- включения и выключения фотоаппаратов;
- установки и поддержания заданного темпа работы;
- сигнализации о неисправности работы механизмов (транспорта пленки, срабатывания затвора и т. д.);
- учета числа произведенных циклов.

Наибольшую трудность из перечисленных функций командного прибора составляет поддержание заданного темпа работы. Диапазон интервалов, в которых изменяется величина продолжительности между циклами и цена деления шкалы интервалов, зависит от назначения фотоаппарата. В фотоаппаратах топографического типа цена деления шкал интервалов командного прибора обычно составляет $1 \div 3$ с. Весь диапазон интервалов не превосходит $2 \div 200$ с.

Основной частью командных приборов является устройство для установки и поддержания заданного темпа работы, т. е. требуемой частоты циклов работы фотоаппарата. Это устройство обычно содержит механизм задания импульсов или интервалометр, механизм поддержания постоянной угловой скорости интервалометра и двигатель.

Механизмы для установки и поддержания определенных интервалов состоят из вращающегося с постоянной угловой скоростью храповика и соединяющегося с ним рычага. Рычаг служит для замыкания контактов цепи мотора фотоаппарата. После замыкания контактов рычаг отбрасывается пружиной в исходное положение. Величина угла, на который отбрасывается рычаг, определяет величину интервала между циклами и устанавливается поворотом рукоятки регулировки интервалов, которая несет на себе упор для рычага. Постоянная угловая скорость вращения храповика поддерживается либо с помощью анкерного механизма, связанного с ним, либо с помощью регуляторов числа оборотов приводного храповика.

Командный прибор позволяет:
автоматически выдерживать интервал между снимками в пределах от 2 до 60 с;

производить одиночные снимки;
 контролировать работу фотоаппарата по миганию
 контрольной лампочки;
 включать фотоаппарат на непрерывную работу;
 определять число произведенных снимков;
 включать и выключать электрообогрев.

3.8. Методика расчета параметров фотоаппаратуры

Основными параметрами фотоаппарата, предназначенного для космического фотографирования, являются: частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), разрешающая способность R_{ϕ} , фокусное расстояние f' , угол поля зрения $2W$, размеры кадра $l_x \times l_y$, интервал фотографирования $T_{\text{н}}$, продолжительность экспонирования t , добротность, габариты и масса.

В первой главе приведена схема звеньев фотопроцесса (см. рис. 1.1). Каждое из этих звеньев влияет на результирующую функцию рассеивания. Ряд звеньев фотопроцесса имеет функцию рассеивания, которая может быть представлена в аналитической форме, что дает возможность и ЧКХ этих звеньев представить аналитически [20]. Введение каждого нового независимого звена в фотопроцесс вызывает изменение качества изображения. Количественная оценка влияния свойств звена на ЧКХ фотопроцесса в целом является важным этапом при анализе и синтезе фотоаппаратуры и ее отдельных звеньев.

Рассчитаем ЧКХ фотографической системы. Если f_1, f_2, \dots, f_n рассматривать как функции рассеивания последовательных независимых звеньев в фотопроцессе, то можно показать, что спектр свертки функции есть произведение спектров этих функций, т. е.

$$S(\vartheta) = S_1(\vartheta) S_2(\vartheta), \dots, S_n(\vartheta),$$

но

$$S(\vartheta) = A(\vartheta) e^{-\tau(\nu)},$$

тогда

$$A(\vartheta) = A_1(\vartheta) A_2(\vartheta), \dots, A_n(\vartheta)$$

— результирующая амплитудно-частотная характеристика,

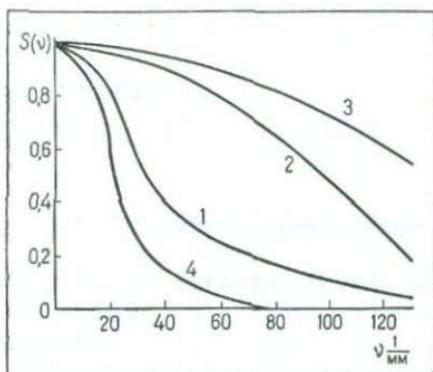


Рис. 3.25. Контрастно-частотные характеристики фотопроектирования:

1 — объектив плюс фотопленка $R = 125$ мм; 2 — сдвиг изображения $\Delta x = 0,0063$ мм; 3 — дефокусировка $\Delta x = 0,05$ мм; 4 — результирующая всех трех звеньев фотопроектирования

$$\varphi(\vartheta) = \varphi_1(\vartheta) + \varphi_2(\vartheta) + \dots + \varphi_n(\vartheta)$$

— результирующая фазо-частотная характеристика.

На рис. 3.25 в качестве примера показана ЧКХ фотографической системы. Анализируя проведенные зависимости, легко заметить, что влияние дефокусировки и сдвига изображения существенно ухудшает фотосистему в целом. Метод получения результирующей ЧКХ (фотопроектирования справедлив лишь для линейных звеньев, которыми можно считать объектив, фотопленку, дефокусировку, сдвиг изображения, атмосферу (проявление — процесс нелинейный и его учет вызывает определенные трудности). Частотно-контрастная характеристика может быть использована для получения некоторых критериев качества изображения.

Для определения разрешающей способности по ЧКХ необходимо перейти к характеристике, представляющей зависимость контраста фотоизображения штриховой миры от пространственной частоты, т. е. найти функцию контрастности

$$\bar{T}(\vartheta) = \frac{4}{\pi} T(\vartheta),$$

определяемую с использованием ЧКХ фотосистемы.

Предельные пространственные частоты T_n могут быть вычислены по формуле

$$T_n(\vartheta) = \frac{1 - 10^{-0,87\gamma T(\vartheta)}}{1 + 10^{-0,87\gamma T(\vartheta)}},$$

которая выведена в предположении, что $D = D_0 + \gamma \lg H$.

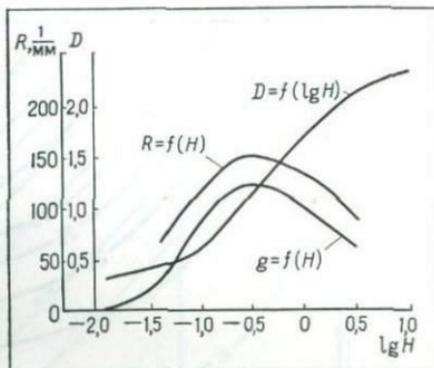


Рис. 3.26. Определение зависимости разрешающей способности от экспозиции

При $T(\vartheta) \ll 0,2$, получим $T_{\Pi}(\vartheta) = \gamma T(\vartheta)$.

Вследствие малости используемого интервала экспозиции последней формулой можно пользоваться и в тех случаях, когда изображение выходит за пределы прямолинейного участка характеристической кривой

$$T_{\Pi}(\vartheta) = gT(\vartheta),$$

где

$$g = \frac{dD}{d(\lg H)}$$

— градиент характеристической кривой в точке $H_{\text{ср}}$.

И тогда

$$\bar{T}_{\Pi}(\vartheta) = 1,27g\bar{T}(\vartheta). \quad (3.4)$$

Таким образом, разрешающую способность можно определить как пространственную частоту, измеренную по функции контрастности в точке с контрастом, равным пороговому значению.

Для получения зависимости разрешающей способности от экспозиции $R = f(H)$ необходимо выполнить следующие операции:

1) по характеристической кривой фотоматериала определить зависимость $g = f(H)$;

2) для фиксированных значений экспозиции, перекрывающих интересующий нас диапазон, по формуле (3.4) вычислить функции контрастности;

3) задавшись пороговым контрастом, определить разрешающую способность при всех экспозициях.

На рис. 3.26 показана методика определения зависимости $R = f(H)$ в предположении, что пороговый конт-

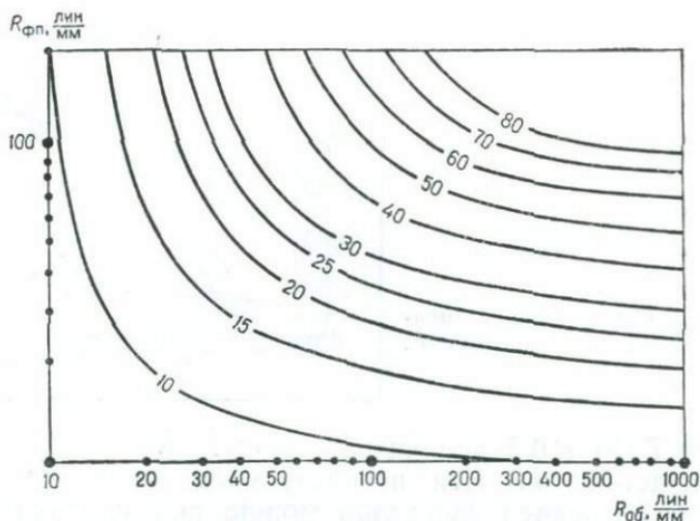


Рис. 3.27. Определение разрешающей способности фотосистемы

раст не зависит от абсолютного значения оптической плотности и от пространственной частоты.

При известных разрешающих способностях объекта $R_{об}$ и фотопленки $R_{фп}$ разрешающая способность фотосистемы R_c может быть определена по формуле

$$R_c = \frac{R_{об} R_{фп}}{R_{об} + R_{фп}}. \quad (3.5)$$

Рассмотрение этой формулы показывает, что увеличение разрешающей способности любого из этих звеньев приводит к увеличению разрешающей способности фотосистемы. Наиболее полно разрешающая способность обоих звеньев используется при $R_{об} = R_{фп}$. На рис. 3.27 показано изменение разрешающей способности фотосистемы в зависимости от $R_{об}$ и $R_{фп}$.

При оценке разрешающей способности фотосистемы необходимо иметь в виду, что она зависит от контраста и экспозиции и что она изменяется по полю изображения (см. рис. 3.11). Методика учета этих особенностей изложена в ряде работ [9, 24].

Необходимая угловая разрешающая способность оптической системы фотоаппарата $R_{об}$

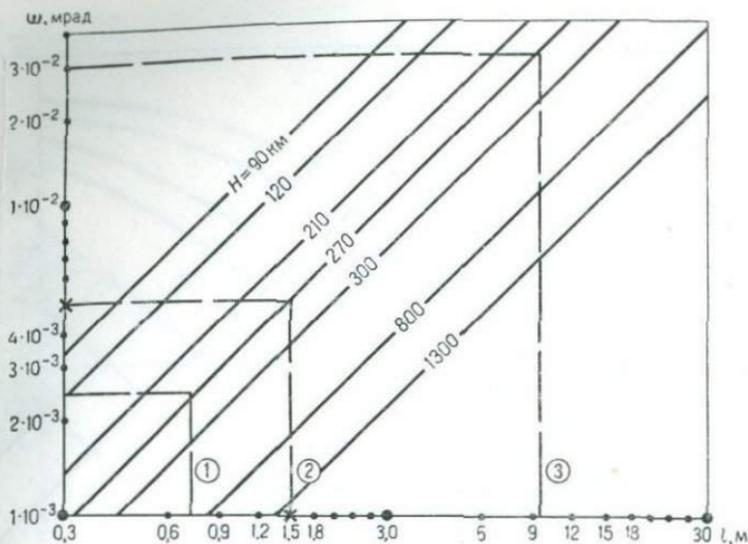


Рис. 3.28. Определение угловой разрешающей способности:

1 — граница при максимальной детализации; 2 — граница при наблюдении; 3 — граница при фотографировании

определяется по линейному размеру разрешаемого элемента на местности и по высоте фотографирования. Предварительная оценка может быть выполнена с использованием графика, приведенного на рис. 3.28. Например, для получения изображения объектов размером в 1,5 м на местности с высоты в 270 км необходимо иметь угловую разрешающую способность фотосистемы, равную $4,7 \cdot 10^{-3}$ мрад. По полученной угловой разрешающей способности выбираются необходимое фокусное расстояние и разрешающая способность фотопленки.

Для нашего случая из рис. 3,29 следует $f_1 = 274,3$ см, тогда $R_{\text{фп}} = 75 \frac{\text{лин}}{\text{мм}}$, или же для $f_2 = 91,4$ см нужна фотопленка $R_{\text{фп}} = 200 \frac{\text{лин}}{\text{мм}}$. Затем по выбранному фокусному расстоянию определяются угол поля зрения и размеры кадра фотоаппарата l_x по направлению полета l_y и перпендикулярно к нему по формуле

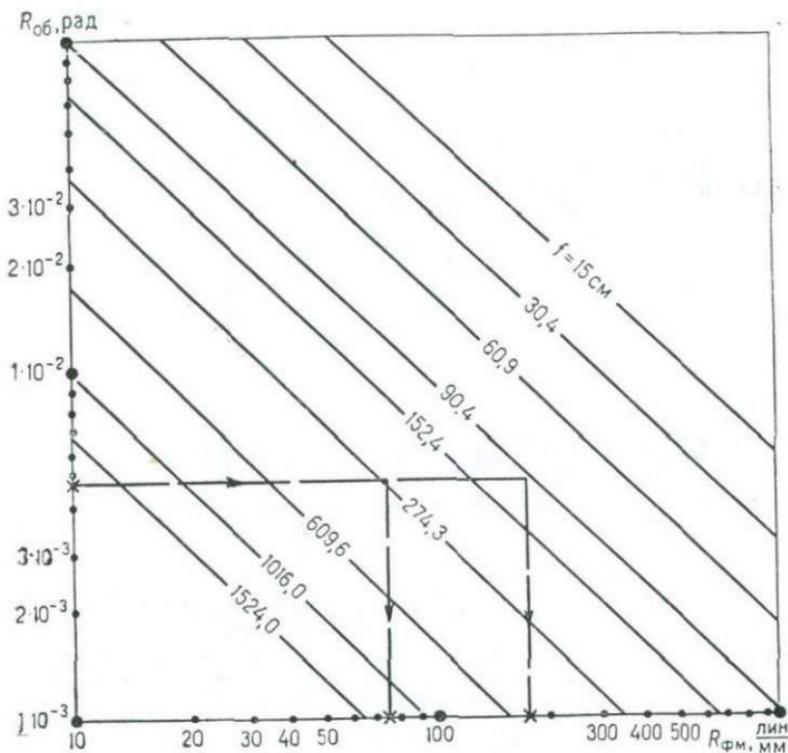


Рис. 3.29. Определение фокусного расстояния и разрешающей способности фотопленки

$$\operatorname{tg} W = \frac{\sqrt{l_x^2 + l_y^2}}{2f}.$$

То же самое можно определить и с использованием графика, приведенного на рис. 3.30. Для нашего случая с $f = 91,4$ см имеем для кадра 30×30 см угол поля зрения примерно 24° .

Расчет интервала фотографирования. В кадровых фотосистемах изображения фотографируемой планеты получаются в виде отдельных фотоснимков, все точки которых экспонируются почти одновременно. Если возникает необходимость съемки больших участков планеты, то для облегчения последующего монтажа необхо-

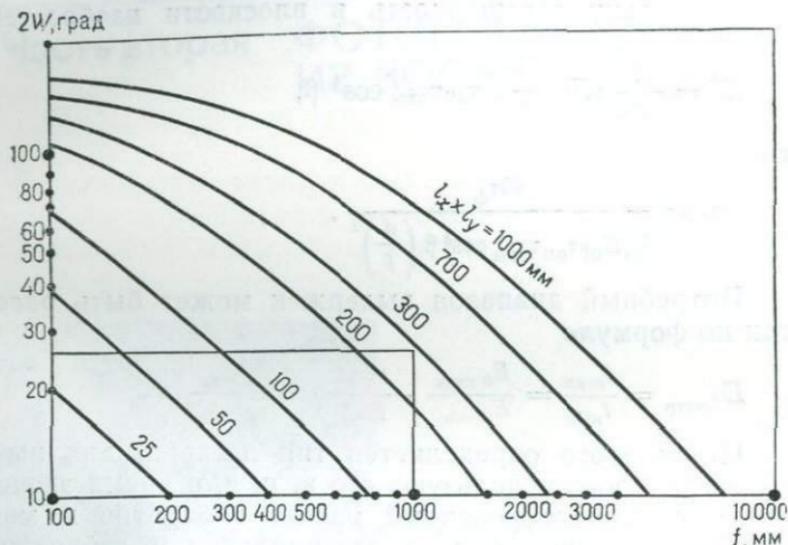


Рис. 3.30. Определение размеров кадра и угла поля зрения

можно задать определенную величину перекрытия снимков как продольного k_1 , так и поперечного k_2 . Численные значения этих коэффициентов зависят от задач фотографирования. Для обеспечения заданного коэффициента продольного перекрытия, фотографирование должно выполняться через определенный интервал, который рассчитывается по формуле

$$T_{\text{и}} = \frac{(1 - k_1) a}{f \left(\frac{W}{H} \right)},$$

где a — продольный размер кадра на местности.

Расчет продолжительности экспонирования. Известно, что оптимальная выдержка при фотографировании определяется выражением

$$t_{\text{опт}} = \frac{10}{S_D E'},$$

где E' — освещенность в плоскости изображения; S_D — светочувствительность пленки.

Поскольку освещенность в плоскости изображения равна

$$E' = \frac{1}{4\tau_\phi} \rho E_0 \left(\frac{d}{f}\right)^2 \tau_{\text{оп}} \tau_{\text{атм}} \cos^4 \beta,$$

то

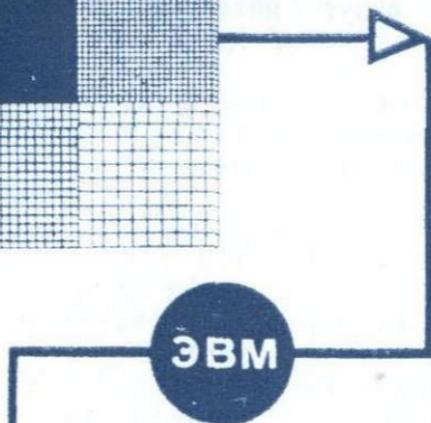
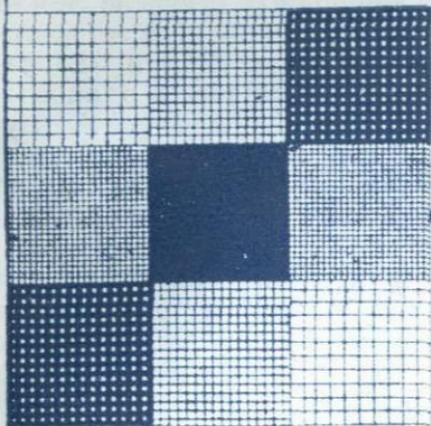
$$t_{\text{опт}} = \frac{40\tau_\phi}{S_D E_0 \rho \tau_{\text{оп}} \tau_{\text{атм}} \cos^4 \beta \left(\frac{d}{f}\right)^2}.$$

Потребный диапазон выдержек может быть рассчитан по формуле

$$D t_{\text{потр}} = \frac{t_{\text{max}}}{t_{\text{min}}} = \frac{E_{0 \text{ max}}}{E_{0 \text{ min}}} \cdot \frac{\rho_{\text{max}}}{\rho_{\text{min}}} \cdot \frac{\tau_{\text{атм max}}}{\tau_{\text{атм min}}}.$$

После этого определяется тип затвора, для вычисления которого используют его к. п. д. и время экспонирования. Ориентировочный расчет габаритов и массы аппаратуры производится суммированием габаритов и масс объектива и вспомогательного оборудования.

Часть вторая **ФОТОГРАФИРОВАНИЕ
ИЗ КОСМОСА**



0	1	3
2	4	2
3	1	0

4.1. Задачи, решаемые при космическом фотографировании

Интерес к проблеме использования космических аппаратов (КА) для изучения природных ресурсов Земли особенно возрос, когда были получены первые фотографии с метеорологических спутников Земли. В настоящее время ведутся интенсивные работы в определении направлений использования КА для целей изучения природных ресурсов. Так, американские ученые наметили и ведут интенсивные исследования по вопросу использования КА в следующих направлениях [53]:

1. В области сельского и лесного хозяйства: для оценки сельскохозяйственных угодий и определения степени ухудшения обрабатываемых земель вследствие эрозии и засоления почв; для изучения сельскохозяйственных ресурсов; для разработки сельскохозяйственной информационной системы; для разработки методов устойчивого урожая фуражных культур.

2. В области картографирования и использования земель: слежение за рекультивацией земель, разрушенных в результате открытой разработки полезных ископаемых; для изучения процесса ухудшения качества водных ресурсов; для изучения вопросов использования земель.

3. В области геологии и полезных ископаемых: для создания тектонических моделей и поиска полезных ископаемых; для создания геологических карт и проведения гидрогеологических исследований; для разработки методов борьбы с оползнями и обвалами.

4. В области исследования водных ресурсов: для проведения гидрологических исследований; для определения размеров площадей, покрытий оросительных систем, с целью оценки запасов воды для орошения земель; для изучения сезонных изменений запасов воды; для изучения морских и прибрежных ресурсов.

5. В области океанологии и гляциологии: для изучения морских и прибрежных ресурсов; для определения рыбных ресурсов; для изучения состояния береговой линии; для изучения ледовой обстановки с целью обеспечения безопасности буровых работ в прибрежных водах.

6. В области метеорологии: для определения тепловых потоков от Солнца и изучения процессов взаимодействия облаков различных типов; для разработки методов прогнозирования погоды.

7. В области изучения окружающей среды: для изучения влияния горных выработок на сохранение окружающей среды; для изучения диких животных и др.

Для обеспечения выполнения исследований по наменным направлениям на борту КА устанавливается довольно сложный комплекс аппаратуры, используемой в различном сочетании. Это фотографическая аппаратура, предназначенная для обзорного и детального фотографирования, фототелевизионная — для спектрозонального фотографирования, инфракрасная спектральная и радиометрическая, радиотехническая и целый ряд других видов аппаратуры и устройств. Здесь названы наиболее широко используемые виды аппаратуры.

Так, например, для целей изучения природных ресурсов Земли в США в 1972 г. был запущен КА [51], на борту которого помещались блок видиконов с обратным лучом, спектрозональный сканирующий радиометр, два широкополосных видеоманитофона и ретранслятор. Блок видиконов включает три камеры с фокусным расстоянием 12,5 см, которые обеспечивают обзор поверхности Земли в трех спектральных диапазонах: 0,475—0,575 мкм (сине-зеленый); 0,58—0,68 мкм (красно-оранжевый); 0,69—0,83 мкм (красный и инфракрасный). С помощью этого блока получают фотоснимки участков поверхности Земли размерами 185 × 185 км.

Спектрозональный сканирующий радиометр обеспечивал съемку полосы поверхности Земли шириной 185 км в четырех спектральных диапазонах: 0,5—0,6 мкм (зеленый); 0,6—0,7 мкм (красный); 0,7—0,8 мкм (красный и инфракрасный); 0,8—1,1 мкм (инфракрасный).

Другим примером использования КА и его аппаратуры для исследования природных ресурсов Земли

является запуск КА «Landsat» на синхронную относительно Солнца орбиту [2]. На его борту были установлены три фототелевизионные установки, работающие в трех различных диапазонах от 0,475 до 0,830 мкм и спектральный сканирующий радиометр, чувствительный в четырех спектральных диапазонах в интервале 0,5—1,1 мкм.

Таким образом, исходя из анализа направлений, по которым ведутся исследования в областях использования КА и аппаратуры, устанавливаемой на них, можно сформулировать основные задачи:

— получение фотоснимков для составления фотокарт поверхности Земли;

— изучение рельефа поверхности отдельных районов;

— определение топографических характеристик территории континентов;

— получение изображений для прогнозирования возможных обвалов вследствие тектонических трещин;

— получение фотоснимков для проведения исследования в интересах сельского хозяйства;

— исследование растительных покровов Земли;

— исследование характеристических излучений в зависимости от вида землепользования;

— получение фотоснимков для исследования вопросов экологии заливных земель в отдельных районах;

— изучение энергообмена на границе почвы и атмосферы;

— контроль за состоянием лесных массивов (поражение болезнями, вредителями, засуха, пожары);

— получение информации в интересах лесотаксации и геодезии;

— изучение возможности разведки и разведка полезных ископаемых (залежей металлических руд, нефтяных запасов и т. п.);

— исследование природных ресурсов континентов и окружающих морей;

— изучение геологических структур Земли;

— многоцелевые геофизические исследования;

— наблюдение вулканической активности Земли;

— изучение тепловых процессов, связанных с активностью вулканов;

— океанографические исследования берегов отдельных континентов и океанических течений;

- исследование влияния условий в океане на рыбные ресурсы у берегов и в открытом пространстве;
- картирование водных стоков;
- совершенствование метеорологических прогнозов;
- обнаружение штормов, ураганов и их исследование;

- исследование физики сезонного образования облачного покрова Земли;

- получение информации для изучения вопросов, связанных с древними цивилизациями и т. д.

Это далеко не полный перечень задач, которые могут решаться с помощью КА и аппаратуры, устанавливаемой на них.

Каждая из перечисленных задач накладывает определенные требования на способ и условия фотографирования, комплект аппаратуры, необходимой для выполнения космического фотографирования, и целый ряд других факторов, обеспечивающих получение качественной фотоинформации.

4.2. Способы фотографирования из космоса

Способы фотографирования из космоса могут оставаться теми же, какие применялись при фотографировании с самолетов и воздушных шаров, а в зависимости от направления оптической оси фотографического аппарата по отношению к направлению местной вертикали (МВ) подразделяются на: плановое, перспективное, планово-перспективное и панорамное [20].

Плановое фотографирование является основным видом фотографирования из космоса. Для выполнения плановой съемки КА должен находиться над фотографируемым объектом и оптическая ось фотоаппарата совпадать с направлением МВ или отклоняться от нее не более $3-5^\circ$ (рис. 4.1, точка А).

Поскольку фотографические аппараты, размещаемые на борту КА, крепятся жестко, то ориентирование их оптических осей осуществляется относительно оптических осей оптико-электронного датчика — строителя МВ в момент их установки. В процессе же фотографирования фотоаппарат ориентируют относительно Земли путем построения МВ на борту КА. МВ может быть построена с достаточно высокой точностью и в

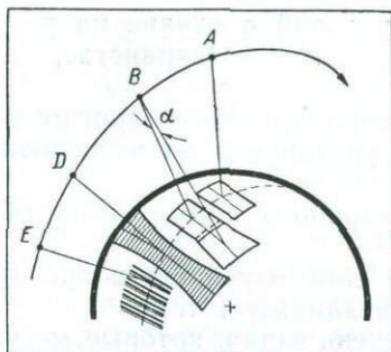


Рис. 4.1. Виды космического фотографирования

зависимости от высоты орбиты составлять несколько десятков минут [33].

На рис. 4.2, а показан участок поверхности, захватываемый оптической системой фотоаппарата при плановом фотографировании. Точка С соответствует главной точке объектива. Получаемый снимок располагается в плоскости, параллельной изображенной местности, и масштаб его постоянен во всех направлениях по снимку, а поэтому он может быть легко использован для проведения измерительных работ и для целей картографирования. Масштаб снимка может быть определен из формулы

$$M = \frac{1}{m} = \frac{f'}{H} = \frac{a}{b} = \text{const}, \quad (4.1)$$

где m — величина, показывающая во сколько раз объект больше его изображения на фотоснимке; f' — фокусное расстояние объектива; H — высота орбиты, с которой осуществляется фотографирование.

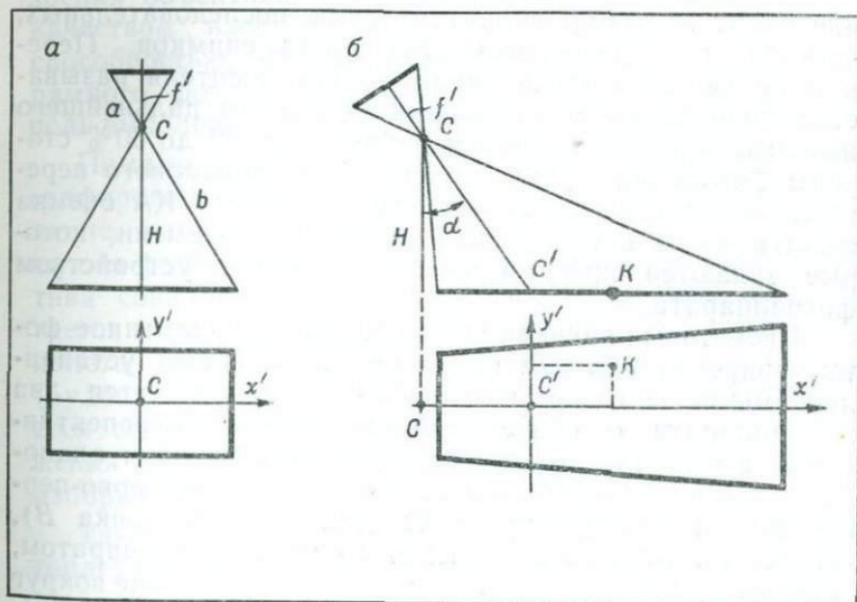
По известным f' и H можно вычислить интересующий масштаб фотоснимка. При этом необходимо помнить, что с увеличением или уменьшением фокусного расстояния масштаб фотоснимка изменяется прямо пропорционально фокусному расстоянию, а площадь, охватываемая фотоснимком, обратно пропорциональна квадрату фокусного расстояния. При космическом фотографировании это правило особенно нужно учитывать, так как в процессе полета КА и проведения фотографирования высота орбиты меняется в значительных пределах. Изменение высоты обуславливается эллиптичностью орбиты.

Значения f' и H , а соответственно и масштаб выбираются из условий решения той или иной задачи и точностных характеристик, которые необходимо обеспечить при фотографировании. Известно [47], что фотографическим аппаратам свойственны ошибки, обусловленные дисторсией объектива, искривлением пленки, сдвигом изображения и другие; светочувствительный материал, имея различную разрешающую способность, дает ошибки неравномерной резкости, обработка фотоснимков также вносит искажения, и т. д. Следовательно, при выборе съемочного масштаба с этим обстоятельством следует считаться.

Недостатком планового фотографирования является низкая дешифрируемость фотоснимка, так как не видно предметов съемки сбоку.

Перспективным фотографированием (см. рис. 4.1, точка B ; 4.2, б) называется такое, при котором оптическая ось фотоаппарата отклоняется относительно MV более чем на 5° . Перспективный снимок уже не подобен

Рис. 4.2. Геометрические соотношения фотографирования:
 а — планового; б — перспективного



фотографируемой местности и для проведения измерительных работ он практически не пригоден. Наилучшая перспективность снимков наблюдается при угле отклонения оптической оси от направления МВ, равном 45° . В этом случае масштаб фотоснимка для переднего и заднего планов будут различными. Несмотря на эти недостатки перспективные снимки выгодно отличаются от плановых и легче дешифрируются. Отличительная особенность перспективного фотографирования состоит в том, что фотографируется большая площадь, чем при плановом.

В общем виде масштаб изображения определяется формулами

$$\frac{1}{m_{y'}} = \frac{f'}{H} \cos \alpha; \quad \frac{1}{m_{x'}} = \frac{f'}{H} \cos^2 \alpha.$$

С учетом координат x , y точки K на местности, получим

$$\frac{1}{m_{y'}} = \frac{f'}{H} \left(\cos \alpha - \frac{y}{f'} \sin \alpha \right);$$

$$\frac{1}{m_{x'}} = \frac{f'}{H} \left(\cos \alpha - \frac{y}{f'} \sin \alpha \right)^2.$$

Как плановое, так и перспективное фотографирование могут выполняться путем ряда последовательных, частично перекрывающихся друг друга снимков. Перекрытие снимков вдоль линии полета носителя называется продольным, его величина зависит от дальнейшего использования снимков и колеблется от 20 до 60% стороны фотоснимка. Для поддержания одинакового перекрытия фотоснимков по всей трассе полета КА съемка ведется через определенные интервалы времени, которые задаются программным временным устройством фотоаппарата.

В некоторых случаях выполняется одновременное фотографирование двумя или тремя аппаратами, устанавливаемыми на одном носителе. Если используется два фотоаппарата, то оба снимка выполняются перспективными, а если три, то два перспективные, а один плановый, т. е. осуществляется так называемое планово-перспективное фотографирование (см. рис. 4.1, точка B). Оно может также выполняться и одним фотоаппаратом, если ему совместно с объектом задать вращение вокруг оси, по которой направлен вектор скорости движения КА.

В зависимости от решаемых задач плано-перспективное фотографирование может осуществляться многообъективными фотоаппаратами с несколькими камерами для перспективной и одной центральной — для плановой съемки. В большинстве случаев этот способ фотографирования применяется для обеспечения контроля за лесными массивами и сельскохозяйственными угодьями, при ведении метеорологической разведки, при изучении природных ресурсов и окружающей среды. Для проведения фотографической съемки в целях картографирования этот способ мало пригоден, так как масштаб по кадру различен.

Стремясь охватить большую площадь при фотосъемке с одного носителя, применяют панорамное фотографирование. Панорамное фотографирование (см. рис. 4.1, точка *D*) может осуществляться фотографическими системами, в которых объектив качается относительно точки *C* в направлении, перпендикулярном к направлению движения носителя. Снимок получается путем последовательного перемещения щели по поверхности пленки. При панорамном фотографировании для построения изображения используется только часть поля зрения объектива, которая характеризуется наилучшим качеством изображения и наибольшей разрешающей способностью. Фотоаппараты, применяемые для панорамного фотографирования, не имеют затвора, а его роль выполняет щель, образованная в предметном стекле.

Помимо рассмотренных способов космического фотографирования может иметь место щелевое фотографирование, которое осуществляется на непрерывно движущуюся фотопленку. В этом случае оптическая ось объектива совпадает с направлением *МВ*, а щель располагается в плоскости, перпендикулярной к направлению полета носителя. Щелевой снимок имеет вид ленты (рулона). Движение пленки в этом случае осуществляется со скоростью, равной скорости движения изображения и, следовательно, компенсируется смазывание изображения.

Таким образом, при щелевом фотографировании фотопленка по мере перемотки подвергается сплошному экспонированию. Для получения резкого изображения в

этом случае необходимо, чтобы выполнялось условие [5]:

$$V_{\text{п}} = V_{\text{и}} = V \frac{f'}{H}, \quad (4.2)$$

где $V_{\text{п}}$ — скорость перемещения фотопленки; $V_{\text{и}}$ — скорость перемещения изображения в плоскости щели; V — скорость носителя.

При орбитальном полете над равнинной поверхностью и при тщательной синхронизации скоростей $V_{\text{п}}$ и $V_{\text{и}}$ качество изображения, даваемое щелевым фотоаппаратом, по-видимому, по точности построения не будет отличаться от изображения, получаемого обычным фотоаппаратом при фотографировании в тех же условиях.

Применительно к щелевому фотоаппарату масштаб изображения в направлении полета определится из соотношения

$$\frac{1}{m_x} = \frac{V_{\text{п}}}{V}, \quad (4.3)$$

а масштаб в поперечной плоскости из соотношения

$$\frac{1}{m_y} = \frac{f'}{H}.$$

Тогда будет иметь место следующая зависимость

$$\frac{1}{m_x} = \frac{1}{m_y} = \frac{V_{\text{п}}}{V} = \frac{V_{\text{и}}}{V} = \frac{f'}{H}. \quad (4.4)$$

Таким образом, изменение высоты носителя ведет к изменению скорости сдвига изображения. Следовательно, для того чтобы не было искажения изображения, необходимо, чтобы пропорционально изменению скорости перемещения изображения менялась бы скорость перемещения пленки относительно щели. Регулирование скорости перемещения может осуществляться с помощью автоматического устройства, управляемого сигналами, поступающими с высотомера. В последнее время для определения высоты местонахождения КА на борту устанавливают лазерные высотомеры.

Основными достоинствами щелевого фотографирования являются отсутствие в фотоаппарате затвора и повышение качества изображения, поскольку использу-

ется только центральная часть объектива. Щелевое фотографирование в настоящее время находит применение при проведении фотографирования в научных целях. Один из возможных вариантов применения щелевого фотоаппарата рассмотрен в 7.2.

Каждый из рассмотренных способов космического фотографирования обладает своими достоинствами и недостатками. Сравнительная оценка этих способов может быть проведена только с учетом анализа конкретных условий проведения того или иного вида фотосъемки и ее назначения.

Достоинство перспективного фотографирования состоит в том, что при выполнении его охватываются большие поверхности, но эффективность резко падает при фотографировании всхолмленных участков поверхности и резко выраженных рельефов. Дальний план перспективных фотоснимков в измерительных целях практически не пригоден.

Перспективное фотографирование особенно эффективно в случае, если фотосъемка ведется в целях ледовой и метеорологической разведок, т. е. тогда, когда необходим сам факт установления объектов съемки.

Плановое же фотографирование по сравнению со всеми способами космического фотографирования является наиболее предпочтительным. Эта предпочтительность обуславливается следующими причинами:

- простотой фотограмметрической обработки фотоснимков в наземных устройствах;
- высокой точностью картографирования в различных масштабах по плановым снимкам;
- возможностью получения фотоснимков в различных масштабах и т. д.

Вместе с тем плановое фотографирование накладывает более жесткие требования к точности ориентации КА.

4.3. Особенности фотографирования из космоса и требования, предъявляемые к фотографической аппаратуре

Фотографирование из космоса имеет ряд особенностей, которыми являются: большие высоты, скорость полета и их периодическое изменение при движении КА по орбите; вращение Земли, а следовательно, и

объектов съемки относительно плоскости орбиты; быстрое изменение освещенности Земли по трассе полета КА; фотографирование ведется через весь слой атмосферы; съемка ведется на большем по величине кадре; фотографическая аппаратура должна быть полностью автоматизирована и т. д.

Большая высота съемки вызывает уменьшение масштаба снимка. В то же время с целью увеличения обзорности высоту орбиты увеличивают. Выбор высоты орбиты осуществляется исходя из задач, которые решаются при съемке, и необходимости получения фотографических снимков определенного масштаба. Так, например, для получения снимков с целью картографирования выбираются высокие орбиты, позволяющие проводить обзорные снимки. В то же время, если фотографирование ведется с целью выявления изменения активности вулканов, то требуются низкие орбиты и дополнительно длиннофокусные аппараты и т. д.

Кроме этого, повышаются требования к объективам фотоаппаратов с точки зрения качества изображения, которое должно быть хорошим по всему полю [30, 42]. Особенно высоки требования к искажениям, вызываемым дисторсией объективов, так как при наличии их изображение не будет подобно фотографируемой местности, и составленная по такому космическому фотоснимку карта не даст правильного представления об истинных размерах линий и углов на местности.

К глубине резкости особо жестких требований не предъявляется, так как фотографирование осуществляется с больших высот, т. е. объекты съемки практически находятся в бесконечности. Поэтому плоскость изображения в большинстве случаев совпадает с фокальной плоскостью объектива. Однако расфокусировка все-таки может быть за счет температурных деформаций корпуса фотоаппарата.

Большая скорость носителя вызывает сдвиг изображения в фокальной плоскости объектива, т. е. за время выдержки изображение на снимке будет смазано. Это явление резко снижает качество снимка.

Вращение Земли относительно плоскости орбиты вызывает угловое перемещение изображения и, следовательно, для получения фотоснимков хорошего качества требуются устройства, которые бы компенсировали это

смещение. Компенсация угловых перемещений является делом весьма сложным, так как в зависимости от местоположения КА и сферичности Земли фотографируемые объекты имеют не одинаковую скорость углового перемещения. Следовательно, устройства компенсации должны учитывать и эти явления, а это в свою очередь вызывает усложнение автоматических устройств фотоаппарата.

Изменение освещенности земной поверхности под КА по мере продвижения его по орбите накладывает особые требования на работу автоматики фотоаппаратуры: своевременная установка диафрагмы и выдержки, для чего требуются специальные автоматические устройства, реагирующие на изменение освещенности.

Более того, при обращении КА вокруг Земли возникают моменты, в которые солнечные лучи попадают в объектив или на устройства, измеряющие освещенность земной поверхности. Это явление накладывает требование по оснащению объектива и устройств измерения освещенности защитными приспособлениями. В противном случае солнечные лучи, сфокусированные на шторки затвора, могут прожечь их, и вывести из строя устройства измерения освещенности.

Фотографирование через весь слой атмосферы земной поверхности резко снижает контраст изображения, так как перед объективом находится большой слой воздушной дымки. Для устранения влияния ее нужны дополнительные мероприятия: фотографирование ведется в близкой инфракрасной области спектра, применяется спектрзональное фотографирование и т. д.

Фотографирование при большом кадре предъявляет повышенные требования к механизмам транспорта и выравнивания пленки. Формат кадра при космическом фотографировании может быть самым разнообразным от 18×24 мм до 1000×1000 мм по определенной шкале. Наиболее распространен формат кадра 300×300 мм. В ряде американских источников указывается, что при использовании для фотографирования из космоса фото-телевизионных установок применяется 70-миллиметровая фотопленка (фотографирование ведется при кадре 60×60 мм).

При космическом фотографировании аппаратура должна быть полностью автоматизированной, так как

на долю человека, если он находится на борту КА, приходятся другие обязанности; фотографическая аппаратура наравне с ручным управлением должна обладать способностью работать автоматически по наперед заданной программе.

Исходя из сказанного и учитывая особенности космического фотографирования, к фотографическому оборудованию КА можно предъявить следующие требования:

1) фотографическая система фотоаппарат — фотопленка должна иметь высокую разрешающую способность, удовлетворяющую требованиям решаемой задачи при фотографировании;

2) фотографические аппараты, имеющие длиннофокусные объективы, в целях устранения искажений в изображении за счет больших скоростей носителя должны иметь автоматические устройства компенсации сдвига изображения;

3) для обеспечения нормальных выдержек при фотографировании автоматические фотоаппараты должны иметь экспоиметры, позволяющие сохранять оптимальные экспозиции в условиях изменения освещенности снимаемых участков земной поверхности;

4) в целях выполнения автоматического фотографирования в состав фотоаппаратуры должны входить устройства, позволяющие проводить программную фотосъемку;

5) для обеспечения автоматического управления всем комплексом фотографической аппаратуры в состав ее должны входить устройства автоматического управления в виде программно-временных командных или вычислительных устройств;

6) в целях получения фотоснимков высокого качества фотографическая аппаратура в момент фотографирования должна иметь малые угловые перемещения и колебания;

7) весь комплекс фотографической и вспомогательной аппаратуры по возможности должен иметь малые габариты, массу и должен быть относительно дешев.

Это далеко не полный список требований, которые можно предъявить к фотографическому оборудованию КА.

Анализируя особенности космического фотографирования и учитывая требования, предъявляемые к фото-

графической аппаратуре, предназначенной для его выполнения, можно сформулировать некоторые требования, предъявляемые к орбитам носителей этой аппаратуры.

Прежде всего орбиты КА должны удовлетворять требованиям, направленным на выполнение той или иной задачи, поставленной при космическом фотографировании. Исходя из поставленных условий будут рассчитываться параметры орбиты: наклон орбиты, величины апогея и перигея, период обращения.

Орбита КА должна обеспечивать выполнение условий фотографирования, т. е. проходить в условиях оптимальной освещенности фотографируемых территорий и объектов, иметь максимальную длительность рабочего периода, наибольший охват фотографируемой поверхности и т. д.

Орбита КА должна проходить таким образом, чтобы обеспечивалось надежное управление КА и фотографической аппаратурой с наземных или надводных пунктов управления.

4.4. Особенности движения носителя фотоаппаратуры

Космическое фотографирование осуществляется с больших высот (до нескольких сот километров) и при длинных маршрутах съемки, измеряемых иногда несколькими тысячами километров. Высота полета носителя фотоаппаратуры и длина маршрута съемки определяются параметрами орбиты.

Орбита или траектория полета КА начинается с Земли и начальный период ее проходит в плотных слоях атмосферы. После вывода КА в заданную точку траектории и сообщения ему соответствующей скорости, он совершает полет по расчетной траектории (круговой, эллиптической, параболической). Для обеспечения нормальных условий космического фотографирования, т. е. сохранения постоянства высоты или ее незначительного изменения, как правило, используют круговые или эллиптические орбиты.

Обобщенное уравнение траектории полета КА в полярных координатах может быть записано в следующем виде [2]

$$r' = \frac{p'}{1 + e \cos(\theta - \theta_0)}, \quad (4.5)$$

где r' , Θ — полярные координаты текущей точки местонахождения КА на траектории;

$$p' = \frac{4G}{gR_3^2} \text{ — параметр орбиты;}$$

$G = \frac{1}{2} r_0 V_0 \cos \Theta_1$ — секториальная скорость (площадь, ометаемая радиусом-вектором траектории в единицу времени);

r_0 — радиус-вектор начальной точки орбиты, в конце траектории вывода КА; V_0 — скорость КА в конце активного участка; Θ_1 — угол наклона вектора скорости к горизонту в точке конца активного участка; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение, вызываемое силой земного притяжения; $R_3 = 6371 \text{ км}$ — средний радиус Земли;

$$e = \sqrt{1 + \frac{4G^2}{g^2 R_3^4} \left(V_0^2 - 2g \frac{R_3^2}{r_0} \right)} \text{ — эксцентриситет орбиты;}$$

$$\text{tg} \Theta_0 = \frac{4G^2 \text{tg} \alpha}{g R_3^2 r_0 - 4G^2}.$$

Из уравнения траектории следует, что при $V_0 > \sqrt{2gr_0}$ траектория будет гиперболой ($e > 1$); при $V_0 = \sqrt{2gr_0}$ — параболой ($e = 1$); при $V_0 < \sqrt{2gr_0}$ — эллипсом ($e < 1$).

Кроме выбора необходимого типа траектории, важное значение при космическом фотографировании имеет скорость полета носителя, так как она накладывает жесткие требования на механизм компенсации сдвига изображения. В связи с этим КА необходимо выводить на высоту, отвечающую выбранной точке исходя из решаемой задачи и характеристик фотографической аппаратуры, и сообщать ему необходимую скорость, совпадающую по направлению с касательной к заданной орбите в этой точке. Минимальная скорость может быть сообщена КА, если его движение по орбите начинается в точке апогея. Но дополнительные энергетические затраты, связанные с подъемом КА на большую высоту, превышают выигрыш, который будет получен от уменьшения скорости аппарата. Оказывается, наиболее рациональным с точки зрения энергетических затрат является выведение КА на орбиту в области перигея.

Наиболее выгодно производить запуск КА в восточном направлении, так как в этом случае к скорости, сообщенной ему на активном участке ракетой-носителем, добавляется часть окружной скорости суточного вращения Земли как некоторая начальная скорость в момент старта.

Приращение скорости КА за счет вращения Земли зависит от угла наклона плоскости орбиты к плоскости экватора и может быть выражено приближенной формулой [3]

$$\Delta V_{\text{орб}} = \omega_3 (R_3 + H_0) \cos \varphi_e,$$

где ω_3 — угловая скорость вращения Земли; H_0 — высота выведения КА; φ_e — широта точки старта.

Максимальное увеличение скорости возникает в случае, если КА выводится на экваториальную орбиту, и равно нулю, если на полярную. Для отечественных КА, запускаемых на орбиты с углом наклона в 65° , это приращение составляет около 200 м/с.

Здесь следует также заметить, что при заданной географической широте места запуска невозможно получить орбиту с наклоном $i < \varphi_r$, так как все остальные плоскости орбит, проходящие через точку с заданной широтой, будут иметь наклон больше, чем значение φ_r . Минимальное значение угла наклона, если задана географическая широта, будет равно ее численному значению.

Следовательно, орбиты с малыми углами наклона можно получить только в случае, если запуски КА осуществлять с широт, близких к экваториальным. Полярные орбиты могут быть получены из любой точки земной поверхности.

Относительное движение КА, выполняющего полет, с целью фотографирования наземных объектов и территорий Земли и находящегося в гравитационном поле ее, характеризуется координатами КА на подстилающую поверхность. Этими координатами являются: высота полета, путевой угол орбиты и скорость относительно Земли.

Известно [40], что положение проекции КА на поверхности Земли определяется широтой и долготой, которые связаны с элементами орбиты КА равенством

$$\text{tg } \varphi_r = \text{tg } i \sin (\omega_3 t + \Delta \lambda'), \quad (4.6)$$

где i — наклонение орбиты КА; ω_3 — суммарная угловая скорость вращения Земли и прецессии орбиты КА; t — время полета КА от восходящего узла орбиты до данной точки на ней; $\Delta\lambda'$ — разность долгот данной точки орбиты и восходящего узла орбиты.

Таким образом, проекция траектории на поверхности Земли будет проходить в пределах — $90^\circ \leq i \leq 90^\circ$. При этом долгота точки проекции с максимальной широтой будет определяться из соотношения

$$\lambda'_{\max} = \lambda'_в + 90^\circ - \omega_3 t_1,$$

а с минимальной широтой

$$\lambda'_{\min} = \lambda'_в + 270^\circ - \omega_3 t_1,$$

где $\lambda'_в$ — долгота восходящего узла орбиты; t_1 — время полета КА от восходящего узла до соответствующих высшей и низшей точек орбиты и равное половине периода обращения (T) КА.

С каждым очередным витком в силу вращения Земли проекция траектории КА будет смещаться относительно первоначальной проекции на запад на величину

$$\Delta\lambda' = \omega_3 T. \quad (4.7)$$

Так, при $T = 90$ мин смещение проекции, обусловленное вращением Земли, без учета явления прецессии орбиты составляет $22,5^\circ$. Полученное значение сразу же предъясняет определенные требования к величине поля зрения фотографической аппаратуры, т. е. для того чтобы вести фотографирование без пропусков территории, поле зрения фотографической системы должно быть не менее $2\Delta\lambda'$. С увеличением периода обращения смещение проекции естественно увеличивается. При изменении наклона орбиты проекция ее смещается и при $i = 90^\circ$ смещение будет максимальным, а при $i = -90^\circ$ равным нулю, т. е. проекция орбиты будет совпадать с экватором Земли.

Если углы наклона орбит малы, то проекции траекторий, находящихся в некоторых пределах от $-i$ до $+i$, не проходят по всем участкам земной поверхности и соответственно фотографическая аппаратура не в состоянии фиксировать интересующие участки поверхности в больших северных и малых южных широтах. Следовательно, для надежного охвата всех участков земной

поверхности необходимо, чтобы траектории проходили близко к полярным, т. е. с большим углом наклона орбиты.

Высота, на которой находится носитель фотографической аппаратуры, со временем непрерывно меняется (если орбита эллиптическая), и может быть определена из формулы

$$H = \frac{r'}{1 - e \cos \theta'} - R_3, \quad (4.8)$$

где θ' — истинная аномалия КА в момент определения высоты.

Минимальная высота в этом случае будет в точке перигея, а максимальная в точке апогея. Путевой угол β КА в любой точке траектории его движения зависит от широты данной точки, т. е.

$$\beta = \arccos(\cos i \sec \varphi_r).$$

Здесь φ_r — значение геоцентрической широты КА в момент измерения путевого угла. Величина путевого угла в точке восходящего узла орбиты определяется из соотношения $\beta = 90^\circ - i$, а в точке нисходящего узла — $\beta = 90^\circ + i$. В точках проекции орбиты, соответствующих местонахождению КА, с наибольшими и наименьшими широтами при любом наклоне орбиты путевой угол равен 90° .

Проекция орбитальной скорости на поверхность Земли определяется как векторная разность, т. е.

$$\bar{V}' = \bar{V}'_{\text{орб}} - \bar{V}_3, \quad (4.9)$$

где $\bar{V}'_{\text{орб}}$ — проекция вектора орбитальной скорости на поверхность Земли.

V_3 — вектор линейной скорости суточного вращения точки Земли, в которую проектируется КА (направлен вдоль параллели Земли с запада на восток).

Не менее важной особенностью носителя фотографической аппаратуры является время существования его на орбите, которое определяется продолжительностью полета КА с момента выведения его на орбиту до входа в плотные слои воздуха (ниже 150—160 км) [40]. Установлено, что критическим значением периода обращения, т. е. временем, в течение которого еще обеспечивается орбитальный полет, является значение, равное 87,75 мин при высоте 170 км.

Время существования КА и число оборотов, которое может совершить КА до снижения на критическую высоту, могут быть вычислены по приближенным формулам

$$\left. \begin{aligned} t_c &= \frac{0,75eT_0}{(\Delta T_0)_c}; \\ N &= \frac{0,75eT_0}{\Delta T_0}, \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

где e , T_0 — соответственно эксцентриситет орбиты и период обращения, ΔT_0 , $(\Delta T_0)_c$ — соответственно изменение периода обращения за один оборот и за одни сутки к моменту времени t_0 .

Для вычислений более точных значений используется ряд других формул с введением дополнительных параметров. Время существования КА на орбите в значительной степени зависит от высоты орбиты КА и поперечной нагрузки.

4.5. Изменения освещенности Земли в зависимости от параметров орбиты КА и факторы, влияющие на освещенность в плоскости изображения

Фотографирование из космоса земной поверхности и ее образований представляет собой сложный процесс как в техническом, фотохимическом, так и в светотехническом отношении. Для того чтобы получить изображение фотографируемых объектов и образований Земной поверхности, удовлетворяющее заданным требованиям на космическое фотографирование, необходимо тщательно учитывать все условия, определяющие качество фотоснимков. Как это было показано ранее, этими условиями являются:

- оптические свойства земной поверхности, ее освещенность, интервал яркостей, спектральные характеристики;

- влияние промежуточной среды между фотографируемыми объектами и фотографической системой;

- оптические свойства фотографической системы;

- характеристики фотографической пленки и светочувствительных элементов;

- влияние условий фотографирования и факторов, определяющих фотографический процесс на экспозицию;

— условия проведения негативного процесса, т. е. фотохимической обработки экспонированной фото- пленки.

Оптические свойства земной поверхности, ее освещенность, интервал яркостей и спектральные характеристики (прил. 1) рассмотрены в главе 1. Поэтому здесь остановимся на установлении зависимости изменения освещенности Земли от параметров орбиты КА и последующих факторах.

В предыдущем параграфе установлено, что географическая широта проекции точки местонахождения КА определяется зависимостью (4.6). В то же время освещенность земной поверхности в зависимости от высоты стояния Солнца может вычисляться по формуле [29]

$$E = E_0 \tau_a^{\sec z_0} \cos z_0^2.$$

Кроме того, известно [47], что высота стояния Солнца в зависимости от географической широты, видимого в заданной точке склонения Солнца для данного времени года, от часового угла Солнца может быть определена по основной формуле сферической тригонометрии, т. е.

$$h_0 = \arcsin (\sin \varphi_r + \sin \delta_0 + \cos \varphi_r \cos \delta_0 \cos t_0), \quad (4.11)$$

где δ_0 — видимое склонение Солнца, t_0 — часовой угол Солнца.

Также известно, что зенитное расстояние Солнца связано с высотой стояния Солнца соотношением

$$z_0 = 90^\circ - h_0. \quad (4.12)$$

Таким образом, если формулу (4.6) подставить в (4.11), а затем полученное в (4.12), то найдем выражение, устанавливающее связь зенитного расстояния Солнца с параметрами орбиты полета КА, т. е.

$$z_0 = 90^\circ - \arcsin (\sin \{\arcsin [\operatorname{tg} i \sin (\omega_3 t + \Delta \lambda')]\} \times \\ \times \sin \delta_0 + \cos \{\arcsin [\operatorname{tg} i \sin (\omega_3 t + \Delta \lambda')]\} \cos \delta_0 \cos t_0).$$

Если полученное выражение подставить в формулу освещенности, найдем расчетную формулу для вычисления освещенности земной поверхности в зависимости от параметров орбиты КА и координат его местонахождения для условий безоблачной атмосферы, т. е.

$$E = E_0 \tau_a^{\sec z_0} \cos z_0 + \pi B_a, \quad (4.13)$$

где B_a — яркость атмосферы, обусловленная рассеянием света в ней.

Наличие облачного покрова отрицательно влияет на качество фотографического изображения, так как освещенность, создаваемая Солнцем на границе атмосферы, составляет около 130 000 лк, то значение яркости облачного покрова больше, чем значения яркости наземных объектов. Кроме того, поскольку облачный покров расположен ближе к фотографической системе, чем объекты съемки, то он создает мешающий яркий фон, который вызывает засветку фотографического материала, и изображения объектов съемки практически получить не представляется возможным.

Вторым существенным фактором, снижающим качество изображения, является слой атмосферы, через который ведется фотографирование. Слой атмосферы практически не бывает идеально прозрачным, в нем всегда присутствуют многочисленные мельчайшие частицы (пыли, дыма, водяного пара и т. д.), которые вызывают рассеяние света и заставляют в какой-то степени этот слой светиться.

Таким образом, мутная среда — дымка, обладающая некоторой яркостью, накладывает на изображение объектов в свою очередь добавочную яркость и тем самым уменьшает контраст изображения.

Плотность дымки зависит от физико-географических и климатических особенностей районов земного шара, времени суток, сезонных метеорологических изменений и т. д. Так, в районах больших водных пространств наблюдается большая прозрачность атмосферы по сравнению, например, со степными и пустынными районами, где в воздухе большое содержание мельчайшей пыли. В ряде случаев дымка становится настолько яркой, что несмотря на контрастность объектов и фотопленки получить сколько-нибудь удовлетворительные снимки практически не представляется возможным.

Устранение или ослабление влияния яркости дымки на качество изображения является одной из важных задач при выполнении фотографической съемки. Для этой цели используют оптические светофильтры и специальные сорта фотографических пленок.

Применение светофильтров позволяет абсорбировать отраженные и рассеянные атмосферой вредные лучи

света, лежащие влево от зеленого участка спектра. Наиболее распространенными являются светофильтры желтого, оранжевого и реже красного цвета различных плотностей. Использование светофильтров указанных окрасок обусловлено тем, что синие, фиолетовые и ультрафиолетовые лучи в силу отражения и рассеивания их атмосферой, не идут на образование изображения, хотя большинство фотопленок более чувствительны именно к этим лучам. В то же время, используя желтые или оранжевые фильтры, тем самым уменьшают световой поток, необходимый для нормального построения изображения. В этом случае, учитывая кратность светофильтра, необходимо изменять экспонирование фотопленки таким образом, чтобы компенсировать недостачу светового потока. Обычно это делается путем учета коэффициента кратности при расчете времени экспонирования.

Наряду с влиянием дымки на качестве фотографического изображения в значительной степени сказываются и метеорологические условия в слое атмосферы, через который ведется фотографирование. Облака верхнего яруса, а частично и нижнего делают в большинстве случаев космическое фотографирование невозможным, так как простираются на высотах 500—3000 м и закрывают объекты съемки. При редкой облачности на поверхности Земли образуются тени, которые вызывают затруднения при дешифрировании фотоинформации как ручным, так и машинным способом.

Следующим фактором, оказывающим влияние на качество фотографического изображения, являются оптические свойства фотографической системы. Световой поток в фотоаппарате состоит из двух частей: «организованного» потока, образующего изображение фотографируемых объектов, и «неорганизованного» рассеянного света [29]. Рассеянный свет возникает за счет отражений в объективе, его оправе, на деталях затвора, от белой поверхности светочувствительного слоя. Кроме того, поле изображения, которое строит объектив, круглое, а на фотопленку проецируется вырезаемый предметной рамкой прямоугольник. Участки срезанного поля проецируются на стенки камеры и также создают дополнительное рассеяние. Влияние рассеянного света

такое же, как дымки, т. е. снижается контраст изображения.

Таким образом, оптическая система фотоаппарата, элементы и узлы вносят некоторые погрешности в изображение, создаваемое световым потоком, пришедшим от объектов съемки через атмосферу, оптическую систему и камеру фотоаппарата. При этом освещенность, создаваемая в каждой точке плоскости изображения, определяется по формуле [47]

$$E' = E_0' \cos^4 \alpha, \quad (4.14)$$

где E_0' — освещенность в центре поля зрения, α — угол отклонения луча, проходящего через главную точку объектива и точку, где определяется освещенность, от оптической оси объектива.

Формула (4.14) справедлива в предположении, что явление виньетирования отсутствует. В реальных объективах учитывают это явление коэффициентом виньетирования, представляющего собой отношение площади сечения наклонных пучков к площади сечения, проходящего через центральную часть объектива. Таким образом, освещенность в плоскости изображения с учетом виньетирования определится из формулы

$$E'_v = K_v \cos^4 \alpha, \quad (4.15)$$

где K_v — коэффициент виньетирования.

Помимо виньетирования на величину освещенности оказывает влияние потеря светового потока в оптической системе фотоаппарата. Они обуславливаются отражением световых потоков на преломляющих поверхностях объектива, граничащих с воздухом, и учитываются коэффициентом пропускания объектива

$$\tau_0 = 0,95^{m'} \exp(\tau_y l), \quad (4.16)$$

где 0,95 — доля светового потока, которую пропускает каждая преломляющая поверхность; m' — число преломляющих поверхностей; τ_y — удельный коэффициент пропускания для данного оптического стекла; l — путь лучей, на котором происходит затухание.

Принимая во внимание коэффициенты виньетирования K_v и пропускания τ_0 , освещенность в плоскости изображения вычислится по формуле

$$E' = K_v \tau_0 \frac{rE_0 q^2}{4} \cos^4 \alpha, \quad (4.17)$$

где r — коэффициент яркости (его значения для наиболее основных объектов съемки приведены в прил. 1); E — освещенность объектов съемки; q — относительное отверстие объектива.

Учитывая, что при фотографировании необходимо получить изображение даже самых темных деталей по всему полю кадра, последняя формула может быть представлена так

$$(E')_{\min} = (K_a)_{\min} \tau_0 \frac{r_{\min} E q^2 \cos^4 \alpha}{4}. \quad (4.18)$$

Помимо нужной освещенности на качество изображения фотографируемых объектов на пленке в значительной степени оказывают влияние ее параметры; чувствительность, зернистость, наличие противоореального слоя и т. д. Выбор фотопленки зависит от решаемой задачи. Наибольшее распространение при космическом фотографировании получила панхроматическая пленка, чувствительная ко всем лучам видимого спектра, за исключением крайних красных. Наряду с панхроматическими могут быть использованы изохроматическая, инфрахроматическая, спектрзональная и цветная пленки [59]. Основные характеристики некоторых типов пленки приведены в прил. 2.

4.6. Расчет скорости перемещения изображения по чувствительному слою в зависимости от параметров орбиты

Одним из основных факторов, определяющих качество изображения на фотопленке, как это было установлено ранее, является линейный сдвиг изображения в момент фотографирования. Для того чтобы это явление устранить, в космических фотосистемах используют специальные устройства, компенсирующие сдвиг изображения. Поскольку полностью компенсировать сдвиг невозможно, остаточную погрешность влияния сдвига изображения на разрешающую способность рассчитаем по формуле [12]

$$R_a = R_0 \left\{ \frac{\sin(\pi R \delta \eta)}{\pi R \delta \eta} \cdot \frac{\sin[\pi R \delta (1 - \eta)]}{\pi R \delta (1 - \eta)} \right\}^{0,36}, \quad (4.19)$$

где R_0 и R_c — разрешающие способности фотографической системы при соответствующем контрасте без учета

и с учетом сдвига изображения соответственно; δ — линейный сдвиг изображения; η — коэффициент полезного действия затвора.

Формула (4.19) дает общее представление о влиянии сдвига изображения на разрешающую способность всей системы, но не учитывает исходного контраста объектов фотографирования и контрастно-частотных характеристик фотографической системы в целом.

Допустимая величина сдвига изображения $\delta_{\text{доп}}$ исходя из условий разрешающей способности может быть определена из формулы

$$\delta_{\text{доп}} = \frac{1}{\kappa R_0}, \quad (4.20)$$

где κ — коэффициент, характеризующий относительное снижение разрешающей способности. По [11] значение κ колеблется от 5 до 1,25.

Известно также, что величина допустимого сдвига изображения определяется из зависимости

$$\delta_{\text{доп}} = \Delta V_{\text{и}} t_{\text{э}}, \quad (4.21)$$

где $t_{\text{э}}$ — время экспонирования фотоматериала,

$\Delta V_{\text{и}}$ — скорость декомпенсации сдвига изображения.

Из соотношений (4.20) и (4.21) следует, что допустимая скорость декомпенсации в фокальной плоскости может быть определена из соотношения

$$(\Delta V_{\text{и}})_{\text{доп}} = \frac{1}{\kappa R_0 t_{\text{э}}}, \quad (4.22)$$

Таким образом, из (4.20), (4.21) и (4.22) следует, что допустимое и абсолютное значения скорости декомпенсации в период экспонирования зависит от разрешающей способности при соответствующем коэффициенте контраста. Допустимое значение относительной скорости изображения в плоскости чувствительного слоя фотопленки составит

$$(\Delta V_{\text{и}})_{\text{доп}} = \frac{(\Delta V_{\text{и}})_{\text{доп}}}{V_{\text{и}}}, \quad (4.23)$$

где $V_{\text{и}}$ — суммарная скорость перемещения изображения, обусловленная линейным перемещением центра масс КА, его угловыми перемещениями из-за нарушения ориентации в момент фотографирования и вращением Земли.

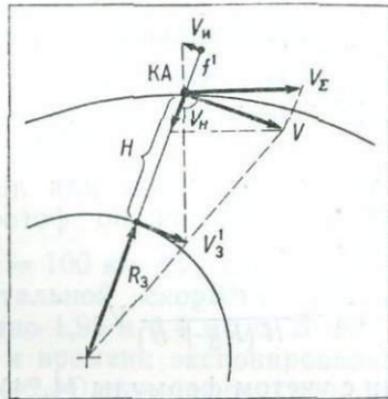


Рис. 4.3. Линейная скорость сдвига изображения в фокальной плоскости фотографической системы

Значение $(\Delta V_{и})_{доп}$ обычно задается заранее, исходя из решаемой задачи. Следовательно, для определения допустимого значения относительной скорости изображения необходимо знать значение скорости $V_{и}$ перемещения изображения в плоскости чувствительного слоя фотоматериала.

Методика определения $V_{и}$ в этом случае может быть следующей. Для вывода зависимости линейной скорости сдвига изображения рассмотрим рис. 4.3, из которого видно, что суммарная скорость перемещения КА по траектории будет равна

$$V_{\Sigma}^2 = V_H^2 + V^2,$$

где V_H — скорость КА, обусловленная силой земного притяжения; V — линейная скорость, обусловленная угловым перемещением КА по орбите.

Откуда

$$V = \sqrt{V_{\Sigma}^2 - V_H^2} = \dot{\theta} r', \quad (4.24)$$

где $\dot{\theta} = \frac{2\pi}{T}$ — угловая скорость движения КА относительно центра Земли; T — период обращения КА вокруг Земли.

Поскольку КА в процессе фотографирования ориентирован таким образом, что оптическая ось фотоаппарата направляется по направлению местной вертикали, то проекция скорости V на Землю составит значение V'_3 . Тогда, если учесть фокусное расстояние f' объектива фо-

то аппарата и значение высоты КА над Землей H , исходя из пропорциональных соотношений

$$\frac{V_{\text{н}}}{V_3} = \frac{f'}{H} \quad \text{и} \quad \frac{V_3}{V} = \frac{R_3}{R_3 + H},$$

получим выражение для линейной скорости перемещения изображения по фоточувствительной поверхности пленки

$$V_{\text{н}} = \frac{f' R_3}{H (R_3 + H)} V$$

или с учетом формулы (4.24)

$$V_{\text{н}} = \frac{2\pi f' R_3 r'}{TH (R_3 + H)}. \quad (4.25)$$

Если значение r' , взятое из (4.5), подставить в выражение (4.25), то последнее в окончательном виде запишется так

$$\begin{aligned} V_{\text{н}} = & \frac{4\pi f' r_0 V_0 \cos \theta_1}{g T H R_3 (R_3 + H)} \left\{ 1 + \right. \\ & + \sqrt{1 + \frac{r_0^2 V_0^2 \cos^2 \theta_1}{g^2 R_3^4} \left(V_0^2 - 2g \frac{R_3^2}{r_0} \right)} \times \\ & \left. \times \cos \left[\theta - \arctg \left(\frac{r_0 V_0^2 \cos^2 \theta_1 \operatorname{tg} \theta_1}{g R_3^2 - r_0 V_0^2 \cos^2 \theta_1} \right) \right] \right\}^{-1}. \quad (4.26) \end{aligned}$$

Полученная формула позволяет вычислить линейный сдвиг изображения в плоскости фотопленки для случая эллиптической орбиты и идеальной ориентации КА. При наличии неточности ориентации КА относительно местной вертикали и поворота его по углу рыскания будут возникать изменения z скорости перемещения изображения. Формула (4.26) не учитывает приращения орбитальной скорости, обусловленной угловой скоростью вращения Земли и наклоном орбиты к плоскости экватора.

Установлено [2], что приращение орбитальной скорости КА для средних и малых широт и высот, характерных для большинства орбит существующих КА, состав-

ляет от 200 до 450 м/с. Для расчета приращения в скорости перемещения изображения в этом случае можно воспользоваться приближенной формулой, полученной из тех же пропорциональных соотношений, что и формула (4.25), представленной в виде

$$\Delta V_{\text{и}} \cong \frac{(200 \div 450) f' R_3}{H (R_3 + H)}.$$

Так при $f' = 1000$ мм и $H = 100$ км $\Delta V_{\text{и}}$ для крайних значений приращений орбитальной скорости 200 и 450 м/с составит соответственно 1,95 и 4,4 мм/с. В зависимости от решаемых задач и времени экспонирования этот сдвиг можно и не учитывать. Однако в совокупности с другими факторами, вызывающими линейный сдвиг, $\Delta V_{\text{и}}$ необходимо учитывать как дополнительную поправку.

Здесь все рассуждения велись в предположении, что вектор скорости перемещения КА лежит в плоскости орбиты. В то же время и компенсация сдвига изображения осуществляется, как правило, перемещением пленки в период экспонирования со скоростью, равной по величине и направлению скорости перемещения изображения.

В этом случае для компенсации сдвига изображения в заданных пределах необходимо, чтобы ориентация КА относительно местной вертикали и по углу рыскания выполнялась с высокой точностью. В случае ошибок системы ориентации КА по полю кадра возникают составляющие скорости изображения, которые не всегда можно скомпенсировать.

4.7. Особенности расчета экспозиции при космическом фотографировании

На качество фотографического изображения при космическом фотографировании, кроме рассмотренных ранее факторов, оказывает влияние и точность экспозиции. Особенно при фотографировании из космоса нельзя допускать передержек, так как затрудняется дешифрирование мелких деталей, поскольку съемка ведется с больших высот и масштаб фотоснимков относительно мал.

При космическом фотографировании, для того чтобы получить фотоснимки хорошего качества, необходимо

решать еще три задачи. Это найти оптимальные выдержки при данных условиях фотографирования, определить время начала съемки при максимальной выдержке, обусловленной допустимым сдвигом изображения, и учесть природные условия районов съемки.

Экспозиция (или количество освещения), представляющая собой произведение освещенности, создаваемой оптической системой фотоаппарата в плоскости изображения, на время экспонирования зависит от целого ряда факторов, которые влияют на освещенность. Этими факторами являются: входная апертура оптической системы, фокусное расстояние объектива, яркость объектов съемки или средний коэффициент яркости для совокупности объектов, коэффициент светотдачи фотоаппарата, светочувствительность фотоматериала и кратность светофильтра. С учетом этих факторов время экспонирования определяется по формуле

$$t = \frac{40F^2q'}{E\bar{\rho}K_a S_{D(0,85)}},$$

где $F = \frac{f'}{L_{св}}$; f' — фокусное расстояние объектива; $D_{св}$ — световой диаметр входного отверстия объектива; q' — кратность светофильтра для данного светочувствительного материала; E — освещенность фотографируемой поверхности; $\bar{\rho}$ — средний коэффициент яркости; K_a — постоянная величина, характеризующая данный фотоаппарат; $S_{D(0,85)}$ — светочувствительность фотопленки.

Указанная формула позволяет вычислить время экспонирования при наличии всех входящих в нее параметров. Параметры определяются заранее, а такие из них, как освещенность, могут измеряться непосредственно на борту КА с помощью специальных устройств и вводиться в решающее устройство, которое, вычислив значение времени экспонирования, выдает необходимые сигналы на установку соответствующих значений выдержек в фотографическом затворе.

В ряде случаев задача может решаться от обратного, т. е. зная необходимую экспозицию, которая обеспечит качественное получение фотографического изображения на фотопленке, находят время экспонирования. Сущность методики заключается в следующем [5].

Известно, что экспозиция определяется из формулы

$$H' = E't_3,$$

где t_3 — время экспонирования фотоматериала.

Если в выражении (4.18) правую и левую части умножить на t_3 , то получим

$$t_3 (E')_{\min} = t_3 (K_B)_{\min} \tau_0 \frac{r_{\min} E q'^2 \cos^4 \alpha}{4},$$

откуда

$$t_3 = \frac{4 t_3 (E')_{\min}}{(K_B)_{\min} \tau_0 r_{\min} E q'^2 \cos^4 \alpha}$$

или

$$t_3 = \frac{4H'}{(K_B)_{\min} \tau_0 r_{\min} E q'^2 \cos^4 \alpha}. \quad (4.27)$$

Формула (4.27) дает возможность вычислить время экспонирования чувствительного материала, но без учета чувствительности фотопленки. Для учета светочувствительности фотоматериала в формулу вводится значение светочувствительности, которое определяется по формуле

$$S_{D(0,85)} = \frac{10}{H_{D_0+0,85}} \quad (4.28)$$

и значение кратности светофильтра q' .

С учетом (4.28) формула (4.27) в окончательном виде запишется так

$$t_3 = \frac{40q'}{(K_B)_{\min} \tau_0 r_{\min} E q'^2 S_{D(0,85)} \cos^4 \alpha}. \quad (4.29)$$

По данной формуле можно рассчитать минимальное значение времени экспонирования фотоматериала в любой точке изображения, так как все величины, входящие в формулу, известны. Неизвестна только величина освещенности фотографируемой поверхности, которая рассчитывается по формуле (4.13) с учетом параметров орбиты и географических координат.

В практике расчетов значение t_3 вычисляют для некоторых определенных значений параметров и для центральной части изображения. В этом случае формула (4.29) примет следующий вид:

$$t_3 = \frac{40q'}{K_B \tau_0 r E q'^2 S_{D(0,85)}}. \quad (4.30)$$

Значение величины t_0 при космическом фотографировании ограничивается скоростью носителя фотографической аппаратуры. При длительном экспонировании, учитывая что КА перемещается с большой линейной скоростью, изображение, как это было показано в предыдущем параграфе, перемещается, вызывая смазывание на фотопленке даже при условии компенсации сдвига изображения. Связь между величиной сдвига ξ и временем экспонирования t_0 определяется формулой [29]

$$\xi = \frac{V_{\text{орб}} t_0 K}{H}, \quad (4.31)$$

где K — поправочный коэффициент, учитывающий свойства светочувствительного материала, условия проявления и ориентировочно равный 0,7.

Таким образом, для того чтобы получить из космоса фотографические снимки хорошего качества, необходимо наряду со всеми прочими факторами точно определять время экспонирования. Однако если учитывать, что фотографирование ведется при большой скорости КА, то расчет и ввод значений t_0 должны осуществляться заблаговременно до момента съемки. Следовательно, для выполнения этих операций на борту КА должны быть предусмотрены соответствующие решающие устройства, входными параметрами которых являются сигналы астроизмерительных устройств и экспонетрических приборов.

Продолжительность периода фотографирования, а также время начала и конца его определяются параметрами орбиты и географическими координатами местонахождения КА и могут быть вычислены из формулы [5]

$$t_0 = \arccos \left[\frac{\sin h_0 - \sin \varphi_r \sin \delta_0}{\cos \varphi_r \cos \delta_0} \right]. \quad (4.32)$$

Значение часового угла Солнца выражено в градусах, и для получения временной характеристики его переводят в меру времени исходя из соотношений, обусловленных изменением часового угла Солнца в течение одного витка КА, т. е. на 360° : $1^{\text{ч}}$ соответствует 15° ; $1^{\text{м}}$ соответствует $15'$, и, наоборот, 1° соответствует $4^{\text{м}}$.

Природные условия районов съемки по трассе полета также оказывают существенное влияние на качество фо-

тоснимков и их дешифрируемость [29]. Земные образования, находящиеся под снегом, вряд ли могут дать какую-либо информацию. Поэтому при фотографировании следует учитывать сезонные изменения ландшафта. Так, в северных широтах его наиболее целесообразно проводить ранней весной, так как листовенная растительность по тону окраски резко отличается от фонового покрова. Для смешанных лесов предпочтителен осенний период фотографирования. Для степных и пустынных районов характерно то, что растительный покров их весной и осенью резко отличаются.

При разведке и исследовании полезных ископаемых в гористой и овражистой местностях, когда ведется крупномасштабное фотографирование, на объекты съемки могут накладываться тени от соседних предметов. В этом случае необходимо заботиться о том, чтобы детали съемки в тени были бы различимы.

При съемке лесных и болотистых районов выгоднее использовать инфрапленки с оранжевым или красным светофильтрами в целях определения их границ, поражения растительности вредителями и т. д. Вода и влажная почва поглощают инфракрасные лучи и, следовательно, эти участки контрастно изображаются на фотоснимках. Однако многие другие объекты на инфрахроматической пленке получаются плохо, а тени получаются без деталей. Поэтому целесообразно одновременно с фотографированием на инфрахроматическую пленку вести фотографирование и на панхроматическую пленку со слабым желтым фильтром.

Проведение фотографирования в интересах коммунального хозяйства городов и населенных пунктов, а также в целях их картографирования сталкивается с таким фактором, как тени от соседних построек и зданий. Кроме того, над современными городами в атмосфере находится слой серой дымки, бороться с которой при фотографировании из космоса практически невозможно, но для повышения контраста деталей в тени необходимо использовать ряд существующих мероприятий.

Фотографирование из космоса подводных объектов при проведении океанологических и рыбохозяйственных исследований является еще более сложным, так как на условия видимости объектов съемки под водой накладывает свой отпечаток рассеяние света в водной среде,

ТАБЛИЦА 13
Коэффициенты увеличения выдержки

Глубина объекта, м	Прозрачность воды		
	хорошая	средняя	плохая
1	1,55	3,0	8,85
3	3,70	26,3	до 1000
9	5,25	—	—

влияние воздушной дымки, отражающие и поглощающие свойства воды.

Рассмотренные факторы больше, чем воздушная дымка, влияют на качество, которое при фотографировании подводных объектов зависит и от состояния водной поверхности. Необходимо также, чтобы высота стояния Солнца в момент фотографирования была не более некоторого значения, определяемого по формуле [29]

$$h_{\circ}^{\prime} \leq 90^{\circ} - 2\beta^{*} - \alpha' - \gamma, \quad (4.33)$$

где h_{\circ}^{\prime} — предельно допустимая высота стояния Солнца; β^{*} — угол наклона водной поверхности; α' — угол отклонения оптической оси фотоаппарата от направления местной вертикали в точке местонахождения КА; γ — ширина околосолнечного ореола, которая принята равной 2° . Для планового фотографирования $h_{\circ}^{\prime} \leq 51,3^{\circ}$.

При определении времени экспонирования необходимо в данном случае учитывать поглощение света в толще воды. Для ориентировочных расчетов выдержки можно воспользоваться значениями коэффициента увеличения, взятыми в [29] и предназначенными для расчета выдержек при фотографировании подводных объектов с самолетов (табл. 13).

Понятие «прозрачность хорошая» соответствует наблюдению белого диска Секки с поверхности под водой до полного его исчезновения на глубине 7 м и более, «прозрачность средняя» — на глубине от 3 до 7 м и «прозрачность плохая» — на глубине от 0 до 2,5 м. Приведенные значения рассчитывались для случая падения лучей на объект под $< 45^{\circ}$ на указанных глубинах и отразившихся вверх.

Как видно из табл. 13, при фотографировании подводных объектов даже на малых глубинах необходимо

значительно увеличивать время экспонирования. При этом выдержка может определяться с помощью автоматических устройств — экспозиметров, а табличная поправка вводится дополнительно, по программе, определяющей фотографический процесс в зависимости от параметров орбиты и местонахождения КА.

Для устранения влияния воздушной дымки, обусловленной рассеянием светового потока в толще воды, через который осуществляется фотографирование, целесообразно использовать длинноволновую часть видимого участка спектра, так как при длине волны $\lambda > 0,5$ мкм влияние ее становится минимальным. Кроме того, для устранения влияния отраженного поляризованного светового потока от поверхности воды на фотографическое изображение можно совместно с обычными светофильтрами использовать поляризационные, которые этот световой поток в фотоаппарат не пропускают, обеспечивая тем самым уменьшение посторонних бликовых засветок.

Глава 5. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

5.1. Методы повышения качества изображения, используемые при автоматизированной обработке фотоинформации

Обработка фотоинформации с использованием ЦВМ, как было показано ранее, сопряжена с определенными трудностями и проблемами. Одной из важных проблем при этом является сохранение качества передаваемой с борта КА фотоинформации. В связи с этим при цифровой обработке фотоинформации к кодированию и средствам передачи предъявляются повышенные требования по сохранению и неискажению передаваемых фотоизображений.

При передаче фотографических изображений аналоговые сигналы образуются путем развертки (просмотра) с помощью оптико-электронных сканирующих устройств

фотографических изображений. Эти сигналы, пропорциональные оптической плотности почернения элементов фотографического изображения, кодируются и передаются по линиям связи на Землю.

Для кодирования передаваемых сигналов в радиотехнике и телевидении используется большое число самых разнообразных способов и методов. Однако большинство из них по тем или иным причинам не находят применения. Наиболее распространенными способами кодирования фотографической информации являются:

— кодирование фотоинформации с преобразованием изображений;

— кодирование с помощью разностной кодово-импульсной модуляции;

— смешанное кодирование изображений;

— кодирование фотоинформации методом оконтуривания;

— межкадровое кодирование.

Рассмотрение приведенных способов выходит за рамки данного параграфа. Укажем лишь только, что с использованием этих методов удается достаточно полно восстанавливать изображения передаваемых фотоснимков, хотя и восстановленное изображение имеет погрешности, снижающие качество снимка и обусловленные несовершенством кодирующих устройств и линий передачи информации.

Повышение качества изображений при автоматизированной обработке фотоинформации заключается в представлении зрителю или обрабатывающему устройству дополнительной информации об изображении. В настоящее время при обработке фотоинформации для улучшения качества фотоснимков используют следующие группы методов: преобразование яркости, моделирование свойств глаза, подчеркивание краев изображений и псевдоцветовые методы.

Методы первой группы основаны на нелинейном преобразовании шкалы яркости. Так, если исходное изображение описывается функцией $g(x, y)$, то улучшенное по этому методу будет характеризоваться функцией $\hat{g}(x, y) = I(g(x, y))$, где I — нелинейная функция, не зависящая от координат x и y .

Методы моделирования основаны на изучении физиологических свойств глаза по восприятию информации на

фотоснимках и введении на этой основе предварительной коррекции в системы обработки и визуализации. Использование подобных моделей позволяет учитывать спектральную чувствительность, сенситометрические характеристики, временные параметры и т. д. В ряде случаев перенос некоторых физиологических свойств глаза на визуальные устройства дают возможность улучшить качество воспринимаемого изображения. Так, например, глаз способен в некоторой степени осуществлять дифференцирование высоких пространственных частот, обеспечивающих передачу мелкой структуры изображений и соответственно подчеркивать контуры объектов. Выделение краев изображений является достаточно эффективным методом улучшения качества, поскольку для человеческого глаза предпочтительно распознавание резких краев изображений. Для реализации этого явления на ЦВМ используют математический аппарат, работающий в области пространственных частот, которым является преобразование Фурье. Используя преобразование Фурье, увеличивают резкость контуров объектов путем применения монотонно нарастающих функций в плоскости пространственных частот.

Практическая реализация способа выделения контуров изображения основывается на вычитании однотипных изображений, причем одно из которых расфокусировано. В этом случае на выходе устройства вычитания получают сигналы, соответствующие контурам объекта. Кроме того, если исходное изображение подвергнуть расфокусировке, то [29] амплитуда яркости краев крупной детали падает ровно наполовину, а мелкой — значительно больше. Это обстоятельство используется для селекции деталей изображения по величине.

После получения высокочастотной компоненты, т. е. контура изображения, этот сигнал подвергается выпрямлению. В том случае, когда яркость при расфокусировке снижается наполовину, выпрямленные участки сигнала хорошо прилегают друг к другу, не образуя резких контрастных переходов, а там, где края детали при расфокусировке уменьшались более чем наполовину, при выпрямлении возникают резкие контрастные переходы. Теперь, если выпрямленный сигнал отфильтровать в фильтре нижних частот, то резкие контрастные переходы несколько сглаживаются. Затем, установив некоторый

порог ограничения, можно выделить те контрасты, которые наиболее полно характеризуют изображение.

Для улучшения качества черно-белого фотографического изображения в ряде случаев в него привносят цветовую информацию. Поскольку исходное изображение на фотопленке, обладающей узкополосной спектральной чувствительностью, является однотонным, то введение в изображение цветных составляющих приводит к псевдоцветовому эффекту. Это позволяет сделать видимой энергию невидимых участков спектра: инфракрасного и ультрафиолетового. Таким образом, добавляя информацию дополнительных участков спектра к основному, добиваются улучшения качества фотоизображения в целом. Применение псевдоцветового эффекта улучшает наблюдение динамического диапазона исходной шкалы серых тонов с помощью цветовой характеристики человеческого зрения. Известно, что составляющие пространственных частот изображаются определенным цветом, а поэтому, внося определенные цветовые добавления к основному, добиваются улучшения качества изображения и особенно в отображении их тонкой структуры.

При автоматизированной передаче и обработке фотоинформации наряду с названными способами улучшения качества может быть использован способ устранения общего фона и повышения контраста. В этом случае информация, считанная с фотоснимков, закодированная и переданная на Землю, до обработки в ЦВМ проходит предварительную обработку в электронных устройствах, в которых воспринимаемые сигналы декодируются и фильтруются через специальные устройства. В этих устройствах с них снимается постоянная составляющая, соответствующая оптической плотности вуали фотографической пленки, а сигналы, несущие полезную информацию, усиливаются и подаются в ЦВМ для дальнейшей обработки.

Таким образом, использование дополнительной электронной обработки фотоинформации позволяет снять с фотоизображений мешающий фон и повысить их контрастность.

В последнее время для улучшения качества изображений все чаще используется пространственно-частотный анализ. В ряде некоторых зарубежных источников [28] указывается, что несмотря на то что восстановление опи-

саний объектов по его изображению с помощью обратного преобразования Фурье наталкивается на серьезные трудности, изображение может быть улучшено умножением преобразования изображения на некоторую эвристическую передаточную функцию и дальнейшим проведением обратного преобразования

$$f(x, y) = F^{-1} \{H^*(\vartheta_1, \vartheta_2) b^*(\vartheta_1, \vartheta_2)\} = \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h^*(x - \xi, y - \eta) B(\xi, \eta) d\xi d\eta,$$

где $F^{-1} \{H^*(\vartheta_1, \vartheta_2) b^*(\vartheta_1, \vartheta_2)\}$ — обратное преобразование Фурье; $H^*(\vartheta_1, \vartheta_2)$ — некоторая передаточная функция обрабатываемой оптической системы, либо ее аналога; $b^*(\xi, \eta)$ — функция спектральной плотности распределения пространственных частот.

Это преобразование может быть вычислено либо оптическим способом, либо с использованием ЦВМ по соответствующим алгоритмам. При расчете на ЦВМ следует оперировать с яркостной выборкой $B(\xi, \eta)$ и дискретной формой преобразования Фурье. Кроме того, полученную свертку необходимо представить в виде конечной суммы

$$f_{m, n} = \Delta^2 \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} h_{m-l, n-k}^* B_{l, k}(x, y).$$

Вместе с тем, поскольку в настоящее время разработано быстрое преобразование Фурье (БПФ), то свертку рассчитывают путем умножения в Фурье-области. БПФ для кадра из $N \times N$ элементов описывается уравнением

$$B_{l, k}(x, y) = \frac{1}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} b_{m, n}^*(j\vartheta_1, j\vartheta_2) \times \\ \times \exp \left[j \frac{2\pi}{N} (im + kn) \right],$$

а его обратное преобразование

$$b_{m, n}(j\vartheta_1, j\vartheta_2) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} B_{l, k}(x, y) \times \\ \times \exp \left[-j \frac{2\pi}{N} (im + kn) \right].$$

Эти формулы приближенные, так как в них предполагается, что условие Дирихле выполняется по всему полю рассматриваемого кадра и вне его. На самом деле функция $B(x, y)$ вне кадра равна нулю. Однако неточность этого преобразования удастся устранить, а сам способ использовать для улучшения качества фотографического изображения, т. е. выполнять пространственную фильтрацию умножением в Фурье-области, вычислять статистические характеристики изображений и т. д.

Помимо изложенного здесь уместно остановиться на радиометрическом и геометрическом анализе фотонизображений. Суть радиометрического анализа состоит в определении энергетической яркости протяженных источников. Здесь также исходят из предположения, что измеряемая плотность элементов фотопленки является монотонной функцией эффективного освещения, если все другие факторы воздействия на плотность постоянны. Эта функция может быть определена заблаговременно путем измерения плотностей пленок, полученных при известных освещенностях. Другими словами, получают сенситограмму и характеристическую функцию. Эффективная освещенность, в свою очередь, пропорциональна проинтегрированному по всем длинам волн произведению энергетической яркости, чувствительности пленки и пропусканию вдоль оптического пути от точки в плоскости объекта до соответствующей точки в плоскости пленки. С помощью соответствующих алгоритмов и методов машинной обработки данных об эффективной освещенности удастся «развернуть» энергетическую яркость в одном или нескольких спектральных диапазонах. Учитывая время экспонирования, светорассеяние фотографической системы и параметры вне осевой коррекции, можно получить абсолютную радиометрическую информацию об объекте.

5.2. Основы оптической фильтрации

Сущность оптической пространственной фильтрации при анализе оптических изображений заключается в распространении принципа электронного фильтра, преобразующего информацию одного временного измерения, на пространственный фильтр, преобразующий информацию двух пространственных измерений. Пространственную

фильтрацию в ряде случаев определяют как процесс использования световой диафрагмы или оптической системы, в простейшем случае оптической линзы, с ее аберрационными характеристиками для пропускания световых потоков от объектов съемки, имеющих определенные размеры. Использование различных диафрагм, решеток, экранов различной формы и структуры позволяет выделять необходимые объекты по их пространственно-частотному спектру.

Прежде чем рассматривать непосредственно, каким образом осуществляется пространственная фильтрация тех или иных оптических или фотографических изображений, необходимо остановиться на фильтрующих свойствах обычной простейшей оптической системы. Пусть, например, имеется точечный источник света, расположенный в передней фокальной плоскости оптической линзы. На выходе линзы будет формироваться параллельный световой пучок. Освещенность, создаваемая точечным источником, на входе линзы может быть по определению [38] представлена в виде двумерной δ -функции

$$E(0, 0) = \delta(x, y).$$

Из математики известно, что одномерная δ -функция задается условием

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} = \infty & 0 < t < t_0 \\ 0 & t > 0 \end{cases}$$

и обладает двумя свойствами:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1;$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t - t_0) dt = f(t_0).$$

Последнее выражение описывает фильтрующие свойства δ -функции. Также известно, что прямое и обратное преобразования Фурье для δ -функции имеют вид

$$\delta(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{i\omega t} d\omega;$$

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) e^{-i\omega t} dt.$$

Аналогичным образом приведенные соотношения можно записать для двумерной δ -функции:

$$\delta(x - x_0, y - y_0) = \begin{cases} \infty, & x = x_0, y = y_0 \\ 0, & \text{в остальной области;} \end{cases}$$

$$\iint_{-\infty}^{\infty} \delta(x - x_0, y - y_0) dx dy = 1;$$

$$\iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x - x_0, y - y_0) dx dy = f(x_0, y_0).$$

Таким образом, согласно законам геометрической оптики, любая сферическая линза, если поместить точечный источник в ее передней фокальной плоскости, преобразует распределение освещенности в виде δ -функций в равномерную освещенность в области изображения.

Если сравнить это явление с преобразованием Фурье δ -функции, можно сделать вывод [38], что идеальная сферическая линза обладает свойством делать преобразование, аналогичное преобразованию Фурье, только двумерных сигналов. Так, если на вход линзы подается сигнал в виде двумерной δ -функции, то на выходе ее будем иметь сигнал в виде распределения пространственных частот, т. е. будут иметь место выражения:

$$\delta(x, y) = \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} \delta^*(\vartheta_1, \vartheta_2) e^{2\pi j(\vartheta_1 x + \vartheta_2 y)} dx dy;$$

$$\delta^*(\vartheta_1, \vartheta_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} \delta(x, y) e^{-2\pi j(\vartheta_1 x + \vartheta_2 y)} d\vartheta_1 d\vartheta_2.$$

Применительно к физическим величинам это явление можно пояснить на примере. Если положить, что точечный источник на входе идеальной оптической сферической линзы создает освещенность $E(x, y)$, то на выходе линзы, т. е. в области изображений, будет иметь место распределение $e^*(\vartheta_1, \vartheta_2)$, описываемое двумя соотношениями:

$$E(x, y) = \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} e^*(\vartheta_1, \vartheta_2) e^{2\pi j(\vartheta_1 x + \vartheta_2 y)} dx dy,$$

$$e^*(\vartheta_1, \vartheta_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} E(x, y) e^{-2\pi j(\vartheta_1 x + \vartheta_2 y)} d\vartheta_1 d\vartheta_2.$$

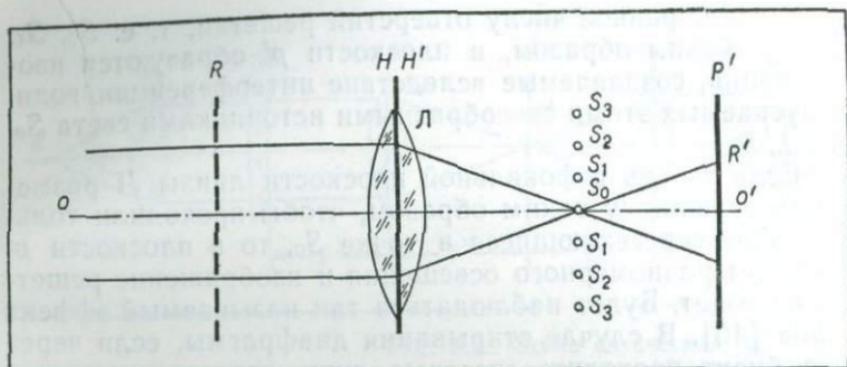


Рис. 5.1. Схема оптической фильтрации

Таким образом, в идеальной оптической системе комплексное распределение амплитуды освещенности светового поля в передней фокальной плоскости линзы связано с комплексным распределением светового поля в задней фокальной плоскости ее двумерным преобразованием Фурье. Следовательно, идеальная оптическая система обладает свойством Фурье-преобразования, а поскольку это так, то помещая в плоскости, в которой дифракционная картина объекта описывается его преобразованием Фурье (Фурье-плоскость), различные маски или транспаранты с заданным распределением прозрачности, можно определенным образом влиять на получаемый пространственно-частотный спектр, т. е. выполнять пространственную фильтрацию информации, расположенной в передней фокальной плоскости.

Принцип фильтрации пространственных частот рассмотрим с использованием оптической схемы, представленной на рис. 5.1 [46]. Пусть в качестве объекта преобразования взята амплитудная решетка R с чередующимися темными и светлыми линейными промежутками, установленная в передней фокальной плоскости линзы L . Решетка освещается параллельным когерентным пучком света, идущим из бесконечности, и размещается на таком расстоянии от линзы L , что изображение ее R' строится в плоскости p' . В фокальной плоскости оптической системы будет построено изображение точечного источника. Поскольку на входе стоит решетка, то в фокальной плоскости будем иметь число изображений точечного

источника, равное числу отверстий решетки, т. е. S_0, S_1, \dots, S_n . Таким образом, в плоскости p' образуются изображения, создаваемые вследствие интерференции волн, испускаемых этими своеобразными источниками света S_0, S_1, \dots, S_n .

Если теперь в фокальной плоскости линзы L разместить диафрагму таким образом, чтобы проходили только лучи, пересекающиеся в точке S_0 , то в плоскости p' не будет равномерного освещения и изображение решетки исчезнет. Будет наблюдаться так называемый эффект Аббе [46]. В случае открывания диафрагмы, если через нее будут проходить световые лучи, пересекающиеся в точках S_1, S_2 , в плоскости p' будет строиться изображение решетки. И чем больше будем открывать диафрагму, тем четче и точнее будет воспроизводиться изображение. Для лучшего воспроизведения изображения оригинала необходимо, чтобы оптическая система, строящая изображение, пропускала как можно большее количество информации, а если это касается передачи синусоидальной решетки, то большее количество максимумов S_1, S_2, \dots, S_n , соответствующих высоким пространственным частотам.

Если вместо синусоидальной решетки R взять некоторый объект с равномерным освещением, вместо светящихся точек $S_0, S_1, S_2, \dots, S_n$ в фокальной плоскости линзы L будет наблюдаться дифрагированное распределение света. При этом следует заметить, что лучи, дифрагированные от крупных деталей объекта, отклоняются меньше от осевой линии, а от мелких деталей — больше, поэтому для передачи крупных деталей требуются низкие пространственные частоты, а для мелких — высокие.

Таким образом, если в фокальной плоскости разместить диафрагму, которая пропускает только лучи приосевой части, то на экран будут передаваться низкие частоты, а следовательно, изображение деталей крупных размеров. Если вместо диафрагмы поместить экран, который будет задерживать приосевые лучи, в изображении будут передаваться высокие частоты, соответствующие мелким деталям. Тем самым осуществляется фильтрация низких пространственных частот в изображении объекта.

Использование оптических систем для пространственной фильтрации при когерентном монохроматическом освещении имеет некоторые особенности. Прежде всего

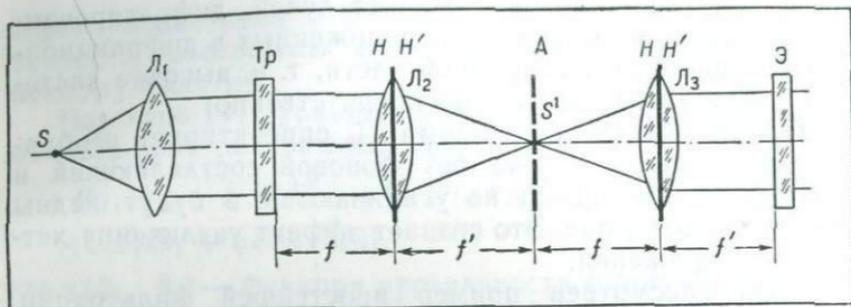


Рис. 5.2. Схема оптической фильтрации при когерентном монохроматическом освещении:

S — источник монохроматического светового потока; L_1, L_2, L_3 — оптические системы (в простейшем случае линзы); Tr — транспарант с изображением; Z — экран для наблюдения отфильтрованного изображения; A — плоскость размещения фильтра, f' — фокусное расстояние

поясним сущность пространственной фильтрации, выполняемой в этом случае.

Фильтрация изображений, размещаемых на прозрачном носителе, может быть выполнена с использованием схемы, представленной на рис. 5.2 [46]. Изображение описывается функцией $B(x, y)$ и освещается параллельным монохроматическим пучком света. Так если транспарант Tr находится от оптической системы L_2 на расстоянии, равном фокусному расстоянию, преобразование Фурье записанного на носителе Tr изображения лежит в задней фокальной плоскости A оптической системы L_2 . Это преобразование представляет собой некоторую дифракционную картину, несущую информацию о записанном на носителе Tr изображении. Если теперь в плоскость A поместить некоторый фильтр, который изменяет распределение комплексных амплитуд в этой плоскости, то можно отфильтровать имеющееся изображение, например снять постоянный фон и т. д.

В качестве пространственного фильтра в простейшем случае может служить экран, имеющий малые размеры и ограничивающий световые лучи приосевой области дифракционной картины. В этом случае задерживаются световые лучи, представляющие постоянную составляющую изображения, т. е. лучи, несущие информацию о больших размерах, общем фоне и т. д. Другими словами, задерживаются низкие пространственные частоты. В то

время как экран не задерживает лучей, дифрагированных мелкими деталями, и расположенных в дифракционной картине по периферийной части, т. е. высокие частоты проходят мимо экрана беспрепятственно.

Теперь оптическая система L_2 спроектирует изображение на экран Э уже без фоновой составляющей и тогда крупные детали не усилятся и будут видны относительно лучше. Это создает эффект увеличения четкости изображения.

Здесь рассмотрен пример простейшей фильтрации. При синтезировании более сложных, например голографических фильтров [44], можно достаточно эффективно осуществлять пространственную фильтрацию изображений, а также вести распознавание отдельных объектов изображений.

В работе [44] дается методика и принципы построения подобных фильтров с использованием средств вычислительной техники. Синтезирование и использование фильтров с заданными характеристиками дает возможность получить оптимальную фильтрацию с точки зрения распознавания объектов, пропускания необходимой энергии и нужного количества пространственных частот.

5.3. Голографическая фильтрация

Появление источников излучения с высокой степенью когерентности сделано реальным решением задачи обработки и улучшения качества оптического изображения на основе теории оптимальной фильтрации сигналов [44]. Выделение отдельных участков и их фильтрация могут выполняться с использованием, как это было рассмотрено ранее, оптимальных комплексных фильтров.

С открытием в когерентной оптике явления голографии появилась возможность получения голографических фильтров и использования принципов голографии для распознавания образов.

Поскольку процесс фильтрации здесь может осуществляться в когерентном свете, то фильтр должен быть амплитудно-фазовым, т. е. комплексным и процесс фильтрации будет сводиться к операции корреляции между неизвестным и заранее известным объектами. При их соответствии на выходной плоскости появится всплеск яркости. Распознавание на основе принципа корреляции

будет рассмотрено в 5.4. Здесь остановимся на идентичности голограммы Фурье комплексному пространственному фильтру.

Известно [44] уравнение голограммы, записанное для области пространственных частот ϑ_1 и ϑ_2 ,

$$\tau(\vartheta_1, \vartheta_2) = K \{ 2A_0^2 - \gamma A_E^2(\vartheta_1, \vartheta_2) - 2\gamma A_0 A_E(\vartheta_1, \vartheta_2) \times \\ \times \cos[\alpha\vartheta_1 + \varphi(\vartheta_1, \vartheta_2)] \},$$

где $\tau(\vartheta_1, \vartheta_2)$ — функция прозрачности голограммы; A_0 — амплитуда опорной волны; $A_E(\vartheta_1, \vartheta_2)$ — амплитуда излучения, рассеянного объектом; $\varphi(\vartheta_1, \vartheta_2)$ — фаза излучения, рассеянного объектом; α — постоянная определяемая углом падения опорного луча; ϑ_1 и ϑ_2 — координаты плоскости пространственных частот (плоскости голограммы); γ — коэффициент контрастности; K — коэффициент, учитывающий чувствительность фотослоя и время экспозиции.

Представим последний член приведенной формулы в комплексной форме

$$\tau(\vartheta_1, \vartheta_2) = K \{ 2A_0^2 - \gamma A_E^2(\vartheta_1, \vartheta_2) - \gamma A_0 A_E(\vartheta_1, \vartheta_2) \times \\ \times [e^{i[\varphi(\vartheta_1, \vartheta_2) + \alpha\vartheta_1]} - \gamma A_0 A_E(\vartheta_1, \vartheta_2) e^{-i[\varphi(\vartheta_1, \vartheta_2) + \alpha\vartheta_1]}].$$

Обозначив $A_E(\vartheta_1, \vartheta_2) e^{i\varphi(\vartheta_1, \vartheta_2)} = H(\vartheta_1, \vartheta_2)$, получим

$$\tau(\vartheta_1, \vartheta_2) = K \{ 2A_0^2 - \gamma A_E^2(\vartheta_1, \vartheta_2) - \gamma A_0 [e^{i\alpha\vartheta_1} H(\vartheta_1, \vartheta_2) + \\ + e^{-i\alpha\vartheta_1} H^*(\vartheta_1, \vartheta_2)] \}. \quad (5.1)$$

Рассмотрим далее оптическую систему, изображенную на рис. 5.3. В предметной плоскости Π_1 находится транспарант с анализируемым изображением. Обозначим амплитуду прошедшего сквозь пленку излучения через $B(x, y)$. Линза L_1 выполняет преобразование Фурье над упавшим на нее излучением, так что в ее фокальной плоскости Π_2 (плоскость фильтра) амплитуда волны определится выражением

$$b(\vartheta_1, \vartheta_2) = K_0 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(x, y) e^{-i2\pi(\vartheta_1 x + \vartheta_2 y)} dx dy.$$

В плоскости фильтра Π_2 установлена голограмма, за которой амплитуда волны равна произведению амплитуды упавшей волны на функцию прозрачности голограммы

$$\Phi(\vartheta_1, \vartheta_2) = b(\vartheta_1, \vartheta_2) \tau(\vartheta_1, \vartheta_2).$$

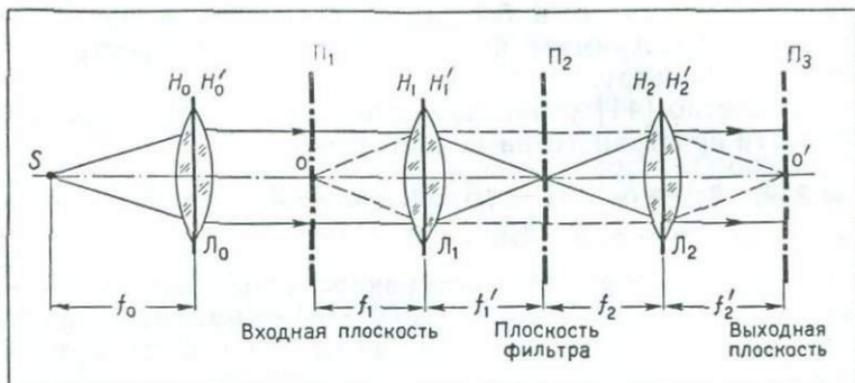


Рис. 5.3. Схема оптической фильтрации

Линза L_2 , выполняя вторичное преобразование Фурье, строит в выходной плоскости Π_3 изображение

$$F(x_1, y_1) = K_0 \iint_{-\infty}^{\infty} b(\vartheta_1, \vartheta_2) \tau(\vartheta_1, \vartheta_2) e^{i2\pi(\vartheta_1 x_1 + \vartheta_2 y_1)} dx_1 dy_1,$$

где $x_1 = -x$, а $y_1 = -y$.

Подставив вместо $\tau(\vartheta_1, \vartheta_2)$ ее значение из (5.1), получим

$$\begin{aligned} F(x_1, y_1) = & K_1 \iint_{-\infty}^{\infty} b(\vartheta_1, \vartheta_2) [2A_0^2 - \gamma A_E^2(\vartheta_1, \vartheta_2) \times \\ & \times e^{i2\pi(\vartheta_1 x_1 + \vartheta_2 y_1)} dx_1 dy_1 - K_1 \gamma A_0 \iint_{-\infty}^{\infty} b(\vartheta_1, \vartheta_2) H(\vartheta_1, \vartheta_2) e^{i\alpha \vartheta_1} \times \\ & \times e^{i2\pi(\vartheta_1 x_1 + \vartheta_2 y_1)} dx_1 dy_1 - K_1 \gamma A_0 \iint_{-\infty}^{\infty} b(\vartheta_1, \vartheta_2) H^*(\vartheta_1, \vartheta_2) \times \\ & \times e^{-i\alpha \vartheta_1(\vartheta_1 x_1 + \vartheta_2 y_1)} dx_1 dy_1. \end{aligned}$$

Это соотношение показывает, что выходное изображение состоит из трех частей: центрального (первое слагаемое) и двух боковых (второе и третье слагаемое), сдвинутых относительно центра плоскости изображения на величину $\pm \alpha$. Величина сдвига выражается сомножителями $e^{\pm i\alpha \vartheta_1}$, стоящими под знаком интеграла.

Второе слагаемое указывает на то, что голограмма в рассмотренной оптической системе играет роль комплексного фильтра, причем требуемое выходное изображение,

полученное как результат фильтрации анализируемого изображения, получается на одном из боковых участков плоскости изображений.

Для того чтобы голограмма играла роль оптимального фильтра, необходимо, чтобы входящая в ее функцию прозрачности величина $H(\vartheta_1, \vartheta_2)$ определялась соотношением

$$H(\vartheta_1, \vartheta_2) = \frac{b_0^*(\vartheta_1, \vartheta_2)}{G(\vartheta_1, \vartheta_2)}, \quad (5.2)$$

где $b_0^*(\vartheta_1, \vartheta_2)$ — сопряженный пространственно-частотный спектр изображения, приведенный к началу координат; $G(\vartheta_1, \vartheta_2)$ — пространственно-частотный спектр функции спектральной плотности фона.

Таким образом, имея голограммы с вполне определенными передаточными функциями, тем самым получаем комплексные пространственно-частотные фильтры, позволяющие осуществлять пространственно-частотную фильтрацию.

Изготовление голограмм с заданными передаточными функциями представляет собой самостоятельную и на современном этапе в ряде случаев достаточно сложную задачу. Однако для некоторых частных случаев этот процесс вполне осуществим. Покажем это на примере.

Голограмме с функцией прозрачности $\tau(\vartheta_1, \vartheta_2)$, включающей в себя передаточную функцию $H(\vartheta_1, \vartheta_2)$, в плоскости предметов Π_3 соответствует изображение

$$T(x, y) = K \iint_{-\infty}^{\infty} H(\vartheta_1, \vartheta_2) e^{j2\pi(\vartheta_1 x + \vartheta_2 y)} dx dy. \quad (5.3)$$

Пусть оптический фон характеризуется равномерным пространственно-частотным спектром, т. е.

$$G(\vartheta_1, \vartheta_2) = G = \text{const}, \quad (5.4)$$

тогда для передаточной функции фильтра из (5.2) будем иметь

$$H(\vartheta_1, \vartheta_2) = \frac{1}{G} b_0^*(\vartheta_1, \vartheta_2). \quad (5.5)$$

Подставив это значение в (5.3), получим выражение для функции исходного изображения, которое необходи-

мо использовать для получения заданной передаточной функции (5.5) голограммы

$$\begin{aligned} T(x, y) &= \frac{K}{G} \iint_{-\infty}^{\infty} b_0^*(\vartheta_1, \vartheta_2) e^{j2\pi(\vartheta_1 x + \vartheta_2 y)} dx dy = \\ &= \frac{K}{G} \iint_{-\infty}^{\infty} b_0(\vartheta_1, \vartheta_2) e^{j2\pi(\vartheta_1 x + \vartheta_2 y)} dx_1 dy_1 = \frac{1}{G} E_0(x_1, y_1). \end{aligned}$$

Таким образом, для получения голограммы, являющейся в данном примере оптимальным фильтром, нужно в предметной плоскости Π_1 установить перевернутое центрированное изображение объекта, который в дальнейшем предстоит селективировать.

5.4. Корреляционный способ распознавания изображений

При автокорреляционном способе распознавания образов основная задача состоит в том, чтобы узнать, содержит ли изображение, описываемое функцией $B(x, y)$, некоторый объект, описываемый функцией $g(x, y)$. В этом случае прежде всего необходимо иметь согласованный фильтр, т. е. получить преобразование Фурье $g^*(\vartheta_1, \vartheta_2)$ интересующего объекта. Согласованный фильтр представляет собой Фурье-образ объекта.

Поясним принцип получения согласованного фильтра на примере рис. 5.4, где освещаемое монохроматическим пучком изображение с помощью оптической системы L проектируется в плоскости P' . Часть светового потока, освещающего изображение на носителе Tr , падая на призму Pr , отклоняется в плоскость изображения P' , на которой построено изображение объекта, заключенного на носителе Tr . Теперь, если поместить в плоскость изображения фотопластинку ф/п, мы получим устройство для записи голограммы объекта, который размещен на прозранте Tr .

Для описания распределения освещенности в плоскости P' примем систему координат x', y' с началом в точке S' .

Если преломляющее ребро призмы Pr перпендикулярно к плоскости чертежа, амплитуда опорной волны

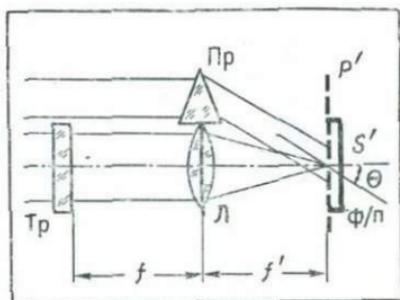


Рис. 5.4. Схема получения голографических согласованных с сигналом фильтров:

Тр — носитель информации; Пр — призма; Л — оптическая система (линза); Ф/п — фотопленка

в плоскости P' , если ось $S'y'$ лежит в плоскости чертежа, запишется в виде

$$B(x', y') = B_0 e^{iK\theta_2 y'}, \quad (5.6)$$

где B_0 — яркость объекта;

$K = \frac{2\pi}{\lambda}$; λ — длина волны светового потока; θ — угол между предметным и опорным лучами.

Освещенность на поверхности пластинки в плоскости P с учетом (5.6) определится из соотношения [46]

$$E = B_0^2 + |g^*(\vartheta_1, \vartheta_2)|^2 + B_0 g(x', y') e^{-iK\theta_2 y'} + \\ + B_0 \hat{g}(x', y') e^{iK\theta_2 y'},$$

а коэффициент пропускания носителя информации с изображением может быть представлен в виде

$$\tau = \tau_0 - \beta \{|g^*(\vartheta_1, \vartheta_2)|^2 + B_0 g(x', y') e^{-i\theta_2 y'} + \\ + B_0 \hat{g}(x', y') e^{iK\theta_2 y'}\}.$$

где $\hat{g}(x', y')$ — комплексная составляющая функции $g(x', y')$; β — угол наклона прямолинейного участка характеристической кривой носителя информации; τ_0 — коэффициент пропускания носителя информации, соответствующий середине прямолинейного участка характеристической кривой.

Коэффициент пропускания можно назвать фильтрующей функцией. Слагаемое $B_0 g(x', y') e^{-iK\theta_2 y'}$ с точностью до множителя $e^{-i\theta_2 y'}$ соответствует коэффициенту пропускания по амплитуде, пропорциональному $g(x', y')$, т. е. преобразованию Фурье по амплитуде и фазе сигнала $g(x, y)$.

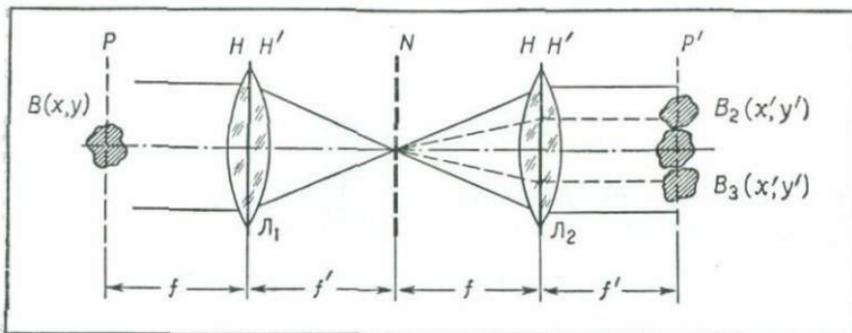


Рис. 5.5. Схема фильтрации изображения с помощью согласованного фильтра:

P — плоскость размещения изображения; N — плоскость размещения согласованного фильтра; P' — плоскость получения отфильтрованного изображения

Таким образом, изображение, зафиксированное на светочувствительном материале в плоскости P' , и будет являться согласованным фильтром. Теперь если этот фильтр поместить в плоскость N оптической системы, показанной на рис. 5.5, то можно осуществить фильтрацию светового потока, дифрагированного транспарантом, расположенным в плоскости P .

При распознавании образов с использованием способа автокорреляции, т. е. при распознавании отдельных фрагментов в общем поле изображения, например отдельных букв или слов в тексте, размещенных на транспаранте, поступают так же. В плоскость P (см. рис. 5.5) помещают транспарант с текстом и теми фрагментами, которые необходимо распознать, а фильтр, несущий информацию о распознаваемой букве или слове, помещают в плоскость N . Тогда в фокальной плоскости P' оптической системы L_1 будет строиться три изображения [26] в виде размытых светящихся пятен. Нам естественно интересуют изображение, соответствующее корреляции изображения с сигналом.

Наиболее простым будет распознавание, если на транспаранте изображение $B(x, y)$ состоит только из фрагмента, описываемого функцией $g(x, y)$. После прохождения светового потока через фильтр амплитуда световой волны опишется уравнением

$$\tau b(x', y') = \tau_0 b(x', y') - \beta \{b(x', y') |g^*(\vartheta_1, \vartheta_2)|^2 +$$

$$+ B_0 b(x', y') g(x', y') e^{-iK\theta y'} +$$

$$+ B_0 b(x', y') \hat{g}(x', y') e^{iK\theta y'}.$$

Последний член этого выражения, соответствующий изображению $B_3(x', y')$, показывает, что амплитуда световой волны имеет значение, равное функции взаимной корреляции,

$$r(\xi, \eta) = \iint_{-\infty}^{\infty} g(x', y') \hat{b}(x' - \xi, y' - \eta) d\xi d\eta.$$

Поскольку объект состоит только из фрагмента, то значение функции взаимной корреляции численно будет равно действительному значению функции автокорреляции. Следовательно, волна, прошедшая сквозь фильтр, будет плоской и в фокальной плоскости оптической системы L_2 построит изображение объекта в виде яркой точки. Это произойдет в случае, если входное отверстие оптической системы будет иметь безграничные размеры. Поскольку входная апертура имеет граничные размеры, то изображение отфильтрованного объекта будет выглядеть в виде размытой точки.

Таким образом, чем выше корреляция между распознаваемым объектом и изображением фильтра, тем точнее распознавание, т. е. изображение светящейся точки получают более четким и малых размеров. Если же корреляционная связь мала, изображение получают размытым и увеличенных размеров. Это же явление возникает в случае, когда распознаваемый фрагмент ориентирован неправильно относительно фильтра или его размеры не согласованы с фильтром.

Если в плоскости P' разместить фотоэлектрическое считывающее устройство, а в плоскости N согласованные фильтры, можно получить оптико-электронное устройство распознавания, основанное на использовании принципа корреляции.

5.5. Оценка качества систем распознавания

Известно несколько схем голографических систем распознавания, построенных на основе использования принципов согласованной фильтрации [27, 28]. Один из возможных вариантов функциональной схемы голографи-

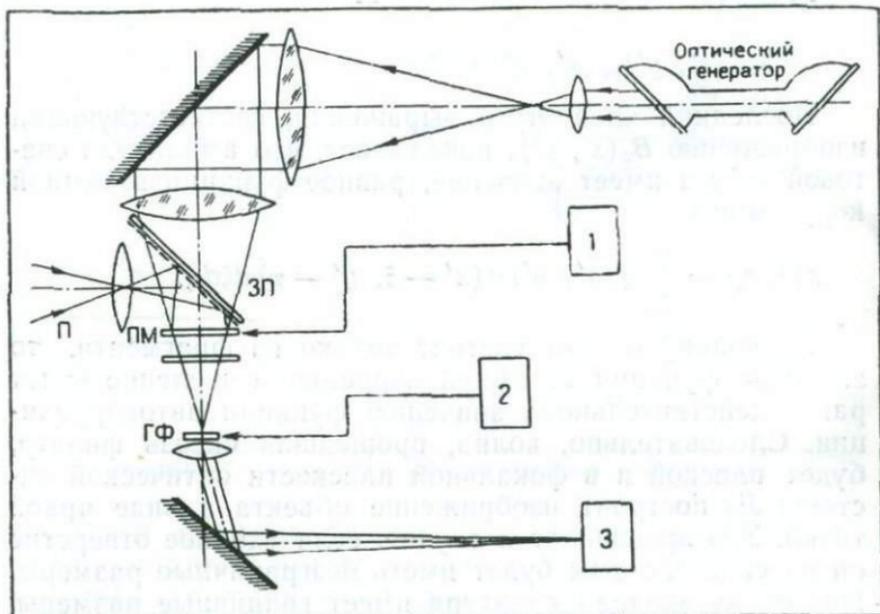


Рис. 5.6. Функциональная схема голографической распознающей системы: 1 — блок пространственного модулятора; 2 — блок настройки голографических фильтров; 3 — блок формирователя команд

ческой системы распознавания представлен на рис. 5.6. Изображение распознаваемого объекта строится с помощью оптической системы П и полупрозрачного зеркала ЗП на пространственном модуляторе ПМ, расположенном в луче оптического квантового генератора. В плоскости голографического фильтра, который может быть синтезирован описанным ранее способом или получен путем расчета с помощью ЭВМ, а затем зафиксирован на прозрачном носителе методами фотографии, происходит фильтрация промодулированного излучения. Отклик системы распознавания регистрируется матрицей фотодиодов, которая является входным элементом блока формирователя команд управления, поступающих в систему дальнейшей обработки сигнала.

Во время работы системы возможно изменение масштаба и ракурса анализируемого изображения, кроме того, возможен и поворот изображения относительно

оптической оси системы. Это может привести к ошибкам. Рассмотрим величины возникающих ошибок.

Если изображение описывается функцией $f(x, y)$, изменение положения изображения можно характеризовать коэффициентом $a = f_1(x, y)/f(x, y)$, который представляет собой отношение функций, описывающих измененное и идеальное изображение, и углами ψ_1 поворота изображения относительно оптической оси системы и ψ_2 — между плоскостью, в которой расположено изображение, и плоскостью, перпендикулярной к оптической оси системы.

Для определения алгоритма настройки голографических фильтров нужно найти предельные значения величин a , ψ_1 , ψ_2 , при которых система еще распознает изображение. Для этого воспользуемся параметром качества системы распознавания, который равен отношению интенсивности сигнальной части и отклика системы к среднему квадратическому отклонению шума. В качестве распознаваемого выберем сигнал

$$B(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{при } -R < x < R, \quad -nR < y < nR, \\ 0 & \text{при всех остальных } x, y. \end{cases}$$

Здесь $n = c/d$, где c и d — размеры изображения объекта. Фурье-преобразование такого сигнала равно

$$b(\vartheta_1, \vartheta_2) = \frac{4}{\vartheta_1 \vartheta_2} \sin \vartheta_1 R \sin \vartheta_2 nR.$$

Из теории преобразования известно, что

$$aB(x, y) \rightarrow b\left(\vartheta_1 \frac{1}{a}; \vartheta_2 \frac{1}{a}\right).$$

При матричном преобразовании векторного аргумента сигнала аргумент его Фурье-спектра преобразуется с помощью обратной матрицы

$$b_n(\omega) = |\text{Det } N| b(M^{-1}\bar{\omega}),$$

где $\text{Det } N$ — определитель некоторой матрицы, удовлетворяющей условию

$$N^1 M^{-1} N = E_1,$$

где E_1 — единичная матрица; N — транспонированная матрица.

Тогда спектр повернутого сигнала равен

$$b_{M\psi_1}(\vartheta_1, \vartheta_2) = b \left(\begin{vmatrix} \cos \psi_1 & -\sin \psi_1 \\ \sin \psi_1 & \cos \psi_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \end{vmatrix} \right).$$

Спектр сигнала, связанный с изменением ракурса,

$$b_{M\psi_2}(\vartheta_1, \vartheta_2) = b \left(\begin{vmatrix} \frac{1}{\cos \psi_2} & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \end{vmatrix} \right) \frac{1}{\cos \psi_2}.$$

В качестве шумового выберем сигнал, описанный в [31]

$$|N(\omega)|^2 = \exp \left\{ 1,5 \left[\exp \left(-\frac{|\omega|}{2} \right) - 1 \right] \right\}.$$

Найдем зависимости, связывающие качество системы Q с параметрами a , ψ_1 , ψ_2 .

1. Зависимость качества системы от изменения масштаба

$$Q(a) = \frac{\left| \int_{-W}^W \frac{16a^2}{\vartheta_1^2 \vartheta_2^2} \sin\left(\frac{\vartheta_1 R}{a}\right) \sin\left(\frac{\vartheta_2 R n}{a}\right) \sin(\vartheta_2 R n) \sin(\vartheta_1 R) d\vartheta_1 d\vartheta_2 \right|^2}{F \int_{-W}^W \int_{-W}^W \frac{|C|^2 |D|^2 \left| \frac{4}{\vartheta_1 \vartheta_2} \sin(\vartheta_1 R) \sin(\vartheta_2 R n) \right|^2}{|A|^4 |B|^4} d\vartheta_1 d\vartheta_2}.$$

$$A = \exp \left\{ 1,5 \left[\exp \left(-\frac{|\vartheta_1|}{2} \right) - 1 \right] \right\},$$

$$B = \exp \left\{ 1,5 \left[\exp \left(-\frac{|\vartheta_2|}{2} \right) - 1 \right] \right\},$$

$$C = \exp \left\{ 1,5 \left[\exp \left(-\frac{|\vartheta_2|}{2} \right) - 1 \right] \right\},$$

$$F = \int_{-W}^W \int_{-W}^W \frac{\left| \frac{2}{\vartheta_1} \sin(\vartheta_1 R) \right|^2 \left| \frac{2}{\vartheta_2} \sin(\vartheta_2 R n) \right|^2}{|A|^2 |D|^2} d\vartheta_1 d\vartheta_2,$$

W — полоса пропускания системы, F — нормировочный коэффициент.

2. Зависимость качества системы от угла поворота изображения

$$Q(\Psi_1) = \frac{\left| \int_{-W}^W \int_{-W}^W \frac{16 \sin(P_1 R) \sin(\vartheta_1 R n) \sin(\vartheta_1 R) \sin(\vartheta_2 R)}{\vartheta_1 \vartheta_2 P G |A|^2 |B|^2} d\vartheta_1 d\vartheta_2 \right|^2}{\int_{-W}^W \int_{-W}^W \frac{|A'|^2 |B'|^2}{|A|^4 B^4 \frac{\vartheta_1 \vartheta_2}{4 \sin(\vartheta_1 R) \sin(\vartheta_2 R n)}} d\vartheta_1 d\vartheta_2} \times$$

$$\times \frac{1}{F},$$

где

$$P = \vartheta_1 \cos \psi_1 - \vartheta_2 \sin \psi_1; \quad G = \vartheta_1 \sin \psi_1 + \vartheta_2 \cos \psi_1;$$

$$A' = \exp \left\{ 1,5 \left[\exp \left(-\frac{|P|}{2} \right) - 1 \right] \right\};$$

$$B' = \exp \left\{ 1,5 \left[\exp \left(-\frac{|G|}{2} \right) - 1 \right] \right\}.$$

3. Зависимость качества системы от изменения ракурса

$$Q(\Psi_2) = \frac{\left| \int_{-W}^W \int_{-W}^W \frac{16}{\vartheta_1^2 \vartheta_2^2} \sin \left(\frac{\vartheta_1}{\cos \psi_2} R \right) \sin(\vartheta_1 R_1) \sin^2(\vartheta_2 R n) \right|^2}{\int_{-W}^W \int_{-W}^W \frac{1}{\cos \psi_2} |L|^2 |B|^2 \left| \frac{4 \sin(\vartheta_1 R_1) \sin(q R n)}{q} \right|^2}{|A|^4 |B|^4} d\vartheta_1 d\vartheta_2} \times$$

$$\times \frac{1}{F},$$

где

$$L = \exp \left\{ 1,5 \left[\exp \left(-\left| \frac{\vartheta_1}{2 \cos \psi_2} \right| \right) - 1 \right] \right\}, \quad R_1 = \frac{R}{\cos \psi_0}.$$

Таким образом получены расчетные формулы для оценки качества голографических систем распознавания объектов, заключенных на транспаранте.

Расчет по этим формулам выполнен на ЭВМ для следующих значений параметров

$$R = 1 \div 5; n = 0,2 \div 10; \omega = 50, 30, 10;$$

$$\psi_1 = 0 \div 20; \psi_2 = 8 \div 38; a = 0,9 \div 20.$$

Анализ выполненных расчетов показал [44], что качество голографических систем при изменении ω от 50 до 10 почти не ухудшается. Изменение ракурса объектов оказывает незначительное влияние. При этом изменение масштаба допустимо только в пределах от 1,0 до 1,1, а поворот изображения — на угол до 10° .

При таких изменениях параметров системы ее качество уменьшается от 1 до 0,7, а это считается допустимым из условия надежного распознавания. Коэффициент a влияет на качество системы весьма значительно в пределах от 1,0 до 1,1. Повышение качества системы заметно даже при небольшом изменении масштаба. Физически это легко объясняется. Дело в том, что при изменении масштаба меняется не только сигнал от объекта, но изменяется и шумовая составляющая.

Рассмотрим изменение качества системы в зависимости от увеличения интенсивности шума. Так, при шуме

$$|N(\omega)|^2 = \exp \left\{ 1,5 \left[\exp \left(-\frac{|\omega|}{2} \right) - 1 \right] \right\}$$

качество системы в случае $a = 1,19$ равно 1,5 и допустимое увеличение масштаба составляет 2,3, если $R = 2$, $n = 0,2$. Видно, что качество системы зависит от n больше, чем от R .

Изменение масштаба может компенсироваться изменением фокусного расстояния входной оптической системы или длины волны излучения ОКГ. Поворот изображения можно компенсировать вращением голографического фильтра.

6.1. Критерии оценки качества фотографических и воспроизводимых изображений

Для оценки фотографических изображений или автоматизированной обработки фотоинформации широко пользуются термином «качество изображения», хотя в ряде случаев в него вкладывается разный смысл и оценка качества проводится по-разному [14]. Иногда фотографическое изображение оценивается по художественному исполнению, выразительности, т. е. по психологическому эффекту, вызываемому изображением. Такой чисто субъективный подход к оценке качества изображения совершенно не дает количественной информации, хотя в принципе и может быть использован.

Для количественной оценки качества изображений, по-видимому, более предпочтительно было бы пользоваться такой характеристикой, при которой качество определялось бы целым рядом показателей, измеряемых или оцениваемых с помощью приборов.

Понятие «качество изображения» как в фотографии, так и в устройствах отображения фотоинформации при ее автоматизированной обработке является индивидуальной характеристикой и в общем случае не может характеризовать предельных возможностей системы обработки и воспроизведения фотоинформации в целом. При автоматизированной обработке, оценивая качество изображения, исходят из соответствия выходного изображения входному с учетом его параметров. Поэтому для оценки систем обработки и воспроизведения используют такую характеристику, как «качество воспроизведения изображения». Чаще всего при выборе той или иной системы обработки и воспроизведения фотоинформации пользуются именно этой характеристикой.

Качество фотографических изображений, получаемых при космическом фотографировании, во многом зависит от состояния атмосферы в момент съемки, характеристик оптической системы фотоаппарата, фотографической пленки, механизмов компенсации сдвига изображения,

выравнивания пленки, автоматической фокусировки и т. д. При передаче фотоизображений на Землю для дальнейшей их обработки в автоматизированных системах качество воспроизведения изображения в свою очередь зависит от целого ряда факторов, связанных с характеристиками считывающих устройств, передающих, принимающих, обрабатывающих и воспроизводящих систем.

Качество воспроизведения изображения оценивается по совокупности показателей. Основными показателями при оценке качества фотографических изображений являются [32]: число различаемых полутонов; разрешающая способность системы в горизонтальном и вертикальном направлениях; инерционность системы обработки и воспроизведения; спектрозональная чувствительность системы; степень отступления спектральных характеристик системы от требуемых; степень нелинейности характеристики преобразования; величина ложных сигналов и т. д.

В общем случае для оценки качества фотографических изображений и изображений воспроизведения используются следующие критерии [24]: тоновоспроизведение, резкость, разрешение мелких деталей, зернистость, критерий верности воспроизведения изображения, среднее квадратическое отклонение критерия качества и др.

Для того чтобы можно было предъявлять сколько-нибудь обоснованные требования к величинам названных критериев качества изображения, нужно знать необходимые значения этих критериев на носителе информации, а также закономерности, связывающие эти значения на носителе со значениями в предшествующих изображениях.

Тоновоспроизведение оценивается путем построения яркостно-контрастных характеристик, представляющих собой зависимость отношения детали яркости на носителе информации (в изображении) ΔB_H , отвечающей детали в объекте $\Delta B_{об}$ в функции логарифма яркости объекта [14], т. е.

$$\frac{\Delta B_H}{\Delta B_{об}} = f(\lg B_{об}).$$

На основании этой зависимости в [14] устанавливается, что искажение тоновоспроизведения тем больше, чем выше интервал яркости объекта съемки.

Качество изображения мелких по размерам деталей оценивается числом раздельно передаваемых штрихов с помощью обычной резельвометрической методики, фотографируя синусоидальную или П-образную миру. Изменение разрешения в окончательных изображениях по сравнению с предыдущими тем больше, чем выше абсолютное значение разрешения.

Одним из важных критериев оценки фотографических и отображаемых изображений является критерий резкости изображения. Известно, что свойства того или иного звена получения фотографического изображения или воспроизведения изображения могут быть количественно выражены с помощью контрастно-частотной характеристики этого звена.

Для количественной оценки отдельных звеньев при получении качественного изображения контрастно-частотную характеристику аппроксимируют некоторым эмпирическим уравнением [24]

$$K(\vartheta) = \exp \left[- \left(\frac{\vartheta}{\vartheta_{кр}} \right)^n \right], \quad (6.1)$$

где ϑ — пространственная частота (текущее значение); $\vartheta_{кр}$ — некоторое критическое значение пространственной частоты; n — показатель степени ($n = 1,2 \div 2,5$).

При пространственной частоте $\vartheta = \vartheta_{кр}$, $K(\vartheta) = 0,368$, а показатель степени определяется по формуле

$$n = \frac{\vartheta_{кр}}{\vartheta_{кас} - \vartheta_{кр}}, \quad (6.2)$$

где $\vartheta_{кас}$ — значение пространственной частоты, соответствующей отрезку, отсекаемому на оси ϑ касательной и кривой $K(\vartheta)$ в точке, соответствующей $\vartheta = \vartheta_{кр}$. Изменение величины n ведет к изменению наклона КЧХ и, следовательно, к изменению площади, заключенной между КЧХ и осями координат K и ϑ . Установлено [24], что эта площадь может быть определена из соотношения

$$A_{\vartheta} = \vartheta_{кр} \Gamma \left(1 - \frac{1}{n} \right), \quad (6.3)$$

где $\Gamma \left(1 + \frac{1}{n} \right)$ — гамма-функция, изменяющаяся при изменении $n = 1,2 \div 2,5$ на $\pm 2\%$.

$$A_{\Phi} \cong 0,915\vartheta_{кр}. \quad (6.4)$$

Исходя из предположения, что фотографический процесс линейный, устанавливается выражение для эффективной ширины зоны постепенного изменения яркости или коэффициента пропускания изображения в случае скачкообразного изменения яркости исходного предмета

$$\Delta_{\text{эф}} = \frac{0,5}{A_{\Phi}}. \quad (6.5)$$

Если учесть (6.4), то формула (6.5) преобразуется к виду

$$\Delta_{\text{эф}} \approx \frac{0,55}{\vartheta_{кр}}, \quad (6.6)$$

а в общем виде для $\Delta_{\text{эф}}$ будем иметь

$$\Delta_{\text{эф}} = \frac{B_2 - B_1}{\left(\frac{dB}{dx}\right)_0}, \quad (6.7)$$

где B_1 и B_2 — яркости изображения по краям зоны постепенного изменения яркости на кадре; $\left(\frac{dB}{dx}\right)_0$ — градиент яркости в середине зоны.

Из формулы (6.6) видно, что критическая пространственная частота $\vartheta_{кр}$ может быть удобным критерием для количественной оценки резкости изображения, так как она определяет ширину зоны постепенного изменения яркости изображения объекта. Критическая частота по сравнению с разрешающей способностью более полно характеризует резкость изображения. Если пространственная частота достигает значения, равного разрешающей способности R (рис. 6.1), то частотно-контрастная функция снижается до значения K_R , при котором изменения яркости почти не наблюдается. В ряде случаев решается обратная задача, т. е. находится разрешающая способность по КЧХ с учетом кривой контрастной чувствительности глаза или устройства, считывающего эту информацию. Величина K_R может меняться в пределах $0,02 \div 0,1$. Учитывая изменения величины n , устанавливают связь между критической пространственной частотой $\vartheta_{кр}$ и разрешающей способностью R , т. е.

$$R \approx (1,2 \div 4) \vartheta_{кр}. \quad (6.8)$$

При $n = 2$, $K_R = 0,02$, $R = 2 \vartheta_{кр}$.

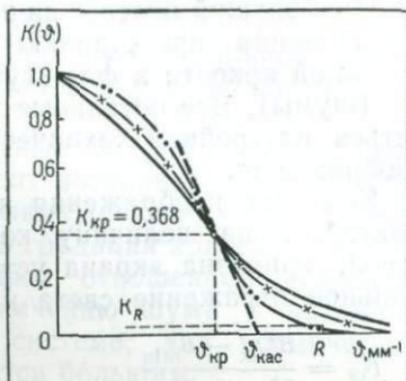


Рис. 6.1. К определению критической пространственной частоты

Формула (6.8) позволяет оценивать разрешающую способность как любого отдельного звена при получении фотографического или воспроизводимого изображения, так и всей системы в целом, если имеется КЧХ, полученная экспериментальным путем.

Таким образом, конечным результатом при оценке качества изображения по критерию резкости является разрешающая способность любого звена системы изображения.

В настоящее время для оценки оптических фотографических и воспроизводимых устройств отображения изображений используются самые разнообразные критерии. Однако ни один из них не дает полной и достаточно достоверной оценки, так как не учитывает целого ряда факторов. Наиболее достоверным критерием, по мнению авторов [9, 31] дающим наилучшее представление о качестве изображения, является совокупность значений контрастности больших площадей и семейства амплитудно-частотных характеристик системы.

При оценке качества воспроизводимых изображений в устройствах отображения фотоинформации прежде всего исходят из того факта, что воспроизводимое изображение является репродукцией оптического изображения. Более того, оригинал всегда содержит больше информации, чем его любое изображение.

Качество воспроизводимого изображения оценивается исходя из его технических характеристик, которыми являются: размер изображения, число строк разложения, средняя яркость, частота мельканий, контраст, число градаций яркости, четкость, равномерность фона, шумы.

Наибольший интерес из перечисленных характеристик изображения представляют: контраст, четкость, число градаций яркости и флюктуационные паразитные сигналы (шумы). Все остальные характеристики могут устраняться настройкой технических систем воспроизведения изображения.

Контраст изображения является одним из важных факторов, на величину которого оказывают влияние ореол, кривизна экрана устройства отображения, нормальное отражение света и т. д. Он определяется как

$$K_э = \frac{B_{\max}^э - B_{\min}^э}{B_{\max}^э + B_{\min}^э},$$

где $B_{\max}^э$ и $B_{\min}^э$ — максимальная и минимальная яркости изображения на экране технического средства отображения фотонформации.

При определении величины контраста необходимо также учитывать геометрические размеры отдельных элементов экрана и элементов устройства отображения и, следовательно, коэффициент контраста выбирается не по одной характеристике, а по нескольким — некоторое среднее значение.

Другим важным свойством изображения является четкость, определяемая контрастом мелких деталей изображения. Известно, что величина контраста на экране устройства отображения при уменьшении размеров воспроизводимых деталей изображения падает от максимального значения до значения детального контраста.

В связи с этим при оценке качества изображения пользуются контрастом крупных, мелких и средних деталей. Под крупными деталями понимаются такие, размеры которых больше двойной толщины стекла экрана устройства отображения; под мелкими — размеры которых сравнимы с размерами развертывающей апертуры устройства, и под средними — размеры которых меньше двойной толщины стекла экрана.

Максимальное число градаций яркости определяется из соотношения [36]

$$m_1 \approx \frac{1}{K_0} \ln \left(\frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}} \right), \quad (6.9)$$

где K_0 — контрастная чувствительность глаза.

Из формулы (6.9) видно, что при постоянной контрастной чувствительности глаза максимальное число градаций яркости определяется контрастом воспроизводимых деталей.

Флюктуационные паразитные сигналы (шумы), возникающие на экране в момент воспроизведения изображений, снижают контраст мелких деталей, а следовательно, снижают четкость и число градаций яркости. Влияние паразитных шумов оценивают отношением полезного сигнала к эффективному значению шума в наземных условиях по пятибалльной системе; для космических систем это соотношение берется бóльшим.

Для автоматизированных систем обработки и отображения фотоинформации используется также информационная оценка точности воспроизведения изображений, оценка чувствительности воспроизводящих и фотографических систем, информационная емкость изображения. Рассмотрим некоторые из них.

Точность воспроизведения фотографических изображений определяется формулой [13]

$$Q = 1 - \frac{H_1}{H_2} = \frac{I_{\text{вх}}}{I_{\text{вых}}},$$

где H_1 — энтропия входного изображения; H_2 — энтропия выходного изображения; $I_{\text{вх}}$ — количество информации о входном изображении; $I_{\text{вых}}$ — количество информации о выходном изображении.

Величина Q меняется от 1 до 0; при $H_1 = 0$ и $Q = 1$, что соответствует максимальной точности воспроизведения и при $H_1 \rightarrow H_2$ и $Q \rightarrow 0$, что соответствует наименьшей точности воспроизведения изображения.

Если учесть, что $I_{\text{вх}} = \nu z_x z_y n_1 \log_2(m_1 + 1)$ и $I_{\text{вых}} = \nu_0 z_{x_0} z_{y_0} n_0 \log_2(m_0 + 1)$, то получим

$$Q = \frac{\nu z_x z_y n_1 \log_2(m_1 + 1)}{\nu_0 z_{x_0} z_{y_0} n_0 \log_2(m_0 + 1)},$$

где ν — число спектральных интервалов; z_x и z_y — число элементов в кадре; n_1 — число кадров; m_1 — число ступеней энергии (число градаций яркости).

Чувствительность фотографических систем и систем обработки и воспроизведения фотоинформации может быть оценена величиной, обратной входной энергии, при которой получается заданное количество информации.

Для идеальной системы чувствительность S определится по формуле [36]

$$S = \frac{1}{W} = \frac{1}{W_1} = \frac{\log_2(m_1 + 1)}{\frac{m_1}{2}(m_1 + 1)I},$$

где W — энергия излучения, поступающая на вход системы; W_1 — энергия излучения, поступающая на вход с одного элемента разложения объекта; $I = N \log_2(m_1 + 1)$; N — число элементов.

Для реальных систем пользуются удельной чувствительностью, представляющей собой величину, обратную величине энергии, приходящейся на единицу информации, и определяемую выражением

$$g = \frac{\int_0^{N_{\text{вых}}} \log_2 \frac{\bar{m}(N)}{K_1} dN}{W_{\text{вх}}}, \quad (6.10)$$

где $\bar{m} = \frac{m_1}{\sigma_{m_1}}$ — отношение сигнала к шуму;

σ_{m_1} — среднее квадратическое отклонение числа градаций яркости от их среднего числа; K_1 — коэффициент, характеризующий надежность измерения.

Формула (6.10) позволяет оценивать удельную чувствительность различных устройств, исходя из единых позиций и предпосылок. Наряду с рассмотренными критериями и способами оценки качества фотографических и воспроизводимых изображений в случае передачи их по каналам связи используют такой критерий, как верность воспроизведения изображения, представляющий собой оценку влияния статистических характеристик искажений изображения на параметры, определяющие качество изображений. Этот критерий зависит от назначения системы передачи изображений и свойств получателя (свойств глаза или устройства отображения) и в основном предназначен для сравнения каналов передачи по верности воспроизведения изображений.

При этом считают, что качество воспроизведения определяется вероятностью того, что элемент изображения принадлежит к заметной посторонней детали, а критерий оценки качества сводится к требованию, чтобы эта вероятность была меньше некоторой заданной малой

величины, т. е. $p < \xi$. Величина ξ выбирается равной $10^{-4} \div 10^{-5}$.

В рамках принятого критерия оценка качества изображения сводится к оценке заметности, или видности малых случайных искажений изображения, вызванных помехами в канале передачи. Параллельно с рассмотренным критерием в ряде случаев используют среднее квадратическое отклонение критерия качества, мерой которого служит величина

$$\xi_1^2 = m [B_{вх}(x, y) - B_{вых}(x, y)]^2,$$

где m — знак математического ожидания, т. е. величина усреднения по ансамблю изображений.

При космическом фотографировании качество и точность изображения фотографируемых объектов в значительной степени зависят от фотографических материалов. Так, применение мелкозернистых фотопленок при съемке в одних и тех же условиях может дать повышение разрешающей способности в 2—3 раза по сравнению с высокочувствительной крупнозернистой пленкой. Применение же фотопленок, очувствленных в различных спектральных диапазонах (панхром, изохром, ортохром, инфрахром и т. д.), а также многослойных цветных пленок позволяет повысить информационную емкость фотоснимков, а также определять по фотоснимкам множество различных характеристик и свойств наблюдаемых объектов и местности (искусственную и естественную маскировку, состояние лесных массивов, состояние урожаев, загрязнение водоемов, болезней растений и т. п.). Деформации пленок в момент фотографирования ведут к геометрическим искажениям изображений объектов, территории, что вносит ошибки при составлении топографических карт, если последние делаются на основании фотоснимков из космоса.

В прил. 2 представлены некоторые типы фотопленок, используемых для космического фотографирования в США и поставляемых фирмой «Eastman Kodak» [59].

6.2. Некоторые особенности основных характеристик носителей фотографической информации

Основные сенситометрические характеристики фотографических носителей информации ранее были подробно рассмотрены. Поэтому здесь остановимся на их

особенностях и некоторых дополнительных характеристиках, представляющих определенный интерес с точки зрения автоматизированной обработки фотографической информации.

Оптическая плотность почернения фотоматериала под воздействием распределения количества освещения, воспринимаемого светочувствительным слоем, или коэффициент пропускания является одной из дополнительных характеристик. Известно, что проявленный фотографический слой, в отличие от других прозрачных сред, имеющих молекулярно твердую или жидкую структуру, обладает свойством не только пропускать через себя световой поток, но и рассеивать, и поглощать его. Рассеяние света влияет как на оптическую плотность D , так и на коэффициент пропускания τ , результаты измерения которых зависят от входной и выходной апертур оптических систем.

Обозначив [12] входную апертуру через u_1 , а выходную через u_2 , рассмотрим две степени рассеяния света.

1. При $u_1 = 0$, т. е. слой освещается параллельным световым лучом. В этом случае выходной поток может распространяться в направлениях, ограниченных двумя положениями $u_2 = 0$ и $u_2 = \pi$. При первом положении оптическая плотность и коэффициент пропускания называются регулярными и определяются из формул:

$$D_{\text{рег}} = \lg \frac{F_0}{F_{\text{рег}}} \quad \text{и} \quad \tau_{\text{рег}} = \frac{F_{\text{рег}}}{F_0}.$$

Во втором случае световой поток распространяется в полусферу и, следовательно, приемником излучения воспринимается полностью. Оптическая плотность и коэффициент пропускания в этом случае называются интегральными и определяются

$$D = \lg \frac{F_0}{F} \quad \text{и} \quad \tau = \frac{F}{F_0}.$$

2. При $u_1 = \pi$ и $u_2 = \pi$ изображение освещается диффузно и прошедший световой поток воспринимается фотоэлектрическим приемником полностью. В этом случае D и τ называются диффузными. Кроме того, установлено [40], что

$$D_{\text{рег}} > D_{\text{диф}} \approx D.$$

В практике автоматизированной обработки фотоинформации предельные случаи практически отсутствуют, а φ_1 и φ_2 занимают некоторые промежуточные значения. В этом случае измеряемая оптическая плотность называется эффективной и в зависимости от u_2 может быть найдена по некоторой эмпирической зависимости

$$D_u(u_2) = \frac{a}{b + u_2} + D,$$

где a и b — константы, зависящие от параметров пленки и значительно меньше единицы.

Светорассеяние в носителе фотоинформации при просвечивании световым потоком характеризуется коэффициентом Каллье

$$Q' = \frac{D_{\text{рег}}}{D_{\text{диф}}}.$$

При автоматизированной обработке фотографической информации с использованием оптико-электронных считывающих устройств и средств вычислительной техники основными параметрами, которые используются при обработке, являются либо оптическая плотность $D(x, y)$, являющаяся результатом воздействия на светочувствительный слой распределения экспозиции $H(x, y)$, и ее производные, либо коэффициент пропускания $\tau(x, y)$, имеющие сложную вероятностную природу и обусловленные фотохимической обработкой, зернистостью и целым рядом других факторов.

Амплитудная характеристика или характеристическая кривая фотографического слоя были рассмотрены в первой части. Здесь только заметим, что эта характеристика индивидуальна для каждого фотографического материала и зависит от условий физико-химической обработки, от освещенности и времени экспонирования фотоматериала. Кроме того, при автоматизированной обработке фотографической информации необходимо учитывать амплитудную характеристику носителя фотоинформации.

Пространственно-частотная характеристика фотографического слоя — одна из важных, так как она позволяет оценивать фотографический материал по передаче информации с точки зрения распространения пространственных частот. Привлечение пространственно-частот-

ного анализа для оценки фоточувствительного слоя позволяет наиболее эффективно оценить фотографический слой как по разрешающей способности, так и по передаче контраста в изображении.

Сущность характеристики заключается в следующем. Как известно, фотографический слой, являющийся механическим соединением желатины и галоидного серебра, не одинаково рассеивает падающий на него световой поток в силу различия их коэффициентов преломления. Рассеяние света в фотографическом слое описывается импульсной переходной характеристикой $h(x, y)$, представляющей собой распределение освещенности, если на фотослой действует освещенность в виде дельта-функции, т. е.

$$E(x, y) = \delta(x - x_0, y - y_0),$$

имеющей для всех точек плоскости x, y значения, равные нулю, и в точке x_0, y_0 стремящейся к бесконечности; причем

$$\iint_{-\infty}^{\infty} \delta(x - x_0, y - y_0) dx dy = 1.$$

Для фоточувствительного слоя импульсная переходная характеристика описывается формулой [39]

$$h_{\text{фс}}(x, y) = \frac{a_0}{K_p} 10^{-\frac{2 \sqrt{x^2 + y^2}}{K_p}}, \quad (6.11)$$

где a_0 — некоторая константа, определяемая из условия нормирования

$$\iint_{-\infty}^{\infty} h_{\text{фс}}(x, y) dx dy = 1;$$

K_p — коэффициент, характеризующий рассеяние света в фотослое (численное значение его колеблется от 20 мкм для мелкозернистых слоев и до 50 мкм для крупнозернистых).

Формула (6.11) справедлива для сильно рассеивающих слоев, для других случаев используется более точная зависимость

$$h_{\text{фс}}(x, y) = a_1 \left[\frac{\rho}{K_{p_1}} 10^{-\frac{2 \sqrt{x^2 + y^2}}{K_{p_1}}} + \frac{1 - \rho}{K_{p_2}} 10^{-\frac{2 \sqrt{x^2 + y^2}}{K_{p_2}}} \right].$$

Здесь K_{p_1} и K_{p_2} имеют тот же физический смысл, что и K_p , а ρ — некоторая константа, означающая долю нерассеянного или слабо рассеянного света.

Распределение освещенности в фотослое, которое воздействует эффективно на светочувствительные центры фотослоя, может быть вычислено с помощью интеграла свертки

$$E_g(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} E_0(x - \xi, y - \eta) h_{\text{фс}}(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (6.12)$$

где $E_0(x - \xi, y - \eta)$ — освещенность, создаваемая на светочувствительном слое световым потоком в момент экспонирования фотоматериала.

Однако наряду с формулой (6.12) для анализа оптической диффузии в фоточувствительном слое можно воспользоваться пространственно-частотным спектром импульсной переходной функции, т. е.

$$h_{\text{фс}}^*(\vartheta_1, \vartheta_2) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} h_{\text{фс}}(x, y) e^{-2\pi j(\vartheta_1 x + \vartheta_2 y)} dx dy.$$

Это выражение и представляет собой амплитудную пространственно-частотную характеристику (АПЧХ) фотографического слоя, обусловленную диффузным состоянием света в слое. Тогда с учетом теоремы о Фурье-преобразовании свертки получим спектр функции $E_g(x, y)$

$$e_g(\vartheta_1, \vartheta_2) = E_0(\vartheta_1, \vartheta_2) h_{\text{фс}}^*(\vartheta_1, \vartheta_2),$$

где

$$E_0(\vartheta_1, \vartheta_2) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} E_0(x, y) e^{-2\pi j(\vartheta_1 x + \vartheta_2 y)} dx dy.$$

Поскольку функция рассеяния точки симметричная, пространственно-частотная передаточная функция оптической диффузии имеет только действительную часть и по [12] может быть записана для одной переменной в следующем виде

$$h_{\text{фс}}^*(\vartheta_1) = \frac{q^2}{q^2 + \vartheta_1^2}, \quad \text{где } q = \frac{2 \ln 10}{K}.$$

Наряду с АПЧХ в фотографии используют понятие «контрастно-частотная характеристика» (КЧХ). КЧХ дает более полную информацию о фоточувствительном слое с точки зрения определения его разрешающей способности.

Зернистость фотографического изображения является одной из важных характеристик при обработке фотоинформации, так как она накладывает шумовую составляющую на изображение. Под зернистостью понимают [12] неоднородность фотографического изображения, вызванную структурной неоднородностью фотографического слоя, которая определяется флуктуациями размеров и формы проявленных зерен, перекрытием их в момент просвечивания изображения, рассеянием света на этих зернах, имеющих неодинаковую форму и размеры. Различают два вида зернистости — объективную и субъективную. Объективная зернистость определяется путем фотометрирования или с помощью специальных приборов — гранулометров. Субъективная зернистость определяется по визуальному восприятию человеком.

При автоматизированной обработке фотоинформации с использованием ЭВМ учитывается объективная зернистость. Распределение числа проявленных зерен на единицу поверхности фотослоя подчиняется закону Гауса [1]

$$\varphi(n) = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(n-m_n)^2}{2\sigma_n^2}},$$

где n — число зерен; m_n — математическое ожидание числа зерен, приходящихся на единицу площади поверхности фотослоя; σ_n^2 — дисперсия флуктуаций числа проявленных зерен.

Связь между числом проявленных зерен и оптической плотностью участка фотографического слоя площадью A устанавливается соотношением

$$D = \frac{0,434nA_3}{A},$$

где A_3 — средняя площадь проекции одного зерна.

Исходя из этого выражения и условия, по которому число зерен n в фотослое подчинено нормальному зако-

ну распределения, можно с некоторым приближением утверждать, что оптическая плотность почернения фотослоя также подчинена нормальному закону, т. е.

$$\varphi(D) = \frac{1}{\sigma_D \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(D - \sigma_D^2)}{2\sigma_D^2}},$$

где

$$\sigma_D = 0,434 \frac{A_3 \sigma_n}{A}, \text{ а } \sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (n_i - n)^2}{N}} \approx m_n.$$

Воспользовавшись приведенными формулами, можно получить выражение, устанавливающее связь между средней оптической плотностью фотометрируемого участка площадью A и средним квадратическим отклонением значения флюктуации оптической плотности

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{0,434 m_D A_3}{A}}. \quad (6.13)$$

Если оптическая плотность есть величина постоянная, то последняя формула преобразуется к виду

$$\sigma_D \sqrt{A} = G = \text{const},$$

где $G = \sqrt{0,434 m_D A_3}$ — коэффициент гранулярности.

Выражение (6.13) строго справедливо для больших площадей сканирующего пятна. В случае если размеры соизмеримы с размерами зерен, дисперсия σ_D растет значительно медленнее, чем уменьшается площадь пятна, так как начинают сказываться статистические связи между соседними зернами фотослоя.

Оптическая плотность с коэффициентом пропускания связаны соотношением [12]

$$\Delta D = -0,434 \frac{\Delta \tau}{\tau}, \quad (6.14)$$

позволяющим сделать предположение, что флюктуации τ также подчиняются нормальному закону распределения,

а среднее квадратическое отклонение коэффициента пропускания описывается выражением

$$\sigma_{\tau} = \ln 10 m_{\tau} \sqrt{\frac{0,434 A_3 \lg m_{\tau}}{A}}.$$

Здесь также $\sigma_{\tau} \sqrt{A} = \text{const}$, но зависимость σ_{τ} от математического ожидания коэффициента пропускания при постоянной площади сканирующего пятна более сложная и имеет вид

$$\sigma_{\tau} = a m_{\tau} \sqrt{\lg \left(\frac{1}{m_{\tau}} \right)},$$

где a — некоторый эмпирический коэффициент.

Знание рассмотренных характеристик и их особенностей является необходимым фактором при автоматизированной обработке фотоинформации.

6.3. Структурная схема фотографического процесса

Исходя из анализа механизма получения фотографического изображения, его характеристик и условия, по которому для образования изображения необходимо чувствительному слою фотоматериала сообщить некоторое количество освещения, можно составить структурную схему фотографического процесса, которая представлена на рис. 6.2 [12].

Входным сигналом этой схемы является распределение экспозиции на поверхности светочувствительного слоя

$$H'(x, y) = E_0(x, y) t_0,$$

где $E(x, y)$ — распределение освещенности, t_0 — время экспонирования светочувствительного слоя.

Первый блок схемы представляет собой линейный инерционный элемент, описывающий оптическую диффузию фотослоя, т. е. рассеяние в фотослое. Выходным сигналом этого блока является распределение экспозиции внутри фотослоя $H'_b(x, y)$. Функционирование блока описывается функцией вида

$$E_g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_0(x - \xi, y - \eta) h(\xi, \eta) d\xi d\eta,$$

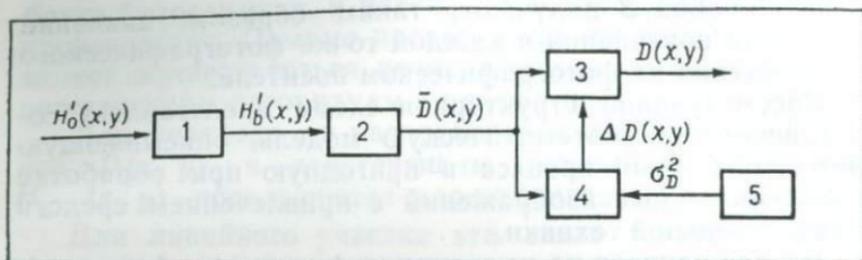


Рис. 6.2. Структурная схема фотографического процесса:

1 — блок, реализующий рассеивающие свойства светочувствительного слоя; 2 — блок, реализующий связь плотности почернения фотографического материала и экспозиции; 3 — суммирующее устройство; 4 — модулирующее устройство; 5 — генератор белого шума, имитирующий зернистость фотоматериала

где $E_g(x, y)$ — действующее распределение освещенности на фотослое, $h(\xi, \eta)$ — импульсная переходная характеристика фотослоя.

Сигнал $H'_g(x, y)$ воздействует на безынерционное звено 2, устанавливающее взаимосвязь между оптической плотностью почернения фотоматериала и экспозицией, т. е. $D = \gamma(\lg H' - \lg H'_i)$, взятой для линейного участка характеристической кривой.

Здесь γ — коэффициент контрастности, определяемый по характеристической кривой для данного фотографического материала. На выходе блока 2 получают среднее значение плотности почернения изображения — \bar{D} , представляющей собой модулирующую функцию, которая поступает на сумматор 3 и модулирующее устройство 4. Одновременно на блок 4 поступает сигнал с блока 5, реализующего функцию $g(x, y)$, представляющую зернистость фотослоя или гранулярность. Блок 4 выполняет функции модулятора, т. е. накладывает на белый шум, вырабатываемый генератором 5, модулирующую функцию $\bar{D}(x, y)$, решая равенство

$$\sigma_D^2 = 0,344 \frac{A_3}{A} m_D(x, y). \quad (6.15)$$

На выходе блока 4 получают значение промодулированного шума $\Delta D(x, y)$, которое подается на сумматор 3. Туда же подается значение средней плотности почернения фотоматериала, обусловленного экспозицией. На

выходе блока Z получают, таким образом, значение плотности почернения в каждой точке фотографического изображения на фотографическом носителе.

Рассмотренная структурная схема представляет собой некоторую математическую модель, описывающую фотографический процесс и пригодную при обработке фотографических изображений с привлечением средств вычислительной техники.

В ряде случаев по имеющимся фотографическим изображениям необходимо распознать объекты съемки, провести фотографические работы или определить значения экспозиции. В каждом из этих случаев используются значения распределения плотности почернения $D(x, y)$, полученные на фотографическом изображении. Так, для отыскания распределения экспозиции $H'_0(x, y)$ по известному на фотоснимке распределению $D(x, y)$ можно воспользоваться методикой, изложенной в [13].

Анализируя структурную схему получения фотографического изображения, заключаем, что при получении фотографического изображения на его качество оказывает существенное влияние зернистость фотографического слоя. Из формулы (6.15) видно, что дисперсия шума, создаваемая зернистостью, в значительной степени зависит от значения площади A_c сканирующей диафрагмы при считывании изображения. Увеличение площади сканирующей диафрагмы ведет к снижению дисперсии шума. Однако увеличение размеров сканирующей диафрагмы влечет за собой ухудшение ее пространственно-частотной характеристики, так как уменьшает число составляющих высоких пространственных частот, хотя и улучшает энергетические характеристики. Поэтому прежде чем обрабатывать на ЭВМ то или иное изображение, необходимо выбрать оптимальные размеры диафрагмы в оптико-электронном считывающем устройстве. Выбор осуществляется исходя из решаемых задач при предстоящей обработке фотографических изображений и критерия оптимальности. Кроме того, фотографическое изображение в момент, предшествующий вводу в ЭВМ, может быть подвергнуто обработке с целью фильтрации получаемых аналоговых сигналов. Характеристики фильтров при этом определяются отдельно и задаются они исходя из условий космического фотографирования, особенностей, которые возникают при обра-

ботке фотоснимков, и целей, для которых эта обработка производится. Помимо предварительной фильтрации она может осуществляться непосредственно в ЭВМ по соответствующим алгоритмам и программам.

Для перехода от распределения оптической плотности $D(x, y)$ к действующим значениям экспозиций $H'_d(x, y)$ используются характеристические кривые.

Для линейного участка эта связь устанавливается формулой

$$H'_g = H'_i \cdot 10^{\frac{D}{\gamma}}, \quad (6.16)$$

а на начальном участке эта формула преобразуется к виду

$$H'_g = \frac{D + K_1}{u}. \quad (6.17)$$

Преимущество использования формулы (6.17), отражающей начальный участок характеристической кривой, заключается в том, что в этом случае погрешность в определении экспозиции остается постоянной в силу постоянства погрешности в оптической плотности почернения фотоматериала. При использовании выражения (6.16), характерного для линейного участка, ошибка в определении величины $H'_d(x, y)$ растет пропорционально погрешности в считывании плотности почернения, т. е.

$$\Delta H'_g = 0,434 \frac{H'_i}{\gamma} \cdot 10^{\frac{D}{\gamma}} \Delta D.$$

Таким образом, при обработке фотографических изображений на ЭВМ необходимо учитывать характеристическую кривую, которая определяется целым рядом факторов, связанных как с экспонированием фотоматериала, так и с условиями и способом химической обработки фотоматериала. Поскольку при космическом фотографировании получают большой объем фотографической информации, то необходимо добиваться, чтобы как характеристики фотоматериалов, так и условия химической обработки были стабильными.

Для отыскания пространственно-частотного спектра (ПЧС) распределения экспозиции, воздействующей на светочувствительный слой в зависимости от простран-

ственно-частотного спектра плотности почернения и функции рассеяния фотографического слоя, может быть использовано выражение

$$H_0^*(\vartheta_1, \vartheta_2) = \frac{H_g^*(\vartheta_1, \vartheta_2)}{\tau^*(\vartheta_1, \vartheta_2)},$$

где

$$H_g^*(\vartheta_1, \vartheta_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} H_g(x, y) e^{-2\pi j(\vartheta_1 x + \vartheta_2 y)} dx dy$$

— ПЧС действующего распределения экспозиции по фоточувствительному слою;

$$\tau^*(\vartheta_1, \vartheta_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} h_{\text{фс}}^*(x, y) e^{-2\pi j(\vartheta_1 x + \vartheta_2 y)} dx dy$$

— пространственно-частотная характеристика фотоматериала;

$h_{\text{фс}}^*(x, y)$ — импульсная передаточная характеристика фотослоя.

В свою очередь исходное распределение экспозиции описывается обратным преобразованием Фурье в следующем виде:

$$H_0(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} H_0^*(\vartheta_1, \vartheta_2) e^{2\pi j(\vartheta_1 x + \vartheta_2 y)} d\vartheta_1 d\vartheta_2;$$

$$H_0^*(\vartheta_1, \vartheta_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} H_0(x, y) e^{-2\pi j(\vartheta_1 x + \vartheta_2 y)} dx dy.$$

Определение ПЧС или других величин на ЭВМ представляет определенные трудности, так как непосредственно интегралы в бесконечных пределах и комплексные величины без некоторых допущений и ограничений не могут быть вычислены. Кроме того, даже при соответствующих допусках на расчет ПЧС требуются большие затраты машинного времени. В последнее время для эффективного решения этой задачи разработано и используется быстрое преобразование Фурье (БПФ).

6.4. Информационная емкость фотографического изображения

При передаче фотографических изображений с борта КА на землю и автоматизированной обработке их с использованием ЭВМ наряду с ранее перечисленными ха-

раактеристиками нужно знать информационную емкость фотографических изображений.

Фотографическое изображение на фотопленке, его качество и информационная емкость определяются целым рядом факторов. Это прежде всего оптическое изображение, получаемое с помощью оптической системы фотоаппарата и его механизмов; передаточные характеристики фоточувствительного слоя; характеристики зернистости используемых светочувствительных слоев; параметры фотохимической обработки и т. д. Таким образом, информационная емкость того или иного фотографического изображения прежде всего определяется информационной емкостью оптического изображения, пространственно-частотными характеристиками фоточувствительного слоя и зернистостью фотослоя.

Из теории информации известно, что количество информации в сообщении о каком-либо событии принято определять как

$$I = \log_2 \frac{P_2}{P_1},$$

где P_1 и P_2 — соответственно априорная и апостериорная вероятности.

Последняя устанавливается на основании принятого сообщения. Для идеального случая, когда наступает только полезный сигнал и шумы отсутствуют, т. е. когда $P_2 = 1$,

$$I = \log_2 \frac{1}{P_1} = -\log_2 P_1.$$

Теперь, если представить оптическое изображение, состоящее из n элементов со своей постоянной освещенностью на каждом элементе, то число различаемых значений разности освещенностей будет составлять некоторую величину N_1 , а различаемых освещенностей $N_1 + 1$. Для определения полной информации оптического изображения воспользуемся методикой, изложенной в работах В. И. Алексеева, И. А. Бандарского и В. И. Кононова. В этом случае будем исходить из предпосылок, что все изображение имеет n_j элементов с освещенностью E_j . Количество информации для некоторого элемента с освещенностью E_j определится как

$$I_j = -\log_2 p_j,$$

где p_j — априорная вероятность наличия в изображении элемента с освещенностью E_j ($p_j = n_j/n$).

Тогда полное количество информации, получаемое от всех элементов с освещенностью E_j , составит

$$I_{nj} = -n_j \log_2 p_j$$

или с учетом того, что $n_j = np_j$, будет равно

$$I_{nj} = np_j \log_2 p_j.$$

Полная же информация от всего изображения, учитывая освещенности всех элементов, определится из выражения

$$I_n = -n \sum_{i=1}^{N_1+1} p_i \log_2 p_i. \quad (6.18)$$

Если появление каждой j освещенности равновероятно, т. е.

$$p_j = \frac{1}{N_1 + 1},$$

то

$$I_n = n \log_2 (N_1 + 1). \quad (6.19)$$

Таким образом, формулы (6.18), (6.19) дают возможность вычислить количество информации, которое несет в себе оптическое изображение, проектируемое оптической системой на фоточувствительный слой.

Другой характеристикой, определяющей информационную емкость изображения, является энтропия, показывающая, какое количество информации несет в себе в среднем один элемент изображения, и определяемая из выражения

$$H_{и} = - \sum_{j=1}^{N_1+1} p_j \log_2 p_j.$$

При равновероятном появлении каждой градации освещенности величина энтропии определяется формулой

$$H_{и} = \log_2 (N_1 + 1).$$

Таким образом, мы рассмотрели возможность определения количества информации и энтропии, заключенных в оптическом изображении для идеального случая, т. е. когда в изображении отсутствуют шумы.

Фотографическое изображение, возникшее в результате преобразования фоточувствительным слоем оптического изображения, в силу рассеивающих свойств и других характеристик слоя содержит количество информации, отличающееся от количества информации, заключенного в оптическом изображении.

Следовательно, при сравнении нескольких светочувствительных слоев между собой нужно знать, какое наибольшее количество информации, содержащееся в оптическом изображении, они способны передать или какова их информационная емкость.

Получение фотографического изображения немислимо без наличия шумовой составляющей (зернистости) и, следовательно, $P_2 \neq 1$. Применительно к этому случаю в теории информации для определения информационной емкости канала с шумами существует следующая зависимость

$$I_n = n \log_2 \left[1 + \frac{\bar{U}_0^2}{\bar{U}_ш^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6.20)$$

где n — число элементов, передаваемых в канале, \bar{U}_0^2 — средний квадрат амплитуды сигнала, $\bar{U}_ш^2$ — средний квадрат амплитуды шума.

Эта формула справедлива, если допустить, что сигнал и шум независимые, нормальные, стационарные и эргодические, а система передачи информации линейная. Формула (6.20) для условий фотографического изображения преобразуется к виду

$$I_n = n \log_2 \left[1 + \frac{\Delta D^2}{(\sigma')^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6.21)$$

где $\Delta D = D_{\max} - D_{\min}$ — диапазон плотностей на фотопленке; σ' — среднее квадратическое отклонение плотности зернистости, измеренное на площади, эквивалентной площади передаваемого элемента.

Приведенная формула (6.21) является приближенной в силу как принятых условий, так и того, что фотопленка не является линейной системой.

Для более точного определения информационной емкости того или иного изображения пользуются пространственно-частотными характеристиками. В этом случае информационная емкость единичного участка —

элемента изображения может быть вычислена по формуле

$$\Delta I = \frac{1}{2} \iint_{-\infty}^{\infty} \log_2 \left[1 + \frac{D^*(\vartheta_1, \vartheta_2)}{G^*(\vartheta_1, \vartheta_2)} \right] d\vartheta_1 d\vartheta_2, \quad (6.22)$$

где $D^*(\vartheta_1, \vartheta_2)$ — спектр Хинчина—Винера для плотности почернения пленки от светового сигнала воздействия; $G(\vartheta_1, \vartheta_2)$ — спектр Хинчина—Винера зернистости пленки.

С учетом ПЧХ пленки $\tau^*(\vartheta_1, \vartheta_2)$ и спектра Хинчина—Винера для экспозиций $H^*(\vartheta_1, \vartheta_2)$ формула (6.22) примет вид

$$\Delta I = \frac{1}{2} \iint_{-\infty}^{\infty} \log_2 \left[1 + \frac{|\tau^*(\vartheta_1, \vartheta_2)|^2 H^*(\vartheta_1, \vartheta_2)}{G^*(\vartheta_1, \vartheta_2)} \right] d\vartheta_1 d\vartheta_2. \quad (6.23)$$

Из формулы (6.23) следует, что с увеличением области пространственных частот, передаваемых пленкой, и с уменьшением ее зернистости информационная емкость пленки возрастает.

Так как пленка изотропна, то формулу (6.23) можно переписать, выразив информационную емкость через одну пространственную частоту, т. е.

$$\Delta I = \frac{1}{2} \int_0^{\vartheta_n} \log_2 \left[1 + \frac{\tau^*(\vartheta) H^*(\vartheta)}{G^*(\vartheta)} \right] d\vartheta, \quad (6.24)$$

где $\vartheta^2 = \vartheta_1^2 + \vartheta_2^2$;

ϑ_n — предельная пространственная частота в спектре экспозиций.

Предельная пространственная частота ϑ_n — это такая частота при заданном среднем квадрате отклонения экспозиций, при которой информационная емкость максимальна. В оптическом изображении пространственные частоты бóльшие, чем предельные ϑ_n пленкой не могут быть переданы.

Частота ϑ_n зависит от передаточных характеристик пленки спектра зернистости и среднего квадрата отклонения экспозиций и определяется из соотношения

$$\frac{1}{a^4} \vartheta_n^4 + \frac{2}{3a^6} \vartheta_n^6 = \frac{\xi^2 (\Delta H')^2}{\pi G^* a^2},$$

где a — параметр, характеризующий ПЧХ пленки, причем

$$\tau^*(\vartheta) = \frac{a^2}{a^2 + \vartheta^2}; \quad (6.25)$$

$\Delta H'$ — максимальное отклонение экспозиции от ее среднего значения;

$$\xi = \frac{|\delta \bar{H}'|}{\Delta H'}, \quad \Delta H' = \frac{H'_{\max} - H'_{\min}}{2},$$

где $\delta \bar{H}'$ — средний квадрат отклонения экспозиции.

Если спектр зернистости фоточувствительного слоя принять постоянным и в формулу (6.24) подставить (6.25), то получим

$$\Delta I_{\max} = \pi a^2 \log_2 e \left[\frac{\vartheta^2}{a^2} - \ln \left(1 + \frac{\vartheta^2}{a^2} \right) \right]. \quad (6.26)$$

Формула (6.26) выведена в предположении, что экспозиция имеет нормальное распределение, хотя она и ограничена значениями линейного участка характеристической кривой, определяемыми D_{\max} и D_{\min} .

Знание информационной емкости фотографической пленки позволяет вычислить время, необходимое на передачу фотоинформации по радиоканалу. Так при передаче максимального количества информации, содержащейся на 1 см² пленки, при полосе пропускания радиоканала Δf необходимое время может быть вычислено по формуле

$$t = \frac{\Delta I_{\max}}{\Delta f \log_2 \left[1 + \left(\frac{U_c}{U_m} \right)^2 \right]},$$

где U_c — напряжение полезного сигнала, обусловленного плотностью почернения фотоматериала и полученного в результате считывания фотоинформации; U_m — напряжение шума, обусловленного зернистостью фоточувствительного слоя.

6.5 Пространственно-частотные характеристики расфокусировки объектива, сдвига изображения и сканирующей диафрагмы

Наряду с пространственно-частотными характеристиками оптической системы и фотопленки на качество фотографического изображения в значительной степени

оказывают влияние пространственно-частотные характеристики расфокусировки объектива, затвора и остаточного сдвига изображения.

Поскольку объективы фотографических систем, используемых при космическом фотографировании, в большинстве своем являются длиннофокусными, то при некоторых температурных изменениях окружающей фотографической аппаратуры среды возникают изменения в линейных размерах корпуса фотоаппарата. Эти изменения в свою очередь ведут к расфокусировке объектива и получению размытого оптического изображения. Отдельная точка в этом случае изображается в виде кружка рассеяния.

Если функция рассеяния $g(\xi, \eta)$ известна, то двумерная функция освещенности фотографического слоя с учетом расфокусировки может быть получена сверткой функции изображения, создаваемого объективом в плоскости наилучшего изображения и функции рассеяния, т. е.

$$E_p(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} E(x - \xi, y - \eta) g_p(\xi, \eta) d\xi d\eta.$$

Пространственно-частотная передаточная функция (ПЧПФ) расфокусировки в этом случае определится из соотношения

$$W_p(\vartheta_1, \vartheta_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} E_p(x, y) e^{-2\pi j(\vartheta_1 x + \vartheta_2 y)} dx dy.$$

Однако если мы исходим из условия, что функция рассеяния расфокусировки $g_p(x - \xi, y - \eta)$ известна, то $W_p(\vartheta_1, \vartheta_2)$ может быть найдена путем прямого преобразования Фурье функции рассеяния. Поскольку функция рассеяния точки при расфокусировке имеет равную освещенность на некотором участке, то ее преобразование Фурье и ПЧПФ, представляющая собой $W_p(\vartheta_1, \vartheta_2) = |W_p(j\vartheta_1, j\vartheta_2)|$ и характеризующая расфокусировку, имеет колебательный характер относительно оси ординат (пространственных частот ϑ_1 и ϑ_2). Это означает, что $W_p(\vartheta_1, \vartheta_2)$ представляет собой совокупность чередующихся участков с положительными и отрицательными значениями коэффициента передачи. В точках, разделяющих эти участки, $W_p(\vartheta_1, \vartheta_2) = 0$.

Другой не менее важной характеристикой, оказывающей существенное влияние на качество фотографического изображения, является пространственно-частотная характеристика сдвига изображения.

Известно, что при космическом фотографировании в фотографическом аппарате оптическое изображение местности в момент экспонирования перемещается по поверхности чувствительного слоя фотопленки. Это обусловлено большой скоростью поступательного движения носителя и большой выдержкой фотографирования. Чтобы обеспечить получение качественного фотоснимка в фотографических аппаратах применяют специальные устройства, компенсирующие сдвиг изображения. Однако полной компенсации сдвига изображения получить не удастся в силу таких факторов, как изменение орбитальной скорости, неточность ориентации КА и т. д. В этом случае имеет место остаточный сдвиг изображения. Если изображение фотографируемой местности таким образом перемещается в плоскости размещения фотопленки, т. е. координаты являются функциями времени, то в случае прямолинейного перемещения в направлении оси x со скоростью v_H имеем $x(t) = v_H(t)$, $y(t) = 0$. Если скорость перемещения изображения постоянна, изображение линии будет иметь ширину, равную величине остаточного сдвига, т. е. $\Delta\delta = v_H t_B$, где t_B — время выдержки, и тогда пространственно-частотная передаточная функция сдвига изображения определится как

$$W_c(\vartheta_1, \vartheta_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} \Delta\delta(x, y) e^{-2\pi j(\vartheta_1 x + \vartheta_2 y)} dx dy.$$

Одномерная амплитудная ПЧХ представляет собой преобразование Фурье от полосы, т. е.

$$W_a(\vartheta_1) = |W_c(j\vartheta_1)| = \frac{\sin(\pi\vartheta_1\Delta\delta)}{\pi\vartheta_1\Delta\delta}. \quad (6.27)$$

Здесь $\Delta\delta$ — остаточный сдвиг, если компенсация осуществляется с использованием механических устройств. В том случае, когда компенсация сдвига изображения осуществляется оптическим путем, каждая точка изображения совершает колебательное движение вдоль оси x

и, если $\Delta\delta$ является амплитудой колебания, то траектория точки описывается выражением

$$x = \frac{\Delta\delta \cos 2\pi t}{t_\phi}; y = 0,$$

где t_ϕ — время фактической выдержки; t — текущее время.

В этом случае ПЧХ, определяющая пространственную фильтрацию изображения, описывается функцией Бесселя 1 рода нулевого порядка, т. е.

$$W_c(\vartheta_1) = I_0(2\pi\vartheta_1\Delta\delta). \quad (6.28)$$

Из анализа выражений (6.27) и (6.28) следует, что ПЧХ определяют фильтрующие действия сдвига изображения и носят колебательный характер, а следовательно, имеют участки, где коэффициент передачи имеет отрицательное значение. Последнее свойство ПЧХ оказывает определенное влияние на изображение. Так элементарные составляющие изображения при отрицательных значениях контрастно-частотной характеристики ослабляются и меняют фазу на 180° .

Таким образом, если теперь использовать в последующих звеньях пространственные оптические или электронные фильтры, то оказывается, что из-за последнего свойства ПЧХ не представляется возможным полностью скомпенсировать нечеткость изображения, вызванную сдвигом.

Помимо рассмотренных ПЧХ расфокусировки и сдвига изображения на его качество оказывает влияние также механизм затвора и в особенности отверстие в затворе, обеспечивающее пропускание светового потока к чувствительному слою фотопленки в момент фотографирования. В случае центрального затвора, по-видимому, состояние открытого затвора можно рассматривать соответствующим некоторой диафрагме. В случае же шторного затвора пропускание светового потока осуществляется последовательно при движении щели, образованной движущимися шторками затвора. Как в первом, так и во втором случае в пространственно-частотный спектр затвором вносятся искажения, которые сказываются на качестве фотографического изображения.

Рассматривая состояние открытого центрального затвора как состояние неподвижной осесимметричной диа-

фрагмы круглой формы, можно определить для центрального затвора его ПЧХ. Так, функция веса определится как отношение реакции диафрагмы к световому потоку от точечного источника, поступившему в затвор,

$$\tau(\xi, \eta) = \frac{F(\xi, \eta)}{\frac{F}{2\pi}}.$$

В то же время световой поток точечного источника связан с освещенностью в плоскости открытого затвора через дельта-функцию соотношением

$$\iint_{-\infty}^{\infty} F \delta(x, y) dx dy = \iint_{-\infty}^{\infty} E(x, y) dx dy.$$

Из приведенных соотношений следует, что функция веса центрального затвора характеризует распределение его прозрачности. Поскольку центральный затвор открывается от центра к краям, то, следовательно, прозрачность его будет максимальной в центре и линейно уменьшающейся к краям (до нуля). В таком случае пространственная функция веса будет некоторым спадающим конусом.

Световой поток, прошедший через затвор, определится интегралом свертки

$$F'(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} E(x - \xi, y - \eta) \tau(\xi, \eta) d\xi d\eta.$$

Преобразование Фурье от функции веса центрального затвора дает его пространственно-частотную передаточную функцию (ПЧПФ) в виде

$$\tau^*(\vartheta_1, \vartheta_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} \tau(\xi, \eta) e^{-2\pi j(\vartheta_1 \xi + \vartheta_2 \eta)} d\xi d\eta.$$

Нормированная ПЧПФ центрального затвора определяется из соотношения

$$\tau_H^*(\vartheta_1, \vartheta_2) = \frac{\tau(\vartheta_1, \vartheta_2)}{\iint_{-\infty}^{\infty} \tau(\xi, \eta) d\xi d\eta},$$

и тогда нормированная функция веса определится как

$$\tau_H(\xi, \eta) = \iint_{-\infty}^{\infty} \tau^*(\vartheta_1, \vartheta_2) e^{2\pi j(\vartheta_1 \xi + \vartheta_2 \eta)} d\xi d\eta.$$

Спектр потока, прошедшего через центральный затвор, может быть найден из соотношения

$$F'(\vartheta_1, \vartheta_2) = e^*(\vartheta_1, \vartheta_2) \tau^*(\vartheta_1, \vartheta_2),$$

где $e^*(\vartheta_1, \vartheta_2)$ — пространственно-частотный спектр освещенности.

Световые потоки, проходящие через центральные затворы, а равно и через круглые диафрагмы, фазовых изменений не претерпевают и поэтому в ряде случаев ПЧПФ называют ПЧХ.

Для шторных затворов ПЧХ могут находиться прежде всего как для прямоугольной диафрагмы со сторонами a и b . Математический аппарат остается тем же, и действительные амплитудная и нормированная ПЧХ шторного затвора запишутся в виде

$$\tau_{шз}(\vartheta_1, \vartheta_2) = ab \tau_{шз} \frac{\sin \pi a \vartheta_1}{\pi a \vartheta_1} \cdot \frac{\sin \pi b \vartheta_2}{\pi b \vartheta_2};$$

$$\tau_{ншз}(\vartheta_1, \vartheta_2) = \frac{\sin \pi a \vartheta_1 \sin \pi b \vartheta_2}{\pi^2 a b \vartheta_1 \vartheta_2},$$

где $\tau_{шз}$ — коэффициент пропускания шторного затвора; a, b — размеры сторон щели, образованной движущимися шторками.

При автоматизированной обработке фотоинформации считывание ее осуществляется с помощью подвижных диафрагм, перемещающихся по установленному закону. Естественно, при считывании информации возникают погрешности, обусловленные нестабильностью параметров считывающего устройства, конечных размеров считывающей щели (диафрагмы). При сканировании происходит искажение пространственно-частотного спектра считываемого изображения, т. е. получаемый спектр изображения будет определяться выражением

$$e^*(\vartheta_1, \vartheta_2) = b^*(\vartheta_1, \vartheta_2) \tau_g^*(\vartheta_1, \vartheta_2),$$

где $b^*(\vartheta_1, \vartheta_2)$ — ПЧС считываемого изображения, а $\tau_g^*(\vartheta_1, \vartheta_2)$ — ПЧС сканирующей диафрагмы.

При этом для прямоугольной сканирующей щели выполняется условие

$$\tau_g(x, y) = \begin{cases} 1, & |x| \leq a; \quad |y| \leq b; \\ 0, & |x| > a; \quad |y| > b. \end{cases}$$

Математический аппарат вычисления ПЧХ в этом случае остается тем же самым, что и для любых диафрагм, в том числе и затворов. Однако следует иметь в виду, что прямоугольные диафрагмы пропускают такие пространственные частоты изображения, для которых выполняются условия [12]

$$\vartheta_1 < \frac{\pi}{a}; \quad \vartheta_2 < \frac{\pi}{b}, \quad (6.29)$$

т. е. пространственные частоты ϑ_1 и ϑ_2 , равные значениям, определяемым правыми частями этих условий или большие их, диафрагмой не пропускаются. Из условий (6.29) также следует, что чем меньше размеры диафрагмы, тем большие значения пространственных частот она пропускает.

Таким образом, для того чтобы передать составляющие высоких пространственных частот, т. е. передать тонкую структуру изображений, необходимо иметь малые размеры диафрагм. Однако в этом случае резко падает амплитуда пропускания сигнала, т. е. падает величина светового потока, проходящего через диафрагму. Это с одной стороны, а с другой — резко снижается помехоустойчивость на входе считывающих устройств вследствие снижения соотношения сигнал/шум.

Уменьшение светопропускания в ряде случаев удается компенсировать путем удлинения диафрагмы, но это влечет за собой ограничение пространственных частот по направлению размера b диафрагмы, что вызывает искажения в передаваемом изображении.

Из изложенного следует, что пространственно-частотный спектр преобразуемого в результате сканирования изображения определяется геометрическими параметрами сканирующей (считывающей) диафрагмы. Таким образом, зная ПЧС передаваемого изображения и задачи дальнейшей обработки фотоинформации, выбирают параметры сканирующих диафрагм.

6.6. Структурная схема получения фотоинформации

Основным фактором, определяющим эффективность обнаружения целей с помощью оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) любого вида, является качество изображения (отображения) получаемой информации, которое

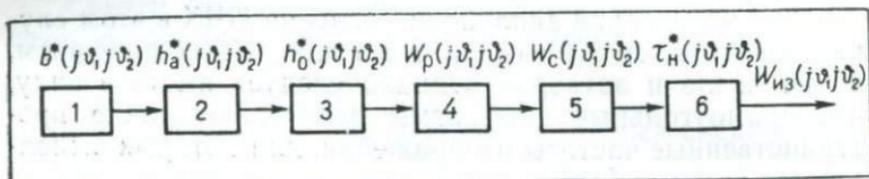


Рис. 6.3. Структурная схема получения фотонинформации:

1 — фотографируемый объект; 2 — атмосфера; 3 — оптическая система; 4 — расфокусировка объектива; 5 — сдвиг изображения; 6 — фотопленка

в основном определяется величиной разрешающей способности оптико-электронной системы. Поэтому при синтезе ОЭА в первую очередь обращают внимание на получение высокой разрешающей способности как элементов, так и систем в целом

Пусть, например, требуется определить разрешающую способность фотографической системы. Фотографическая система в наземных условиях рассматривается обычно состоящей из трех звеньев: объект — фотоаппарат — пленка. Для космических условий, когда фотографический аппарат, имеющий большое фокусное расстояние, находится на большой высоте и относительно объектов съемки перемещается с огромной скоростью, для определения разрешающей способности системы помимо разрешающих способностей объектива и пленки необходимо учитывать дополнительные факторы, такие как:

- состояние атмосферы (ее пространственно-частотный спектр);

- расфокусировка оптической системы, обусловленная изменением высоты носителя и изменением фокусного расстояния из-за нестабильности температурных условий, в которых находится фотоаппарат;

- сдвиг изображения, обусловленный перемещением носителя и вращения Земли во время фотографирования.

Таким образом, для определения разрешающей способности фотографической системы в целом необходимо определить ее контрастно-частотную характеристику, воспользовавшись математическим аппаратом пространственно-частотного анализа, а затем по ней найти численное значение разрешающей способности. Для решения этой задачи предварительно составим структурную схему получения фотонинформации, которая может быть вы-

полнена в виде, представленном на рис. 6.3. Она представляет собой схему последовательного включения звеньев элементов системы или факторов, оказывающих влияние на качество получения фотоинформации со своими пространственно-частотными передаточными характеристиками.

Ранее установлено, что объект съемки достаточно полно может быть охарактеризован его двухмерным пространственно-частотным спектром яркости

$$b^*(\vartheta_1, \vartheta_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} B(x, y) e^{-2\pi j(\vartheta_1 x + \vartheta_2 y)} dx dy,$$

где $B(x, y)$ — яркость объекта съемки в системе координат x и y .

При определении $b^*(\vartheta_1, \vartheta_2)$ величина $B(x, y)$ как функция времени, коэффициент пропускания оптических сред и элементов в оптическом диапазоне спектра принимаются постоянными.

Одной из особенностей космического фотографирования является фотографирование через толстый слой атмосферы. Таким образом, состояние атмосферы, ее характеристики оказывают значительное влияние на качество получаемой фотоинформации. Учет ее влияния осуществляется введением в схему звена с передаточной функцией атмосферы

$$h_a^*(\vartheta_1, \vartheta_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} h_a(x - \xi, y - \eta) e^{-2\pi j[\vartheta_1(x - \xi) + \vartheta_2(y - \eta)]} d\xi d\eta,$$

где $h_a(x - \xi, y - \eta)$ — функция рассеяния атмосферы.

Аналогичным образом находятся характеристики оптической системы

$$h_0^*(\vartheta_1, \vartheta_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} h_0(x - \xi, y - \eta) e^{-2\pi j[\vartheta_1(x - \xi) + \vartheta_2(y - \eta)]} d\xi d\eta,$$

где

$$h_0(x - \xi, y - \eta) = \frac{E(x - \xi, y - \eta)}{\left(\frac{F}{2\pi}\right)}$$

— функция рассеяния точки.

Расфокусировка, как известно, приводит к ухудшению резкости фотографического изображения, т. е. изображаемая точка превращается в кружок рассеяния. Если

функция рассеяния, обусловленная расфокусировкой, известна, то пространственно-частотная передаточная функция, характеризующая расфокусировку, запишется в следующем виде

$$W_p(\vartheta_1, \vartheta_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} h_p(x - \xi, y - \eta) e^{-2\pi j(\vartheta_1(x-\xi) + \vartheta_2(y-\eta))} d\xi d\eta,$$

где $h_p(x - \xi, y - \eta)$ — функция рассеяния точки, обусловленная расфокусировкой оптической системы.

Если известна функция освещенности в изображении, создаваемой оптической системой при условии расфокусировки, а функция рассеяния неизвестна, то

$$W_p(\vartheta_1, \vartheta_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} E_p(x, y) e^{-2\pi j(\vartheta_1 x + \vartheta_2 y)} dx dy.$$

Сдвиг изображения при космическом фотографировании обусловлен большой скоростью перемещения КА в момент экспонирования фотоматериала и пространственно-частотная передаточная функция сдвига изображения в этом случае определится из выражения

$$W_c(\vartheta_1, \vartheta_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} \Delta\delta(x, y) e^{-2\pi j(\vartheta_1 x + \vartheta_2 y)} dx dy,$$

где $\Delta\delta(x, y)$ — остаточный сдвиг, возникающий при компенсации сдвига изображения (декомпенсация).

Светочувствительный материал — последнее звено структурной схемы получения фотоинформации — может быть описан передаточной функцией проявленного негатива

$$\tau_n^*(\vartheta_1, \vartheta_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} \tau_n(x, y) e^{-2\pi j(\vartheta_1 x + \vartheta_2 y)} dx dy,$$

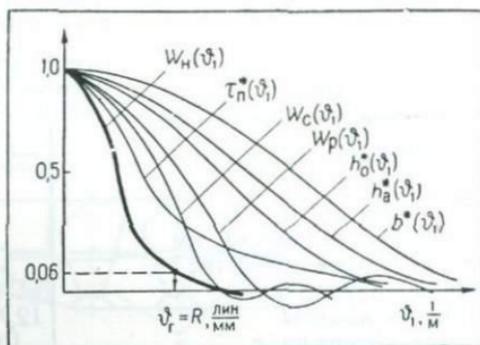
где $\tau_n(x, y)$ — коэффициент пропускания негативного изображения на пленке в функции координат x, y .

Таким образом, зная передаточные функции звеньев рассматриваемой системы, можно проводить анализ звеньев системы и синтезирование фотографической аппаратуры. Для удобства анализа и сравнения ПЧС звеньев их нормируют и наносят на один и тот же график.

Так, нормированные амплитудные пространственно-частотные спектры звеньев имеют вид

$$\begin{aligned} b_n^*(\vartheta_1, \vartheta_2) &= |b^*(j\vartheta_1, j\vartheta_2)|; \\ h_{ан}^*(\vartheta_1, \vartheta_2) &= |h_a^*(j\vartheta_1, j\vartheta_2)|. \end{aligned} \quad (6.30)$$

Рис. 6.4. Кривые пространственно-частотных спектров



Примерный вид нормированных ПЧС рассматриваемой системы в функции ϑ_1 представлен на рис. 6.4 (для удобства анализа целесообразно рассматривать одномерные спектры, если конечно двумерные спектры симметричны). Суммарный ПЧС анализируемой системы представляет собой произведение ПЧС звеньев, т. е.

$$W(\vartheta_1, \vartheta_2) = b^*(\vartheta_1, \vartheta_2) h_a^*(\vartheta_1, \vartheta_2) \times h_0^*(\vartheta_1, \vartheta_2) W_P(\vartheta_1, \vartheta_2) W_C(\vartheta_1, \vartheta_2) \tau_H(\vartheta_1, \vartheta_2). \quad (6.31)$$

Нормированный результирующий амплитудный ПЧС на основе (6.30) и (6.31) имеет вид

$$W_H(\vartheta_1, \vartheta_2) = |W(j\vartheta_1, j\vartheta_2)|.$$

На рис. 6.4 полученный спектр в функции ϑ_1 представлен утолщенной линией. Поскольку информация, полученная на фотопленке, оценивается и анализируется глазом человека, на этот же график наносится контрастная чувствительность глаза в функции ϑ_1 . Если же таковой нет, то проводится прямая, соответствующая средней контрастной чувствительности глаза человека на уровне 0,06 и на пересечении с кривой результирующей ПЧС системы определяют граничную пространственную частоту, численно равную разрешающей способности анализируемой системы.

Поскольку в технических требованиях на проектирование фотографической аппаратуры (табл. 14) в первую очередь задается разрешающая способность, то, решая задачу по определению граничной пространственной частоты, можно изменять ПЧС составляющих звеньев, а

ТАБЛИЦА 14

Основные характеристики
фотоаппарата КА-92 [69, 70]

Наименование характеристики	Значения характеристик	
	короткофокусный канал	длиннофокусный канал
Фокусное расстояние, мм	230	610
Относительное отверстие	—	1 : 4
Формат кадра, мм	115×720	115×1900
Емкость кассеты	12,7 см×1450 м	
Время выдержки, с	1/60—1/1500	1/450—1/11000
Разрешающая способность (в лабораторных условиях на пленке), лин/мм	95	90

затем по ним и сформулировать требования к характеристикам звеньев, составляющих систему.

Здесь мы рассмотрели процесс получения фотоинформации без учета местных эффектов проявления, — химической диффузии, которая оказывает значительное влияние на передачу различных пространственных частот спектра изображения. Известно, что при проявлении фотослоя происходит диффузия истощенного проявителя от участков пленки, получивших большее количество освещения, к слабо экспонированным участкам, а концентрированного проявителя — в противоположном направлении.

Глава 7. УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОЙ ФОТОАППАРАТУРЫ

7.1. Схема размещения фотографической аппаратуры на борту КА и особенности картографирования с использованием лазерного высотомера [72]

Один из вариантов принципиальной схемы размещения фотографической аппаратуры на борту КА [72], предназначенного для исследования природных ресурсов

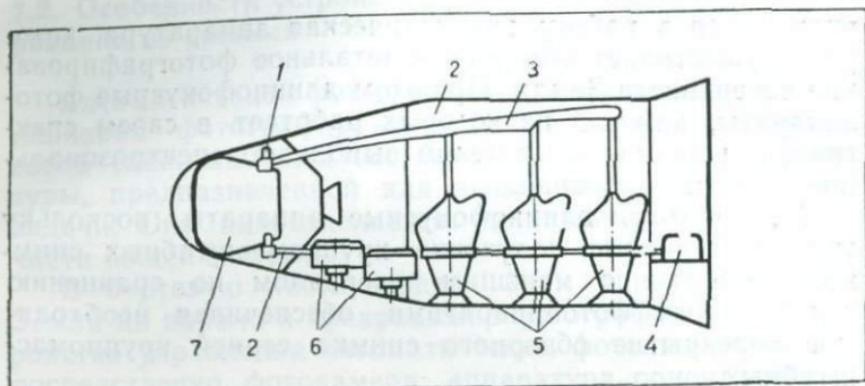


Рис. 7.1. Принципиальная схема размещения автоматической фотографической аппаратуры на борту КА:

1 — устройство для разрезания фотопленки и водонепроницаемого уплотнения контейнера; 2 — цилиндрическая часть КА; 3 — канал для подачи пленки (пленкопровод); 4 — рычажный механизм для регулирования натяжения фотопленки; 5 — спектросональные фотоаппараты; 6 — обзорные фотоаппараты для привязки крупномасштабных снимков; 7 — контейнер, возвращаемый на Землю

Земли, представлен на рис. 7.1. В такого рода КА в цилиндрической части корпуса размещаются автоматические аппараты детального наблюдения, а в конической части — фотоаппараты обзорного наблюдения и контейнер с приемной кассетой.

В состав автоматической фотографической аппаратуры входят: два широкоугольных фотоаппарата, предназначенных для получения обзорных снимков и привязки фотоснимков детального наблюдения; три длиннофокусных автоматических фотоаппарата, позволяющих получать крупномасштабные снимки с относительно высоким разрешением фотографируемых объектов на местности; контейнер с приемной кассетой, обеспечивающей автоматическое сматывание фотопленки со всех фотоаппаратов одновременно и ее хранение, а также пленкопровод для направления пленки при ее сматывании.

Принцип работы комплекта автоматической аппаратуры заключается в следующем. Космический аппарат выводится на необходимую орбиту вокруг Земли (в большинстве случаев это орбиты с перигеем 156—184 км [55]). По программе от бортового вычислительного устройства в зависимости от условий выполняемой задачи

включается в работу автоматическая аппаратура, которая осуществляет обзорное и детальное фотографирование поверхности Земли. При этом длиннофокусные фотоаппараты, каждый из которых работает в своем спектральном диапазоне, в целом выполняют спектрально-зональное фотографирование.

Кроме того, длиннофокусные аппараты, поскольку они обеспечивают получение крупномасштабных снимков, работают с меньшим интервалом по сравнению с обзорными фотоаппаратами, обеспечивая необходимое перекрытие обзорного снимка серией крупномасштабных.

Зарядка фотоаппаратов пленкой осуществляется перед запуском КА на орбиту. По мере фотографирования отснятая фотопленка поступает в пленкопровод, а затем в контейнер на катушку приемной кассеты. При заполнении кассеты пленкой в работу включается устройство для обрезания пленки и устройство водоуплотнения контейнера.

В ряде случаев при фотографировании поверхности Земли и других планет в целях картографирования наряду с фотографическими системами используются дополнительные устройства и системы (например, лазерные высотомеры [73], звездные фотокамеры, датчики ориентации и т. д.).

При картографировании поверхностей Земли, Луны и других планет необходимо знать дальность от КА до поверхности картографирования. Для этой цели использовался лазерный высотомер. Так, для картографирования лунной поверхности использовалась картографическая система, в которую входят звездная и точная картографическая фотокамеры и лазерный высотомер, обеспечивающий измерение дальности от КА до поверхности Луны по направлению оптической оси картографической фотокамеры [73].

Дальность до поверхности в этой системе измеряется в момент фотографирования. Значение дальности и полученные фотоснимки поверхности могут служить для определения широты, долготы и высоты орбиты КА, а по ним в свою очередь можно определить координаты точек картографируемой поверхности.

7.2. Особенности устройства аппаратуры для фотографирования из космоса

Автоматическая фотографическая аппаратура для выполнения фотографирования из космоса представляет собой сложный комплекс бортовой и наземной аппаратуры, предназначенной для выполнения той или иной задачи. Она подразделяется на наземную и бортовую части общей системы.

В бортовую часть входят: блок приема команд с Земли на начало и прекращение фотографирования; устройство управления автоматическим фотоаппаратом, непосредственно фотокамера; аппаратура ориентации КА относительно направления на Землю или другую планету; устройства обработки фотопленки, передачи фотоинформации на Землю и спасения фотоинформации.

В наземную часть комплекса аппаратуры входят аппаратура передачи и приема управляющих команд, обработки фотопленки и дешифрирования.

Один из возможных вариантов гипотетической структурной схемы автоматического фотоаппарата, предназначенного для фотографирования Земной поверхности, представлен на рис. 3.3.

Фотографирование, исходя из необходимости и решаемых задач, может осуществляться как одиночными снимками, так и автоматически по заданному циклу с определенной частотой.

К аппаратуре, предназначенной для фотографирования из космоса, предъявляются по ряду параметров довольно жесткие требования, которые влекут за собой некоторые особенности в ее устройстве. Так, при обзорном фотографировании больших поверхностей Земли, если фотосъемка ведется в целях картографирования, объективы фотокамер должны иметь малые искажения по полю кадра. Если же съемка ведется с целью изучения природных ресурсов и получения фотоснимков с отдельных участков, то в этом случае объективы камер должны иметь большие фокусные расстояния. Исходя из частоты производства снимков затворы могут быть шторными или центральными. На схеме (см. рис. 3.3) показаны оба случая. Центральные затворы, как правило, размещаются между линзами и применяются в малоформатных камерах, когда световые отверстия оптических

систем малы, в противном случае требуются большие усилия на взвод и спуск. Шторные затворы хотя и допускают искажения, но требуют малых усилий при взведении и спуске и являются предпочтительными в длиннофокусных фотоаппаратах.

Кроме того, поскольку фотографирование ведется с больших высот и при больших скоростях носителя, необходимо предусматривать компенсацию сдвига изображения на фоточувствительном материале, чтобы не смазывалось изображение на пленке. В фотоаппаратах используются либо оптические компенсаторы, как показано на схеме, в виде вращающихся друг другу навстречу двух оптических клиньев; либо прокачивание фотоаппарата в момент фотографирования со скоростью, равной скорости перемещения изображения и протягивания пленки. В последнем случае необходимо предусматривать подъем прижимного стола, а это в свою очередь, если размеры пленки велики, может привести к деформации фотопленки, что отрицательно влияет на качество изображения.

При использовании для фотографирования из космоса длиннофокусных фотоаппаратов предъявляются повышенные требования к сохранению постоянной температуры, так как изменение ее влечет за собой линейные деформации корпуса фотоаппарата, вызывая расфокусировку объектива. Для устранения этого недостатка либо на КА должен быть установлен терморегулятор, либо, если фотоаппарат размещается снаружи КА, как это было на КА «Аполлон» при полете его к Луне, должна быть предусмотрена автоматическая фокусировка объектива.

Рассмотренная схема далеко не совершенна и дает лишь общее представление об автоматическом фотоаппарате, предназначенном для фотографирования Земли из космоса. Аппаратура рассмотренного типа предусматривает возвращение контейнера с пленкой на Землю с последующей ее обработкой. Иногда это делать нецелесообразно, тогда отснятая фотопленка обрабатывается на борту КА (проявка, фиксирование, сушка), затем с помощью фототелевизионной аппаратуры осуществляется покадровое сканирование (просмотр) фотопленки и передача фотоинформации по телевизионному каналу на Землю, где эта информация воспроизводится на устрой-

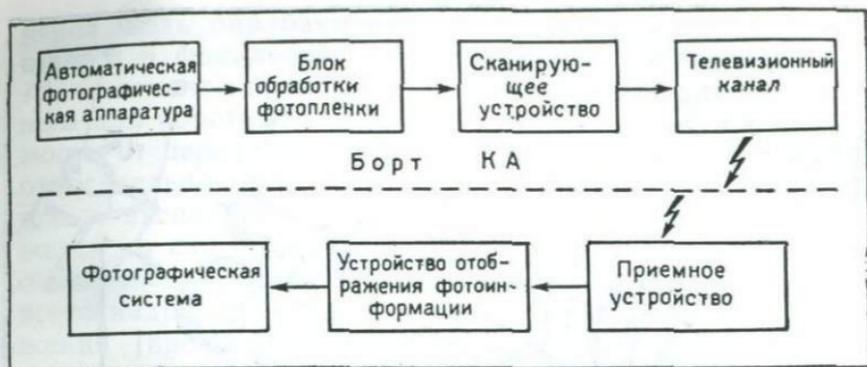


Рис. 7.2. Структурная схема фототелевизионной аппаратуры

стве отображения экранного типа и фотографируется. Один из возможных вариантов структурной схемы фототелевизионной аппаратуры представлен на рис. 7.2.

В последнее время при разработке фотографической аппаратуры проводятся серьезные исследования по оптимизации технических характеристик [54]. Основные направления и тенденции исследований: миниатюризация и переход к малоформатным камерам, автоматизация фотооборудования; универсальность применения и переход на электронные камеры.

Миниатюризация фотографической аппаратуры идет по пути уменьшения величины фокусного расстояния фотокамер при одновременном увеличении их разрешающей способности; сокращения размеров аппаратуры при одновременном увеличении числа различных вспомогательных устройств, размещаемых как внутри камеры, так и за ее пределами (например, датчик отношения V/H); общего повышения тактических и технических возможностей фотооборудования.

Одним из аппаратов, удовлетворяющим в какой-то степени этим требованиям, является аэрофотоаппарат КА-92, который в принципе может быть использован для установки его на борту КА [69, 70]. Оригинальность конструкции этого фотоаппарата состоит в том, что в нем используются два объектива с фокусными расстояниями 230 и 610 мм. По способу проектирования изображения он является панорамным с большим охватом местности. Фотографирование осуществляется одновременно двумя

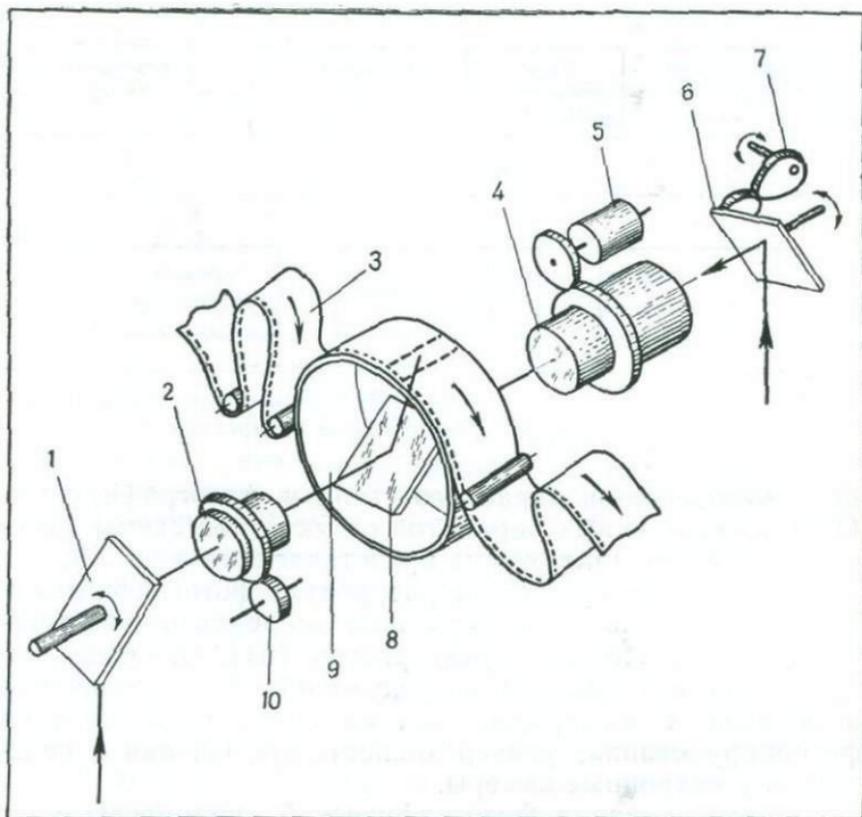


Рис. 7.3. Оптическая схема фотоаппарата КА-92

объективами на одну 127-мм фотопленку на тонкой основе. Пленка может использоваться как черно-белая, так и цветная различной светочувствительности.

Оптическая схема фотоаппарата КА-92 показана на рис. 7.3, а основные характеристики в табл. 14. Перед объективами 2 и 4 установлены сканирующие зеркала 1 и 6. Панорамная съемка осуществляется путем сканирования местности зеркалами, которые могут поворачиваться на угол $\pm 90^\circ$ от направления МВ. Световые потоки от фотографируемой местности направляются сканирующими зеркалами в объективы 2 и 4, а затем на двухстороннее зеркало 8, размещенное в центре фильмового барабана 9, и, отклонившись на 90° , направляются

через щель барабана на фотопленку 3, которая размещается в фокальной плоскости обоих объективов; 5, 7, 10 — элементы привода. Фотографирование длиннофокусным или короткофокусным объективом ведется в зависимости от переключения двухстороннего зеркала 8 на 90° относительно одного из первоначальных положений. Во время экспонирования пленка относительно щели движется со скоростью, равной скорости изображения, чем обеспечиваются необходимая выдержка и фиксирование всего кадра по ширине относительно направления движения (продольная ось фотоаппарата совпадает с направлением движения КА).

Синхронизация движения пленки и изображения осуществляется специальной следящей системой, установленной на приводе механизма сканирования, по сигналам которой устанавливается скорость движения пленки относительно экспозиционной щели.

Компенсация сдвига изображения в продольном направлении для короткофокусного объектива 2 осуществляется путем перемещения всего объектива в направлении перпендикулярном к оптической оси. Для длиннофокусного объектива компенсация достигается путем поворота сканирующего зеркала.

В оптической части длиннофокусного канала фотоаппарата имеется система автоматической фокусировки гиперфокального расстояния и компенсации дефокусировки, вызываемой изменениями температуры окружающей среды.

Для регулирования прохождения светового потока на фотопленку в фотоаппарате предусмотрены система автоматического диафрагмирования объектива и система изменения входного отверстия экспозиционной щели. При этом взаимодействие между входным отверстием объектива и шириной экспозиционной щели таково, что при любом уровне освещенности местности обеспечивается нормальное экспонирование пленки.

В промежутках между кадрами впечатывается необходимая при дешифрировании фотоснимков вспомогательная информация: текущее время, координаты местоположения, скорость, высота и т. д.

7.3. Спектрозональное фотографирование и применяемая аппаратура

С появлением космической техники при решении хозяйственных и технических задач чаще стали применяться спектрозональные способы наблюдения земной поверхности и ее образований, травяных и лесных покровов, сельскохозяйственных посевов и т. д.

Известно, что каждое из земных образований имеет неодинаковые коэффициенты яркости в различных диапазонах спектра. Поэтому, применяя спектрозональные способы наблюдения и фотографируя в определенных спектральных диапазонах, получают возможность наиболее полно выявить качественные особенности многих природных и искусственных объектов (например, болезни сельскохозяйственных культур, испарения нефтеносных слоев Земли, загрязнения водоемов и т. д.).

Таким образом, спектрозональное фотографирование предусматривает выполнение фотографической съемки в различных спектральных диапазонах. Исходя из используемых технических средств, фотографирование может выполняться: одной камерой на несколько пленок различного типа, чувствительных каждая в своем спектральном диапазоне (панхром, изопанхром, инфрахром и т. д.); несколькими камерами, настроенными каждая на свой спектральный диапазон; с использованием спектральной и радиометрической аппаратуры; с использованием фототелевизионной аппаратуры; на цветную пленку.

Чтобы спектрозональное фотографирование было более эффективным, необходимо знать спектральные коэффициенты яркости всех интересующих элементов местности и искусственных объектов.

Основные спектральные характеристики наиболее часто фотографируемых объектов и образований Земной поверхности представлены в прил. 1.

Примером использования спектральной аппаратуры для одновременного получения фотоснимков и спектрограмм фотографируемых участков может служить спектрограф РЩ-1 [35], оптическая схема которого показана на рис. 7.4.

В оптическую систему спектрографа входят две параллельные оптические системы, сфокусированные на один кадр киносъёмочной камеры. Одна из систем пред-

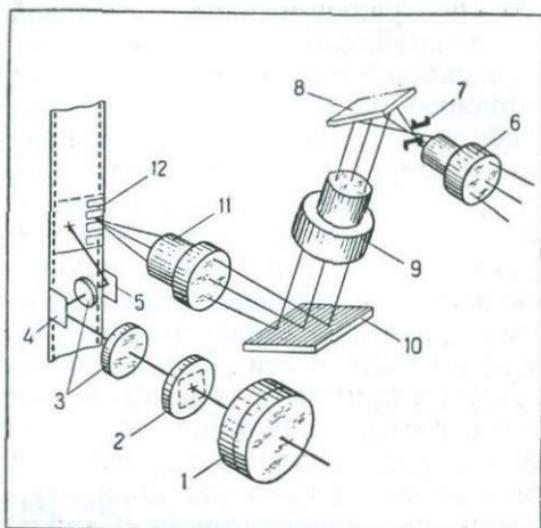


Рис. 7.4. Оптическая схема спектрографа РЩ-1

ставляет спектральную часть прибора, а вторая фотографическую или ландшафтную.

Спектральная система прибора в свой состав включает три объектива типа «Юпитер-9» с фокусным расстоянием 85 мм с относительным отверстием 1:2, выполняющих роль конденсатора 6, коллиматора 9 и объектива камеры 11, спектральную щель 7 длиной 6 мм и шириной от 0,04 до 3 мм, дифракционную решетку 10 типа эшелет с 600 штрихами на 1 мм.

Ландшафтная система включает фотографический объектив 1, опорную сетку 2, проекционную систему 3 и отражающие зеркала 4 и 5.

Фотографирование и запись спектра интересующей поверхности в пределах поля зрения осуществляются на один и тот же кадр фотопленки. Изображение ландшафта занимает левую часть кадра (см. рис. 7.4), а спектр занимает правую часть кадра.

Принцип работы спектрографа заключается в следующем. Световой поток, отраженный от земной поверхности, одновременно поступает в ландшафтную и спектрографическую части спектрографа. С помощью объектива 1 строится изображение фотографируемой местности на пленке. С помощью проекционной системы 3 в центр кадра проектируется перекресток сетки 2, указывающий место соответствия центра спектрофотометрируемого участка.

В спектральном канале световой поток конденсатором 6 направляется на спектральную щель, на отклоняющее зеркало 8 и затем с помощью коллиматора 9 на дифракционную решетку 10, которая, разлагая поступающий на нее световой поток в спектр, при угле падения $31^{\circ}36'$ концентрирует в первом порядке спектра основную массу световой энергии. Затем световой поток с помощью объектива фотокамеры проектируется на пленку 12.

Таким образом получают одновременно и фотографический снимок интересующего ландшафта, и его спектрофотометрическую характеристику, которая позволяет более эффективно вести дешифрирование снимка.

Другим примером спектрозонального фотографирования и использования фотографической и фототелевизионной аппаратуры для исследования природных ресурсов Земли является комплекс аппаратуры, устанавливаемой на долговременной станции «Скайлэб» [52] и включающий: шесть кадровых телевизионных камер, работающих каждая в своем спектральном диапазоне; многодиапазонную сканирующую телевизионную камеру, осуществляющую фотографирование в тринадцати спектральных диапазонах; двухканальный инфракрасный спектрометр; микроволновый зонд, работающий на частоте 13900 ± 100 МГц, и радиометр сантиметрового диапазона. Основные характеристики некоторых приборов этого комплекса представлены в табл. 15.

Комплект из шести кадровых телевизионных камер предназначен для фотографирования лесных массивов, сельскохозяйственных посевов, снежных покровов, геологических образований и других элементов земной поверхности в различных спектральных диапазонах, а также для изучения распределения поверхностных температур водных бассейнов, обнаружение запасов подземных вод и т. д.

Все камеры комплекта однотипны, имеют фокусное расстояние 15,2 см, поле зрения $21,2^{\circ}$. Для выделения необходимых спектральных диапазонов используются 18 узкополосных фильтров. Съемка ведется на 70-миллиметровую пленку. Запас пленки в одной кассете обеспечивает получение 400 изображений.

Многодиапазонная сканирующая телевизионная камера предназначается для определения возможности ис-

ТАБЛИЦА 15
Характеристики комплекта приборов
EREP*

Прибор	Рабочий диапазон	Разрешение на Земле	Спектральное разрешение	Покрытие земной поверхности
Комплект кадровых телевизионных камер	0,5—0,6 мкм (пленка Рап X) 0,6—0,7 мкм (пленка Рап X) 0,7—0,8 мкм (ИК-пленка) 0,5—0,88 мкм (ИК-цветная) 0,4—0,7 мкм (цветная с высоким разрешением)	30 м	0,1 мкм	163×163 км
Многодиапазонная сканирующая телевизионная камера	0,410—0,460 мкм 0,460—0,510 мкм 0,520—0,556 мкм 0,565—0,609 мкм 0,620—0,670 мкм 0,680—0,762 мкм 0,783—0,880 мкм 0,980—1,080 мкм 1,090—1,190 мкм 1,200—1,300 мкм 1,550—1,750 мкм 1,550—1,750 мкм 2,100—2,320 мкм 10,200—12,500 мкм	Пятно 80×80 м	0,4—0,1 мкм	Полоса шириной 78 км ($\pm 10^\circ$ от надира)
Инфракрасный спектрометр	0,4—2,4 мкм 6,2—12,5 мкм	Пятно 0,44 км	1—4% длины волны	0—10° назад от надира

* Earth Resources Experiment Package — комплект для экспериментов по исследованию ресурсов Земли.

пользования количественных данных об излучении в 13 диапазонах видимой и инфракрасной областях спектра. Ее основными задачами являются: выявление сельскохозяйственных посевов, пораженных болезнями, вредителями и засухой; картирование растительности; состояние лесных массивов; сбор информации для анализа земле-

пользования; выявление загрязненных участков в больших водоемах, получение информации о температурном распределении земной поверхности для получения температурных карт и т. д.

Приемное устройство камеры включает объектив с фокусным расстоянием в 300 мм и полем зрения $0,01^\circ$ ($0,186$ мрад), сканирующее зеркало, вращающееся со скоростью 6000 об/мин, и 13 ртутно-теллуридных детекторов, охлаждаемых до 90° К.

Сканирующее устройство и объектив размещаются вне КА. При сканировании излучение от подстилающей поверхности системой оптических элементов направляется на фотоэлектрические приемники через входное окно в корпусе КА.

Инфракрасный спектрометр в основном выполняет функции измерителя излучений, а также определителя прозрачности атмосферы в двух спектральных диапазонах. Работает прибор одновременно с оптическим визиром. Обнаружив необходимые наземные объекты, космонавт с помощью визира наводит на них спектрометр и определяет их излучение. Угол поля зрения спектрометра составляет около $0,057^\circ$ (1 мрад). Принцип измерения полуавтоматический, хотя информация может записываться и фотографироваться на пленку.

7.4. Фотографирование из космоса на цветную фотопленку

Фотографирование на цветную фотопленку в какой-то степени можно было бы и отнести к спектральному, однако многие специалисты склонны рассматривать его как обособленный вид фотографирования. Использование цветной фотопленки для космического фотографирования, как и для воздушного [11], является перспективным и успешно может применяться при фотографировании для обеспечения геологических, лесотаксационных и топографических съемок.

Особенно приемлемо цветное фотографирование при исследовании природных ресурсов Земли, наблюдений за лесными массивами, травяным покровом и сельскохозяйственными посевами в летнее время, при прогнозировании погоды и т. д. Помимо указанных областей цветное фотографирование может применяться и в ряде других

областей, например в транспортном и гидротехническом строительстве.

Цветная фотосъемка может выполняться на цветных пленках [11]: обратимой и негативной для натурального цветовоспроизведения местности; специальной для условной цветопередачи на фотоснимках наземных объектов с заданным преобразованием их цветовых контрастов.

В последние годы значительно расширился ассортимент цветных пленок и круг областей их применения. К настоящему времени цветная фотосъемка применяется в геологии, гидрографии, лесном и сельском хозяйствах, инженерном деле, строительстве и т. д.

Применение цветной фотосъемки в геологии позволяет выявлять тектонические линии, не распознающиеся на черно-белых фотоснимках. Кроме того, выявлять породы по их прямому цветовоспроизведению для районов, где они обнажены, а также по изменениям в окраске растительности. Установлено [11], что для большинства геологических объектов наилучшей распознаваемостью обладают фотоснимки, сделанные на обратимой фотопленке и отпечатанные в натуральных цветах.

Цветное фотографирование в гидрографии позволяет фиксировать различия в цветовых оттенках воды, помогая в изучении морских течений. Особое значение для гидрографического изучения моря имеет то обстоятельство, что по цветным фотоснимкам удается не только вследствие потемнения голубого цвета установить изменение глубины, но и в некоторых пределах определить глубину дна.

Одно из важных мест занимает цветное фотографирование в лесном хозяйстве. Лесные службы применяют цветные фотоснимки для целей таксационного картирования древостоев, обследования лесных массивов, гибель которых от вредителей может принимать угрожающий характер. Последовательность и темп изменений в окраске крон зараженных деревьев позволяет делать выводы о нападении насекомых-вредителей. Повторная съемка цветовых преобразований хвои или листьев больных деревьев позволяет определить состояние леса на данный момент и направление, в каком будет развиваться его заболевание.

Особо важное значение имеет цветное фотографирование в сельском хозяйстве. Оно позволяет вести изуче-

ние почв, состояние посевов, оценивать кормовые ресурсы пастбищных угодий. Если поверхность не покрыта растительностью, с помощью цветных фотоснимков быстрее и точнее осуществляется нанесение контуров почв.

Известно, что при задернованных пространствах, на которых почвенное дешифрирование осуществляется косвенным путем по характеру растительности (т. е. по смене ассоциаций), микрорельефа и дренажа, использование цветного фотографирования в этом случае дает значительные преимущества по сравнению с черно-белыми фотоснимками.

Для исследования почвенных условий и дренажа сельскохозяйственных земель, обнаружения сорняков в период всходов посевов, заболевания посевов наибольший эффект дают цветные фотоснимки, выполненные на специальных цветных фотопленках. Для определения состава культур и их урожайности, контроля заболеваемости посевов находят применение цветные пленки, обеспечивающие получение изображения с натуральной передачей цветов. Использование таких пленок позволяет определить болезни злаковых. Так, например, зараженный овес на цветных снимках выделяется розовыми пятнами весной и желто-красными осенью.

Цветное фотографирование может использоваться и в инженерных работах при строительстве дорог, ирригационных и гидросооружений. Так, воздушная цветная фотосъемка проводилась в долине Нила выше Асуанской плотины. Фотосъемка велась с целью обнаружения памятников культуры и определения возможности спасения их или запечатления тех, которые должны быть затоплены при создании водохранилища [60].

При современном развитии фотографической аппаратуры, техники съемки, наличии фотоматериалов для цветного фотографирования, а также техники фотопечати и дешифрирования цветных фотоснимков цветное фотографирование является одним из составных компонент при постановке топографического картирования местности.

Цветное фотографирование для топографических целей в настоящее время находит широкое применение. Так, в США с привлечением цветной фотосъемки были проведены топографические работы по дешифрированию заболоченной дельты реки Миссисипи. Полученные фо-

тоснимки позволили провести дешифрирование участков местности с наиболее сложной ситуацией.

При фотографировании заснеженных районов, песчаных пустынь обычные черно-белые снимки дают очень мало информации. Цветное фотографирование в этом случае просто незаменимо. Поскольку яркость фона и объектов высокая, а контраст относительно окружающего фона (снега, песка) недостаточен, то фотографирование с КА в этом случае предпочтительнее. Из-за больших высот, с которых ведется съемка, яркость объектов и местности ослабевает, причем фона сильнее. Цветные снимки позволяют, таким образом, увеличить как цветные, так и яркостные контрасты между деталями.

В настоящее время цветное фотографирование все больше завоевывает себе дорогу как наиболее перспективное и информативное по сравнению с черно-белым. Технические средства, используемые при цветном фотографировании, остаются теми же, что и при черно-белой фотосъемке, в то время как химическая обработка, а также дешифрирование цветных фотоснимков несколько отличаются.

Если фотосъемка велась на обратимую цветную фотопленку, то обработка в этом случае по трудозатратам немногим отличается от черно-белой. В том случае, если фотографирование велось на цветную негативную пленку, обработка фотопленки и получение фотографических отпечатков — процессы трудоемкие и достаточно сложные. Однако несмотря на эти недостатки, эффект, достигаемый при дешифрировании цветных фотоснимков, оправдывает все затруднения, возникающие при цветном фотографировании.

7.5. Фотоаппаратура для съемки Луны и планет

1. Аппаратура для фотографирования Луны. 4-го октября 1959 г. стартовала советская автоматическая межпланетная станция «Луна-3», главной задачей которой было фотографирование обратной стороны Луны. В 1961—1962 гг. начались запуски аппаратов «Венера» и «Марс». На межпланетные трассы вышли космические аппараты типа «Зонд», третий из которых, пролетев вблизи Луны, передал на землю высококачественные изображения обратной стороны Луны, включая области,

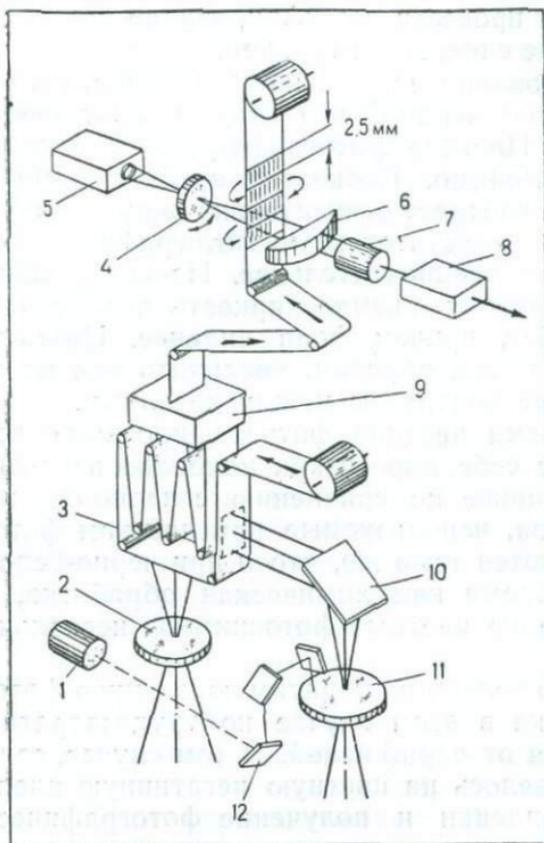


Рис. 7.5. Функциональная схема фотоустановки для фотографирования Луны

недоснятые «Луной-3». Ряд космических аппаратов в сторону Луны и планет был запущен Соединенными Штатами Америки.

Одной из важных задач, которая решалась при этих полетах, была задача изучения поверхности Луны и поиск участков возможного прилунения. Для решения этой задачи на борту КА устанавливались автоматическая фотографическая и фототелевизионная аппаратура, которая позволила получить ряд фотоснимков лунной поверхности. Эта аппаратура представляет собой сложный комплекс автоматических устройств. Для примера рассмотрим фотоустановку космического аппарата «Лунар орбитер» [71].

В состав этой установки входит две фотокамеры (рис. 7.5), осуществляющих фотографирование на одну

и ту же пленку, устройство обработки фотопленки и сканирующее устройство.

При фотографировании с номинальной высоты в 46 км двумя камерами — первой и второй — обеспечивается разрешение по поверхности 8 и 1 м соответственно. Снимки, получаемые с помощью первой камеры, используются для привязки крупномасштабных снимков, полученных с помощью второй камеры с ориентиром на Луне. В свою очередь вторая камера позволяет получить снимки, по которым определялась пригодность тех или иных участков Луны для прилунения КА. При фотографировании с указанной высоты первая камера захватывает участок поверхности размером $31,6 \times 37,4$ км, а вторая камера — участок размером $31,6 \times 37,4$ км, находящийся в центре участка, снятого первой камерой. Фотографирование обеими камерами ведется одновременно.

Характеристики объективов обеих камер:

- фокусное расстояние 80 и 610 мм;
- светосила для обеих камер 5,6;
- диапазон выдержки 1/25, 1/50 и 1/100 с.

Фотографирование ведется на 70-миллиметровую перфорированную фотопленку высокой чувствительности. Запас пленки, равный 80 м, позволяет получить около 212 снимков.

Принцип работы фотоустановки заключается в следующем. Объектив 2 первой фотокамеры строит изображение на пленке 3 непосредственно; в то же время объектив 11 второй камеры строит изображение на фотопленке через посредство зеркала 10. Вместе с этим через объектив 11 и систему зеркал 12 поступает световой поток на датчик 1 отношения V/H , который в свою очередь вырабатывает электрические сигналы для осуществления компенсации сдвига изображения. Компенсация достигается путем перемещения пленки в момент фотографирования. Экспонированная пленка поступает в устройство обработки 9, где прижимается к слою желатины, пропитанной проявочно-фиксирующим составом, и тем самым проявляется и фиксируется. Затем пленка сушится и подается в считывающее устройство, состоящее из устройства строчной развертки 5, сканирующей линзы 4, фокусирующей линзы 6, фотоумножителя 7 и усилителя 8. Считывание изображения осуществляется путем просвечивания пленки световым лучом диаметром в 5 мкм.

За 20 с луч проходит на пленке полосу в 2,5 мм, после чего пленка смещается на 2,5 мм и т. д. Для просмотра двух снимков, полученных с помощью обеих камер, требуется 40 мин.

Световой поток, прошедший сквозь пленку и промодулированный пропорционально плотности почернения пленки, фокусируется линзой 6 на фотокатод фотоумножителя 7. Электрические сигналы, возникшие на выходе фотоумножителя, поступают в усилитель 8, а затем подаются для дальнейшей обработки в передающее бортовое устройство и передаются на Землю, где воспроизводятся на экране кинескопа в видимое изображение. Полученное изображение затем снова фотографируется на фотопленку. Таким образом были получены фотоснимки видимой и оборотной сторон поверхности Луны, а также интересующих участков ее поверхности.

2. Аппаратура для фотографирования планет. Для фотографирования ближайших (кроме Луны) к Земле планет Венеры и Марса используется аппаратура, по принципу построения идентичная аппаратуре, используемой для фотографирования Луны, т. е. фототелевизионная. Так, по программе «Викинг», преследующей целью полет к Марсу и его исследование [61], на борту КА предполагалось иметь научную аппаратуру, размещаемую на орбитальном и посадочном блоках.

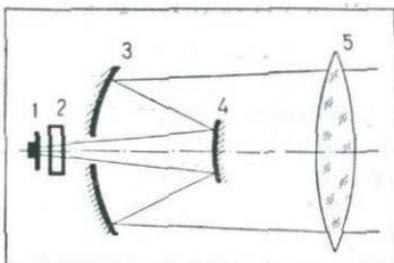
Научные приборы орбитального блока предназначены для выбора мест посадки КА и проведения научных экспериментов. В состав комплекта аппаратуры входят две телевизионные камеры, инфракрасный спектрометр и инфракрасный радиометр. Эта группа приборов позволяет определить пригодность того или иного участка поверхности Марса для исследования. Оптические оси всех приборов направлены параллельно и просматривают одни и те же участки.

Разведка поверхности с помощью этих приборов будет проводиться как с больших, так и с малых высот. После посадки посадочного блока приборы орбитального блока предназначаются для детального изучения места посадки и его окрестностей.

Телевизионные камеры орбитального блока (их две) производят съемку поочередно. Изображение записывается на борту и передается на Землю, где воспроизводятся на экране кинескопа и затем фотографируются.

Рис. 7.6. Оптическая схема телевизионной камеры:

1 — фотокатод чувствительного элемента; 2 — затвор; 3 — первичное зеркало; 4 — вторичное зеркало; 5 — корректирующая линза



Оптическая схема одной из телевизионных камер представлены на рис. 7.6. В качестве объектива используется сложная система Шмидта — Кассегрена с апертурой 200 мм, фокусным расстоянием 500 мм и светосилой $f/2,35$. Телевизионная камера обеспечивает получение кадра $9,6 \times 12,5$ мм при поле зрения $1,1 \times 1,4^\circ$. Разрешающая способность телевизионной камеры (по двум элементам) при съемке с высоты 1800 км составляет 100 м.

Инфракрасный спектрометр предназначен для регистрации водяных паров на длине волны около 1,4 мкм. Инфракрасный радиометр работает в спектральных диапазонах 6—8; 8—9,5; 9—13; 18—24 и 25—35 мкм и выдает информацию для составления тепловых карт местности. Спектральные диапазоны выбраны таким образом, чтобы обеспечить хорошее разрешение во всем диапазоне температур, характерном для Марса. Основное назначение радиометра состоит в том, чтобы измерять отраженную солнечную радиацию и тепловое излучение участка поверхности планеты, который одновременно снимается телевизионными камерами орбитального блока.

Научные приборы, устанавливаемые на посадочном блоке, предназначены для исследований на участке спуска в атмосфере Марса, а после посадки на поверхности планеты.

После посадки проводятся фототелевизионная съемка, метеорологические исследования, изучение физических свойств грунта, определение химического состава грунта и атмосферы, молекулярный анализ грунта и биологические исследования с целью поиска форм жизни и целый ряд других экспериментов.

Для выполнения фототелевизионной съемки на посадочном блоке предусмотрены две панорамные фототелевизионные установки, предназначенные для картографирования, поиска живых или окаменевших форм жизни, геологических, метеорологических и астрономических исследований [57].

При проведении картографических работ предусматривается определение точных координат посадочного блока на поверхности Марса путем наблюдения наиболее ярких планет и звезд, а также спутников Марса, картирование участка посадки, сопоставление элементов рельефа, полученных с помощью аппаратуры орбитального и посадочного блоков.

Проведение биологических экспериментов преследует цель поиска живых или окаменевших форм жизни, следов на грунте, которые могли бы принадлежать живым существам, и т. д.

В геологическом отношении получение фотоснимков преследует цель определения морфологии, структуры и цвета пород — поиск признаков выветривания или переноса осадочных пород; определения их минералогического состава, выявления таких признаков, как слоистость, складки, сбросы и т. д.

Задачей метеорологического и астрономического экспериментов является фотографирование пылевых бурь и переноса частиц ветром, наблюдение облаков, оценка распределения аэрозолей, определение яркости космических объектов и отдельных участков неба, фотографирование спутников Марса и уточнение положения планеты в пространстве.

Каждая из фототелевизионных установок (рис. 7.7) состоит из оптической системы 3, 2, блока кремниевых фотодиодов 1 с усилителями, устройства 4, обеспечивающего сканирование по азимуту и по углу места 6, обтюлятора 7 системы терморегулирования 8 и электронного блока, размещаемого внутри КА. 5 — датчик угла перемещения по углу возвышения.

Сканирование просматриваемой территории (пространства) может осуществляться с двумя скоростями, соответствующими двум режимам передачи информации на Землю. Камеры могут работать в двух режимах: непосредственной передачи изображений и записи с дальнейшей передачей в период сеансов связи.

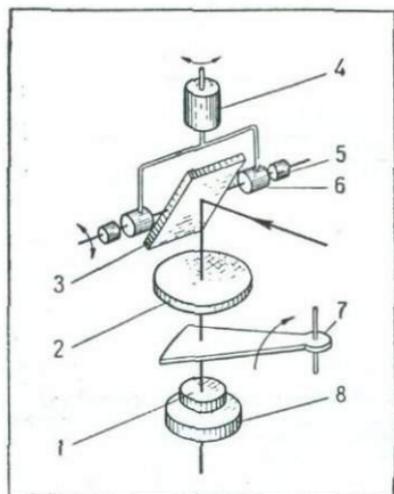


Рис. 7.7. Камера фототелевизионной установки посадочного блока

Оптическая система камеры состоит из сканирующего зеркала и объектива, фокусное расстояние которого 7,6 см и светосила $f/8$. Блок фотодиодов включает 12 кремниевых чувствительных элементов, один из которых предназначен для обзорной съемки, четыре для съемки с высоким разрешением и три для получения цветных снимков (каждый элемент чувствителен к одному из цветов: синему, зеленому и красному). Назначение остальных фотодиодов неизвестно.

Каждый фотодиод, используемый для съемки с высоким разрешением, имеет свою диафрагму, которая и определяет его поле зрения. Диафрагмы расположены на различном расстоянии от соответствующих диодов, так что наилучшая разность создается в случае, если объекты съемки находятся на удалении 1,9; 2,7; 4,5 и 13,3 м. Необходимый фотодиод выбирается по команде с Земли. Сканирование по азимуту может осуществляться на 360° , а по углу возвышения от шасси посадочного блока до $+40^\circ$ над горизонтом.

7.6. Фототелевизионная аппаратура

При использовании КА для выполнения картографирования, исследования природных ресурсов, выполнения научных экспериментов и т. д. в состав бортовой аппаратуры наряду с фотографической, инфракрасной

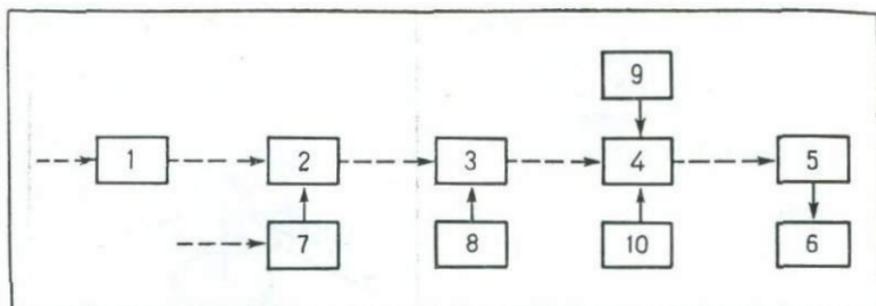


Рис. 7.8. Структурная схема широкоугольной телевизионной камеры:

1 — объектив; 2 — блок светофильтров; 3 — затвор; 4 — телевизионная трубка типа «видикон» с отклоняющей системой; 5 — блок преобразования аналоговых видеосигналов в цифровые; 6 — записывающее устройство; 7 — блок автоматической установки светофильтров; 8 — блок управления затвором; 9 — блок выработки развертывающих напряжений; 10 — блок управления «видиконом»

включается телевизионная и фототелевизионная аппаратура [50, 56, 71]. В состав телевизионной аппаратуры входят широко- и узкоугольные камеры, смонтированные на сканирующей платформе, и вспомогательное оборудование, размещенное вне платформы.

Структурная схема широкоугольной камеры представлена на рис. 7.8. Оптическая система этой камеры включает шестилинзовый объектив и блок из восьми сменных светофильтров. С помощью этой системы излучение от просматриваемых районов поверхности Земли или других планет фокусируется на фотокатоде электронно-лучевой трубки «видикон». Под воздействием отклоняющих устройств электронный луч просматривает и считывает изображение на фотокатоде. Полученные электрические сигналы усиливаются и преобразуются из аналоговых в цифровые, а затем фиксируются в записывающем устройстве, с которого или в часы сеансов связи или в реальном масштабе времени передаются на Землю.

Включение камеры, установка светофильтров и выдержек осуществляются по командам с Земли или по программе от бортового вычислительного или программного устройства. Выбор нужной выдержки осуществляется исходя из освещенности, создаваемой Солнцем на просматриваемой территории. Выдержки выбираются исходя из трех диапазонов освещенности в интервале

118—23 800 лм/м². Управление считывающим электронным лучом (фокусировка электронного луча, вертикальное и горизонтальное отклонение) осуществляется с помощью магнитного поля. Информация записывается на магнитную ленту с 32 телевизионных кадров. Воспроизведение и передача телевизионной информации осуществляется по командам с Земли.

Узкоугольная камера в основном идентична широкоугольной. Отличие ее состоит лишь в том, что в качестве оптической системы используется телеобъектив Шмидта — Кассегрена диаметром 200 мм и один светофильтр.

Передаваемая на Землю видеoinформация обрабатывается в наземной части телевизионной аппаратуры, представляющей собой целую систему обработки информации, создание которой обуславливается следующими факторами:

— необходимостью своевременного получения обработанных данных для внесения изменений в программу полета;

— необходимостью получения информации для калибровки и коррекции геометрических и фотометрических искажений в получаемых снимках, вносимых видиконами;

— необходимостью обработки большого числа фотоснимков.

Обработка и анализ получаемой с борта информации ведутся в четыре этапа: 1) обработка данных в реальном масштабе времени; 2) обработка фотопленки; 3) декалибровка (устранение геометрических и фотометрических искажений) и анализ данных; 4) хранение и распределение данных.

Для обработки используются различные типы оборудования, объединенные в несколько систем [58]: система ЦВМ МТС (Mission and Test Video Komputer) усиления изображения и отображения каждого телевизионного кадра, полученного с борта КА; система MTVS (Mission and Test Video System) записи на фотопленку, обработки и отображения информации и др.

С помощью системы МТС проводится также запись в цифровой форме на магнитную ленту наиболее качественных необработанных телевизионных изображений. Одновременно с этим записываются данные о параметрах орбиты и ориентации КА в момент фотографирования.

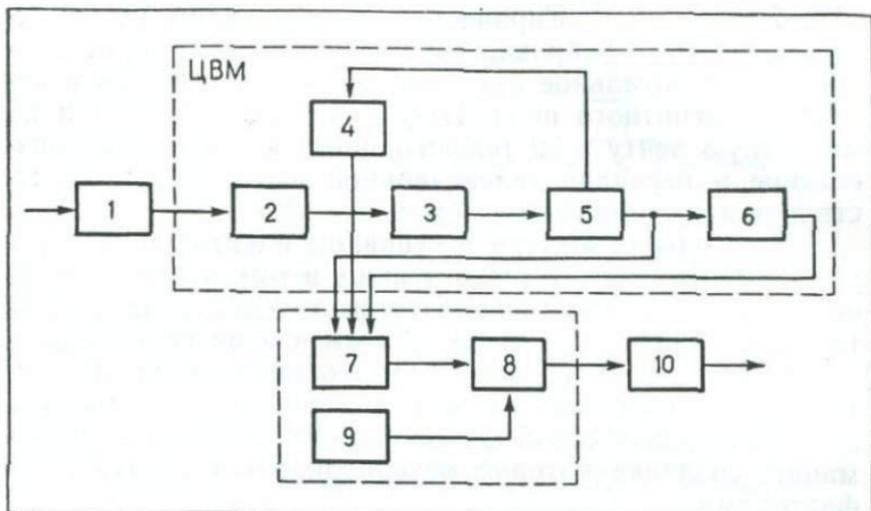


Рис. 7.9. Структурная схема обработки телевизионной информации в системе МТС:

1 — приемное устройство; 2 — поток телеметрической информации; 3 — выделение телевизионных кадров; 4 — запоминающее устройство; 5 — строчная и кадровая синхронизация; 6 — система коррекции и автоматической регулировки; 7 — увеличение контрастности; 8 — объединение телевизионных кадров в форматы, совместимые с устройством записи на пленку; 9 — маркировочные данные; 10 — система МТВС

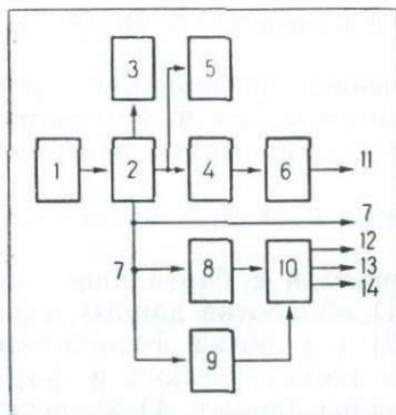


Рис. 7.10. Структурная схема обработки телевизионной информации в системе МТВС:

1 — форматы телевизионных данных от системы МТС; 2 — устройство записи информации на пленку; 3 — скоростная фотокамера; 4 — преобразователь информации в кадры размерами 1000×1000 элементов разложения; 5 — преобразователь в кадры размерами 525×525 элементов; 6 — получение отпечатков; 7 — 70-миллиметровые негативы; 8 — фотоувеличение с автоматической фокусировкой; 9 — построчная кадровая съемка; 10 — получение фотоотпечатков; 11 — отпечатки фотоснимков размером 20×25 см; 12 — 70-миллиметровые отпечатки; 13 — копии диапозитивов; 14 — отпечатки фотоснимков размером 20×25 см

В состав системы входят четыре цифровых вычислительных машины и другая аппаратура.

Система МТВС включает большое число устройств записи на фотопленку, обработки и технических средств отображения информации. В этой системе устройства

записи на фотопленку получают информацию в виде сформированных телевизионных кадров от ЦВМ системы МТС в период считывания данных. Каждый кадр отображается в форме диапозитива с 70-миллиметровой пленки до размеров 20×25 см. Помимо отображения эта система MTVS может представлять отпечатки получаемых изображений.

Обработка поступающей информации в реальном масштабе времени предусматривает обработку во временном интервале, равном 5,4 мин (это время от начала поступления информации по данному кадру до начала появления информации за ним следующего).

Для обработки информации в реальном масштабе времени и отображении телевизионных кадров используется система МТС (рис. 7.9), которая выделяет телевизионные кадры и соответствующие технические данные из потока телеметрической информации и обеспечивает их отображение, и система MTVS (рис. 7.10), которая записывает на пленку полученные от системы МТС кадры и изготавливает их копии.

Система МТС в первую очередь осуществляет строчную и кадровую синхронизацию видеoinформации в потоке принимаемых телеметрических данных. Эта операция производится на основе меток, которые идут в потоке телеметрической информации (метки генерируются бортовой системой сбора данных). Метки указывают начало блока данных, содержащих одну строку телевизионного кадра, отделяют телевизионную информацию от информации другой научной аппаратуры и технической информации.

После выделения телевизионной информации (телевизионного кадра) из потока телеметрических данных необработанный кадр преобразуется в форму, удобную для считывания устройством записи на пленку в системе MTVS.

При усилении изображения осуществляется компенсация темных пятен, которые возникают в результате неоднородности фотометрической чувствительности мишени видикона. Затем телевизионные кадры проходят линейное усиление контрастности, пропускаются через фильтр верхних частот, подвергаются линейному увеличению контрастности и преобразуются в форму для записи на пленку.

Информация, приготовленная для записи, поступает на записывающее устройство 2 системы MTVS (см. рис. 7.10) и фотографируется на пленку. Одновременно с этим с записывающего устройства 2 информация в виде негативов поступает в блоки фотоувеличения с автоматической фокусировкой и построчной кадровой съемки. На основании этой информации в блоке 10 осуществляется фотографическая печать снимков. Параллельно с этим с блока 2 информация поступает в преобразователи информации в кадры с размерами 525×525 и 1000×1000 элементов разложения.

Полученные снимки являются основным материалом при дальнейших работах по картографированию и дешифровке в зависимости от решаемых задач.

Помимо обработки телевизионной информации в реальном масштабе времени обработка может вестись в режиме, отличном от реального масштаба. В этом режиме обработка ведется с декалибровкой кадров. Для фотографирования поверхности с помощью двух телевизионных камер, поля зрения и разрешающие способности которых отличаются друг от друга примерно в 10 раз, поиск необходимых особенностей на фотографируемой поверхности может быть успешно осуществлен только с помощью декалибровки.

Телевизионная информация в период, предшествующий декалибровке, с помощью ЦВМ проходит два этапа обработки, целью которых является восстановление пропущенных строк и исправления ошибочных разрядов. Оба этапа позволяют улучшить визуальное наблюдение декалибруемых данных. На первом этапе производится замена пропущенных строк методом линейной интерполяции по яркости предыдущей и последующей строк для каждого элемента изображения по строке. Второй этап осуществляется с целью исправления ошибочных разрядов, возникающих в результате нечеткости работы аппаратуры.

Пройдя эти этапы, телевизионные кадры подвергаются обработке, направленной на устранение геометрических и радиометрических искажений. Коррекция геометрических искажений каждого полученного телевизионного кадра проводится на основе калибровочных меток, нанесенных на мишень телевизионной трубки, в три этапа: 1) определение положения каждой метки на

полученном кадре; 2) геометрические преобразования с целью перемещения полученного изображения в действительное; 3) преобразование.

Коррекция искажений может осуществляться на ЦВМ по специальным алгоритмам с учетом целого ряда дополнительных факторов и параметров.

Глава 8. МЕТОДЫ ДЕШИФРИРОВАНИЯ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ФОТОИНФОРМАЦИИ

8.1. Методы дешифрирования фотоинформации

При выполнении картографических работ при космическом фотографировании одним из важных и ответственных моментов является дешифрирование получаемой с борта КА фотографической информации. Прежде чем говорить о способах дешифрирования, дадим определение, что же такое дешифрирование.

Дешифрировать космический снимок это значит распознать на нем интересующие нас объекты, раскрыть сущность содержания контуров и отдельных предметов и определить их характеристику. В зависимости от назначения и содержания составляемых по космическим фотоснимкам планов и карт дешифрирование подразделяют на топографическое и специальное.

Под топографическим дешифрированием [7] подразумевается распознавание на фотоснимках объектов местности и изображение их топографическими условными знаками. Топографическое дешифрирование производится для выявления контуров и составления фотопланов. Целью работ при топографическом дешифрировании является распознавание на фотоснимках объектов ситуаций местности, которые могут быть выражены на фотоплане с помощью топографических обозначений и условных знаков. Под объектами ситуации понимаются населенные пункты, всевозможные границы и ограждения, объекты гидрографии, растительные и лесные образования и т. д. При топографическом дешифриро-

вании требуется расшифровать каждый контур с такой подробностью, чтобы пользуясь таблицей условных знаков для того или иного контура, можно отобразить ее на плане в соответствующем масштабе.

Специальное дешифрирование представляет собой также распознавание объектов съемки на фотоснимках и отображение их на фотопланах с дополнительной характеристикой дешифрируемых объектов, присущей только этим объектам.

Помимо чисто картографических целей фотографирование из космоса находит, как это уже было установлено в предыдущей главе, все большее применение в исследовании природных ресурсов и проведении гидрологических, океанографических работ, наблюдении за лесными и сельскохозяйственными массивами и т. д. Так при нанесении на планы контуров лесных массивов необходимо указывать характеристику этих массивов с отображением пород по видам (дуб, сосна, ель и т. д.), таксационных особенностей и т. п. Аналогичные характеристики помещаются на планы и при дешифрировании объектов, снимаемых в интересах решаемых космическим фотографированием задач.

Как топографическое, так и специальное дешифрирование фотографических снимков может быть и полевым, и камеральным.

Сущность полевого дешифрирования заключается в сравнении изображений, запечатленных на фотоснимке, с объектами местности, для чего дешифровщик должен сличать фотоснимок с местностью и опознавать на фотоснимке и на местности наиболее характерные объекты, которые выбираются в качестве ориентиров. Затем устанавливают идентичность объектов на фотоснимках и местности, выявляют их особенности и наносят на фотоплан с указанием их характеристики.

Сущность камерального дешифрирования состоит в распознавании интересующих объектов на основании лишь знания законов изображения на фотоснимках дешифрируемых объектов, основных принципов дешифрирования и использования вспомогательных материалов. В качестве вспомогательных данных используются имеющиеся картографические материалы на данный район работ, а также альбомы эталонов дешифрируемых объектов. Альбомы составляются до проведения

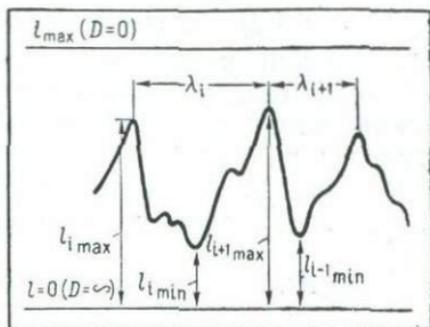


Рис. 8.1. Элементы регистрограммы

съемочных работ и работ по дешифрированию путем полевого обследования местности и вычерчивания на плане характерных ориентиров.

Помимо названных способов дешифрирования специальное дешифрирование в зависимости от задач может быть геофизическим, геологическим, геоботаническим, гидротехническим, океанографическим и т. д. Дешифрирование космических фотоснимков вышеуказанными методами в ряде случаев не дает должного эффекта, так как ряд горных и лесных массивов для полевого дешифрирования просто не доступны.

Наиболее перспективным в этом случае в отношении повышения объективности результатов дешифрирования фотоснимков является метод микрофотометрирования [49]. Метод основан на измерении плотностей почернения участков фотоснимка с помощью специальных фотометрических приборов — фотометров и микрофотометров, которые позволяют фиксировать изменения оптической плотности по фотоснимку непрерывно в виде кривой, называемой регистрограммой. Любая точка регистрограммы характеризуется двумя параметрами: геометрическими и фотометрическими, а именно: отсчеты по оси абсцисс позволяют получить геометрические характеристики объектов, а по оси ординат — фотометрические.

За основание элементарной характеристики регистрограммы принимаются длина фотометрической волны λ , определяемая как разность абсцисс соседних максимальных значений регистрограммы, и амплитуда волны, представляющая собой отношение ближайших максимальной и минимальной ординат регистрограммы. Основные элементы регистрограммы представлены на рис. 8.1.

Ординаты $l_{i\min}$ отсчитываются от нулевой линии, соответствующей показанию микрофотометра при выключенном фотоэлектрическом приемнике излучения. Оптическая плотность фотоматериала в этом случае принималась равной бесконечности ($D = \infty$).

Фотометрическая длина волны на местности L и длина регистрограммы связаны между собой соотношением

$$L = \lambda \frac{m}{M},$$

где m — величина, обратная численному масштабу фотоснимка; M — увеличение, создаваемое регистрирующим устройством микрофотометра.

Помимо названных, к фотометрическим характеристикам относятся:

деталь яркостей

$$U = \frac{B_2}{B_1},$$

где B_1 и B_2 — яркости двух смежных точек;
коэффициент контраста

$$K = \frac{B_2 - B_1}{B_1 + B_2};$$

деталь яркостей и коэффициент контраста функционально связаны между собой и с деталью актиничности

$$U_\Phi = \frac{A_2}{A_1},$$

где A_2 и A_1 — актиничности соответствующих элементов объекта, и с фотографическим коэффициентом контраста

$$K_\Phi = \frac{A_2 - A_1}{A_1 + A_2}.$$

Актиничность — это часть лучистого потока, которая определяет фотографический эффект; в ряде случаев ее называют фотографической освещенностью. Актиничность и коэффициент контраста характеризуют оптическое изображение и непосредственно определяют фотографический эффект, которые для линейного уча-

стка характеристической кривой могут быть рассчитаны по формулам:

$$U_{\Phi} = \frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \text{ и } K_{\Phi} = 1 - \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^{\frac{1}{\gamma}},$$

где γ — коэффициент контрастности фотографического негативного изображения.

Принцип фотометрирования заключается в следующем. С помощью специального прибора — микрофотометра последовательно просматривается световым лучом (на просвет) каждая строка кадра. Световой поток, проходя через прозрачную подложку фотоматериала и слой с изображением, поступает на фоточувствительный приемник, вырабатывающий электрические сигналы, которые затем регистрируются в виде регистрограмм, записываемых в логарифмическом масштабе. Полученные таким образом регистрограммы позволяют визуально сопоставить аналогичные характеристики фотографического изображения, выраженные в деталях оптической плотности. В этом случае деталь оптической плотности получается по регистрограмме как разность отсчетов $\Delta D_{12} = l_1 - l_2$. Деталь оптической плотности с U_{Φ} и K_{Φ} связана зависимостями:

$$U_{\Phi} = 10^{\frac{\Delta D}{\gamma}} \text{ и } K_{\Phi} = 1 - 10^{\frac{\Delta D}{\gamma}}$$

или

$$U_{\Phi} = 10^{\frac{l'_1 - l'_2}{\gamma}} \text{ и } K_{\Phi} = 1 - 10^{\frac{l'_1 - l'_2}{\gamma}}.$$

Наличие регистрограмм позволяет получить некоторые условные характеристики в виде функций измеряемых оптических плотностей, которые используются при дешифрировании в качестве демаскирующих признаков.

Для определения U_{Φ} и K_{Φ} необходимо знать значения коэффициента контрастности γ , который определяется фотолабораторным путем. Чтобы найти значение коэффициента, необходимо при фотографировании поверхностей и объектов проводить сенситометрический контроль, заключающийся во впечатывании в каждый кадр оптического клина (шкалы оптических плотностей). Наличие изображения сенситометрического клина позволяет учитывать при фотометрировании изменения коэффициента

контрастности γ , вызванные неравномерностью фотолабораторной обработки отдельных частей фотопленки.

При сопоставлении изображений на разных фотоснимках при дешифрировании изменения коэффициента контрастности на логарифмической регистрограмме определяются из выражения

$$\Delta D_1 = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \Delta D_2,$$

где ΔD_1 и ΔD_2 — детали оптической плотности для первого и второго фотоснимков; γ_1 и γ_2 — коэффициенты контрастности для этих же фотоснимков.

В работе [49] приводится ряд примеров использования фотометрического метода при дешифрировании фотоснимков различных объектов съемки (различных ландшафтов, ледовых поверхностей, различных форм рельефа и т. д.), показывающих, что микрофотометрический метод является одним из перспективных и в настоящее время находит широкое применение.

Следует здесь отметить, что получение регистрограмм является, несмотря на градуировку микрофотометра и прочие мероприятия по эталонированию, процессом случайным. Случайность процесса заключается в погрешностях при поливе светочувствительным слоем, его неравномерностью, зернистостью фотографического изображения, погрешностями измерения характеристик, условиями фотографирования и т. д.

Кроме того, изображения некоторых природных объектов на фотоснимках представляют собой поля однородных элементов того или иного класса, но в силу своих особенностей не похожие друг на друга; в то же время каждый из них имеет общие черты, определяющие их принадлежность к данному объекту. Выявление этих особенностей может быть осуществлено только путем многократных измерений, т. е. путем набора статистических данных, а обработка этих данных — с использованием аппарата математической статистики.

В работе [49] приводятся основные математические зависимости, позволяющие определять некоторые статистические характеристики фотографического изображения по регистрограммам изображений.

Аппарат математической статистики позволяет для обработки регистрограмм и проведения дешифрирования

использовать вычислительную технику. Более того, уже имеется определенный опыт в дешифрировании и распознавании образов с использованием ЭВМ. В дальнейшем они получат еще большее применение.

8.2. Основные демаскирующие признаки при дешифрировании

При дешифрировании фотографических снимков, полученных с борта КА, и определении тех или иных объектов на них используют демаскирующие признаки, присущие изображениям этих объектов [6]. В связи с этим все демаскирующие признаки (еще их называют дешифровочные признаки) принято делить на прямые и косвенные; при этом прямые признаки одних объектов могут служить косвенными для определения других объектов.

Основными демаскирующими признаками являются форма, размер, тон, падающая от объекта тень и структура изображения объекта. Названные признаки широко используются при дешифрировании таких объектов, которые на фотоснимках данного масштаба изобразились непосредственно [6].

Косвенными демаскирующими признаками являются различные взаимосвязи между изображениями различных объектов и самими объектами. Наличие этих связей в сочетании с основными демаскирующими признаками смежных объектов позволяет сделать логические выводы по определению объекта.

Рассмотрим характеристики некоторых демаскирующих признаков, присущих основным объектам съемки.

Ф о р м а о б ъ е к т а является одним из важных демаскирующих признаков. Если при фотографировании оптическая ось фотоаппарата совпадает с направлением МВ, а объекты съемки находятся в горизонтальной плоскости, форма объектов на фотоснимках передается без изменений: строения изображаются в виде прямоугольников, грунтовые и шоссейные дороги в виде вытянутых или кривых линий, реки, ручьи, проселочные дороги в виде извилистых линий и т. д.

В случае отклонения направления оптической оси фотоаппарата в момент фотографирования от направления МВ форма объектов отличается от действительной. При отклонениях не более 3° эти искажения при

плановом фотографировании практического значения не имеют.

Наиболее важным фактором в этом смысле является искажение формы высоких объектов (высотных домов, водонапорных башен, элеваторов и т. д.). Изображения этих объектов при плановом фотографировании, если они размещаются в центре фотоснимка, не имеют искажений в форме; если на краю фотоснимка — форма объектов искажается. В этом случае для правильной дешифровки объектов используют стереоскопические приборы.

Таким образом, форма объекта является одним из основных, но недостаточных демаскирующих признаков при дешифрировании и распознавании, так как одну и ту же форму, например прямоугольника, могут иметь различные объекты: строения, отдельные поля, искусственные выемки, насыпи, водоемы, котлованы, древесные насаждения и др.

Размер объектов является не менее важным демаскирующим признаком. Так, зная примерный масштаб фотоснимка и примерные размеры объектов дешифрирования в натуре, достаточно просто можно определить, чему должен соответствовать этот контур. Эта зависимость определяется формулой

$$l' = \frac{L}{m},$$

где l' — линейный размер объекта дешифрирования на фотопленке; L — линейный размер объекта в натуре; m — величина, обратная линейному масштабу фотоснимка.

Получив значение линейных размеров l' объекта с учетом приведенной формулы, зная форму объекта, и сравнив полученное значение с размерами объекта на фотопленке, добиваются эффективного и более точного дешифрирования объектов.

Тон изображения также является одним из основных демаскирующих признаков. Тон изображения объекта или степень потемнения того или иного объекта на фотопленке рассматриваются и сопоставляются с окружающими объектами. Тон изображения объекта на фотопленке зависит от естественной окраски самого контура, от количества света, падающего в данный

момент на него, а также от отражающей способности объекта.

Отражающая способность объектов съемки зависит в свою очередь от состояния и характера его поверхности. Основными отражающими характеристиками при фотографировании из космоса являются коэффициенты яркости объектов (см. прил. 1). Так, плотно утрамбованная и сухая земля, дороги, освещенные стороны крыш домов и другие поверхности отражают наибольшее количество света, и поэтому тон изображения на фотоснимках таких объектов будет светло-белым. Все мокрые, взрыхленные и водные поверхности, обладающие большим поглощением, изображаются в виде темных пятен.

Яркость объектов в значительной степени зависит от состояния атмосферы и высоты стояния Солнца.

Тень объектов является также одним из основных демаскирующих признаков. Этот признак выступает в виде собственной и падающей тени. Собственная тень покрывает собой не освещенную сторону сфотографированного объекта, а падающая тень — это тень, которую отбрасывает объект съемки на земную поверхность или другие объекты.

Собственная тень объекта съемки является результатом неравномерного освещения его, создает на изображении иллюзию пластичности, что позволяет правильно определить форму объекта. Так, треугольные крыши строений хорошо дешифрируются благодаря собственной тени, хотя изображение их прямоугольное. По падающей тени легко дешифрируются объекты, выступающие высоко над поверхностью Земли. Кроме того, относительно неплохо дешифрируются при наличии падающей тени такие объекты, которые имеют малые площади или на фотоснимке сливаются с окружающим фоном, но высоко выступают над поверхностью Земли. К таким объектам относятся фабричные и заводские трубы, одиночные деревья, телеграфные столбы, геодезические знаки, изгороди и т. п.

Структура изображения также является одним из демаскирующих признаков, но присуща изображениям только некоторых объектов, таким, как лесные массивы, вызревающие посевы, растительные покровы и т. д.

Так, например, для лесных массивов характерна зернистая структура изображения, по которой определяются кустарниковые и лесные образования, и более того, при детальном изучении структур могут быть определены породы деревьев. Зернистость в изображении леса определяется тем, что кроны деревьев изображаются светлыми пятнами, близкими по форме к кружкам, а затененные промежутки между кронами — почти черным тоном.

В связи с этим обычно принимают, что лесные массивы с деревьями высотой 25—30 м в изображении имеют крупнозернистую структуру, а с мелколесьем и кустарниками имеют мелкозернистую структуру; еловые леса еще отличаются темно-серым общим тоном. Сосновые же леса имеют сравнительно с еловыми светло-серый общий фон; структура изображения кустарников имеет слабо выраженную мелкозернистую форму светло-серого тона, и т. д.

Для правильного и более качественного дешифрирования фотографических снимков, помимо основных демаскирующих признаков, в ряде случаев используют косвенные или вспомогательные. Их называют еще признаками взаимных связей. Значение косвенных признаков особенно велико тогда, когда они применяются в сочетании с основными демаскирующими признаками.

При взаимном сопоставлении демаскирующих признаков некоторых объектов можно косвенным путем сделать предположение или суждение о наличии того или иного объекта. Так, например, дороги или тропы, подходящие к реке и начинающиеся на другом берегу, дают возможность судить о наличии парома или лодочного перевоза, либо о наличии конного или пешего брода, и т. д. Рассматривая скопления судов у берегов, можно установить наличие пристани, а по внешнему виду судов иногда удается уточнить вид пристани — пассажирская или товарная и т. д.

Другим примером косвенных демаскирующих признаков является такой. Известно, например, что более низкие места имеют относительно большую увлажненность, а поэтому на фотоснимках изображаются более темными по тону. Следовательно, если при расшифровке однородных массивов, например пашен, на фотоснимках имеются места с более темным изображением, то это дает основание предполагать наличие в этих местах

впадины или лощины. Если, например, более темная полоса пересекает дорогу, то можно предположить, что на дороге имеется мостик или труба.

Деревянные столбы телефонно-телеграфных и низковольтных линий на снимках с масштабом 1 : 10 000 не видны, но поскольку на пашне вокруг столбов остаются участки незапаханной территории, то они то и являются демаскирующими признаками, позволяющими сделать заключение о наличии телеграфных столбов и линий.

Расположение на снимках тропинок и дорог может быть надежным косвенным признаком для определения, например, таких объектов, как колодцы, а изображение вытоптаных площадок около хозяйственных построек и широких прогонов от них указывает назначение построек, и т. д.

По характеру растительности можно судить о типах заболоченных мест. Для верховых болот свойственно произрастание низкорослой и редкой сосны, а также распространение на значительных пространствах мхов.

Таким образом, косвенные демаскирующие признаки в совокупности с прямыми признаками дают возможность более полно и эффективно осуществлять дешифрирование интересующих объектов на космических снимках.

Помимо названных демаскирующих признаков в ряде случаев есть признаки, характерные для тех или иных объектов. Так, при ведении разведки полезных ископаемых с борта КА «ERTS» [68] были обнаружены на фотоснимках районы, покрытые дымкой (снимки в этих местах как бы смазаны). В результате анализа этого явления было установлено, что имеется связь между дымчатыми пятнами и наличием запасов нефти в районах, которым эти пятна соответствуют.

8.3. Ввод фотоинформации в ЭВМ

При космическом фотографировании получают огромный объем информации, обработка которой представляет собой большие трудности. Существующие до последнего времени методы полуавтоматической и ручной обработки на современном этапе уже не отвечают требованиям оперативного получения фотоинформации. Наиболее эффективными являются автоматические

методы обработки фотоинформации, так применение ЭВМ позволяет повысить точность и объективность результатов обработки.

В настоящее время существует большой круг задач, связанных с обработкой фотографических изображений на ЭВМ. Все их можно подразделить на две группы [12]:

— задачи, связанные с моделированием и восстановлением изображений, улучшением качества изображений путем фильтрации и контрастирования, и

— задачи, связанные с выполнением измерительных работ.

Машинная обработка фотографической информации осуществляется в два этапа: автоматический ввод изображений в ЭВМ и математическая обработка. Выполнение первого этапа связано с автоматическим просмотром изображения с помощью фотосчитывающих устройств, преобразованием считанной информации в цифровой код и вводом ее в ЭВМ.

Помимо этих характеристик при построении устройства ввода изображений в ЭВМ важным параметром является информационная емкость фотоизображения. При этом учитываются статистические характеристики элементов, составляющих изображение.

Для расчета информационной емкости фотоизображения, т. е. максимального количества информации, фотографическое изображение представляют в виде совокупности элементов размером $\Delta x \times \Delta y$. В этом случае число элементов, приходящихся на единицу площади, определится как

$$N = \frac{1}{\Delta x \Delta y} = \frac{1}{\Delta A},$$

где ΔA — площадь элемента изображения.

Количество информации, передаваемое фотографическим изображением, может быть определено по формуле

$$I = \int_0^N \log_2 [n(N', \tau) + 1] dN',$$

где n — число градаций плотности почернения фотоизображения; N' — число элементов, составляющих

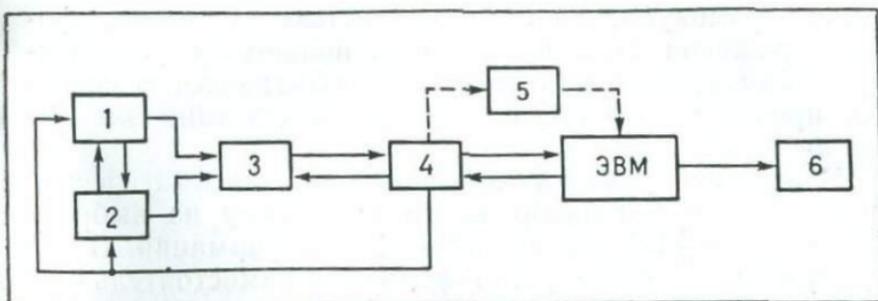


Рис. 8.2. Структурная схема устройства автоматического ввода фотоинформации в ЭВМ:

1 — блок фотометрирования; 2 — блок сканирования; 3 — блок кодирования аналоговой информации в цифровую; 4 — блок сопряжения устройства ввода в ЭВМ; 5 — устройство записи фотоинформации на промежуточный носитель; 6 — устройство вывода и отображения фотоинформации

фрагменты изображения; τ — коэффициент пропускания проявленного фотослоя.

Все многообразие устройств ввода принято [14] классифицировать по пяти основным способам обработки: сканирования, выделения растр-элемента, фотометрирования, генерирования сканирующего пятна и по типу связи с ЭВМ.

Каждый из этих способов в свою очередь может быть подразделен на целый ряд его составляющих (для подробного ознакомления см. [12]).

В современных устройствах ввода считывание фотоинформации с космических фотоснимков осуществляется путем сканирования фотоизображения и измерения коэффициентов пропускания или плотностей почернения.

Типовая структурная схема устройства автоматического ввода фотоинформации в ЭВМ с прозрачного носителя информации представлена на рис. 8.2. Блок фотометрирования обеспечивает просмотр фотографического изображения и измерение коэффициента пропускания или оптической плотности элементов изображения. В основу работы блока фотометрирования положен принцип работы микрофотометра, заключающийся в том, что с помощью эталонного источника просвечивают фотографическое изображение, получая световой

поток, промодулированный плотностью почернения фотоизображения. Этот поток затем подают на фотоэлектрический приемник и получают электрические сигналы, пропорциональные плотностям почернений элементов изображения.

Блок сканирования обеспечивает автоматическое сканирование фотоизображения по одному из выбранных законов [21] и считывание фотоинформации. В ряде случаев при вводе фотоинформации самостоятельного блока сканирования может и не быть, если фотоинформация считывается блоком фотометрирования. В некоторых устройствах ввода наоборот присутствует блок сканирования и отсутствует блок фотометрирования. Состав блоков и узлов в устройствах ввода определяется принципом считывания.

Блок кодирования фотоинформации обеспечивает преобразование аналоговой информации, поступающей со считывающего устройства, в цифровую в зависимости от числа уровней квантования.

Блок сопряжения устройства ввода с ЭВМ, с помощью которого осуществляется связь устройства с ЭВМ непосредственно или через промежуточный носитель. Кроме того, он обеспечивает управление и синхронизацию работы всех элементов устройства ввода.

Устройство записи информации на промежуточный носитель выполняет функции буферного устройства — накопителя информации. Известно, что быстродействие считывающих устройств значительно ниже быстродействия ЭВМ и в ряде случаев, для того чтобы работа ЭВМ была более эффективной, сначала цифровая информация накапливается на промежуточном носителе (магнитные ленты, барабан), а затем уж вводится в оперативную память ЭВМ для ее обработки, но может вводиться и непосредственно.

Для характеристики и оценки устройств ввода используют ряд параметров [12], которыми являются: размер пятна сканирующего луча, пределы измерения параметров изображения (коэффициента пропускания или оптической плотности), быстродействие устройства ввода, число уровней квантования элементов изображения, чувствительность устройства ввода, точность измерения оптической плотности и координатные погрешности.

Размер пятна сканирующего луча (растр-элемента), которым осуществляется просмотр фотографического изображения, является одной из важных характеристик, так как пятно определяет число элементов разложения при дискретизации вводимого в ЭВМ фотографического изображения. Конечно, выбор числа элементов осуществляется исходя из характера задач, решаемых при обработке изображений на ЭВМ, но это только с одной стороны, а с другой стороны необходимо учитывать разрешение, с которым получено фотографическое изображение. Как правило, при выборе размера сканирующего пятна исходят из условия, чтобы оно было соизмеримо со значением разрешающего элемента на фотоизображении. В настоящее время это удастся сделать, если в сканирующих устройствах при считывании использовать луч лазера и прецизионную оптику [21].

Пределы измерения параметров изображения (оптической плотности или коэффициента пропускания) для каждого фотографического изображения определяются исходя из сенситометрической характеристики. Минимум и максимум определяются значениями, соответствующими началу и концу линейного участка характеристической кривой.

Быстродействие устройства ввода — это время, затрачиваемое устройством на ввод одного элемента разложения изображения. Оно складывается из времени сканирования, считывания, кодирования и ввода в ЭВМ. Быстродействие современных устройств ввода пока еще ниже, чем быстродействие ЭВМ.

Число уровней квантования элементов изображения определяется исходя из решаемой задачи и вида обрабатываемого изображения. В большинстве современных устройств ввода число уровней квантования [12] составляет 32—128, в отдельных случаях используется 256 уровней.

Чувствительность устройства ввода изображений определяется из соотношения

$$S = \frac{10^{D_{\max}}}{\Delta A},$$

где D_{\max} — максимальное значение измеряемой оптической плотности.

Для устройств, измеряющих коэффициент пропускания, чувствительность определяется по формуле

$$S = \frac{1}{\tau_{\min} \Delta A},$$

где τ_{\min} — минимальное значение коэффициента пропускания.

Чувствительность позволяет определить значения оптической плотности или коэффициента пропускания при фиксированном значении площади элемента разложения.

Точность измерения оптической плотности (коэффициента пропускания) определяется параметрами источника излучения и фотоэлектрического устройства, т. е. стабильностью их характеристик.

Координатные погрешности возникают из-за неточности юстировки сканирующего устройства, а следовательно, положения сканирующего пятна на строке и по кадру.

В настоящее время по сведениям отечественной и зарубежной печати имеется большое число различных устройств ввода фотографических изображений в ЭВМ. Здесь рассмотрим лишь устройство с оптико-механической разверткой и дискретным приводом. Структурная схема одного из возможных вариантов показана на рис. 8.3.

Принцип работы устройства ввода данного типа состоит в следующем. Фотографический материал с изображением размещается на координатном столе. Световой поток, испускаемый источником с помощью оптической системы, формируется в узкий сходящийся на изображении пучок. На фотоизображении образуется пятно с площадью, равной элементу разложения изображения. Вышедший из пленки световой поток с помощью объектива фокусируется на катод фотоэлектронного умножителя и с его помощью преобразуется в электрический сигнал. Затем этот сигнал в блоке кодирования преобразуется в сигнал, представленный в цифровой форме, который и подается на вход ЭВМ. Сканирование изображения осуществляется с помощью ЭВМ, которая выдает соответствующие сигналы на регистры по кадру и строке, а те в свою очередь воз-

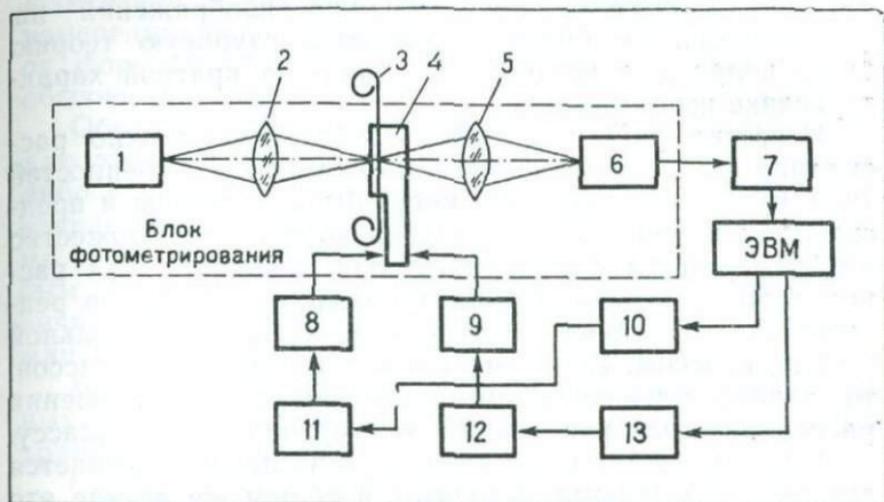


Рис. 8.3. Структурная схема устройства ввода фотоинформации в ЭВМ:

1 — источник светового потока; 2 — фокусирующая система; 3 — носитель фотоинформации; 4 — координатный стол; 5 — объектив; 6 — фотоэлектронный умножитель; 7 — аналогово-цифровое преобразующее устройство; 8, 9 — шаговые двигатели привода координатного стола; 11, 12 — устройства управления шаговыми двигателями; 10, 13 — регистры перемещения по строке и кадру

действуют на блоки управления шаговых двигателей, осуществляющих перемещение координатного стола.

После отработки заданного перемещения координатный стол останавливают и производят фотометрическое измерение. Точность установки при шаге винта в 1 мм достигается 0,005 мм.

Рассмотренное устройство обеспечивает достаточно точное считывание и надежный ввод фотоинформации в ЭВМ, но имеет низкое быстродействие. Для быстрого ввода фотоинформации в ЭВМ используются электронные считывающие устройства, работающие на базе электронно-лучевых трубок.

8.4. Распознавание изображений на фотоснимках

Вопросам распознавания образов как у нас в стране, так и за рубежом посвящено много работ, в которых рассматриваются теоретические и практические аспекты распознавания. Оптическое распознавание целиком основывается на общепринятых методологических и теоретических основах. Поэтому здесь, рассматривая некоторые

методы оптического распознавания изображений на фотоснимках, не будем вдаваться в глубокую теорию этого вопроса, а остановимся лишь на краткой характеристике изображения.

Известно [17], что любое изображение можно рассматривать как совокупность некоторых его особенностей (или признаков), которые могут быть измерены и представлены в многомерной системе координат. Множество изображений на фотоснимке, представленных для распознавания, называют реализациями, а множество реализаций, отнесенных по общим признакам к отдельной группе, классом. Если имеется несколько таких классов, то задача распознавания заключается в соотношении распознаваемых реализаций к тому или иному классу.

В простейшем случае задача распознавания решается детерминированными методами, в общем же случае это статистическая задача и решается она путем выполнения следующих операций:

- определения числа классов и их содержания;
- установления закона распределения вероятностей появления классов;
- определения признаков классов;
- определения распределения признаков по классам;
- определения числа градаций признаков и дискретизации образа;
- минимизации числа признаков;
- вычисления вероятности ошибки при различных признаках и критериях распознавания;
- окончательного установления числа признаков, которые войдут в решающее правило.

При распознавании изображений оптическими устройствами в основном выполняются три процесса [17]: восприятие, преобразование и обработка фотоинформации.

Восприятие фотоинформации включает поиск информативных областей и выделение элементов изображения, причем поиск может быть последовательным, параллельным и последовательным, и выделение элементов осуществляется путем алгоритмического сканирования или пространственной фильтрации.

Преобразование фотоинформации включает измерение признаков, квантование, уплотнение и кодирование.

Измерение признаков естественно выполняется путем измерения амплитуды, фазы или частоты. Все зависит от формы изображения на фотоснимке. Квантование обычно производится либо по уровню, либо по времени.

Обработка фотоинформации может осуществляться, как это уже было сказано, либо детерминированными, либо статистическими методами. На этом этапе распознающее устройство осуществляет реализацию алгоритма сравнения преобразованной информации с эталонным описанием классов. Могут быть использованы различные оптические методы и средства обработки информации.

Наиболее широко и успешно используются два основных метода — корреляционный и пространственной фильтрации.

Считывание фотоинформации и распознавание изображений с помощью оптико-электронных устройств совместно с ЭВМ в последнее время находят широкое применение. В ряде публикаций [17, 36] даются варианты схем их решения и принцип действия. Один из вариантов структурной схемы оптико-электронного устройства распознавания изображений с программной разветкой, управляемой ЭВМ, представлен на рис. 8.4.

Принцип работы приведенной схемы устройства заключается в следующем. По командам, заложенным в программе, ЭВМ посылает сигналы в виде кодов в приемные регистры 19, 20. Информация, заключенная в кодах, представляет собой координаты местонахождения светящихся пятен на экранах электронно-лучевых трубок (ЭЛТ) 9 и 15 с бегущим лучом и ЭЛТ индикации 14. Цифровые коды из приемных регистров поступают в цифро-аналоговые преобразователи 17, 18, в которых из цифровых кодов формируются отклоняющие напряжения. Эти напряжения воздействуют на отклоняющие системы ЭЛТ, заставляя светящееся пятно занять нужное положение на экране.

Пятно с помощью объективов 6 и 8 проецируется на фотоснимок 5 с изображением и эталонный отражающий экран 7, освещая соответствующие участки. Отразившись от них, световой поток воспринимается фотоэлектронными умножителями (ФЭУ) и преобразуется в последних в электрические сигналы, которые затем усиливаются и подаются: первый через усилитель 3 в

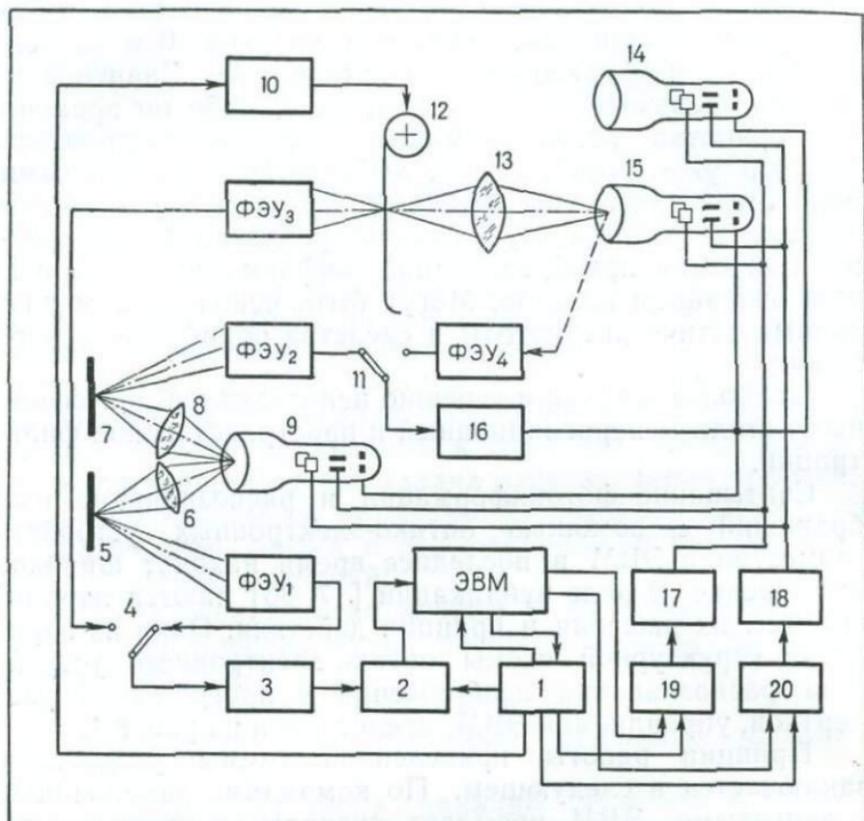


Рис. 8.4. Структурная схема оптоэлектронного устройства распознавания изображений с программной разверткой, управляемой ЦВМ

аналого-цифровой преобразователь 2, в котором преобразуется в цифровой код, а второй на модулирующие устройства ЭВМ 14 и 15.

Из аналого-цифрового преобразователя информация в виде четырехразрядного двоичного кода поступает в регистр яркости ЭВМ, в котором и запоминается. По сигналам, поступающим из блока местного управления 1, код передается в арифметическое устройство ЭВМ.

Таким образом, в результате просмотра изображений на фотопленке в машине накапливается информация о просматриваемом изображении в виде значений коэффициентов отражения от различных участков изображе-

ния, выбранного для анализа в соответствии с программой, заложеной в ЭВМ.

Канал, работающий по отраженному световому потоку от эталонного экрана 7, предназначен для автоматического эталонирования светового пятна на экране ЭЛТ по яркости.

Накопленная в ЭВМ информация о том или ином изображении обрабатывается, сравнивается с изображением, находящимся в памяти, и распознается. Распознавание осуществляется по наперед заданному алгоритму.

Рассматриваемое устройство может работать в двух режимах: первый — в котором считывание фотоинформации осуществляется путем замера коэффициента отражения, и второй, в котором считывание осуществляется путем измерения оптической плотности почернения элементов изображения. Первый режим был только что рассмотрен, а сущность работы устройства во втором режиме заключается в следующем.

Для включения устройства во второй режим работы тумблеры 4 и 11 переключаются в положения противоположные тем, которые они занимают на схеме. Начало работы, т. е. выборка координат местоположения светящегося пятна на экране ЭЛТ 15, происходит аналогично рассмотренному в первом режиме. Световое пятно с экрана ЭЛТ с помощью объектива 13 проектируется на изображение на фотопленке 12. Световой поток проходит через фотопленку и воспринимается ФЭУ₃, а далее работает остальная схема в только что рассмотренном порядке. Одновременно световой поток воспринимается ФЭУ₃ и непосредственно с экрана ЭЛТ 15 приемником ФЭУ₄, который совместно с усилителем 16 создают электрические сигналы эталонирования яркости ЭЛТ.

Параллельно с трубками 9 и 15 включена ЭЛТ 14, которая предназначена для визуального наблюдения за движением светящегося пятна по экрану, а также для высвечивания исследуемых изображений.

Функционирование всех устройств в определенной последовательности организует блок местного управления 1. Перемещение пленки 12 осуществляется приводом 10.

Таким образом, при работе устройства распознавания во втором режиме в ЭВМ накапливается информация о

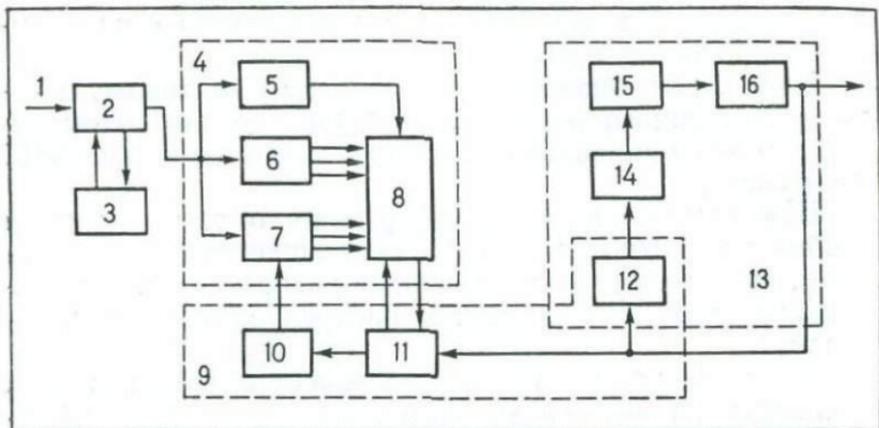


Рис. 8.5. Структурная схема системы распознавания местности по фотоснимкам:

1 — ручная настройка зоны на фотоснимке; 2 — сканирующий блок; 3 — генератор развертки; 4 — предварительный преобразователь информации; 5 — дифференцирующий блок; 6 — блок анализа распределения амплитуд; 7 — адаптивные фильтры; 8 — блок квантования с обучением; 9 — схемы обучения; 10 — блок обучения адаптивных фильтров; 11 — блок обучения уровня квантования; 12 — блок обучения классификатора; 13 — классификатор; 14 — запоминающее устройство характеристик местности; 15 — блок сравнения характеристик; 16 — идентификатор местности

изображении в виде значений плотностей почернения просматриваемых элементов изображения. При накоплении в ЭВМ информации обо всем изображении, последнее распознается с помощью методов машинной обработки по существующим алгоритмам.

Распознавание и дешифрование информации, накапливаемой в результате выполнения космического фотографирования, особенно при исследовании природных ресурсов, имеет исключительно важное значение. Для распознавания изображений на космических фотоснимках может быть использована система [17], представленная на рис. 8.5. В этой системе фотоснимок с изображением местности поступает в блок сканирования, представляющий собой оптико-электронный канал на основе ЭЛТ с «бегущим лугом». Блок сканирования просматривает изображение и выдает видеосигналы, которые поступают на группу фильтров, представляющих собой набор дифференцирующих и интегрирующих цепей и схем определения уровней. Каждый фильтр, обрабаты-

вая видеосигнал, выделяет один из семи принятых для классификации признаков изображения.

Дифференцирующие цепочки выполняют функции подчеркивания краев изображения и характеризуют среднюю «частоту изменения» местности, т. е. фиксируют границу перехода от одного класса признаков к другому. Помимо обработки в дифференцирующих цепочках видеосигналы проходят схемы определения уровня, где производится анализ распределения амплитуд видеосигнала и откуда выдается информация о средней плотности сканируемого фотоснимка. Эта информация одновременно выдается по трем каналам.

Распределение амплитуд видеосигнала позволяет определить асимметричные распределения, характерные для малых объектов, дорог и т. д.

Одновременно видеосигналы поступают в адаптивные фильтры, где осуществляется пространственная фильтрация. Каждый адаптивный фильтр настраивается на фиксированную пространственную частоту. При этом на верхних пространственных частотах выделяются объекты малых размеров, а на низких частотах — объекты, однородные по структуре и имеющие значительные размеры по площади.

Выходные сигналы с дифференцирующего блока, блока анализа распределения амплитуд и блока пространственной фильтрации (блока адаптивных фильтров) поступают в блок квантования с обучением, где сигналы квантуются, и затем осуществляется поэтапный принцип обучения системы, заключающийся в том, что на первом этапе происходит обучение классификаторов с помощью оператора, а на втором — обучение квантователя и фильтров с помощью цепи обратной связи. При указанном обучении достигается цель получения большей достоверности при входных вариациях сигнала.

При обучении классификатора в работу вмешивается оператор, который указывает системе, какие участки местности присутствуют на фотоснимке, т. е. дается некоторая первичная ориентация системы. В этом случае удается подтвердить признаки, по которым происходит классификация.

При обучении квантователя исходят из предпосылки, что тип местности определен правильно, при этом возникает необходимость исследовать, до каких пор это

остается справедливым, если изменять уровни квантования.

Обучение адаптивных фильтров предполагает правильность выходных сигналов с предварительного преобразователя информации и малые вариации входного видеосигнала.

Рассмотренная схема системы распознавания позволяет распознавать участки местности на фотоснимках по заранее заложенным в нее признакам и характеристикам.

8.5. Автоматизированная обработка фотоинформации

При выполнении космического фотографирования с борта КА получают огромный объем информации. Эта информация представляется либо в виде записей изображений на негативной, позитивной, черно-белой или цветной фотопленках, либо в виде записей видеосигналов на фоточувствительных, магнитных или других носителях информации. Объем информации настолько велик, что даже с одного только КА, проводящего фотографирование, например с целью исследования природных ресурсов или с целью прогнозирования метеоусловий, скапливается такой поток информации, с обработкой которого могут справиться только десятки специалистов при многомесячной работе.

Таким образом, обработка получаемой фотоинформации уже в современных условиях является процессом трудоемким и дорогостоящим, так как выполняется она в основном вручную и требует большого числа специалистов высокой квалификации.

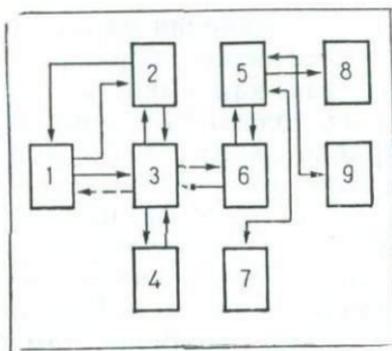
Одной из важных проблем в настоящее время являются разработка и создание автоматизированных систем по обработке фотоинформации на базе использования электронно-вычислительной техники.

Первые образцы таких систем, правда еще далеко не совершенных, уже созданы и находят применение при обработке фотографической и фототелевизионной информации, а также информации, получаемой с помощью инфракрасной аппаратуры.

Ниже остановимся на некоторых способах автоматизированной обработки фотоинформации, получаемой с борта КА при фотографировании поверхности Земли, Луны или других планет.

Рис. 8.6. Структурная схема автоматизированной обработки фотоинформации:

1 — устройство ввода фотоинформации; 2 — блок передачи временных сигналов; 3 — блок управления данными; 4 — устройство отображения экранного типа и регистрирующая фотокамера; 5 — ЭВМ; 6 — синхронизатор; 7 — блок записи на магнитные ленты; 8 — блок получения откорректированных фотографических снимков; 9 — блок записи информации на магнитные барабаны



Принцип автоматизированной обработки результатов фотоинформации рассмотрим на примере обработки результатов картографирования поверхности Луны [65, 66, 67].

Фотографическая информация, получаемая с КА «Lunar Orbiter», первоначально записывалась приемной станцией на Земле на магнитную ленту в виде аналоговых сигналов, после чего переписывалась на 35 мм фотопленку. Одновременно с записью изображения на эту же пленку записывались временные отметки синхронизации и привязки информации к координатам КА. Затем после фотохимической обработки фотопленки дальнейшая обработка фотозаписи проходила в три этапа:

— преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму;

— коррекция цифровой информации в ЭВМ по заданному алгоритму;

— обработка откорректированных данных на ЭВМ.

Структурная схема автоматизированной обработки фотоинформации представлена на рис. 8.6. Первым этапом обработки является преобразование входной информации из аналоговой формы в цифровую. Изображение сфотографированной поверхности, считанное с фотопленки и преобразованное в электрические сигналы, передается по каналам радиотелевизионных наземных приемных устройств, а затем подается в автоматизированную систему обработки, в которой и выполняется первый этап. Устройство преобразования входной информации из аналоговой формы в цифровую позволяет различать до 64 уровней оптической плотности изображения. Получаемые цифровые данные затем записываются для кратковре-

менного хранения на высокоскоростной магнитный барабан (магнитных барабанов должно быть не менее четырех, так как емкость одного барабана обеспечивает запись только $1/4$ части фотоснимка). Как только первый барабан заполняется, управление передается на второй, на который продолжается запись цифровой информации, а первый барабан переключается на считывание и информация с него переписывается на магнитную ленту. Такой двухступенчатый способ значительно ускоряет процесс записи информации, так как быстроедействие магнитных барабанов, тем более высокоскоростных, значительно выше быстрогодействия накопителей на магнитной ленте. Магнитный барабан в данном случае выступает в роли буферной памяти.

После преобразования фотоинформации в цифровую форму полученные данные подвергаются коррекции, которая осуществляется в два этапа. Первый этап коррекции заключается в удалении с пленки краевых меток барабана бортового считывающего устройства, второй — в устранении искажений записи, обусловленных неравномерностью фокусировки электронного луча в процессе считывания первичного изображения в бортовой системе. Коррекция, осуществляемая для каждой точки изображения, представляет функцию вида

$$U_c = \frac{U_a}{U_b} U_i,$$

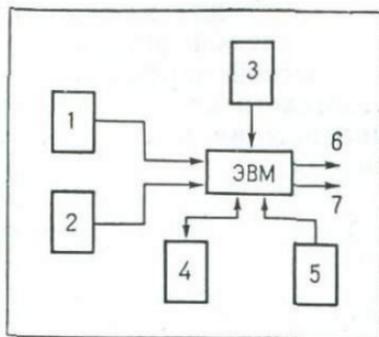
где U_c — напряжение откорректированного сигнала, U_a — средняя величина электрического сигнала, взятого от всех точек изображения, U_i — напряжение некорректированного сигнала, U_b — величина напряжения среднего отфильтрованного сигнала для точек, имеющих одинаковое относительное положение на линии сканирования, с точками, которым соответствуют сигналы U_i и U_c .

После коррекции данные подвергаются обработке на ЭВМ, которая заключается в фотометрическом анализе поступающей информации. На выходе ЭВМ получают откорректированные сигналы, пригодные для формирования и представления на фотобумаге (35 мм фотопленке) или устройствах отображения фотографических изображений.

Обработка фотоинформации на ЭВМ представляет собой довольно сложный процесс и включает набор алго-

Рис. 8.7. Структурная схема обработки фотoinформации на ЭВМ:

1 — откорректированные данные в цифровой форме; 2 — данные для калибровки; 3 — управляющая программа и программа анализа; 4 — навигационные данные, полученные при слежении за полетом КА; 5 — фотометрические данные; 6 — сигналы для записи на 35-мм фотопленку данных о функционировании системы для целей управления; 7 — выходные данные (фотографическое изображение в виде электрических сигналов)



ритмов и программ. Структурная схема (примерный вариант) обработки фотoinформации на ЭВМ показана на рис. 8.7.

При машинной обработке информации для количественного выражения рельефа местности необходимо знать угловые направления лучей Солнца, падающих на фотографируемую поверхность во время съемки, а также световой поток, отраженный каждой точкой снимаемой поверхности. Угловые направления рассчитываются из уравнения

$$B(\alpha, g) = \rho_0 E_0 \Phi(\alpha, g), \quad (8.1)$$

где B — яркость отражающей поверхности; α — угол долготной яркости, представляющий собой проекцию угла отражения на фазовую плоскость; g — угол между лучами, падающими от Солнца и отраженными от фотографируемой поверхности в сторону фотокамеры (в идеальном случае это направление местной вертикали); ρ_0 — альbedo фотографируемой поверхности; E_0 — освещенность фотографируемой поверхности; $\Phi(\alpha, g)$ — фотометрическая функция фотографируемой поверхности.

По известным величинам $\rho_0, E_0, \Phi(\alpha, g), g, B(\alpha, g)$ и специальным алгоритмам вычисляется угол α , который определяет место точки на наклонной линии местности относительно уровенной поверхности. Совокупность таких точек представляет собой горизонталы рельефа.

Световые потоки от каждой точки фотографируемой поверхности определяются путем расчета по величине экспозиции с учетом коэффициента пропускания светового потока оптической системой фотокамеры. Значения

экспозиций для каждого кадра рассчитываются исходя из получаемой фотометрической информации и сенситометрической характеристики, построенной на основании оптического клина с девятью градациями серого, в печатаемого на каждом кадре пленки в момент фотографирования.

Определение плоских координат точек изображения осуществляется на основе результатов слежения за полетом КА с использованием данных внутреннего ориентирования фотокамер, а также вспомогательных навигационных данных.

Наклон поверхности и расчет профилей местности осуществляется по методике, описанной в работе [17]. Известно, что яркость объекта съемки и величина экспозиции H' связаны соотношением

$$B = \frac{4A^2H'}{10,76\tau_0 t_0}, \quad (8.2)$$

где A — входная апертура объектива, H' — экспозиция в лкс, τ_0 — коэффициент пропускания оптической системы, t_0 — время экспозиции.

Если выражение (8.1) выразить через экспозицию, получим

$$H'(\alpha, g) = \frac{10,76 \cdot \rho_0 E_0 \tau_0 t_0 \Phi(\alpha, g)}{4A^2}. \quad (8.3)$$

Формула (8.3) устанавливает зависимость между экспозицией и фотометрической функцией и предназначена для вычисления наклонов поверхности. При этом исходят из предпосылки, что коэффициент пропускания и величина экспозиции для анализируемого участка сфотографированной поверхности являются неизменными, поэтому отношение между экспозицией и фотометрической функцией остается постоянным. Значение α , которому в этом случае будет удовлетворять соотношение (8.3), может быть получено из стандартных таблиц. Так как конкретные значения альбедо и освещенности поверхности для каждого снимаемого кадра неизвестны, то расчет строят на предположении, что средняя поверхность является горизонтальной плоскостью и поэтому среднее значение α приравнивают нулю.

Учитывая эти предпосылки по отношению к средней экспозиции, все постоянные принимают равными едини-

це, и тогда формула (8.3) после соответствующих преобразований принимает вид

$$\Phi(x, g) = \frac{H'}{H'_{\text{ср}}} \Phi(x=0, g). \quad (8.4)$$

Таким образом, зная соответствующие экспозиции для каждого кадра и пользуясь соотношением (8.4), по соответствующим алгоритмам определяют значения наклонов поверхности, которые затем интегрируют в профили, причем каждому началу профиля задают нулевое значение. Полученная информация вводится в устройство отображения, либо на графопостроитель, в котором строятся рельефные изображения сфотографированной поверхности.

Для точной фотограмметрической обработки панорамных фотоснимков и последующего составления по ним соответствующих топографических карт используют аналитический графопостроитель. Это устройство наряду с устранением геометрических искажений обеспечивает обработку данных на ЭВМ. Прибор позволяет также вносить коррекции искажений за счет кривизны снимаемой поверхности (т. е. выступает в роли фототрансформатора), механических деформаций фотопленки (обусловленных неравномерностью выравнивания и натяжения ее), аберраций объектива (дисторсии) и неточности компенсации сдвига изображения.

Таким образом, как видно из изложенного, процесс автоматизированной обработки в настоящее время является еще трудоемким и дорогим. Однако, несмотря на эти недостатки, ему уделяется большое внимание.

8.6. Методы ускоренной обработки фотоинформации

При космическом фотографировании земной поверхности на Землю передается огромный поток информации различными бортовыми техническими средствами, обработка которой представляет довольно сложный процесс. Для повышения скорости обработки информации, снимаемой с инфракрасных систем, существует ряд методов ускоренной обработки: ускоренного поиска изменений, происшедших на участке местности между двумя моментами наблюдения; сверхбыстрой классификации

местности, основанный на принципе грубого дифракционного анализа ее фотографического изображения, полученного при съемке с борта КА; ускоренной обработки информации, представленной в виде спектрозональных снимков и др.

Первый метод. В основу метода ускоренного поиска изменений, происшедших на участке местности между двумя моментами наблюдения, положен принцип сравнения статистических характеристик, получаемых при накоплении данных о распределении совокупности сигналов, принятых от излучаемого участка местности при двух очередных следующих друг за другом наблюдениях. Полученные с борта КА инфракрасные изображения рассматриваются как пространственное распределение энергии, отражаемое различными точками местности. Изменение же яркости в одинаковых точках двух фотоснимков одних и тех же участков Земной поверхности представляется как изменение на местности.

Для количественной оценки энергетических уровней в каждой точке фотографических изображений осуществляется перевод этих уровней в цифровую информацию. В этом случае шкала возможных амплитуд распределения энергии по фотографическому изображению, эквивалентных мощностям принятых сигналов, квантуется на определенное число уровней, например 64, а площадь изображения делят на элементарное число ячеек и блоков. Для каждой ячейки определяют среднее значение амплитуды, соответствующее среднему значению отражаемой энергии.

Измеряя амплитуды, тем самым осуществляют сбор статистических данных, характеризующих распределение средних значений амплитуд для данного типа местности, на основании которых составляют гистограммы, а затем по известным функциональным зависимостям теории вероятностей определяют статистические характеристики: математическое ожидание, дисперсию распределения величин, моменты, характеризующие асимметрию распределения и островершинность распределения (эксцесс).

В результате статистической обработки определяют значения моментов распределения амплитуд и их стандартные отклонения, которые могут служить хорошими параметрами для оценки как типа местности, так и про-

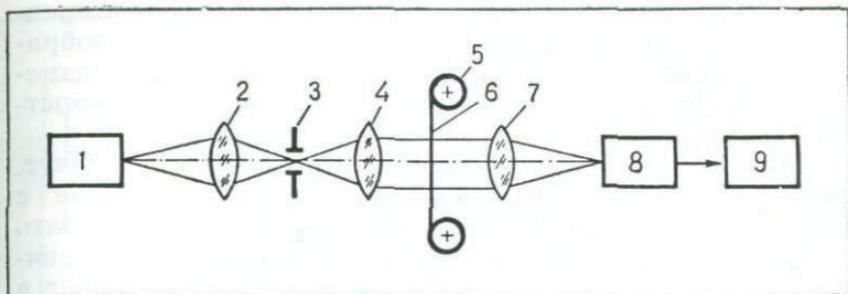


Рис. 8.8. Принципиальная схема установки для получения грубой дифракционной картины изображения аэрофотоснимка:

1 — источник излучения (оптический квантовый генератор); 2 — фокусирующий объектив; 3 — точечное отверстие — щель; 4 — входная линза коллиматора; 5 — катушка с фотопленкой; 6 — фотопленка с прозрачным изображением; 7 — выходная линза коллиматора; 8 — матричный фотоэлектрический приемник светового потока; 9 — устройство электронной обработки и регистрации электрических сигналов

исшедших на ней изменений. Так, например, рассматривая значения моментов, полученных на экране дисплея в виде кривых, убеждаемся, что при анализе и обработке изображений однородной местности имеют вид кривые строго определенной формы, но если на этой же местности имеется объект с другим коэффициентом отражения, то на графиках появляются дополнительные составляющие, характеризующие эти изменения.

Второй метод. Обработка информации по методу сверхбыстрой классификации местности [67] предусматривает получение дифракционной картины, которая может быть получена с использованием установки, принципиальная схема ее представлена на рис. 8.8. Принцип работы этой установки заключается в следующем. Луч лазера 1, фокусируемый с помощью оптической системы 2 на точечную щель 3, на выходе представляется точечным источником, расположенным в фокальной плоскости коллимационной линзы 4. В параллельный световой поток, который образуется входной линзой коллиматора, помещают фотопленку 5 с изображением 6. Информация, заключенная в изображении на фотопленке с помощью выходной коллиматорной оптической системы 7, фокусируется на фотоэлектрический матричный детектор 8, состоящий из 32 клиньев, сходящихся к центру круга,

и 32 концентрических колец. Клинья фотодетектора предназначены для обнаружения граничных линий в изображениях объектов, концентрические кольца — для измерения распределения энергии в зависимости от пространственной частоты изображения.

Магричный фотоэлектрический приемник позволяет, сочетая быстроту оптического преобразования Фурье с процессом перевода данных в цифровую форму, получать дифракционные изображения, воспринимаемые матричным фотоэлектрическим приемником и преобразуемые в цифровую информацию в виде электрических сигналов, которые вводятся в вычислительное устройство 9 для дальнейшей обработки и распознавания. При использовании ЦВМ скорость классификации составляет около 1000 изображений в секунду.

Третий метод. В основном используется при дешифрировании массивов основных видов растительности [67] с использованием спектрозональных фотонегативов дешифрированных объектов съемки. При обработке информации используется автоматизированная система, принципиальная схема которой показана на рис. 8.9.

Основными узлами автоматизированной системы являются цветная телевизионная камера, техническое средство отображения информации экранного типа, аналоговое электронное устройство и счетчик спектров.

Цветная телевизионная камера с помощью собственного сканирующего устройства осуществляет просмотр изображения, зафиксированного на цветном спектрозональном снимке в форме прозрачного диапозитива, одновременно осуществляя считывание и радиометрическое измерение изображения. Подобное считывание может осуществляться одновременно и тремя телевизионными камерами, как это показано на схеме, при условии, что фотографическая информация о местности содержится в трех однотипных фотоснимках, размещенных на пленках с различной спектральной чувствительностью. Фотографические изображения в этом случае получают через разные спектральные фильтры.

На выходе телевизионной камеры как в первом, так и во втором случае возникают три вида видеосигналов от одного и того же участка сфотографированной поверхности. Полученные сигналы представлены в аналоговой форме с соответствующей вспомогательной информацией

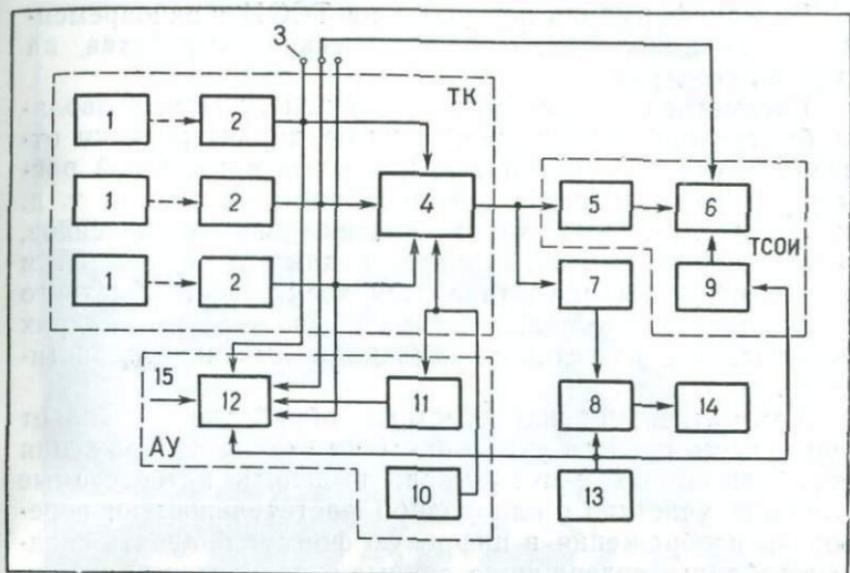


Рис. 8.9. Структурная схема системы для автоматизированной обработки спектрозональных фотоснимков:

1 — черно-белые спектральные диапозитивы; 2 — телевизионные устройства считывания информации и предварительной обработки сигналов; 3 — аналого-спектральных видеосигналов; 4 — приемное устройство электрических сигналов; 5 — частотный дискриминатор; 6 — устройство отображения информации экранного типа; 7 — высокочастотный модулятор; 8 — пространственный фильтр; 9 — генератор маркерных сигналов; 10 — генератор пороговых сигналов; 11 — маркерный генератор; 12 — спектральный индикатор; 13 — генератор стробирующих импульсов; 14 — счетчик спектрального излучения; 15 — сигнал выделения пары цветных сигналов; ТК — телевизионная камера; АУ — аналоговое устройство; ТСОИ — техническое средство отображения информации

и поступают одновременно в приемное устройство для дополнительной обработки и в аналоговое электронное устройство.

В аналоговом устройстве, состоящем из анализатора признаков, стробирующего устройства пространства поля зрения и сумматора, показывающего процент площади кадра, содержащей объекты с заданными спектральными характеристиками, эти сигналы дополнительно обрабатываются и отражаются на спектральном индикаторе 12.

Видеоинформация с приемного устройства 4 поступает в техническое средство отображения информации (ТСОИ), в котором отображаются объекты как выделенные по спектральным признакам, так и имеющие определенные признаки в двух спектральных диапазонах.

Видеоинформация поступает на ТСОИ и одновременно через дополнительные технические устройства на счетчик спектров.

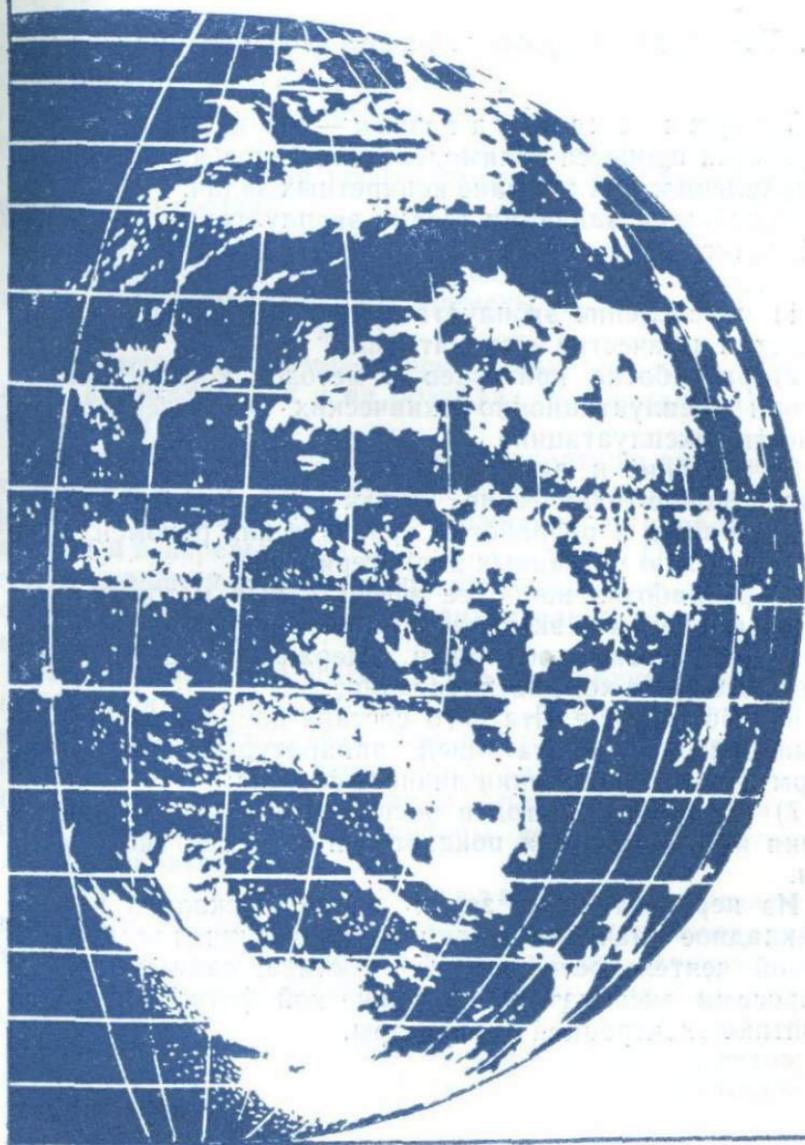
Рассмотренная автоматизированная система позволяет быстро определять спектральные характеристики отдельных участков местности, покрытых однородной растительностью, участков с водной поверхностью, и т. д. Имея спектральные характеристики малых массивов, сельскохозяйственных культур, водных поверхностей и других объектов, представляется возможность быстрого отыскания аналогичных объектов на других кадрах фотопленки с известными спектральными характеристиками.

Автоматизированная система обработки позволяет кроме всего прочего увеличивать на экране изображения обрабатываемых фотоснимков; выделять интересующие площади участков с однородной растительностью; переводить изображения в цифровую форму; получать сводные таблицы, содержащие данные о процентном отношении площадей с различными спектральными характеристиками и др.

Использование автоматизированной системы резко сокращает время на обработку фотоинформации, получаемой с помощью инфракрасной аппаратуры с борта КА.

Часть третья

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ФОТОАППАРАТУРЫ



9.1. Предмет и содержание теории эксплуатации

Теория эксплуатации — это наука о закономерностях процесса взаимодействия человека и техники, направленного на решение конкретных задач.

Основными задачами теории эксплуатации космической фотографической и оптико-электронной аппаратуры являются:

1) определение эксплуатационно-технических характеристик и качества эксплуатации;

2) разработка критериев и методов количественной оценки эксплуатационно-технических характеристик и качества эксплуатации;

3) изучение и анализ факторов, влияющих на эксплуатационно-технические характеристики и качество эксплуатации, и разработка практических рекомендаций по улучшению указанных характеристик;

4) разработка наиболее эффективных методов организации и приемов эксплуатации аппаратуры;

5) обоснование объема и содержания мероприятий, выполняемых в ходе эксплуатации;

6) обоснование штатного состава подразделений, занимающихся эксплуатацией аппаратуры. Разработка форм и методов обучения личного состава;

7) разработка методов экспериментального определения количественных показателей качества эксплуатации.

Из перечисленных задач видно, насколько велико прикладное значение теории эксплуатации для практической деятельности личного состава, занимающегося вопросами эксплуатации космической фотографической и оптико-электронной аппаратуры.

9.2. Основные понятия и определения

Эксплуатация оптико-электронной техники есть совокупность организованных действий личного состава по приведению данного вида техники в рабочее состояние, поддержанию ее в этом состоянии и применению с требуемой эффективностью.

Из этого определения следует, что эксплуатируемая техника может находиться в различных состояниях, определяемых в основном установленной степенью готовности. При этом имеются в виду вопросы хранения техники, технического обслуживания, подготовки к работе, а также поддержания необходимого уровня квалификации личного состава.

Определим эти понятия.

Под хранением понимается поддержание техники в рабочем состоянии в период времени, не связанный с ее подготовкой и применением.

Хранение техники может проводиться как на складах, базах, арсеналах, так и на позициях, в специальных помещениях и т. п.

Хранение оптико-электронной аппаратуры заключается в проведении мероприятий, обеспечивающих ее сохранность от разрушения и повреждений до начала применения и в перерывах между применением. Очень часто период хранения (особенно это относится к космической фотоаппаратуре) оказывается значительно меньше времени ее применения.

Однако даже и в этом случае необходимо иметь в виду, что объекты хранения имеют различную восприимчивость к влиянию внешних факторов: температуре, влажности, давлению, световому и радиальному облучениям, биологическим вредителям. Аппаратура, фотоматериалы и комплектующие приборы должны находиться в гермоупаковке.

Техническое обслуживание — есть комплекс мероприятий, целью которых является поддержание требуемых показателей качества и надежности техники.

Техническое обслуживание, например, включает выполнение таких работ:

- 1) удаление загрязнений с обслуживаемых объектов;
- 2) технические осмотры и проверки укомплектованности, отсутствия повреждений;

3) смазку шарнирных соединений деталей, подверженных износу;

4) приведение техники в готовность;

5) устранение неисправностей;

6) заправку смазывающими жидкостями.

К мероприятиям, проводимым при техническом обслуживании относятся:

контрольные, имеющие целью не допустить применение неисправного или изношенного оборудования. Осуществляются всем руководящим и инженерно-техническим составом, либо инспекцией;

профилактические;

ремонтные работы, которые проводятся с целью устранения небольших неисправностей и повреждений.

Подготовка к применению — это комплекс мероприятий (действий), обеспечивающих перевод техники в рабочее состояние.

Примерами мероприятий, выполняемых при подготовке, являются:

— консервация и реконструкция техники;

— развертывание или свертывание техники;

— установка техники на объект;

— проверка на функционирование и т. п.

Технический ресурс — установленный срок службы изделия до очередного капитального ремонта, в течение которого обеспечивается его нормальная работа при соблюдении установленных правил эксплуатации.

Гарантийный срок — срок службы изделия, в течение которого заводом-изготовителем гарантируется его надежная работа при соблюдении установленных правил эксплуатации.

В практической деятельности часто пользуются понятием «регламентные работы», под которыми понимается техническое обслуживание, проводимое в соответствии с единым регламентом в строго установленные сроки. Техническое обслуживание, осуществляемое не только по регламенту, а и по мере необходимости, относится к нерегламентным работам.

Система основных терминов и понятий теории эксплуатации приведена на схеме (рис. 9.1).

Организация эксплуатации различных видов техники имеет свои специфические особенности. Под поня-



Рис. 9.1. Схема основных терминов и понятий теории эксплуатации

тием «техника» имеют в виду широкий класс фотографической и телевизионной автоматической аппаратуры. Все многообразие аппаратуры для удобства рассмотрения целесообразно разделить на два основных класса:

- одноразового применения;
- многоразового применения.

Характерной особенностью многих приборов является сравнительно продолжительный период хранения, после которого проводится цикл подготовки к использованию. Естественно, что в ходе хранения осуществляются мероприятия по техническому обслуживанию.

К такой аппаратуре относятся: фотографическая, инфракрасная; телевизионная; приборы систем управления.

Для аппаратуры многократного применения характерным является чередование периодов хранения и применения.

К такого вида аппаратуре относятся многие наземные системы и приборы, обеспечивающие работу космической фотоаппаратуры. При переходе от одного периода к другому аппаратура проходит цикл

мероприятий по техническому обслуживанию, связанный с ее подготовкой.

Иногда в отдельный класс выделяют аппаратуру длительного непрерывного использования. В период ремонта аппаратура этого класса находится в нерабочем состоянии, поэтому непрерывное использование в данном случае является понятием условным.

Дежурный режим. В процессе хранения в этом режиме могут находиться системы всех видов. Для дежурных систем характерным является то, что они полностью или частично подготовлены к работе, но находятся в выключенном состоянии до поступления команды на применение.

9.3. Эксплуатационно-технические характеристики фотоаппаратуры

Вся совокупность параметров, характеризующих эффективность фотографической аппаратуры, может быть разделена на три основных класса:

— тактических характеристик (съемочный масштаб, перекрытие, зона обзора, дальность действия и др.);

— технических характеристик (светосила, фокусное расстояние, мгновенный угол поля зрения, разрешающая способность и др.);

— эксплуатационно-технических характеристик (надежность, эксплуатационная технологичность, готовность, долговечность).

Интенсивность отказов — условная плотность вероятности отказа устройства в некоторый момент времени при условии, что до этого момента отказа не было.

Все эти характеристики должны быть взаимосвязаны. Какими бы высокими тактико-техническими характеристиками не обладала система, эффективность ее использования может быть сведена к нулю, если она будет обладать низкими эксплуатационно-техническими характеристиками. Численные значения указанных характеристик являются определяющими при организации процесса эксплуатации конкретных образцов техники. Что же понимается под эксплуатационными характеристиками?



Рис 9.2. Кривая интенсивности отказов элементов

Надежность — свойство аппаратуры сохранять свои выходные параметры в определенных пределах при данных условиях эксплуатации в течение заданного промежутка времени.

Сложность оценки надежности космической фотоаппаратуры вытекает из специфических особенностей.

1. Малый объем статической совокупности ограничивает применение классических методов математической статистики.

2. Многообразие типов применяемых компонентов, надежность которых исследована недостаточно.

3. Тяжелые условия работы, оказывающие большое влияние на надежность.

4. Высокие требования к надежности ввиду чрезвычайной важности предназначения и большой стоимости, которая обуславливает необходимость высокой точности и достоверности оценки.

Кривая зависимости интенсивности отказов элементов приведена на рис. 9.2.

Полагая, что основы теории надежности читателю известны, отметим, что количественные значения надежности конкретных типов аппаратуры в прямом смысле влияют на организацию процесса эксплуатации.

Так, например, низкая надежность аппаратуры снижает эффективность ее использования и готовность и вынуждает проводить в ходе эксплуатации трудоемкие профилактические и регламентные работы, иметь значительный объем дорогостоящего запасного имущества контрольно-измерительной аппаратуры, приборов и т. п.

При этом квалификация личного состава должна быть достаточно высокой, ибо требуется проводить ремонт достаточно сложных фотографических и оптико-

электронных систем. Поэтому для современных систем и сложных комплексов вопросы обеспечения высокой надежности приобретают большое значение.

Эксплуатационная технологичность — есть совокупность свойств конструкции системы или прибора, определяющих ее приспособленность для проведения мероприятий по подготовке к применению и техническому обслуживанию.

Одним из важнейших свойств аппаратуры является ее ремонтпригодность. Под ремонтпригодностью понимают свойство аппаратуры, определяющее ее приспособленность к проведению операций по ремонту и настройке. Следует иметь в виду, что некоторые типы космической аппаратуры не допускают проведения ремонтных работ ни в период хранения, ни в период использования. Для такой аппаратуры показатели ремонтпригодности теряют смысл.

В последние годы вопросам обеспечения высокой ремонтпригодности уделяется большое внимание как в нашей стране, так и за рубежом. Исключительно большое значение для космических оптико-электронных приборов имеет такая эксплуатационно-техническая характеристика, как готовность.

Готовность — это способность аппаратуры к переходу из состояния хранения в состояние непосредственного использования. Готовность как свойство аппаратуры является производной от совокупности свойств надежности и эксплуатационной технологичности. Например, готовность непрерывно функционирующей системы тем выше, чем выше ее надежность и ремонтпригодность. Важнейшей характеристикой любого вида аппаратуры является ее долговечность.

Долговечность — способность аппаратуры к сохранению и поддержанию заданной эффективности в определенных условиях эксплуатации. Наряду с этим определением, которое является общим, различают техническую и моральную долговечность.

Под технической долговечностью понимают способность аппаратуры к сохранению и поддержанию заложенных в нее свойств при заданных условиях эксплуатации. Техническая долговечность допускает возникновение отказов в системах, а также возможность их устранения и позволяет использовать систему много-

кратно на протяжении достаточно большого промежутка времени, после которого дальнейшая эксплуатация системы либо невозможна, либо нецелесообразна. Для отдельных элементов (лампы, сопротивления, конденсаторы) понятия технической долговечности и надежности совпадают.

Под моральной долговечностью понимается способность аппаратуры к удовлетворению возрастающих требований к ее эффективности в условиях бурного развития техники.

При эксплуатации фотографическая и оптико-электронная системы подвергаются воздействию механических (вибраций, ударов, постоянного ускорения) и электрических нагрузок (напряжения, мощности), работают при различных окружающих условиях (температура, влажность, давление). Влияние указанных факторов проявляется в виде отклонений параметров системы от номинальных (расчетных) значений. Эти отклонения могут быть настолько значительными, что система становится непригодной к использованию, так как перестает удовлетворять предъявляемым к ней требованиям, систему считают отказавшей.

Для оценки оптико-электронной и фотографической систем в эксплуатационных условиях пользуются понятием надежности системы. Она оценивается количественно и рассчитывается на основе анализа поведения основных параметров системы при эксплуатации.

Для простых систем приемлема качественная характеристика надежности, под которой понимают способность системы безотказно работать в течение заданного интервала времени в определенных условиях эксплуатации. Для сложных систем, таких, как фотографическая, качественная характеристика надежности не может служить научной основой проектирования, производства и эксплуатации системы. Количественное значение надежности системы должно определяться на основе анализа технических параметров системы в эксплуатационных условиях.

Вследствие того что на отдельные технические параметры оказывают влияние различные факторы (конструктивные, производственные и эксплуатационные), учесть которые аналитически невозможно, количественная оценка надежности как меры изменений ее

параметров возможна только на основе теории вероятности или ее специальных разделов: теории случайных процессов и математической статистики.

Под количественным значением надежности опико-электронной системы будем понимать вероятность выполнения системой заданных ей функций в течение требуемого интервала времени в заданных условиях эксплуатации. Функции системы определяются целевым ее назначением. Если выходные параметры, характеризующие выполнение системой определенной функции, находятся в границах допусков, то система работает идеально.

При больших отклонениях выходных параметров за границу допуска система работает менее качественно, т. е. с меньшей эффективностью.

Под эффективностью состояния системы будем понимать вероятность выполнения системой заданных функций при определенном значении параметра. В случае непрерывного изменения параметра системы ее надежность будет определяться выражением:

$$R(t, \varepsilon) = \int_{-\infty}^{\infty} E(\beta) \omega(\beta, t, \varepsilon) d\beta,$$

где $E(\beta)$ — эффективность состояния системы, характеризующая значение ее параметра β , $\omega(\beta, t, \varepsilon)$ — плотность вероятности параметра β при условиях эксплуатации ε .

Ту или иную задачу (оценку точности или надежности) можно решить, используя эту формулу, путем соответствующего выбора функции эффективности состояния системы. Например, если эффективность равна единице для значений параметра в пределах допусков и равна нулю для всех других значений, то формула даст оценку точности системы. Эта формула свидетельствует о неразрывной связи оценок точности и надежности систем. Три главные составляющие характеризуют надежность системы: безотказность, восстанавливаемость и готовность.

Безотказность опико-электронной или фотографической системы. Безотказность системы является одной из главных и определяющих составных частей надежности автоматической системы. Поскольку бортовые

оптико-электронные и фотографические системы не восстанавливаются, как правило, в течение требуемого интервала времени работы, характеристики надежности этих систем совпадают с характеристиками безотказности.

Под безотказностью понимается вероятность того, что выходные параметры системы будут находиться в границах заданных техническими условиями допусков в течение определенного времени в реальных условиях эксплуатации.

В интервал времени работы и в заданных условиях система может находиться в одном из двух состояний: исправном, удовлетворяющем предъявленным требованиям, и в неисправном, не удовлетворяющем требованиям. Эти состояния системы представляют противоположные события, поэтому для них справедливо равенство, называемое основным статическим уравнением безотказности системы,

$$P + Q = 1,$$

где P — безотказность системы, Q — вероятность отказа системы.

Для оценки надежности системы ее следует разделить на элементы. Под элементом понимается конструктивно-самостоятельная часть, имеющая определенное назначение и выполняющая требуемые функции. Элементом могут считаться детали, узлы или отдельные единицы (линзы, зеркала, объективы, фотоприемники, фотореле, сопротивления, конденсаторы, электронные лампы, транзисторы и т. п.). После того как система разделена на элементы для анализа надежности, в качестве основной характеристики элемента можно считать его безотказность.

Среднее время безотказной работы — краткое название математического ожидания случайного времени до момента очередного отказа, в случае когда понятие среднего времени работы до отказа и среднего времени работы между отказами полностью эквивалентны.

Среднее время восстановления — математическое ожидание величины перерыва в работе восстанавливаемого устройства при устранении отказа.

Среднее время работы до отказа — математическое ожидание случайного времени работы до первого отказа.

9.4. Основные требования к количественным показателям эксплуатационно-технических характеристик

Одной из основных задач теории эксплуатации является разработка совокупности количественных показателей (критериев), методов их расчета и экспериментальной проверки.

Необходимость количественной оценки эксплуатационно-технических характеристик возникает на этапе разработки ТТЗ на вновь создаваемую аппаратуру, при оперативном планировании задач, при определении и планировании мероприятий по техническому обслуживанию, при оценке работы обслуживающего личного состава, при определении штатного состава обслуживающих подразделений. Как и в теории надежности, в теории эксплуатации могут быть использованы временные, вероятностные и стоимостные характеристики.

К временным показателям относятся: время безотказной работы, время выработки на один отказ, время подготовки аппаратуры к применению, время ремонта, срок службы и др. Поскольку время в приведенных характеристиках является величиной случайной, целесообразно пользоваться моментными характеристиками, такими, как математическое ожидание и дисперсия.

Например, в качестве количественного показателя долговечности используется средний срок службы, а в качестве количественного показателя ремонтпригодности — среднее время и дисперсия времени ремонта (восстановления). В некоторых случаях приходится решать вероятностные задачи. Например, определить вероятность подготовки аппаратуры за заданное время, вероятность ремонта за заданное время.

Весьма важным для практики эксплуатации является стоимостная оценка. Например: средняя стоимость и средняя трудоемкость подготовки системы к применению; средняя стоимость эксплуатации.

9.5. Особенности подготовки аппаратуры к использованию в космосе

Показатели готовности аппаратуры. Приведем типичную временную диаграмму работы аппаратуры

Производство	Приемка	Хранение	Подготовка	Работа в космосе
$T_{\text{п}}$	$T_{\text{.}}$	T_{I}	T_2	T

За время $T_{\text{п}} = T_2 - T_1$ должен быть проведен определенный комплекс мероприятий, тем не менее T является величиной случайной. Эта величина включает в себя: степень надежности аппаратуры, состояние личного состава, ведущего подготовку, условия работы личного состава, степень оснащенности контрольной аппаратурой, случайные факторы (разбилась лампочка контроля и т. п.). Поскольку $T_{\text{п}}$ — величина случайная, то ее характеризует среднее значение времени подготовки (среднее время подготовки системы)

$$T_{\text{п}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{n_i}}{N},$$

где t_{n_i} — время, затраченное на перевод системы в заданное состояние; N — число опытов подготовки.

В подразделениях обслуживания эта величина определяется путем обработки статистического материала.

Итак, среднее время подготовки это первый показатель готовности. Вторым показателем готовности является вероятность подготовки за заданное время (доверительная вероятность подготовки). Учитывая, что фотоаппаратура уникальна, $T_{\text{п}}$ определяют на основании ограниченного числа экспериментов (4—6, а иногда и менее). С этой целью используется аппарат теории вероятности, в котором рассматривается обработка результатов при малом числе измерений.

Приведем последовательность расчета доверительной вероятности и доверительного времени подготовки.

1. Определим требуемое значение величины T_n по экспериментальным данным

$$\tilde{m}(\bar{T}_n) = \frac{1}{N} \sum_1^N t_{n_i}$$

2. Определим несмещенную оценку для дисперсии величины

$$\tilde{D}(\bar{T}_n) = \frac{1}{N-1} \sum_1^N [t_{n_i} - \tilde{m}(\bar{T}_n)]^2$$

3. Зададимся доверительной вероятностью подготовки $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ (или несколькими значениями доверительной вероятности).

4. По значениям β и $n-1$, пользуясь таблицей распределения Стьюдента, определяем коэффициент t_β , по которому находим величину доверительного интервала

$$\Delta m(\bar{T}_n)_\beta = t_\beta \sqrt{\frac{\tilde{D}(\bar{T}_n)}{N}}$$

Пример. При подготовке инструкции по эксплуатации фотоаппаратуры необходимо определить вероятность подготовки ее за заданное время.

Исходные данные: за время эксплуатации опытной партии из трех фотоаппаратов были получены следующие величины времени подготовки — 3, 4 и 5 ч

$$1. \tilde{m}(\bar{T}_n) = \frac{3+4+5}{3} = 4,$$

$$2. \tilde{D}(\bar{T}_n) = \frac{1^2+0^2+1^2}{3-1} = 1.$$

5. Зададимся шестью значениями вероятности и найдем коэффициент t_β

β	t_β	β	t_β
0,8	1,88	0,98	6,96
0,9	2,92	0,99	9,92
0,95	4,30	0,999	31,6

6. Определим величину верхней границы доверительного интервала (нижняя граница нас не интересует)

$$\Delta m (\tilde{T}_n)_{0,8} = 1,88 \cdot 0,58 = 1,1 \quad (\tilde{T}_{n\beta})_{0,8} = 5,1$$

$$\Delta m (\tilde{T}_n)_{0,9} = 2,92 \cdot 0,58 = 1,7 \quad (\tilde{T}_{n\beta})_{0,9} = 5,7$$

$$\Delta m (\tilde{T}_n)_{0,95} = 4,9 \cdot 0,58 = 2,8 \quad (\tilde{T}_{n\beta})_{0,95} = 6,8$$

$$\Delta m (\tilde{T}_n)_{0,98} = 6,96 \cdot 0,58 = 4,0 \quad (\tilde{T}_{n\beta})_{0,98} = 8,0$$

$$\Delta m (\tilde{T}_n)_{0,99} = 9,92 \cdot 0,58 = 5,7 \quad (\tilde{T}_{n\beta})_{0,99} = 9,7$$

$$\Delta m (\tilde{T}_n)_{0,999} = 31,6 \cdot 0,58 = 16,0 \quad (\tilde{T}_{n\beta})_{0,999} = 20,0$$

$$\tilde{T}_{n\beta} = \tilde{m} (\tilde{T}_n)_{\beta} + \Delta m (\tilde{T}_n)_{\beta}$$

Такой показатель готовности, как вероятность подготовки за заданное время, находит широкое применение и при планировании периода работы, и при оценке эффективности систем. Обычно требуемое значение вероятности подготовки оговаривается заранее в соответствующих документах (технических заданиях).

Космические фотографические системы относятся к системам одноразового использования с определенным ресурсом работы и определенным циклом включений и выключений. Для таких систем вводится дополнительный показатель — коэффициент готовности, под которым понимают вероятность того, что в заданный момент времени система исправна, и вычисляют его по формуле

$$K_{\Gamma} = \beta_{\Gamma},$$

где β_{Γ} — вероятность исправного состояния.

Экономические показатели готовности: средняя стоимость подготовки, средняя трудоемкость подготовки.

9.6. Математическое определение основных показателей надежности невосстанавливаемых систем

Под невосстанавливаемыми понимаются такие системы, работа которых после отказа считается полностью невозможной или нецелесообразной. К ним относится

большинство бортовых фотографических и оптико-электронных систем. Само понятие в первую очередь характеризуется не видом данной аппаратуры, а ее специфическим назначением.

1. Вероятность безотказной работы системы в интервале времени от 0 до t_0

а) Вероятностное определение Вероятность отказа

$$P(t_0) = P(\Theta \geq t_0) = 1 - F(t_0) \quad Q(t_0) = 1 - P(t_0)$$

где Θ — случайная длительность времени безотказной работы системы до появления отказа, $F(t_0)$ — функция распределения случайной величины Θ ;

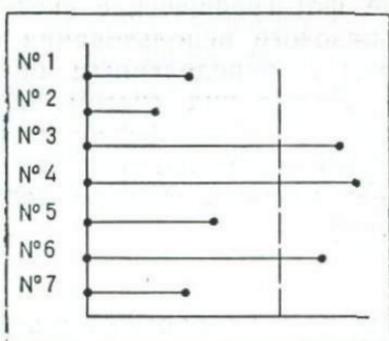
б) Статистическое определение Вероятность отказа

$$\hat{P}(t_0) = \frac{N(t_0)}{N(0)} = 1 - \frac{n(t_0)}{N(0)} \quad \hat{Q}(t_0) = \frac{n(t_0)}{N(0)},$$

где $N(t_0)$ — число устройств, не отказавших в течение требуемого интервала времени t_0 , $N(0)$ — число исправных устройств в момент времени $t=0$, $n(t_0)$ — число отказавших устройств к моменту времени t_0 .

Временная диаграмма, поясняющая статистические

определения понятий $\hat{P}(t_0)$ и $\hat{Q}(t_0)$



Реализация № 1—7 составляют $N(0)$ устройств; реализация № 1, 2, 5, 7 — t_0 устройств; реализация № 3, 4, 6 — $N(t_0)$ устройств.

2. Частота отказов [плотность распределения $F(t)$] системы в момент времени t .

а. Вероятностное определение

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \frac{d}{dt} Qt,$$

где $f(t)$ — плотность вероятности того, что случайное время безотказной работы устройства окажется меньше t , или плотность вероятности отказа до момента времени t .

Вероятность отказа и вероятность безотказной работы устройства в течение определенного интервала времени выражаются через частоту отказов следующим образом:

$$Q(t_0) = \int_0^{t_0} f(x) dx;$$

$$P(t_0) = \int_0^{\infty} f(x) dx.$$

б. Статистическое определение

$$\hat{f}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N(0) \Delta t},$$

где $n(t)$ — число устройств, отказавших к моменту времени t , $N(0)$ — число исправных устройств в момент $t = 0$, или

$$\hat{f}(t) = - \frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{N(0) \Delta t}.$$

3. Интенсивность отказов устройств в момент времени.

а. Вероятностное определение

$$\lambda(t) = \frac{1}{1 - F(t)} \cdot \frac{d}{dt} F(t) = \frac{f(t)}{P(t)},$$

где $\lambda(t)$ — условная плотность вероятности отказа устройств для момента времени t при условии, что до момента времени t отказ устройства не произошел.

Тогда вероятность безотказной работы устройства

$$P(t_0) = e^{-\int_0^{t_0} \lambda(y) dy}.$$

б. Статистическое определение

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N(t) \Delta t} = - \frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{N(t) \Delta t},$$

где $N(t)$ — число устройств, исправных к моменту времени t , $n(t)$ — число устройств, отказавших к моменту

времени t , $\hat{\lambda}(t)$ — число отказов в единицу времени, отнесенное к числу исправных устройств в момент времени t .

4. Среднее время работы устройства до отказа.

а. Вероятностное определение

$$T_1 = M \{ \theta_1 \};$$

$$T_1 = \int_0^{\infty} x f(x) dx;$$

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(x) dx,$$

где T_1 — математическое ожидание (среднее значение) случайного времени работы устройства до отказа.

б. Статическое определение

$$\hat{T}_1 = \frac{1}{N(0)} \sum_{i=1}^{N(0)} \theta_{(i)}.$$

Знание одной любой из функций $P(t)$, $Q(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ дает возможность определить три остальные.

Известная функция	Формулы для определения трех остальных функций			
	$P(t)$	$Q(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$P(t)$	—	$1 - P(t)$	$-\frac{d}{dt} P(t)$	$-\frac{1}{P(t)} \frac{d}{dt} P(t)$
$Q(t)$	$1 - Q(t)$	—	$\frac{d}{dt} Q(t)$	$\frac{1}{1 - Q(t)} \times$ $\times \frac{d}{dt} Q(t)$
$f(t)$	$\int_t^{\infty} f(x) dx$	$\int_0^t f(x) dx$	—	$\frac{f(x)}{\int_0^{\infty} f(x) dx}$
$\lambda(t)$	$e^{-\int_0^t \lambda(x) dx}$	$1 - e^{-\int_0^t \lambda(x) dx}$	$-\int_0^t \lambda(x) dx$	—

5. Показатели надежности невосстанавливаемого элемента.

а. Произвольный закон распределения времени до отказа $F(t)$

Показатель	Точное значение
$P(t_0)$	$1 - F(t_0)$
$Q(t_0)$	$F(t_0)$
$P(x, x + t_0)$	$\frac{1 - F(x + t_0)}{1 - F(x)}$
$Q(x, x + t_0)$	$1 - \frac{1 - F(x + t_0)}{1 - F(x)} = \frac{F(x + t_0) - F(x)}{1 - F(x)}$
T	$\int_0^{\infty} x f(x) dx = \int_0^{\infty} P(x) dx$

б. Экспоненциальный закон распределения времени до отказа $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$

Показатель	Точное значение	Приближенное значение	Погрешность
$P(t_0)$	$e^{-\lambda t_0}$	$1 - \lambda t_0$	$\delta_+ < \frac{(\lambda t_0)^2}{2}$
$Q(t_0)$	$1 - e^{-\lambda t_0}$	λt_0	$\delta_- < \frac{(\lambda t_0)^2}{2}$
$P(x, x + t_0)$	$e^{-\lambda t_0}$	$1 - \lambda t_0$	$\delta_+ < \frac{(\lambda t_0)^2}{2}$
$Q(x, x + t_0)$	$1 - e^{-\lambda t_0}$	λt_0	$\delta_- < \frac{(\lambda t_0)^2}{2}$
T	$\frac{1}{\lambda}$	—	—

Пример. Фотоэлемент бортовой фотографической системы имеет экспоненциальный закон распределения времени работы до отказа с параметром распределения $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-5} - \frac{1}{4}$.

Вычислить основные показатели надежности элемента.

Вероятность	Точное значение, ч	Приближенное значение, ч
Безотказной работы за $t_0 = 2000$ ч $P(t_0) = e^{-\lambda t_0} = e^{0,05}$	$P(t_0) = 0,9512$	$\tilde{P}(t_0) = 0,95$
Отказа за время t_0 $Q(t_0) = 1 - e^{-\lambda t_0}$	$Q(t_0) = 0,0488$	$\tilde{Q}(t_0) = 0,05$
Безотказной работы от $x = 500$ ч до $x + t_0 = 2500$ ч $P(x, x + t_0) = 0,9512$	$P(x, x + t_0) = 0,9512$	$\tilde{P}(x, x + t_0) = 0,95$
Среднее время работы до отказа $T = \frac{1}{\lambda}$	$T = 40\,000$	

9.7. Система мероприятий по подготовке фотоаппаратуры к применению

Проводимые в период подготовки мероприятия можно разделить на следующие группы.

1. Вспомогательные мероприятия. Цель этих мероприятий — подготовить аппаратуру к проведению комплекса подготовительных работ. Примерами вспомогательных операций являются: установка межблочных соединений, подвод кабелей от источников питания, развертывание и подготовка контрольно-измерительной аппаратуры, проверка ее состояния, стыковка элементов комплекта с фотоаппаратурой.

2. Контрольные мероприятия. Задача контрольных мероприятий — обеспечение исправного состояния аппаратуры к моменту начала работы. Методы контроля: визуальные, качественные, инструментальные.

При визуальном контроле определяется комплектность фотоаппаратуры и неисправности с внешним проявлением (наличие коррозии, трещин, скол объектива, помутнение фильтра и др.). При качественном контроле

выявляются обычно полные, явные отказы. Для получения полной гарантии в исправности аппаратуры применяют инструментальный контроль. Инструментальный контроль производится как с помощью серийной КИА, так и с помощью аппаратуры, предназначенной для проверки данного прибора и контроля его параметров. Специальная проверочная аппаратура может быть оформлена в виде как вынесенного отдельного прибора, так и встроенных в систему устройств.

Для системы одноразового использования нет смысла иметь встроенные устройства контроля, в то время как для систем непрерывно или многократно используемых преимущества встроенного контроля очевидны.

3. Ремонтные мероприятия. Эти мероприятия направлены на устранение неисправностей, обнаруженных в процессе подготовки.

4. Профилактические мероприятия. Целью этих мероприятий является предупреждение отказов аппаратуры, возникающих как в процессе подготовки, так и при работе в космосе.

5. Контроль заполнения документации.

9.8. Оценка целесообразности и достоверности контроля состояния аппаратуры в процессе подготовки

В бортовой фотографической и оптико-электронной аппаратуре часто отказываются от комплекса мероприятий по подготовке аппаратуры. Она используется без предварительной ее проверки. В связи с этим перед инженером, разрабатывающим положение по использованию и эксплуатации конкретных систем, возникает вопрос об оценке целесообразности применения контроля в процессе подготовки или оценке целесообразности отдельных контрольных мероприятий. Действительно, если отказаться от контрольных мероприятий, то некоторая часть аппаратуры, в которой произошли отказы за период предшествующего хранения, окажется неисправной и не выполнит поставленной задачи. Это приведет к значительному материальному ущербу. С другой стороны отказ от контроля уменьшит стоимость, время подготовки и т. п.

Введем обозначения: $\Pi_{ущ}$ — стоимость ущерба; $\Pi_{к}$ — стоимость контроля (сюда входит стоимость аппаратуры, оборудования), тогда коэффициент целесообразности контрольных мероприятий можно записать

$$K_{цк} = \frac{(1 - P) \Pi_{ущ}}{\Pi_{к}},$$

где P — вероятность невозникновения ущерба, численно равная вероятности безотказной работы аппаратуры (за период хранения или пользования).

Если $K_{цк} > 1$, то проведение контрольных мероприятий экономически целесообразно, при $K_{цк} < 1$ — невыгодно.

Пример. Из 200 приборов было 20 отказов, $\Pi_{ущ} = 2$ млн. р. (10 чел. по 300 руб. за 8 лет = 240 тыс. р. + 2 млн. аппаратура).

Вероятность отказов $P = \frac{20}{200} = 0,1$. Вероятность безотказной работы равна 0,9.

Тогда $K_{цк} = \frac{0,9 \cdot 2}{2,24} = 0,82$. Контроль нецелесообразен.

В ряде случаев такой контроль сложен, особенно если нет опыта эксплуатации.

Глава 10. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ФОТОГРАФИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

10.1. Общие положения

Безаварийная работа и постоянная готовность к работе фотографического и оптико-электронного оборудования определяется не только качеством конструкции и ее изготовления, но и соответствующим своевременным, тщательным обслуживанием материальной части.

Обслуживание оборудования производится согласно инструкциям и указаниям по эксплуатации и общим

положениям наставления. Механики и техники непосредственно отвечают за исправность и постоянную готовность обслуживаемых аппаратов. Техническое руководство и контроль за их работой осуществляются инженером, несущим ответственность за правильность эксплуатации и обслуживание всего фотографического и оптико-электронного оборудования.

Фотооборудование, устанавливаемое на космическом аппарате, подразделяется на съемное и стационарное. Разделение это условное, но оно позволяет детальнее разработать указания по эксплуатации. К съемному фотооборудованию можно отнести все то, что входит в комплект фотоаппаратуры. К стационарному можно отнести то, что принадлежит и монтируется на космическом аппарате: детали крепления, фотолюки, пульта управления и прочие приборы и механизмы. При монтаже фотооборудования на космическом аппарате необходимо предусмотреть, чтобы было исключено воздействие на фотопленку проникающей радиации, чтобы аппаратура была устойчива к воздействию вибраций и ускорений, размеры фотолюков не должны ограничивать светового потока, проходящего от объекта фотографирования через объектив и строящего изображения в фокальной плоскости фотоаппарата.

Обслуживание фотооборудования состоит из:

- а) предварительной подготовки,
- б) предполетной подготовки,
- в) регламентных работ.

10.2. Предварительная подготовка

Этот вид подготовки заключается в проверке комплектности, основных параметров и элементов регулировки.

Под основными параметрами понимают основные тактико-технические показатели, присущие данному виду фотоаппаратуры, номинальные величины которых оговорены тактико-техническими требованиями или техническими условиями и изложены в формуляре (например, фокусное расстояние объектива, разрешающая способность аппаратуры, величины выдержек затвора, продолжительность рабочего цикла).

ТАБЛИЦА 16
Цикловая таблица

Элементы цикла	Число оборотов входного вала камерной части	
	фактиче- ское	по техническим условиям
Экспозиция	0,00	0,00
Закрывание предохранительных крышек объектива	0,65	Не более 0,25
Потухание лампочек подсвета регистрационных приборов	0,82	Не более 1,00
Отрыв прижимного стола кассеты от прикладной камеры	1,22	0,5—1,5
Начало перемотки фотопленки	2,12	1,25—2,5
Фактическое начало цикла работы фотоаппарата	5,2	—
Конец перемотки пленки	8,16	7,25—8,5
Начало открывания предохранительных крышек объектива	8,37	Не более 9,0
Прижим стола кассеты к прикладной рамке камеры	9,10	8,50—9,30
Загорание лампочек подсвета регистрационных приборов	9,63	Не более 9,00
Экспонирование	10,00	10,00

К элементам регулировки относятся условия, определяющие надежную и согласованную работу отдельных механизмов фотооборудования, поддающихся изменению в известных пределах без нарушения основных параметров, например предельная минимальная освещенность, обеспечивающая срабатывания фотореле, и т. п.

Осмотр и проверка заключаются в наружном осмотре частей и механизмов (отсутствие помятостей, повреждений и коррозии), при котором особое внимание необходимо обратить на состояние кожухов, командного прибора и бленды объектива, а также на отсутствие повреждений оптики (выколки, расклейки линз, трещины); в проверке плотности затяжки винтовых и болтовых соединений (проверка отверткой и ключом); в проверке состояния электропроводки и ее изоляции (отсутствие замыканий проводов между собой и на корпус, закрепление проводов в штепсельных разъемах,

надежный контакт др.), производимой пробником или омметром; в проверке правильности цикла работы аппарата (по циклограмме) (табл. 16); в апробировании работы механизмов (вручную) и всего аппарата в целом от аккумуляторов (правильность транспортирования пленки; отсутствие местных затираний и перекосов, работа сигнализации); в проверке состояния электрообогрева по величине потребляемого тока (амперметром).

Помимо перечисленного, производят проверку дополнительных агрегатов, являющихся особенностью данного типа аппарата.

Аппаратура допускается к эксплуатации при положительных результатах проверок и соответствии его параметров техническим условиям для данного типа.

Результаты предполетной подготовки и проверки заносятся в соответствующие разделы формуляра.

10.3. Предполетная подготовка

Предполетная подготовка заключается в проверке стационарного оборудования космического носителя. В этом случае проверяются точность и качество крепления всех деталей бортового оборудования, надежность электропроводки, надежность открывания створок фотолюков, надежность работы систем передачи фотоинформации на землю, контролируется точность расположения объективов над центрами фотолюков и отсутствие виньетирования. Проверяется надежность работы системы герметизации и термостатирования фотоотсека.

Предполетная подготовка заключается также в осмотре фотооборудования, производимом непосредственно перед стартом. В этом случае, как правило, проверяют: снятие предохранительных крышек с объективов, надежность присоединения электрошнуров, установку требуемых комплектов светофильтров, установку дополнительных фотокассет, работу системы обогрева, работу системы запрета фотографирования, работу системы автоматической установки экспозиции. Для оценки надежности работы фотоаппаратуры производится несколько пробных фотоснимков. При этом наблю-

дается работа командных приборов, работа механизма транспорта, работа затвора.

Если космическое фотографирование предполагается полностью автоматическое, то в результате предполетной подготовки должен быть выполнен весь объем работ, предусмотренных описанием и конструкцией по техническому обслуживанию автоматической фотоаппаратуры.

Если предполагается, что фотографирование будет выполнять экипаж летательного аппарата, то в предполетной подготовке инженер экипажа должен принимать участие.

Кроме того, экипаж должен четко усвоить порядок работы с фотоаппаратурой при подготовке и при выполнении фотографирования. Вначале следует убедиться в нормальных условиях фотоотсека по показаниям приборов давления и температуры. При подходе к объекту фотографирования открыть фотолюк и в нужный момент включить фотоаппаратуру в работу, следить по показаниям счетчиков за нормальной работой аппаратуры. Над выходным объектом выключить фотоаппаратуру из работы и закрыть фотолюк.

10.4. Регламентные работы

Фотоаппаратура рассчитана на безотказную работу в условиях нормальной эксплуатации, под которой подразумеваются периодические осмотры, чистка деталей электрической схемы и механизмов, а также смазка последних и устранение мелких дефектов.

Износ деталей механизмов аппаратов происходит неодновременно; более быстро изнашиваются фрикционные соединения, пружинные сочленения, коллекторы и щетки электромоторов, контактные группы, соединительные кабели и амортизаторы. Дефекты аппаратов, вызывающие их отказы, возникают не только вследствие механического износа деталей и подгорания контактов при работе, но и под влиянием вибраций; ударов и толчков, а также из-за переменной влажности и температуры. Под влиянием последних факторов происходит ослабление винтовых и болтовых соединений, деформация отдельных наиболее жестких деталей, за-

грязнение и коррозия деталей, окисление поверхностей контактов, нарушение изоляции электропроводки и изменение вязкости смазки вследствие ее загрязнения, высыхания и замерзания.

Таким образом, для предупреждения отказов оборудования возникает необходимость осмотра его после определенного периода работы (циклов), а также и через определенное регламентное время, независимо от объема проделанной работы.

Регламентные работы имеют целью обеспечить регулярное наблюдение за состоянием фотосъемочного и обеспечивающего оборудования. Для этого в определенные сроки производятся работы, указанные в технической инструкции данного фотоаппарата. Эти работы выполняются либо персоналом, работающим на земле, либо бортовым инженером, если фотоаппаратура эксплуатируется несколькими сменными экипажами летательного аппарата.

10.5. Уход за аппаратурой и ее хранение

Смазка и чистка. Своевременная смазка деталей аппаратов, а также использование соответствующих масел во многом определяют безотказность и сохранность оборудования.

Для смазки деталей применяются как жидкие, так и густые (консистентные) масла исключительно с низкой температурой замерзания. Жидкие масла марки МВП и № 5 (ОСТ Н-1417) имеют температуру замерзания ниже -60°C . Они идут для смазки осей и подшипников лепестков и валиков шторных затворов, осей анкерного механизма командного прибора, подшипников скользящего трения и других мелких деталей механизмов.

Густые смазки марки ГОИ-54 и 2Ц ОСТ Н-417, вазелиновое масло и церезин используются для смазки силовых механизмов (червячных пар и цилиндрических шестерен, скользящих деталей), а также шарикоподшипников электромоторов и умформеров. Для тех же целей можно применить летом смазки марок ГАС и НК-50 темно-серого цвета, имеющих более высокую температуру замерзания.

Смазка наносится тонким равномерным слоем и тщательно распределяется по всей поверхности детали. Для эксплуатации при низких температурах масла разжижаются на 10—15% обезвоженным керосином и наносятся весьма тонким слоем. Смена смазки для большинства деталей производится через 3000 циклов работы аппарата или через 3 месяца его эксплуатации, а в летнее время при работе в высоких температурах, способствующих быстрому загустеванию смазок, требуется менять их более часто.

Смазка снимается путем промывки деталей и механизмов (при их работе) бензином Б-70. Оптические детали протираются чистой фланелью, либо льняной мягкой тряпкой, и промываются спиртом-ректификатом. Применение для этой же цели спирта-сырца, содержащего сивушные масла, частицы которых, оставаясь после испарения алкоголя на поверхности стекла, служат очагами для прилипания пыли и мелкого песка — недопустимо.

Очистка коллекторов электромоторов и умформеров от нагаров и окисей производится промывкой их бензином Б-70. При обгорании коллекторов, вызывающем искрение во время работы, их полируют стеклянной шкуркой и притирают щетки. Поверхности контактов для очистки от окислов и нагара протираются шкуркой или серебряной пластинкой. При сильном подгорании контакты чистят и затем полируют на камне типа «Арканзас», добиваясь касания их всей площадью.

Порядок хранения. Хранение аппаратов в сырых помещениях, а также совместно с аккумуляторами вызывает усиленную коррозию деталей и потому воспрещается.

По окончании проверок работы у аппаратов ослабляют рабочие пружины затворов и командных приборов, установив максимальное значение времени экспонирования и опустив затвор: в командных приборах для этой цели спускают несколько раз откидной рычаг. Прижимные доски должны быть отжаты от прикладных рамок.

Светофильтры хранятся в своих футлярах и устанавливаются только перед стартом.

Аппараты резервные и снятые на длительное время хранятся в упаковочных ящиках законсервированными.

Консервация заключается в смазке неокрашенных поверхностей и механизмов слоем технического вазелина или масла марки ГОИ-54 и ослаблении рабочих пружин затворов и командных приборов. Законсервированные аппараты просматриваются не реже одного раза в три месяца с выполнением регламентных работ первой группы.

В случае отпотевания аппаратов вследствие резкого изменения температур появляющуюся влагу не стирают, а дают высохнуть, после чего части аппарата протирают чистой ветошью, а оптику — фланелью.

10.6. Документация

Формуляр, прилагаемый к каждому комплекту фотоаппаратуры, служит основным документом, фиксирующим время его работы и состояние. В соответствующие графы формуляра вносится период работы комплекта, его перемещения, выполненные регламентные работы, ремонты и результаты осмотров. Объем работы комплекта определяется не по числу сделанных снимков, а по числу всех выполненных циклов (определение, проверки и пр.).

Для обеспечения правильного режима обработки фотопленки, а также для контроля района и объектов фотографирования по результатам каждого фотографирования составляется отчетный лист, в котором указываются дата зарядки кассеты, характеристики фотопленки, дата и время фотографирования, район фотографирования и основные объекты, облачность, выдержка, светофильтр.

10.7. Консервация аппаратуры

Консервация ставит своей целью сохранение от коррозии металлических деталей аппарата во время транспортировки и хранения на складах. Консервирующие вещества гарантируют аппараты от коррозии при соблюдении следующих правил хранения: помещение склада должно быть сухим и отопляемым при относительной влажности 50—60% (хранение аппарата возле отопляемых печей и окон на солнечной стороне

не допускается), в помещении не должно быть кислот, щелочей и других химических материалов.

В качестве консервирующих веществ применяются: вазелин желтый для смазки деталей, изготовленных из стали и латуни; специальная смазка 2ЦКП для внутренних узлов и деталей.

Перед нанесением консервирующего вещества детали предварительно обезжириваются с помощью ватного или марлевого тампона, смоченного в авиационном бензине. Для полного улетучивания бензина на наружные узлы и детали наносится слой обезвоженного вазелина. Смазка наносится тонким сплошным слоем.

Характеристика смазок. Вазелин желтый. Без комков и зерен. Температура каплепадения по Уббелоде не ниже $37-50^{\circ}\text{C}$, золы не более 0,03%, механических примесей не более 0,025%. Вода — отсутствует.

Смазка 2ЦКП. Состоит из вазелинового масла 76%, церозина высокоплавкого 22%, костного масла 2%. Температура застывания не выше -60°C , температура каплепадения по Уббелоде не более 50°C . Вода и технические примеси отсутствуют. Водорастворимые кислоты и щелочи отсутствуют.

10.8. Хранение фотоматериалов

Результаты процесса старения сказываются на изменении величин вуали и светочувствительности. С увеличением времени хранения вуаль увеличивается, а светочувствительность уменьшается. Причем в большей степени у высокочувствительных фотоматериалов. Ускорению процесса старения фотоматериалов способствует высокая окружающая температура, резкие колебания температуры и повышенная влажность, а также наличие повышенной концентрации химических реагентов: пары аммиака, иода.

Требования к хранению фотоматериалов следующие: они должны храниться отдельно от прочих материалов. Помещение должно быть чистым, сухим и хорошо вентилируемым, защищенным от проникновения различных газов и испарений. Влажность воздуха в помещении допускается не более 70%, а температура в пределах $10-20^{\circ}\text{C}$. Не допускается наличие в помещении аммиа-

ка, бензина, керосина, ароматических продуктов, а также радиоактивных веществ. Пленки следует хранить в хорошо закупоренных банках.

Инфрахроматическая пленка, стабильность которой очень невелика, должна храниться в специальных ампулах, из которых выкачан воздух. В жарком и влажном климате банки с пленкой должны храниться в герметических ящиках из цинка или оцинкованного железа. Хранение пленки организуется по размерам, типам, номерам эмульсии и срокам выпуска,

1. *Аингорн М. А.*
О вероятностной модели фотографического процесса. В кн.: «Проблемы передачи информации. М., «Наука», 1964, с. 47 с ил.
2. *Алексеев К. Б., Бебенин Г. Г.*
Управление космическим летательным аппаратом. М. «Машиностроение», 1964. 402 с. с ил.
3. *Алешин Г. М.*
Обработка пленки в фототелевизионных системах космических аппаратов научного назначения.— «Космическая иконоика», М., «Наука», 1973, с. 51—55.
4. *Антонов С. М., Богомолов В. И., Успенский В. И.*
Фотографические процессы, применявшиеся при первом фотографировании обратной стороны Луны. В кн.: Искусственные спутники Земли, 1969, вып. 9, с. 84 с ил.
5. *Аржанов Е. П., Ильин В. Б.*
Аэрофотосъемочное оборудование. М., «Недра», 1972. 183 с. с ил.
6. *Бобир Н. Я.*
Фотограмметрия. М., «Недра», 1965. 290 с. с ил.
7. *Богомолов Л. А.*
Дешифрирование аэроснимков. М., «Недра», 1976. 144 с. с ил.
8. *Виноградов Б. В.*
Космические методы изучения природной среды. М., «Мысль», 1976. 286 с. с ил.
9. *Гдалин В. С.*
Оценка качества изображения, воспроизводимого телевизионными приемными трубками.— В кн.: Успехи научной фотографии, вып. X, М., — Л., «Наука», 1961, с. 123—129.
10. *Голованов А. М.*
Ввод значения светочувствительности пленки в автоматических фотоаппаратах (обзор).— «Оптико-механическая промышленность», 1968, № 2, с. 59—63.
11. *Гольдман Л. М.*
Современное состояние и использование цветной аэросъемки в зарубежных странах. М., Госгеолтехиздат, 1963. 52 с. с ил.
12. *Гришин М. П., Курбанов Ш. М., Маркелов В. П.*
Автоматический ввод и обработка фотографических изображений на ЭВМ., М., «Энергия», 1976. 151 с. с ил.

13. *Гуревич С. Б.*
Об аналогии характеристик воспроизведения в телевидении и фотографии.— В кн.: Успехи научной фотографии, вып. X, М.—Л., «Наука», 1961, с. 123—129.
14. *Гуревич С. Б.*
Эффективность и чувствительность телевизионных систем. М.—Л., «Энергия», 1964. 334 с. с ил.
15. *Денисюк Г. В., Чураев Л. П.*
Фотоэлектрические устройства для автоматической фокусировки объектива.— «Оптико-механическая промышленность», 1966, № 4, с. 39—50.
16. *Заказнов Н. П.*
Затворы аэрофотоаппаратов. М., «Недра», 1965, 86 с. с ил.
17. *Здор С. Е., Широков В. Б.*
Оптический поиск и распознавание. М., «Наука», 1973, 96 с. с ил.
18. *Изнар А. Н., Павлов А. В., Федоров Б. Ф.*
Оптико-электронные приборы КА. М., «Машиностроение», 1972. 368 с. с ил.
19. *Изнар А. Н., Федоров Б. Ф.*
Оптические квантовые приборы в военной технике. М., «Советское радио», 1964. 174 с. с ил.
20. *Инженерный справочник по космической технике.* Под ред. А. В. Солодова. М., Воениздат, 1969. 693 с. с ил.
21. *Катыс Г. П.*
Автоматическое сканирование. М., «Машиностроение», 1969. 520 с. с ил.
22. *Киселевский Ф. Н., Широкин В. А.*
Классификация средств автоматического программного управления электронно-лучевыми установками.— «Вестник Киевского политехнического института», 1970, № 7, с. 83 с ил.
23. *Клименко В. Л.*
Цифровая обработка изображений (Обзор).— «Зарубежная радиоэлектроника», 1975, № 4, с. 13—33.
24. *Комар В. Г.*
Критерий резкости изображения и ее оценка в различных системах кинематографии. В кн.: Успехи научной фотографии, вып. X, М.—Л., «Наука», 1964, с. 79—89.
25. *Космические исследования земных ресурсов.* М., «Наука», 1976. с. с ил.
26. *Космическая фотосъемка и геологические исследования.* М.—Л., «Недра», 1975. 123 с. с ил.
27. *Краткий справочник по расчету надежности радиоэлектронной аппаратуры.* М., «Советское радио», 1966. 432 с. с ил.

28. *Лебедев Д. Г.*

Повышение помехоустойчивости выделения контуров в системах обобщенного квантования изображений.— В кн.: «Иконика», М., «Наука», 1968, с. 88—93.

29. *Михайлов В. Я.*

Аэрофотография и общие основы фотографии. М., Геодизиздат, 1959. 263 с. с ил.

30. *Основные* технические требования к аэросъемке. М., «Геодизиздат», 1951. 37 с. с ил.

31. *Оценка* качества оптического изображения. Сб. под ред. О. А. Герасимовой, М., Геодизиздат, 1959, 304 с. с ил.

32. *Павлов А. В.*

Оптико-электронные приборы. М., «Энергия», 1974. 358 с. с ил.

33. *Павлов А. В., Пермяков В. Д.*

Оценка точности методов построения местной вертикали, основанных на использовании инфракрасного излучения Земли.— «Космические исследования», т. X, 1972, вып. 4, с. 499—503.

34. *Применения* голографии. Сб. статей под ред. Дж. Гудмена. М., «Мир», 1973. 79 с. с ил.

35. *Романова М. А., Щепеткин Ю. П.*

Спектрограф РЩ-1 и его использование для изучения с воздуха спектральной яркости геологических объектов.— В кн.: Аэрометоды в природных исследованиях. М.—Л., Изд. АН СССР, 1960, с. 3—9 с ил.

36. *Рыбак В. И.*

Универсальное устройство для обработки информации с помощью вычислительных машин.— В кн.: Читающие автоматы. Киев, «Наукова думка», 1965, с. 82—90 с ил.

37. *Рябушкин Ю. В.*

Влияние сдвига изображения на фотографическую разрешающую способность.— «Научная и прикладная фотография и кинематография», 1958, № 3, с. 17—24 с ил.

38. *Свет В. Д.*

Оптические методы обработки сигналов. М., «Энергия», 1971. 104 с. с ил.

39. *Селиванов А. С., Алешин Г. М., Караева М. К.*

Фототелевизионные устройства для космических исследований.— «Техника кино и телевидения», 1969, № 7, с. 3—12.

40. *Справочник* по космонавтике. Под ред. Н. Я. Кондратьева. М., Воениздат, 1966. 328 с. с ил.

41. *Справочное* руководство «Аэросъемка городов и городских поселков». М., Минкомхоз РСФСР, 1953. 356 с. с ил.

42. Урмахер Л. С.
Оптика фотографических и аэрофотограмметрических приборов. М., «Недра», 1965. 240 с. с ил.
43. Федоров Б. Ф.
Оптические квантовые генераторы. М., «Энергия», 1966. 88 с. с ил.
44. Федоров Б. Ф., Эльман Р. И.
Цифровая голография. М., «Наука», 1976. 150 с. с ил.
45. Физика и техника инфракрасного излучения. Пер. с английского Н. В. Васильченко. Под общей ред. Н. В. Васильченко. М., «Советское радио», 1965. 642 с. с ил.
46. Франсон М.
Голография. М., «Мир», 1972. 246 с. с ил.
47. Шершень А. И.
Аэрофотосъемка. М., Геодиздат, 1958. 335 с. с ил.
48. Щербаков Я. Е.
Расчет и конструирование аэрофотоаппаратов. М., «Машиностроение», 1974. 248 с. с ил.
49. Янтуш Д. А.
Микрофотометрирование как средство дешифрирования аэроснимков. — В кн.: Вопросы дешифрирования и фотограмметрической обработки аэроснимков. М.—Л., АМ СССР, 1963, с. 3—5 с. с ил.
50. «AIAA Paper», 1973, № 204, 11 p.
51. «AIAA Paper», 1974, № 74—249, 7 p.
52. «Astronautics and Aeronautics», 1971, VI, 9, № 6, p. 24—76.
53. «Aviation Week and Tehnology», 1975, 102, № 5, p. 44—46.
54. Fisher R. W., Rosenfeld A.
Camera Design and Optimization by Computer.— «NAECON» 74 Record», 1974, p. 197—202.
55. Greenwood Ted. Reconnaissance, Surveillance and Arms Control, The International Institute for Strategic Studies, ADELPHI Papers, 1972, № 88. 28 p.
56. «ICARUS», 1970, 12, № 1, p. 10—45.
57. «ICARUS», 1972, 11, 16, № 1, p. 1—227.
58. «ICARUS», 1973, 18, № 1, p. 75—101.
59. Kodak.
Data for Aerial Photography, 1970, p. 17—20.
60. Mikhail E. M.
Photogrammetry helps save the treasures of Nubia. Cornell Engr., 26, № 8, 1961, 23 p.
61. NASA News Release, 1975, № 75—42, II. 26 p.
62. «New Scientist», 1975, 66, № 932, 117 p.
63. «Photogrammetric Engineering», 1972, 36, № 10, 1050—1051.
64. Там же 1972, 38, № 6, p. 574—587.
65. —»— 1973, 39, № 1, p. 59—63, 65—72, 73—79.
66. —»— 1973, 39, № 8, p. 815—820.

67. «Photogrammetric Engineering», 1974, 40, № 4, p. 433—439.
68. —»— 1974, 40, N 5, p. 517—550.
69. —»— 1974, 40, № 6, p. 722.
70. —»— 1974, 40, № 10, p. 1225—1235.
71. «Space Word», 1971, N H -7, p. 11—27.
72. Scientific American, 1973, 228, N 2, p. 14—25.
73. *Light D. L.*
Altimeter Observations as Orbital Constraints.—«Journal of The American Society of Photogrammetry» 38, N 4, 1972, p. 339—346.
74. «The Journal of Environmental Sciences», 1974, 17, № 2, p. 6—22.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
Спектральные коэффициенты яркости
некоторых объектов съемки [20, 29, 40]

Объект съемки	Длина волны, мкм								
	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Белая полотняная ткань	0,40	0,55	0,77	0,84	0,87	0,90	—	—	—
Бетонное покрытие	—	—	—	0,20	0,35	0,37	0,37	0,38	—
Водная поверхность (река, озеро)	—	—	0,15	0,08	0,05	0,03	0,02	0,01	—
Вода в реке мутная	—	—	0,15	0,19	0,20	0,15	0,09	—	—
Вода морская	—	—	—	0,07	0,07	0,02	—	—	—
Дорога:									
накатанная по подзолу, сухая	—	—	0,12	0,16	0,22	0,30	0,30	0,31	—
накатанная по чернозему, сухая	—	—	0,06	0,07	0,09	—	—	—	—
грязная и мокрая	—	—	0,03	0,04	0,07	—	—	—	—
в конце зимы пожелтевшая	—	—	0,63	0,70	0,78	—	—	—	—
Крыша дранковая сухая, старая	—	—	0,09	0,12	0,16	—	0,28	—	—
Лес:									
хвойный	—	—	0,03	0,05	0,08	0,15	0,35	0,45	0,46
лиственный	—	—	0,04	0,05	0,08	0,12	0,48	0,65	0,68
летом лиственный	—	—	0,05	0,06	0,07	0,10	0,10	0,11	—
зимой лиственный	—	—	0,06	0,10	0,20	0,34	0,58	0,64	0,65
Луг:									
зеленый	—	—	0,03	0,05	0,10	0,19	0,50	0,55	—
пожелтевший	—	—	0,04	0,08	0,11	0,25	0,62	0,67	—
Маскировочные сети зеленые	—	—	—	0,18	0,20	0,20	0,40	0,45	—
Мел	0,25	0,35	0,55	0,65	0,68	0,72	0,76	0,80	—
Окись цинка	0,05	0,05	0,15	0,72	0,75	0,75	0,75	0,79	—
Песок сухой	—	—	0,14	0,18	0,27	0,30	0,40	0,43	0,46

Продолжение прилож. 1

Объект съемки	Длина волны, мкм								
	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Почва:									
супесчаная вспаханная сухая	—	—	0,09	0,14	0,16	0,20	0,23	0,25	—
суглинистая сухая	—	—	0,10	0,16	0,23	0,25	0,34	0,41	0,45
суглинистая мокрая	—	—	0,05	0,06	0,08	—	—	—	—
черноземная вспаханная сухая	—	—	0,02	0,03	0,03	—	0,06	—	—
черноземная вспаханная мокрая	—	—	0,02	0,02	0,02	—	—	—	—
Рожь выколосив- шаяся	—	—	0,07	0,13	0,16	0,40	0,71	—	—
Снег свежевывап- ший	0,79	0,82	0,86	0,89	0,90	0,85	0,85	0,85	—
Степь целинная	—	—	0,03	0,06	0,09	—	0,26	—	—
Тротуар асфальто- вый сухой	—	—	0,15	0,21	0,27	—	0,17	—	—
Тундра	—	—	0,05	0,09	0,10	0,22	0,35	0,36	—
Черепичное по- крытие:									
новое красное	—	—	0,07	0,15	0,24	0,69	0,75	0,76	—
старое на солнце	—	—	—	0,38	0,48	0,48	0,53	0,70	—
старое в тени	—	—	—	0,13	0,13	0,15	0,20	0,45	—
Шоссе:									
асфальтиро- ванное сухое	—	—	0,08	0,10	0,12	0,18	0,20	0,22	—
с булыжным покрытием мо- крое	—	—	0,05	0,06	0,07	—	—	—	—
с булыжным покрытием сухое	—	—	0,11	0,16	0,23	0,32	0,35	0,36	—

**Распределение потока в спектре
отраженного от травы, снега
и облаков солнечного излучения [32]**

Диапазон спектра, мкм	Распределение потока в спектре солнечного излучения, Вт/м ²	Распределение по спектру отраженного солнечного излучения на высоте 30 км, Вт/м ²			Альбедо		
		над травой	над снегом	над облаками	над травой	над снегом	над облаками
0,29—0,30	6 440	21	21	126	0,0033	0,0033	0,02
0,30—0,32	7 420	224	1252	2 380	0,0302	0,17	0,0032
0,32—0,34	21 600	2 240	6670	13 070	0,10	0,31	0,0061
0,32—0,34	23 400	2 800	1 0283	16 700	0,12	0,44	0,0072
0,34—0,36	25 500	3 374	1 2873	18 920	0,13	0,51	0,0074
0,36—0,38	24 400	3 738	1 6570	18 740	0,15	0,68	0,0077
0,38—0,40	75 200	5 313	4 4270	57 490	0,0705	0,59	0,0076
0,40—0,44	86 800	6 433	5 5950	67 730	0,0711	10,64	0,0078
0,44—0,48	79 700	6 293	5 3370	58 860	0,079	0,68	0,0074
0,48—0,52	74 700	6 643	5 3800	56 840	0,085	0,69	0,0072
0,52—0,56	75 500	6 447	5 3590	54 420	0,085	0,71	0,0072
0,56—0,60	86 000	6 090	4 9340	50 270	0,089	0,72	0,0073
0,60—0,64	64 400	5 740	4 4880	48 430	0,089	0,70	0,0075
0,64—0,68	31 500	4 088	2 0700	23 080	0,14	0,69	0,0077
0,68—0,70	55 400	10 080	3 6480	42 920	0,18	0,66	0,0078
0,70—0,74	61 600	14 080	4 0110	48 140	0,23	0,65	0,0078
0,74—0,79	54 700	13 475	3 2060	42 600	0,25	0,59	0,0078
0,79—0,84	18 900	4 872	1 0570	14 800	0,26	0,56	0,0078
0,84—0,86	111 300	23 570	4 4480	86 030	0,23	0,41	0,0078
0,86—0,99	28 700	6 825	1 0440	22 550	0,24	0,36	0,0079
0,99—1,03	115 500	29 570	3 6680	89 460	0,26	0,32	0,0077
1,03—1,23	9 800	2 050	2280	7 690	0,21	0,23	0,0077
1,23—1,25	51 200	7 497	8240	34 680	0,15	0,16	0,0068
1,25—1,38	36 400	2 720	3740	22 040	0,075	0,11	0,0061
1,38—1,50	7 700	364	740	4 720	0,047	0,096	0,0061
1,50—1,53	2 800	126	230	1 740	0,045	0,083	0,0064
1,53—1,54	28 700	1 848	2070	21 370	0,064	0,071	0,0074
1,54—1,67	5 600	1 441	250	3 110	0,079	0,045	0,0055
1,67—1,70	32 900	1 330	270	14 130	0,040	0,0081	0,0043
1,70—1,92	17 500	—	—	75 700	—	—	0,0044

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Характеристики некоторых типов фотопленок фирмы Eastman Kodak [59]

Наименование и тип фотопленки	Вид фотопленки*, диапазон спектральной чувствительности, мкм	Толщина основы/толщина чувствительного слоя, мкм	Показатель светочувствительности (AEI**)	Разрешающая способность при контрасте 1000:1/контрасте 1,6:1, линн/мм	Общая характеристика. Область применения
Plus-X Aerographic 2402	Панхром 0,25—0,72	102/110	80	100/50	Черно-белая, негативная, средней чувствительности, малодеформируемая. Картографирование
Tri-X Aerographic 2403	Панхром 0,25—0,7	102/114	250	80/25	Черно-белая, негативная, высокой чувствительности, малодеформируемая. Картографирование при плохих условиях освещения
Double-X Aerographic 2405	Панхром 0,4—0,72	102/112	125	80/40	Черно-белая, негативная, средней чувствительности, малодеформируемая. Картографирование
Panatomic-X Aerial 3400	Панхром 0,4—0,71	64/74	20	160/63	Черно-белая, негативная, малой чувствительности, высококонтрастная. Фотографирование территории с больших высот.
Plus-X Aerial 3401	Панхром 0,25—0,72	64/79	64	160/63	Черно-белая, средней чувствительности, негативная, высококонтрастная, мелкозернистая. Фотографирование территории с больших высот.

Продолжение прилож. 2

Наименование и тип фотопленки	Вид фотопленки*, диапазон спектральной чувствительности, мкм	Толщина основы/толщина чувствительного слоя, мкм	Показатель светочувствительности (АЕI**)	Разрешающая способность при контрасте 1000:1/контрасте 1,6:1, лин/мм	Общая характеристика. Область применения
Infrared Aerographic 2424	Инфрахром 0,4—0,93	102/110	110	80/32	Черно-белая, негативная. Съемка в условиях сильной дымки. Спектрзональное фотографирование
Aerochrome Infrared 2443	Инфрахром 0,4—0,9	102/122	10 с красным светофильтром	63/32	Цветная спектрзональная, обратимая, малодеформируемая. Спектрзональное фотографирование
Aerochrome Infrared 3443	Инфрахром	64/92	То же	63/32	Трехслойная, цветная, обратимая. Спектрзональное фотографирование
Aerocolar Negative 2445	0,4—0,7	102/124	32	80/40	Цветная, негативная, высокочувствительная. Картографирование. Разведка полезных ископаемых
Ektachrome MS Aerographic 2448	0,4—0,7	102/122	6	80/40	Цветная, обратимая для съемки с малых и средних высот. Картографирование. Фотографирование Земли
Aerographic Duplicating 2420	0,4—0,5	102/107	—	125/80	Черно-белая, мелкозернистая, малодеформируемая. Копирование аэронегативов

Продолжение приложения 2

Наименование и тип фотопленки	Вид фотопленки*, диапазон спектральной чувствительности, мкм	Толщина ос-новы/толщина чувствительного слоя, м/м	Показатель светочувствительности (AEI**)	Разрешающая способность при контрасте 1000:1/контрасте 1,6:1, лин/мм	Общая характеристика. Область применения
Aerographic Duplicating 4427	0,4—0,5	178/188	—	125/80	Черно-белая, недеформируемая. Копирование аэронегативов и диапозитивов
Fine Grain Aerial Duplicating 2430	0,4—0,5	102/107	—	320/160	Черно-белая, мелкозернистая. Копирование аэронегативов
Экспериментальная	0,4—0,6	—	—	178	Черно-белая, высококонтрастная. Съемка подводных объектов с воздуха
Linagraph Sp—845 Orto	0,4—0,63	—	—	138/84	Черно-белая. Регистрация сигналов РЛС бокового обзора

* Все приведенные в таблице фотопленки могут иметь следующие размеры: ширина 70 мм, 12,7 и 24 см, длина 30, 60, 150, 300 и 600 м.

** AEI — Aerial Exposure Index — показатель светочувствительности, определяемый как 0,5 величины экспозиции (ЛКС), отсчитываемой в точке характеристической кривой, где ее наклон соответствует 0,6 характеристической кривой. Приводимые цифры дают возможность относительной оценки светочувствительности различных типов аэропленок.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Основные характеристики некоторых объективов отечественного производства [20, 29]

Название фстообъектива	Фокусное расстояние, мм	Угол поля зрения, градус	Относительное отверстие	Разрешающая способность, лив/мм		Число линз
				в центре поля	на краю поля	
Мир-1	37	60	1:2,8	45	23	—
Гелиос-44	58	42	1:2	35	14	—
Руссар-29	70	122	1:6,8	27	5	—
Гелиос-40	85	30	1:1,5	32	16	—
Руссар-19	100	100	1:5,5	30	—	6
Руссар-33	100	104	1:6,8	36	19	—
ОФ-102	100	100	1:6,3	35	11	6
Уран-10	100	60	1:2,5	—	—	7
Руссар-30	120	120	1:6,3	30	—	6
Руссар-35	200	65	1:9	35	33	—
Орион-1а	200	92	1:6,3	35	4	4
Телемар-22	200	12,5	1:4,5	38	—	—
Индустар-51	210	56	1:4,5	32	8	4
ОФ-233	210	56	1:2,5	27	9	7
ЗМ-30-1	300	5	1:3	40	—	—
Индустар-13	300	46	1:4,5	25	—	—
Таир-3	300	8	1:4,5	36	30	—
МТО-350	350	5	1:5,6	—	—	—
Тафар-3	350	40	1:6	39	30	—
ТЕ-17	400	31	1:6,3	38	18	4
МТО-500	500	5	1:8	35	22	—
ЗМ-50-1	500	3	1:5,6	40	—	—
Оргоннар-13	500	29	1:7	30	18	—
Индустар-52	500	46	1:5	25	12	4
Телемар-2	750	32	1:6,3	32	15	4
Уран-16	750	32	1:3,5	31	11	7
ЗМ-1000-1	1000	1,5	1:6,8	40	—	—
МТО-1000-1	1000	2,5	1:10	35	22	—
Телемар-7	1000	24	1:7	30	17	4
Телемар-12	1800	22	1:8	27	15	4

ПРИЛОЖЕНИЕ 4
Характеристики инфракрасного
излучения планет и Луны

Характеристики	Земля		Венера		Луна		Море	
	поверхность	верхние слои атмосферы	поверхность	верхние слои атмосферы	освещенная сторона	неосвещенная сторона	экватор	полюс
Температура, °К	290	220	430	225	400	120	280	205
Длина волны максимального излучения, мкм	10	13	7	11,5	7,5	24	10	14
Энергетическая яркость Вт/см ² · ср	0,013	0,004	0,062	0,0047	0,046	0,0004	0,011	0,003
Доля излучения в диапазоне спектра от 1,8 до 18 мкм	0,66	0,47	0,85	0,49	0,82	0,09	0,64	0,42
Доля излучения в диапазоне спектра от 7,5 до 18 мкм	0,56	0,42	0,52	0,46	0,54	0,09	0,56	0,41

Элементы аппаратуры	Вероятность отказа		
	$\lambda_{\min} \cdot 10^{-5}$ (1/ч)	$\lambda_{\max} \cdot 10^{-5}$ (1/ч)	$\lambda_{\text{ср}} \cdot 10^{-5}$ (1/ч)
1. Электровакuumные приборы	0,1	34,5	12
Электронные лампы:			
приемные	0,1	20	6
передающие	13	13	13
собирающие	0,5	1,0	0,75
Двойные диоды	0,5	1,0	0,75
Двойные триоды	0,7	1,5	1,1
Триоды	0,067	1,0	0,3
Пентоды	0,08	2,0	0,9
Тиратроны	0,37	1,43	0,5
Электронно-лучевые трубки	1,0	2,5	1,8
2. Полупроводниковые приборы	0,01	10	1,7
Диоды:			
германиевые	0,012	8,3 (50)	1,5
кремниевые	0,015	0,53	0,2
селеновые	0,011	6 (40)	2,7
Триоды:			
германиевые	0,02	3 (90)	0,6
кремниевые	0,027	0,7	0,4
3. Сопротивления	0,001	1,92	0,5
Угольные	0,0017	0,25	0,094
Проволочные	0,004	9	4,5
Пленочные	0,0017	0,006	0,1
Переменные	0,004	1,0	0,4
4. Конденсаторы	0,00025	2,4	0,23
Бумажные	0,002	0,5	0,25
Слюдяные	0,002	3,5	1,25
Керамические	0,006	0,3	0,12
Танталовые	0,027	16,4	6,0
Электролитические	0,003	8,0	2,0
Переменные	0,009	0,1	0,064
5. Индукционные элементы			
Трансформаторы:			
малой мощности	0,002	6,63	0,52
импульсные	0,01	0,8	0,29
мощные	0,02	0,2	0,11
Дроссели	0,0012	0,34	0,025
Катушки индуктивности	0,002	4,4	0,63
Линии задержки	0,015	0,5 (93,5)	0,27
Соленоиды	0,5	0,5	0,5

Элементы аппаратуры	Вероятность отказа		
	$\lambda_{\min} \cdot 10^{-5}$ (1/ч)	$\lambda_{\max} \cdot 10^{-5}$ (1/ч)	$\lambda_{\text{ср}} \cdot 10^{-5}$ (1/ч)
6. Коммутационные элементы			
Реле	0,005/0,01	25,8/0,06	1,1/0,602
Переключатели	0,0003/0,0009	2,8/0,014	0,64/0,005
Микровыключатели	—/0,009	26,2/0,05	—/0,025
Выключатели автоматические	0,0045	0,04	0,014
Реле времени	—/0,05	0,3/0,26	—/0,15
Пускатели	1,2	7,5	3,2
7. Монтажные элементы			
Штепсельные разъемы	0,001	9,1	0,24
Пайки и провода	0,01	1,0	0,1
Схемы	0,01	0,1	0,07
Панели электроламп	0,002	0,1	0,075
8. Измерительные устройства			
Измерительные приборы	0,5	6,0	3,0
Индикаторные лампы	0,01	0,3	0,17
Сельсины	0,009	7,0	2,4
Гироскопы	5,0	146 (600)	32
Акселерометры	0,035	0,75	0,28
Тахометры	0,025	0,055	0,03
Датчики давления	0,17	0,66	0,35
Датчики температуры	0,15	0,64	0,33
9. Исполнительные устройства			
Двигатели маломощные	0,015	17 (33)	2,1
Приводы	0,035	0,2	0,12
Муфты электромагнитные	0,043	9,4	9,4
Шаговые двигатели	0,022	0,071	0,07
10. Источники питания			
Первичные источники энергии	0,05	1,43	0,32
Преобразователи	100	105	102
Мотор-генераторы	0,12	99	25
11. Другие электрические устройства			
Магнитные усилители	0,02	0,5	0,215
Схемы формирования импульсов	0,02	1,5	0,75
Усилители малой мощности	0,05	0,5	0,27
Электрические фильтры	0,30	0,30	0,30
Термостаты	0,2	1,0	0,5
Вибраторы	0,5	1,0	0,6
Предохранители	0,03	1,0	0,44

- Аберрация 97
 Абсолютно черное тело (АЧТ) 17
 Автоматическая фокусировка 107
 Активности 264
 Альбеда 34
 Анализ фотосистем 11
 Анастигмат 99
 Астигматизм 98
 Безотказность системы 305
 » фотоаппаратуры 304
 Блок обработки фотопленки 79
 Быстрое преобразование Фурье (БПФ) 179
 Вероятность исправного состояния 309
 » подготовки за заданное время 308
 » отказа системы 305
 Вероятностные показатели эксплуатационно-технических характе-
 ристик 306
 Визуальный контроль 314
 Виньетирование 13
 Временные показатели эксплуатационно-технических характеристик
 306
 Временной спектр 25
 Время безотказной работы 305
 » выработки на один отказ 306
 » подготовки аппаратуры к применению 307
 » ремонта 307
 Вспомогательные операции 314
 Гарантийный срок 298
 Гиперсенсibilизация 59
 Гиперфокальное расстояние 97
 Глобальная съемка 5
 Глубина резкости 90
 Гляциология 143
 Голография 186
 Готовность 302
 » фотоаппаратуры 302
 Гранулярность 50

- Двухмерный спектр 28
Дежурный режим 300
Действующее отверстие 91
Дешифрирование 6, 11, 267
Джоуль 16
Диапазон времени экспонирования 103
 » выдержек 13
Диафрагма 93
Динамическая интеграция 7
Дисперсия 308
Дифракция 14
Диффузионное отражение 34
Добротность 11
Доверительная вероятность подготовки 308
Долговечность 302
- Закон Голицына-Вина 19
 » Кирхгофа 19
 » Ламберта 22
 » Планка 17
 » Стефана 17
- Затвор 11, 47, 82
Зенитное расстояние Солнца 161
Зеркальное отражение 34
Зернистость фотослоя 56
- Идеальный рассеиватель 35
Импульс кванта 15
Импульсная переходная характеристика фотосистемы 215
Индикатриса 45
Инструментальный контроль 314
Интегральная чувствительность фотоматериала 12
Интенсивность потока 12
 » отказов 300
Интервал экспозиции 52
 » яркости 37
Интеркосмос 6
Интерферометрия 14
Информационная емкость 11
Инфракрасное излучение 15
 » фотографирование 5
Источник излучения 11, 14
- Калория 16

- Кандела 20
- Качественные характеристики надежности 304
- Качественный контроль 304
- Качество эксплуатации 304
 - » изображения 8, 90
- Клиновое компенсация сдвига изображения 80
- Количество фотонформации 14
- Количественные характеристики надежности 304
- Компенсационный светофильтр 63
- Контроль состояния 304
- Контрольные мероприятия 314
- Контраст 12
 - » яркости 35
- Корпус фотоаппарата 81
- Корреляционный метод 8, 186
- Космическая геология 7
 - » метеорология 7
- Космическое фотографирование 5
- Коэффициент готовности 309
 - » целесообразности контрольных мероприятий 316
 - » Келье 209
 - » задымленности 46
 - » отражения 32
 - » передачи колебаний 13
 - » прозрачности 12
 - » поглощения 32
 - » пропускания 32
 - » рассеяния 33
 - » полезного действия (к. п. д.) глаза 24
- Кратность светофильтра 54
- Кружок рассеяния 13
- Лазерный высотомер 150, 234
- Ламбертово излучение 19
- Люкс 21
- Люмен 22
- Массовый отказ 301
- Масштаб снимка 90
 - » фотографирования 13
- Математическое ожидание 308
- Методические ошибки компенсации 127
- Механизм выравнивания фотопленки 82

- Механизм протяжки пленки 82, 115
- » компенсации сдвига изображения 84, 128
 - » смены светофильтров 84
 - » управления диафрагмой 84
 - » управления затвором 84
- Многозональное фотографирование 6
- Монохроматический фильтр 62
- Монохроматическое излучение 16
- Моральная долговечность 303
- Надежность 301**
- Накопитель пленки 79
- Негативное изображение 48
- Негативная фотопленка 11
- Непрерывный спектр пространственных частот 12
- Неравновесная среда 32
- Обработка фотопленки 11
- Одномерный спектр 28
- Оконтуривание 14
- Оптический коэффициент полезного действия (к. п. д.) 13
- » затвора 104
- Оригинал 10
- Ортоскопичность 13
- Осмотр аппаратуры 318
- Панорамное фотографирование 145
- Передаточная функция сдвига изображения 225
- Перспективное фотографирование 145
- Перигей орбиты 155
- Планетология 5
- Плановое фотографирование 145
- Пневматический способ выравнивания пленки 114
- Подготовка к применению 297
- Подложка 48
- Позитивное изображение 11
- Позитивный процесс 11
- Показатели надежности невосстанавливаемых систем 309
- » » невосстанавливаемого элемента 313
- Показатель преломления среды 16
- Полезный интервал плотностей 50
- » » экспозиций 50
- Полный излучатель 17

- Полярная орбита 158
Постоянная Больцмана 17
 » Планка 15, 117
 » Стефана 17
Построитель местной вертикали 145
Предполетная подготовка 319
Прижимной стол 80
Приработка аппаратуры 301
Приведенное время экспозиции 105
Программно-управляющий блок 79
Пропускание диффузное 39
 » направленное 39
 » направленно-диффузное 39
Профилактические мероприятия 299

Радиальная скорость носителя 122
Разрешающая способность 11
 » способность фотосистемы 83
Расфокусировка 11
Регистрограмма 263
Регламентные работы 299
Рекультивация земель 142
Ремонтопригодность 302
Ремонтные мероприятия 299
Ряд Фурье 25

Сбережение техники 304
Световая отдача источника 25
Световое отверстие затвора 104
Светораспределение 12
Светосила 13, 92
Светофильтр 47
Светочувствительность 50
Сдвиг изображения 11
Селективное поглощение 43
Селективный фильтр 62
Сенситограмма 51
Сенситометрические испытания 51
Сенсибилизатор 48, 57
Секторная скорость 156
Сенситометр 51
Сила света 15
Синтез фотосистем 11

- Система сброса 79
- Скорость света 15
- Спектральный сканирующий радиометр 143
 - » коэффициент отражения 12
 - » коэффициент прозрачности 12
- Спектрограмма 59
- Спектр плотности потока излучения 12
- Спектральная яркость 12
 - » чувствительность фотоматериала 12, 57
- Способ одноклиновой компенсации 128
 - » двухклиновой компенсации 129
- Среднее время безотказной работы 305
 - » » восстановления 305
 - » » до отказа 306
- Средняя стоимость подготовки к применению 306
 - » » эксплуатации 306
- Средняя трудоемкость при подготовке к применению 306
- Стоимость контроля 316
 - » ущерба 136
- Температурный коэффициент линейного расширения 81
- Температурное излучение 17
- Тепловидение 6
- Тепловой излучатель 17
- Территориальная интеграция 7
- Тест-объект 120
- Техническое обслуживание 297
 - » обслуживание фотоаппаратуры 297
- Техническая долговечность 302
 - » регулировка фотоаппаратуры 298
- Точка инерции 61
- Трансверсальная скорость носителя 122
- Требуемое состояние техники 297
- Угловой способ компенсации сдвига изображения 127
- Угол поля зрения 13
- Ультрафиолетовое излучение 15
- Условие Дирихле 25, 180
- Уход за аппаратурой 321
- Фактическое время экспонирования 155
- Физическая выдержка 13
 - » светосила объектива 102
- Фокусное расстояние 90

- Фокусирующее устройство 48
Фотографическая широта 50
Фотонизображение 10
Фотоустановка 13
Фотошум 55
- Характеристика аберрационная 87
 » габаритная 87
 » пространственно-частотная 87
 » эксплуатационная 88
 » энергетическая 88
- Хранение аппаратуры 322
- Центральный затвор 110
- Частота отказов 310
- Шторный затвор 80
- Щелевое фотографирование 145
- Эквивалентная полоса пропускания 11
Эксплуатация техники 297
Эксплуатационная технологичность 302
Экспозиция 12, 60
Экспонометрическое устройство 48
Электрон-вольт 10
Электромагнитный спектр 25
Эмульсионный слой 48
Энергетические величины 16
Энергия 12
Энергетическая яркость 12
Эффективные величины 16
Эффективность состояния системы 304

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
ЧАСТЬ I.	
ОСНОВЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ФОТОГРАФИРОВАНИЯ	
	9
Глава 1.	
Основные понятия светотехники	
	14
1.1. Природа и характеристики оптических излучений	14
1.2. Основные законы излучения	17
1.3. Светотехнические характеристики и связь их с энергетическими	20
1.4. Понятие о пространственно-частотных характеристиках излучения	25
1.5. Источники излучения	29
1.6. Взаимодействие потока излучения со средами	32
1.7. Прохождение излучения через атмосферу Земли и планет	40
Глава 2.	
Основы фотографического процесса и его автоматизация	
	47
2.1. Сущность фотографического процесса	47
2.2. Фотоматериалы и их характеристики	48
2.3. Светофильтры	62
2.4. Съёмочный процесс при космическом фотографировании	65
2.5. Автоматизация фотопроцесса	70
Глава 3.	
Устройство и расчет механизмов автоматического фотоаппарата	
	78
3.1. Схема автоматического фотоаппарата и назначение основных механизмов	78
3.2. Фотографические объективы	86

3.3. Затворы фотоаппаратов	102
3.4. Камеры, кассеты и кассетные механизмы фотоаппаратов	111
3.5. Автоматическая фокусировка фотокамеры	117
3.6. Механизмы компенсации сдвига изображения	121
3.7. Командные приборы фотоаппаратов	132
3.8. Методика расчета параметров фотоаппаратуры	133

ЧАСТЬ II.

ФОТОГРАФИРОВАНИЕ ИЗ КОСМОСА 141

Глава 4.

Особенности космического фотографирования. . . 142

4.1. Задачи, решаемые при космическом фотографировании	142
4.2. Способы фотографирования из космоса	145
4.3. Особенности фотографирования из космоса и требования, предъявляемые к фотографической аппаратуре	151
4.4. Особенности движения носителя фотоаппаратуры	155
4.5. Изменения освещенности Земли в зависимости от параметров орбиты КА и факторы, влияющие на освещенность в плоскости изображения	160
4.6. Расчет скорости перемещения изображения по чувствительному слою в зависимости от параметров орбиты	165
4.7. Особенности расчета экспозиции при космическом фотографировании	169

Глава 5.

Методы повышения качества изображения . . . 175

5.1. Методы повышения качества изображения, используемые при автоматизированной обработке фотоинформации	175
5.2. Основы оптической фильтрации	180
5.3. Голографическая фильтрация	186
5.4. Корреляционный способ распознавания изображений	190
5.5. Оценка качества систем распознавания	193

Глава 6.

Оценка качества изображений 199

6.1. Критерии оценки качества фотографических и воспроизводимых изображений	199
6.2. Некоторые особенности основных характеристик носителей фотографической информации	207

6.3. Структурная схема фотографического процесса	214
6.4. Информационная емкость фотографического изображения	218
6.5. Пространственно-частотные характеристики расфокусировки объектива, сдвига изображения и сканирующей диафрагмы	223
6.6. Структурная схема получения фотоинформации	229

Глава 7.

Устройство автоматической фотоаппаратуры

7.1. Схема размещения фотографической аппаратуры на борту КА и особенности картографирования с использованием лазерного высотомера [72]	234
7.2. Особенности устройства аппаратуры для фотографирования из космоса	237
7.3. Спектрозональное фотографирование и применяемая аппаратура	242
7.4. Фотографирование из космоса на цветную фотопленку	246
7.5. Фотоаппаратура для съемки Луны и планет	249
7.6. Фототелевизионная аппаратура	255

Глава 8.

Методы дешифрирования и автоматизированной обработки фотоинформации

8.1. Методы дешифрирования фотоинформации	261
8.2. Основные демаскирующие признаки при дешифрировании	267
8.3. Ввод фотоинформации в ЭВМ	271
8.4. Распознавание изображений на фотоснимках	277
8.5. Автоматизированная обработка фотоинформации	284
8.6. Методы ускоренной обработки фотоинформации	289

Часть III.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ФОТОАППАРАТУРЫ

Глава 9.

Основные положения эксплуатации фотографической и оптико-электронной аппаратуры

9.1. Предмет и содержание теории эксплуатации	296
9.2. Основные понятия и определения	297

9.3. Эксплуатационно-технические характеристики фотоаппаратуры	300
9.4. Основные требования к количественным показателям эксплуатационно-технических характеристик	306
9.5. Особенности подготовки аппаратуры к использованию в космосе	307
9.6. Математическое определение основных показателей надежности невосстанавливаемых систем	309
9.7. Система мероприятий по подготовке фотоаппаратуры к применению	314
9.8. Оценка целесообразности и достоверности контроля состояния аппаратуры в процессе подготовки	315

Г л а в а 10.

Эксплуатация фотоаппаратуры	316
10.1. Общие положения	316
10.2. Предварительная подготовка	317
10.3. Предполетная подготовка	319
10.4. Регламентные работы	320
10.5. Уход за аппаратурой и ее хранение	321
10.6. Документация	323
10.7. Консервация аппаратуры	323
10.8. Хранение фотоматериалов	324
Список литературы	326
Приложение	331
Предметный указатель	341

ИБ № 1259

БОРИС ФЕДОРОВИЧ ФЕДОРОВ
ВАСИЛИЙ ДМИТРИЕВИЧ ПЕРМЯКОВ

КОСМИЧЕСКОЕ ФОТОГРАФИРОВАНИЕ

Редактор издательства
Н. В. Протопопова

Оформление художника
Ю. Л. Максимова

Художественный редактор
В. В. Евдокимов

График-иллюстратор
Б. А. Руденко

Технические редакторы
Л. Г. Лаврентьева,
Е. С. Сычова

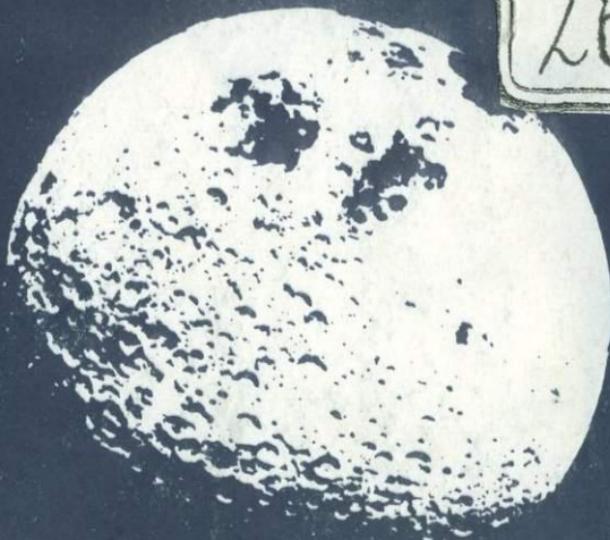
Корректор К. И. Савенкова

Сдано в набор 15.10.77. Подписано в печать
19.04.78. Т-07254. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага № 1,
Литерат. гарнит. Высокая печать. Печ. л. 11,0.
Усл. п. л. 18,48. Уч.-изд. л. 17,80. Тираж 3000 экз.
Заказ 7-462/6373—15. Цена 2 р. 50 к.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12,
Третьяковский проезд, 1/19

Харьковская книжная фабрика «Коммунист» рес-
публиканского производственного объединения
«Полиграфкнига» Госкомиздата УССР, 310012,
Харьков-12, Энгельса, 11.

2601



Фотография помогает человеку зорче взглянуть на объект или явление. Научная фотография позволяет глубже узнать их, а космическая фотография обеспечивает глобальность.

Долгое время только единицы допускали мысль, что Земля имеет шарообразную форму. После кругосветного плавания Магеллана уже тысячи людей стали верить в это.

Полет Юрия Гагарина убедил миллионы в том, что мы живем в общем - то на "небольшом шарике", а опубликование фотоснимков Земли с расстояния в 30-300 тыс. км позволило всему человечеству "увидеть" нашу землю в виде этого "шарика". Увидеть и еще сильнее полюбить прекрасную Землю, населенную разумными существами. И в этом заслуга космического фотографирования.

Космическому фотографированию присуща не только глобальность. Оно помогает человечеству зорче и глубже рассмотреть объект или явление. Уже сейчас с помощью космического фотографирования уточняют прогнозы, разведывают полезные ископаемые, изучают болезни леса, обнаруживают тектонические сдвиги земной коры, исследуют планеты Солнечной системы. Космическое фотографирование служит человечеству и поэтому понятен возросший интерес к нему не только широкого круга специалистов, но и читателей. Однако литературы, посвященной рассмотрению вопросов космического фотографирования, до сих пор не было. Эта монография и предназначена для того, чтобы устранить имеющийся пробел.