

**Г. А. КОРЕЦКАЯ**

**СПУТНИКОВЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ  
В МАРКШЕЙДЕРИИ**

*Учебное пособие*

КЕМЕРОВО 2012

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Кузбасский государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева»

**Г. А. КОРЕЦКАЯ**

**СПУТНИКОВЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ  
В МАРКШЕЙДЕРИИ**

Учебное пособие

КЕМЕРОВО 2012

УДК 622.1: 528

Рецензенты:

Кафедра маркшейдерского дела Санкт-Петербургского государственного горного университета (зав. кафедрой проф., д-р техн. наук В. Н. Гусев)

Зам. директора по науке Института угля Сибирского отделения Российской академии наук, проф., д-р техн. наук В. С. Зыков

Корецкая, Г. А. Спутниковые навигационные системы в маркшейдерии : учеб. пособие / Г. А. Корецкая ; КузГТУ. – Кемерово, 2012. – 93 с.  
ISBN 978-5-89070-840-3

Рассмотрены маркшейдерские работы с использованием Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС/GNSS). Изложены общие сведения о методе спутникового определения координат, даны рекомендации по применению метода при построении опорных сетей и создании съемочного обоснования. Рассмотрены системы координат спутниковой геодезии, основные источники ошибок спутниковых измерений и методы ослабления их влияния. Даны рекомендации по организации и проектированию наблюдений на пунктах СОК: выбор параметров наблюдений и режима работ, подготовка аппаратуры, ведение полевого журнала и обработка результатов маркшейдерско-геодезических измерений.

Подготовлено для студентов вузов, обучающихся по специальности 130400.65 «Горное дело» специализации 130404 «Маркшейдерское дело», а также может быть рекомендовано студентам и аспирантам, изучающим геодезию и маркшейдерскую работу.

Библиогр. 19 назв., табл. 5, ил. 41.

Печатается по решению редакционно-издательского совета КузГТУ.

УДК 622.1: 528

© КузГТУ, 2012

ISBN 978-5-89070-840-3

© Корецкая Г. А., 2012

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Федеральный государственный образовательный стандарт третьего поколения предъявляет повышенные требования к уровню и качеству подготовки специалистов высшего профессионального образования. Чтобы быть конкурентно способными и востребованными на рынке труда, горные инженеры-маркшейдеры должны знать современные технологии и уметь их использовать в своей профессиональной деятельности.

Подготовка учебного пособия вызвана бурным развитием и внедрением в маркшейдерскую практику координатных определений спутниковыми методами и вместе с тем отсутствием учебно-методической литературы по этим вопросам. Автором была поставлена задача в краткой форме, просто и доступно изложить общие принципы функционирования современных спутниковых навигационных систем и их применение в маркшейдерии.

Когда появились GPS-приемники, то возникло мнение, что для определения координат достаточно нажать на кнопку контроллера. Однако уже первые работы показали, что приемник может выдать «не те координаты»: то оператор неправильно выбрал место для наблюдения, то неверно задал режим работы. В настоящее время накоплен достаточный опыт маркшейдерско-геодезических работ с применением спутниковых технологий. Однако еще остается много спорных вопросов, требующих глубокого понимания метода спутникового позиционирования. Нужно помнить, что спутниковые технологии, хотя и во многом подобны классическим методам геодезии, в то же время имеют ряд особенностей, без знания которых невозможно определить координаты с необходимой точностью.

Основными источниками информации являются: первая книга по GPS, изданная на русском языке, которую называют не иначе как «перевод Генике» [1], издание в двух томах К. М. Антоновича [5, 6], а также нормативные документы и публикации материалов по использованию GPS-технологий в геодезии и маркшейдерии.

Особенностью учебного пособия является целевая направленность в рассмотрении принципов функционирования Глобальных навигационных спутниковых систем, режимов работы и методов измерений, теоретических основ определения координат наземных пунктов, факторов, влияющих на точность измерений. Пособие состоит из семи разделов.

В первом разделе «Физические основы электронной дальнометрии» изложены общие принципы измерения расстояний с помощью электромагнитных волн.

Второй раздел «Спутниковые навигационные системы» посвящен назначению и структуре Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС/GNSS).

В третьем и четвертом разделах «Системы координат спутниковой геодезии и связь между ними» и «Редукционные переходы» изложены теоретические основы спутниковой геодезии, необходимые в дальнейшем для понимания спутниковых технологий.

Пятый раздел «Методы определения координат в спутниковой геодезии» посвящен геометрическим принципам позиционирования, сущности абсолютного и дифференциального методов.

В шестом разделе «Основные источники погрешностей спутниковых наблюдений» рассмотрены факторы, влияющие на точность измерений, даны рекомендации по их уменьшению.

Седьмой раздел «Производство работ при спутниковых наблюдениях» посвящен организации и проектированию наблюдений на пунктах спутникового определения координат (СОК): выбору параметров наблюдений и режима работ, подготовке аппаратуры, ведению полевого журнала и обработке результатов измерений.

В области спутниковых технологий сохраняется проблема терминологии, которая используется в радионавигации и геодезии. Поскольку учебное пособие предназначено для студентов-маркшейдеров, автор отдал предпочтение традиционной геодезической терминологии. Приведен словарь терминов и определений.

В настоящем издании использован опыт преподавания дисциплины «Спутниковые навигационные системы», а также практический опыт работы с применением спутниковых технологий топографо-геодезической группы отдела инженерных изысканий ОАО «Кузбассгипрошахт» и ООО «СибГеоПроект-СпецТехнологии».

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 130400.65 «Горное дело» специализации 130404 «Маркшейдерское дело», а также может быть рекомендовано студентам и аспирантам, изучающим геодезию и маркшейдерскую.

Автор признателен профессору кафедры маркшейдерского дела КузГТУ Р. В. Бузуку за ценные замечания и советы, высказанные в процессе подготовки рукописи к изданию.

## ВВЕДЕНИЕ

### Значение курса для специальности «Маркшейдерское дело»

В конце XX века в геодезии нашли широкое применение новые методы и средства измерений, базирующиеся на использовании искусственных спутников Земли, получивших название спутниковое позиционирование. Новые технологии сумели за короткий промежуток времени проникнуть в различные сферы деятельности, заинтересованные в оперативном определении местоположения. Координаты пунктов нужны не только геодезистам и маркшейдерам, но и морякам, авиаторам, военным, туристам, путешественникам и другим потребителям. Спутниковые приемники внедряются в практику маркшейдерских работ на открытых и подземных разработках.

С помощью Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС/GNSS) выполняют следующие виды работ:

- определение границ земельных отводов, шахт и разрезов;
- маркшейдерские замеры и съемки на открытых работах (съемка складов и отвалов);
- определение подходных пунктов, привязка скважин;
- наблюдение за деформациями, за сдвижением на подрабатываемых территориях;
- планировка поверхности;
- управление грузопотоками горного предприятия;
- наблюдение на техногенных и геодинамических полигонах.

Применение спутниковых технологий позволяет не только повысить производительность полевых и камеральных работ, но и улучшить качество маркшейдерского обслуживания горного предприятия.

### Достоинства и недостатки метода СОК

1. Применение метода не требует строительства высоких, дорогостоящих сигналов.

2. Не нужно обеспечивать видимость на все соседние пункты триангуляции, полигонометрии или пункты СОК. Для ориентирования построенных сетей достаточна видимость на 1-2 соседних пункта или на специально определенные ориентирные пункты.

3. Расстояния между определяемыми пунктами могут составлять десятки километров; возможны наблюдения в любую погоду, как в дневное, так и в ночное время.

4. Метод позволяет ускорить процесс получения координат и отметок пунктов, увеличивая производительность на 15–30 % для точных наблюдений.

5. Возможна полная автоматизация процесса от наблюдений до вычисления координат в реальном времени.

6. Метод позволяет вести непрерывные наблюдения на техногенных полигонах за осадками и деформациями земной поверхности.

К недостаткам метода СОК можно отнести следующие:

1. Высокая стоимость аппаратуры и вспомогательных приборов, необходимость наличия радиосвязи.

2. На практике не всегда выдерживается паспортная точность прибора, так как она зависит от ряда внешних факторов, таких как геометрия спутников, вспышки на солнце, магнитные бури, фазы Луны, гравитационное поле Земли.

3. Время наблюдения на станциях зависит от требуемой точности и количества спутников, видимых одновременно, и их взаимного расположения.

4. Разнобазовость (разносистемность) координат определяемых пунктов.

5. Ограничения при применении в лесопарковых зонах и зонах высотной застройки.

## **РАЗДЕЛ 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ**

### **1.1. Принцип измерения дальномерных расстояний**

Спутниковое позиционирование базируется на электронных методах геодезических измерений, в первую очередь *на электронной дальнометрии*, которая широко используется в наземной геодезии. В случае спутниковых измерений эти методы претерпели существенные изменения, обусловленные спецификой прохождения сигналов на космических трассах.

С помощью спутниковых приемников определяют расстояние от приемника до спутника. Принцип измерения расстояния аналогичен принципу измерения длин линий наземными свето- и радио-

дальномерами. Основной измеряемой величиной в этих дальномерах является время  $\tau$ , затрачиваемое сигналом на прохождение удвоенного расстояния (в прямом и обратном направлениях). Если скорость распространения такого сигнала известна, то измеряемое расстояние определяется по формуле

$$D = \frac{c\tau}{2},$$

где  $c$  – скорость распространения электромагнитной волны ЭМВ.

Скорость света известна с высокой точностью, обеспечивающей требования высокоточных геодезических измерений: 300 тыс. км/с, в качестве современной оценки скорости света в вакууме принято значение  $c_0 = 299\,792\,458 \pm 1,2$  м/с.

Метод измерения расстояний свето- и радиодальномерами называют *двусторонним*, т. к. время излучения и приема сигнала регистрируется одними и теми же часами, поэтому не возникает проблемы синхронизации часов.

В спутниковых технологиях находят применение *односторонние* (беззапросные) методы дальномерных измерений, основная особенность которых состоит в том, что передающее устройство располагают на спутнике, а приемное – на наземном пункте.

При этом сигнал проходит измеряемое расстояние только в одном направлении – от спутника до приемника. Если в этом случае момент излучения и момент приема сигнала зафиксированы точно синхронизированными часами, расположенными на спутнике и приемнике, то измеряемое расстояние  $D$  равно

$$D = c\tau,$$

где  $\tau$  – время прохождения сигналом расстояния от спутника до приемника.

Главной трудностью при определении расстояния от спутника до приемника является точное выделение момента времени, в который передан радиосигнал со спутника.

## 1.2. Сведения об электромагнитной волне

Для понимания метода СОК необходимо вспомнить некоторые сведения об электромагнитной волне (ЭМВ).



Условием возникновения электромагнитных волн является ускоренное движение электрических зарядов. В окружающем заряд пространстве возникает система периодически изменяющихся электрических и магнитных полей. На рис. 1.1 изображен «моментальный снимок» такой системы полей. Образуется так называемая электромагнитная волна, бегущая по всем направлениям от колеблющегося заряда. В каждой точке пространства электрические и магнитные поля меняются во времени периодически [3].

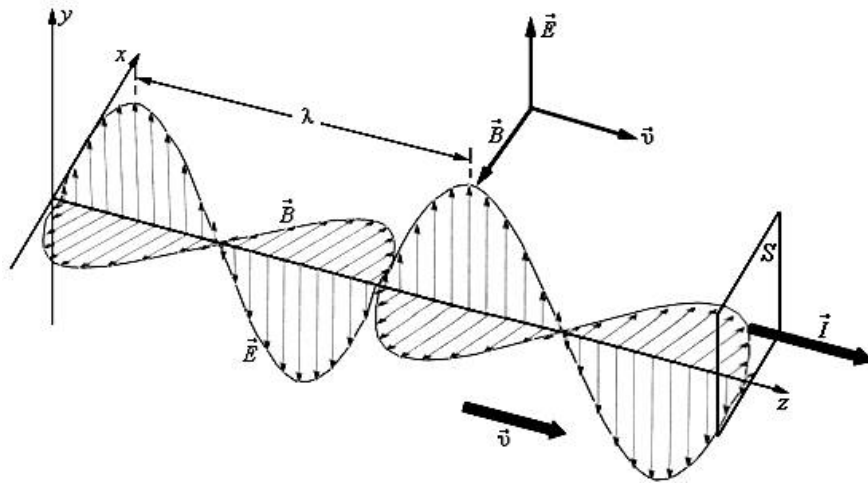


Рис. 1.1. Электромагнитная волна:

$\vec{B}$  – вектор магнитной индукции;  $\vec{E}$  – вектор напряженности электрического поля;  $\vec{v}$  – вектор скорости распространения ЭМВ;  $\lambda$  – длина волны

*Свойства электромагнитной волны (ЭМВ):*

– ЭМВ излучаются колеблющимися зарядами, причем интенсивность излученной волны тем больше, чем больше ускорение, с которым движется заряд;

– ЭМВ существует только в электромагнитном поле (ЭМП);

– ЭМП осуществляет связь между заряженными частицами;

– ЭМП существует только в движении;

– электрические и магнитные волновые колебания совершаются в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, сдвинутых друг относительно друга по фазе на  $90^\circ$ , распространяются в одном направлении и с одинаковой скоростью;

– электромагнитные колебания носят гармонический характер, т. е. совершаются по закону изменения тригонометрических функций  $\sin$  и  $\cos$ . В общем виде уравнение гармонического колебания

$$x(t) = A \cos \varphi \text{ или } x(t) = A \cos(\omega T + \varphi_0),$$

где  $x(t)$  – текущая амплитуда;  $A$  – максимальная амплитуда;  $\varphi$  – фаза колебаний;  $\omega$  – угловая частота;  $T$  – время, за которое происходит одно полное колебание;  $\varphi_0$  – начальная фаза колебаний.

В дальнейшем, говоря об электромагнитных колебаниях или волнах при их графическом изображении, будем строить только электрическую составляющую, не показывая магнитную, то есть в одной плоскости (рис. 1.2).

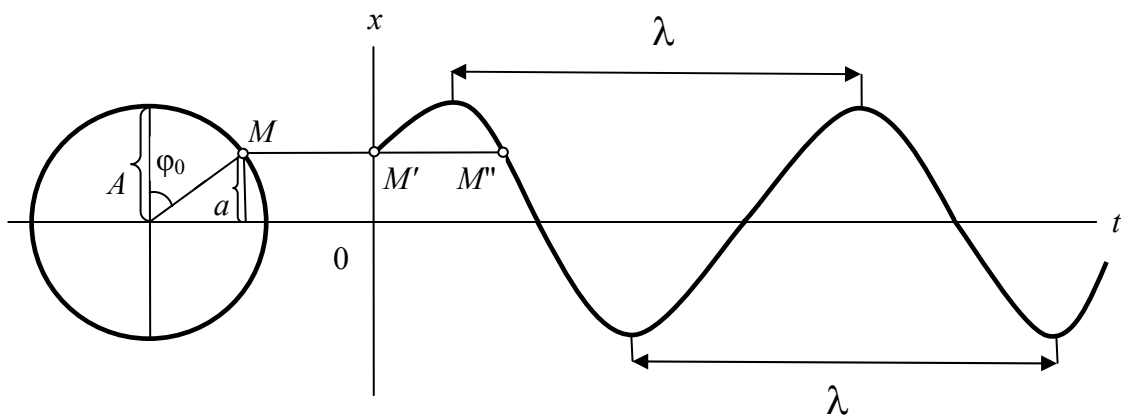


Рис. 1.2. График гармонического колебания:

$a$  – текущая амплитуда;  $\lambda$  – длина волны;  $t$  – текущее время от начала отсчета;  $a/A = \sin \varphi$ ;  $\varphi = 2\pi t/T$

В виде окружности на рис. 1.2 изображено положение точек электромагнитной волны при проектировании этих точек на поперечную плоскость. Для наглядности эта проекция повернута на  $90^\circ$  и совмещена с плоскостью рисунка. Точка  $M'$  движется по синусоиде, когда  $\varphi = 360^\circ$ , процесс повторяется.

Одной из важнейших характеристик электромагнитных волн является частота колебаний  $f$  или связанная с ней длина волны

$$\lambda = v/f,$$

где  $v$  – скорость распространения волны;  $f$  – частота колебаний электромагнитных волн, измеряемая в герцах (Гц), кГц, МГц, ГГц:

$$1 \text{ Гц} = 1/\text{с}; 1 \text{ кГц} = 10^3 \text{ Гц}; 1 \text{ МГц} = 10^6 \text{ Гц}; 1 \text{ ГГц} = 10^9 \text{ Гц}.$$

Электромагнитные волны, используемые для радиосвязи, называются *радиоволнами*. К радиоволнам относят колебания с частотами от 10 МГц до 300 ГГц, что соответствует длинам волн от 30 км до 1 мм.

В спутниковых приборах используется в основном *сантиметровый диапазон* (0,1–0,01 м), который соответствует радиоволнам, поэтому в основу спутниковых приемников для измерений положены радиодальномеры [4].

### 1.3. Модуляция электромагнитных волн

Амплитуда, частота и фаза характеризуют электромагнитное колебание. Изменение одного или нескольких из этих параметров с течением времени называется *модуляцией*. Различают амплитудную, частотную и фазовую модуляции в зависимости от того, какой из параметров изменяется с течением времени (рис. 1.3).

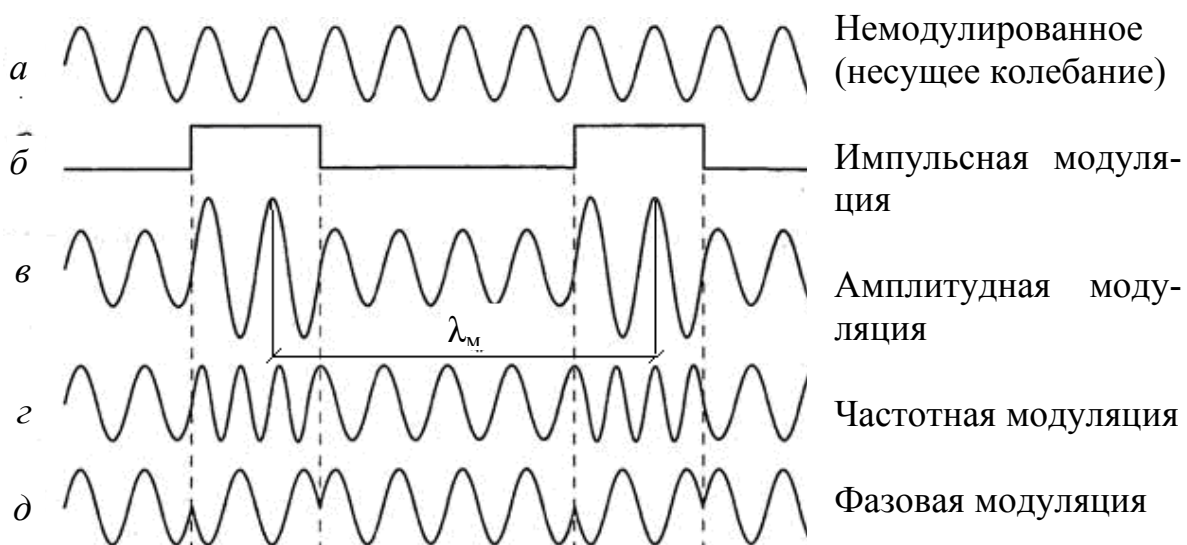


Рис. 1.3. Виды модуляции

*Немодулированное колебание* (а) имеет постоянными все характеристики. Изменяя периодически амплитуду колебания, получают *амплитудную модуляцию* (в). Зная длину модулированной волны  $\lambda_M$  и число ее уложений, можно вычислить расстояние

$$D = \frac{\lambda_M N}{2} + r,$$

где  $N$  – число уложений;  $r$  – остаток в прямом и обратном направлениях.

Изменяя частоту колебания, получают *частотную* модуляцию ( $\varepsilon$ ); при сдвиге начальной фазы – *фазовую* модуляцию ( $\delta$ ).

При *импульсной модуляции* ( $\beta$ ) сохраняются неизменными характеристики электромагнитной волны, а изменяется с определенной частотой сам характер распространения волны, который приобретает прерывистый или импульсный вид. Одним из методов получения импульсной модуляции является механическое прерывание ЭМВ [3].

Частота исходной (немодулированной) волны называется *несущей* частотой, а частота изменения характеристик волны при модуляции – *частотой модуляции* [3].

Принцип модуляции широко используется при измерении длин линий в светодальномерах, радиодальномерах и спутниковых приемопередатчиках. Информация идет как от источника (спутника) к приемнику, так и от приемника (Земля) к спутнику. Благодаря модуляции электромагнитных волн радиодиапазона появляется возможность:

- производить грубые измерения расстояний  $m_S = \pm(100-50)$  м;
- производить точные измерения  $m_S = \pm(1-2)$  см;
- передавать дополнительную информацию;
- кодировать информацию.

Все комбинации модуляций образуют *кодированную модуляцию* и представляют сам код, состоящий из различных всплесков, который расшифровать достаточно сложно (рис. 1.4).

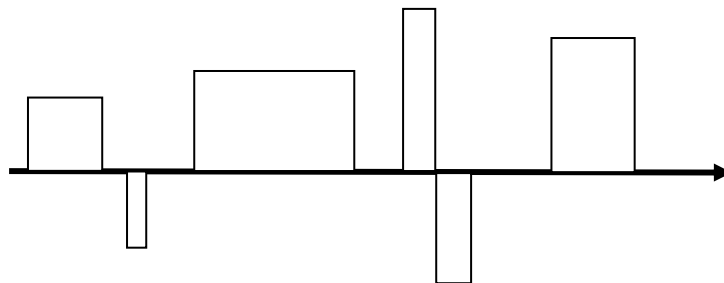


Рис. 1.4. Кодовая модуляция

В спутниковой геодезии наибольшее применение получили *импульсно-фазовая и кодовая* модуляции [9].

Модуляция создается приборами – модуляторами, которые бывают внешними и внутренними. При внешней модуляции модулятор располагают на пути электромагнитной волны. При внутренней модуляции воздействуют непосредственно на источник модуляции – это различного вида генераторы частот (атомные, кварцевые часы). У большинства электронных тахеометров и светодальномеров применяется внутренняя фазово-импульсная модуляция, при которой с требуемой частотой воздействуют на лазерные излучатели. Немодулированные волны служат для поиска, модулированные для кодирования.

Чтобы определить время распространения сигнала, необходимо знать, когда он покинул спутник. Для этого на спутнике и в приемнике одновременно генерируется одинаковый *псевдослучайный код* (рис. 1.5).

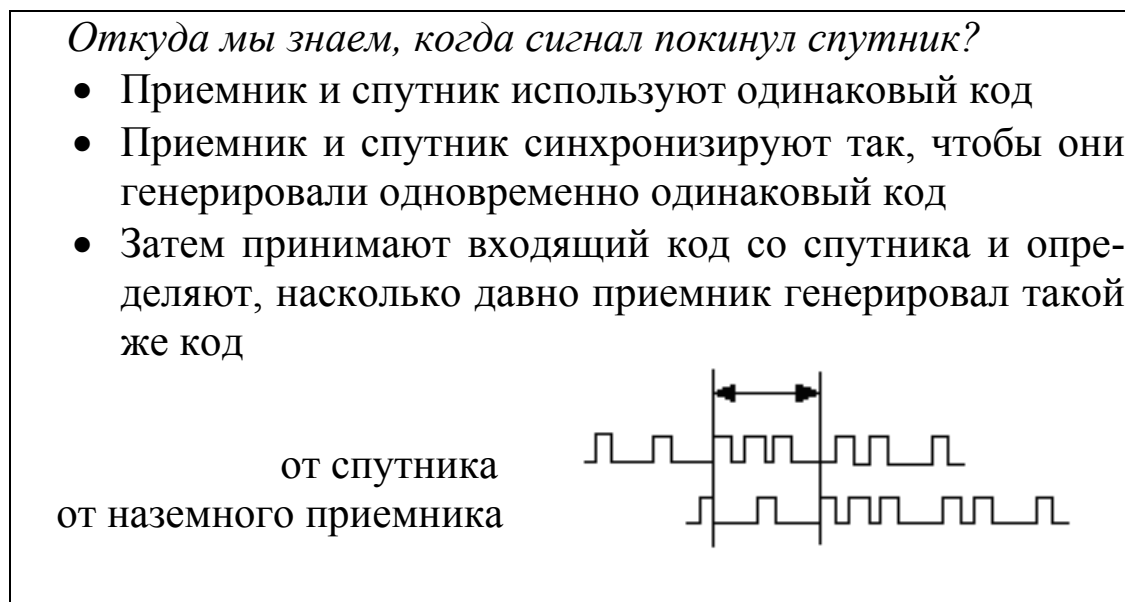


Рис. 1.5. Измерение временной задержки между одинаковыми участками кода

Используемые в GPS коды представляют собой бинарные коды, т. е. последовательность из единиц и нулей (двухуровневый сигнал). Они легко контролируются и воспроизводятся средствами электроники.

Каждый спутник передает радиосигналы на двух несущих частотах L1 и L2. В системе ГЛОНАСС значение L1 составляет около 1,6 ГГц, а значение L2 – 1,2 ГГц. В системе GPS радиосигналы передают на частоте L1 = 1575,42 МГц и L2 = 1227,60 МГц.

Сигнал L1 имеет два дальномерных кода с псевдослучайным шумом (PRN): P-код и C/A-код.

P-код («точный») зашифрован для военных целей.

C/A-код («грубый») не зашифрован для пользователей.

Сигнал L2 модулируется только с P-кодом. Большинство гражданских пользователей используют C/A-код при работе с GPS-системам, и поэтому C/A-код получил название «гражданского кода».

Приемник проверяет входящий сигнал со спутника и определяет, когда он генерировал такой же код. Полученная разница, умноженная на скорость света, дает искомое расстояние.

#### 1.4. Способы регистрации разности фаз

Разность фаз  $\Delta\varphi$  вычисляют по формуле

$$\Delta\varphi = \varphi_m - \varphi_n,$$

где  $\varphi_m$  – текущая фаза;  $\varphi_n$  – полный фазовый цикл;

$$\varphi_n = 360^\circ N,$$

где  $N$  – число полных уложений длин волн в прямом и обратном направлениях.

*Фазовый цикл* – это целый оборот, равный  $360^\circ$ . Графически это можно представить так (рис. 1.6).

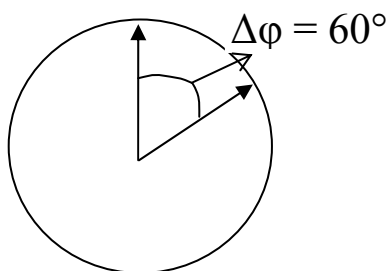


Рис. 1.6. Разность фаз  $\Delta\varphi$

Например, при измерении расстояния текущая фаза  $\varphi_m = 36060^\circ$ ,  $N = 100$ , тогда  $\varphi_n = 36000^\circ$ ;  $\Delta\varphi = 36060^\circ - 36000^\circ = 60^\circ$ .

Известно, что один оборот или один фазовый цикл соответствует перемещению элементарной частицы ЭМВ на длину волны  $\lambda$ .

Например, при  $\lambda_M = 20$  см и  $\Delta\varphi = 60^\circ$  остаток составит 3,3 см.

Расстояние можно вычислить из основного уравнения фазовой дальнометрии

$$D = \frac{\lambda_M N}{2} + \frac{\lambda_M \Delta\varphi}{360 \cdot 2}.$$

Существуют следующие способы регистрации разности фаз: электронно-лучевой; компенсационный; импульсный [14].

1. *Электронно-лучевой способ.* Применяется в наземных радиодальномерных устройствах и в радиолокаторах. Способ позволяет определить как величину остатка, так и всю длину измеряемой линии. На экране электронно-лучевой трубки ЭЛТ получают круговую развертку, на которой отмечены яркими точками сигналы выхода или начала фазы и сигнал, поступивший на приемное устройство, в конце измеряемой линии. На экране ЭЛТ нанесена радиальная сетка, оцифрованная в угловой мере. По сетке берут отсчет разности фаз до десятых долей градуса.

Способ достаточно прост и удобен, однако не обладает большой точностью. В радиолокаторах точность измерения расстояний достигает нескольких десятков метров, в радиодальномерах – до 0,1 м.

2. *Компенсационный способ регистрации.* Световой луч (радиоволну) заставляют пройти дополнительный путь, равный разности фаз  $\Delta\varphi$ , на исходной точке (у передатчика) или на конечной (у приемника). Измеряя этот путь, получают значение  $\Delta\varphi$  в линейной мере, то есть определяют остаток измеряемой линии. Недостатком компенсационного способа является увеличение размеров и веса аппаратуры.

3. *Импульсный способ.* Одновременно с начальным импульсом на измерительное устройство поступают импульсы заполнения, следующие друг за другом с высокой частотой, и прекращают поступать с приходом импульса с дистанции. С помощью специального счетного устройства подсчитывают число импульсов заполнения, а зная их частоту и длину волны, вычисляют величину остатка. У современных измерительных комплексов величина остатка совместно с целой длиной измеряемой линии высвечивается на табло индикатора или на экране дисплея.

При импульсном методе появляется возможность повысить точность измерений. Метод находит применение для измерения  $\Delta\varphi$  в свето-, радиодальномерах и электронных тахеометрах.

## РАЗДЕЛ 2. СПУТНИКОВЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

### 2.1. Назначение Глобальных систем спутникового позиционирования (ГССП)

ГССП предназначены для определения пространственных координат и скорости объектов на поверхности Земли, в околоземном воздушном и космическом пространстве, а также обеспечения пользователей сигналами системного времени, привязанного к международным временным шкалам.

Развитие космической геодезии связано с запуском 4 октября 1957 года первого искусственного спутника Земли и последующими запусками в России, в США и других странах космических аппаратов.

Предшественники современных ГССП (создавались для военных целей):

– ГССП 1-го поколения «Transit» (USA, была введена в эксплуатацию в 1964 г., открыта для гражданского использования в 1967 г.);

– «Цикада» (СССР, введена в эксплуатацию в 1979 г.).

Разработка системы второго поколения началась в середине 70-х годов, и в 1995 г. появились две системы:

– в США – **NAVSTAR** (Навигационные спутники точного времени и координат), чаще называемой GPS (Система Глобального Позиционирования);

– в России – **ГЛОНАСС** (Глобальная Навигационная Система Спутников). Вскоре ГЛОНАСС по ряду причин (перестройка, развал экономики) практически прекратила свое существование, но в 2006–2007 гг. были осуществлены запуски новых спутников, и появилась возможность практического использования системы (с 2008–2009 гг. на территории России, а с 2010 г. – на всей планете) [13].

Таким образом, в настоящее время функционируют две спутниковые навигационные системы: в США – GPS и в России – ГЛОНАСС. Эти системы нашли широкое применение в геодезии. Особого внимания заслуживают методы фазовых измерений, которые позволили реализовать сантиметровой уровень точности при измерении базисных линий от нескольких метров до тысяч и более километров.



В 1999 г. было принято решение о создании космической системы Европейского космического агентства Galileo (30 спутников и 3 резервных), что должно увеличить общую космическую группировку до 80 спутников, покрывающих весь земной шар, с целью повышения точности и надежности определений.

Для этого на территории 15-ти стран заложили 92 пункта (Всемирной системы координат) так, чтобы в каждой стране было не менее трех пунктов. Расстояние между пунктами 300–500 км, по результатам уравнивания сети точность сети оценивается на уровне 3–4 см.

## **2.2. Общие сведения о методе СОК и организации спутниковых наблюдений**

### **2.2.1. Сущность спутникового позиционирования**

Сущность спутникового позиционирования заключается в следующем. Вокруг Земли вращаются спутники, непрерывно излучающие радиосигналы и перемещающиеся по нескольким орбитам так, чтобы в любой точке околоземного пространства можно было принимать сигналы одновременно не менее чем от четырех спутников. Если параметры орбит спутников известны, то для определения положения какой-либо точки необходимо:

- установить на точке спутниковый приемник и с его помощью принять радиосигналы от нескольких спутников одновременно;
- обработать радиосигналы и вычислить расстояния до спутников;
- вычислить координаты точки, решив пространственную линейную засечку.

Решение задачи усложняется подвижностью взаимодействующих в системе спутников и определяемых точек: спутники непрерывно движутся с огромной скоростью относительно определяемых точек, радиолуч искажается, проходя через тропосферу; необходимо внести множество различных поправок для получения необходимой точности измерений.

Спутниковая система позиционирования основана на использовании односторонних методов измерения расстояния. Для реализации такого метода спутниковая радиодальномерная система рас-

падает на две основные части: устанавливаемое на спутнике передающее устройство и находящийся в распоряжении наземного потребителя приемно-вычислительный комплекс. Вместе с тем для поддержания постоянной работоспособности такой системы возникает необходимость в использовании служебной подсистемы управления и контроля. С учетом вышеизложенного современные спутниковые системы позиционирования включают в себя четыре основные составные части, получившие название секторов [1]:

- космический сектор (сектор геодезических спутников – созвездие спутников);
- сектор контроля и управления;
- сектор пользователя (специальные приемники спутниковых сигналов, в том числе геодезические);
- наземный сектор (приемно-вычислительный комплекс).

Общая структура глобальных спутниковых систем позиционирования (ГССП) GPS и ГЛОНАСС приведена на рис. 2.1.

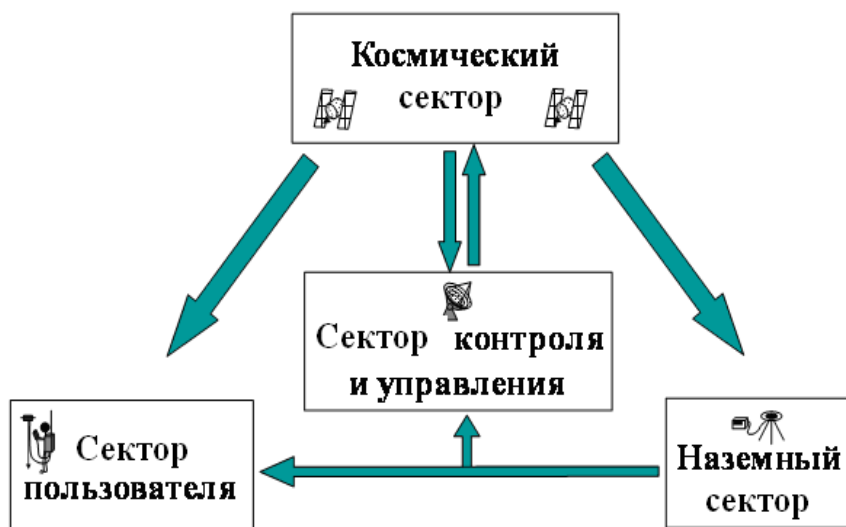


Рис. 2.1. Общая структура ГССП GPS и ГЛОНАСС

### 2.2.2. Сектор контроля и управления

Это комплекс наземных средств, обеспечивающих непрерывное наблюдение и контроль над работой всей системы.

Сектор контроля и управления состоит из нескольких комплексов зданий и сооружений, включающих в себя:

- комплекс слежения за спутниками (**КС**);

- контрольно-измерительный комплекс (**КИК**);
- комплекс приема и переработки информации (**ИК**).

Рабочий сектор управления и контроля GPS системы состоит из одной ведущей станции управления, пяти станций слежения и трех загрузочных станций.

Станции слежения за спутниками (**КС**) равномерно расположены на поверхности Земли, образуя так называемую космическую геодезическую сеть:

- для системы GPS в штате Колорадо, на островах Диего-Гарсия (Индийский океан), Гавайи (Тихий океан), Вознесения (Атлантический океан);
- для системы ГЛОНАСС в Москве, Санкт-Петербурге, Воркуте, Якутске, Енисейске, Улан-Удэ и Уссурийске.

Задачи контрольно-измерительного комплекса (**КИК**):

- осуществлять непрерывное отслеживание всей передаваемой спутниками информации;
- производить обобщение и анализ этой информации с целью своевременной корректировки координат спутников (эфemerид);
- измерять эталонное точное время и корректировать время на часах спутника;
- изменять положение спутника на орбите с помощью реактивного двигателя и запаса топлива на спутнике;
- выявлять неисправности в работе спутников и принимать меры по их устранению;
- участвовать в вычислении координат спутника, которые определяются пространственной линейной засечкой с трех измеренных наземных станций контрольно-измерительного сектора.

Станции слежения круглосуточно отслеживают все спутники в секторе обзора и выполняют измерение расстояний до спутников.

На ведущую станцию передают все метеоданные (температуру, давление, влажность) для введения поправок в измеряемые расстояния и в координаты спутников.

Информационный комплекс (**ИК**) служит для сбора, обработки и передачи информации со спутника и на спутник. В системе GPS этот сектор состоит из пяти станций слежения, трех станций загрузки и одной ведущей станции. Каждый раз, когда спутник проходит над ведущей станцией, происходит введение поправок в его координаты.

### 2.2.3. Космический сектор

Навигационные спутники могут иметь различное назначение:

- спутники дальней космической связи для передачи информации, в том числе телевизионной;
- спутники для наблюдения за климатом планеты и погоды;
- спутники, собирающие разведывательную информацию;
- навигационные спутники для целей грубого и точного определения местоположения объекта (геодезические спутники для точного определения координат).

В общем случае навигационный спутник несет на себе следующее оборудование [1]:

- 1) аппаратуру для измерения навигационных параметров;
- 2) аппаратуру контроля орбиты;
- 3) атомные часы, генератор частот;
- 4) приборы контроля состояния бортовой аппаратуры;
- 5) устройство управления бортовой аппаратурой;
- 6) устройства общего назначения (терморегулирование, энергопитание, антенны и т. д.);
- 7) электронно-вычислительную машину.

Вес спутника – 455 кг, мощность передачи сигналов 450 В.

Питание осуществляется от бортовых аккумуляторов и от трехсекционных солнечных батарей площадью 7 м<sup>2</sup>, которые разворачиваются после вывода спутника на орбиту (рис. 2.2).

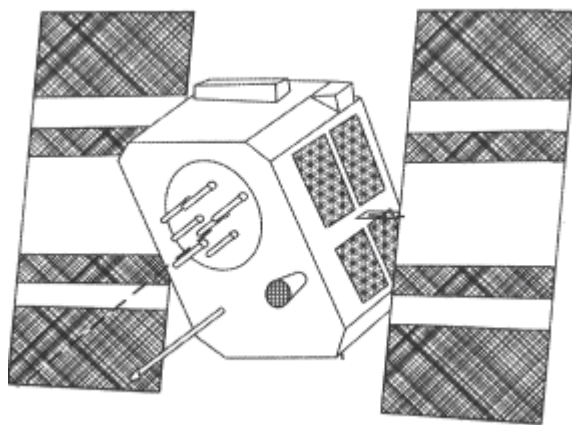


Рис. 2.2. Навигационный спутник с развернутыми солнечными батареями

Параметры систем глобального позиционирования GPS и ГЛОНАСС приведены в табл. 2.1.

Космический сектор систем ГЛОНАСС и GPS

Параметр	ГЛОНАСС	GPS
Число ИСЗ в системе	24 (3 в запасе)	24 (4 в запасе)
Число орбитальных плоскостей	3	6
Наклон орбиты	64,8°	55°
Период обращения ИСЗ	$^{h} 11 \ ^{m} 15 \ ^{s} 44$	$^{h} 11 \ ^{m} 58 \ ^{s} 00$
Высота ИСЗ над поверхностью Земли	19 100 км	20 150 км
Система координат	ПЗ-90	WGS-84
Срок активного существования	5 лет	7,5 лет

Схема взаимного расположения космических аппаратов двух систем приведена на рис. 2.3.

Система космических спутников  
ГЛОНАСССистема космических спутников  
GPS

Рис. 2.3. Схема орбит спутников

Для навигационных спутников и в той и в другой системе соблюдается требование к высоте полета (20 тыс. км). В этом случае спутники совершают два оборота за 24 часа. Плоскости орбит спутников с полюсом экватора составляют 60–70°, благодаря чему спутники захватывают все северное полушарие. На одной орбите могут

существовать несколько спутников (от 4 до 9). Оптимальное количество 6 спутников. В целом необходимо, чтобы в космосе находилось 24 спутника. В этом случае при полном открытом обзоре неба всегда можно установить связь минимум с четырьмя спутниками.

Гироскопические устройства на спутниках обеспечивают устойчивое ориентирование передающей антенны относительно поверхности Земли. Полученные от измерительного комплекса координаты относятся к наконечнику излучателя этой антенны.

#### 2.2.4. Сектор пользователя

Сектор пользователя представляет собой различного вида приемники. Они могут располагаться на борту самолета, корабля, в автомашине, в кармане пешехода, а также над центром геодезического пункта. Эти приемники представляют собой приемно-передающую антенну, предназначенную для приема информации и для измерения псевдодальностей до спутника. В приемниках имеется собственный генератор частот (кварцевые часы), источник питания в виде аккумуляторной батареи, мини-ЭВМ и возможность приема и передачи информации от наземного исполнителя. Управление приемником осуществляется с помощью дополнительного устройства, которое называется «контроллер».

Для окончательной обработки полученной со спутников информации, ее необходимо передать на базовый компьютер, имеющий программу по обработке этой информации. Чтобы получить окончательные значения длин линий или координат, необходимо приехать на базу и передать на компьютер записанную информацию. Можно ускорить процесс и получить результаты измерений непосредственно на пункте. Но для этого приемник должен быть снабжен радиомодемом.

Обычно выделяют три модификации приемников. *Приемники первого класса* предназначены для быстрых навигационных определений координат с небольшой точностью; *второго класса* – для определения положения движущихся объектов; *третьего класса* – для геодезических целей. Спутниковое оборудование выпускают более 50-ти производителей различных стран мира, основными из которых являются фирмы: «Trimble» (США), «Leica» (Швейцария), «ProMark» (Япония), «Geotonics» (Швеция), «Sersel» (Франция), «ГЕО» (Россия) и др. [21, 22, 23].

## РАЗДЕЛ 3. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИИ И СВЯЗЬ МЕЖДУ НИМИ

### 3.1. Фигура и размеры Земли и некоторых земных эллипсоидов

Под *фигурой Земли* понимают фигуру, ограниченную физической поверхностью Земли, т. е. поверхностью суши и невозмущенной поверхностью морей и океанов [10, 11, 12, 15].

Так как более 70 % земной поверхности покрыто морями и океанами, то для решения ряда практических задач принимают более сглаженную поверхность, ограниченную уровнем морей и океанов в спокойном состоянии, – поверхность геоида. *Геоидом* называется уровенная поверхность, в каждой точке которой нормаль к поверхности совпадает с направлением силы тяжести (с отвесной линией). Поверхность геоида имеет сложный волнообразный характер. Волны геоида имеют протяженность до 2000 км и высоту до 200 м (рис. 3.1).

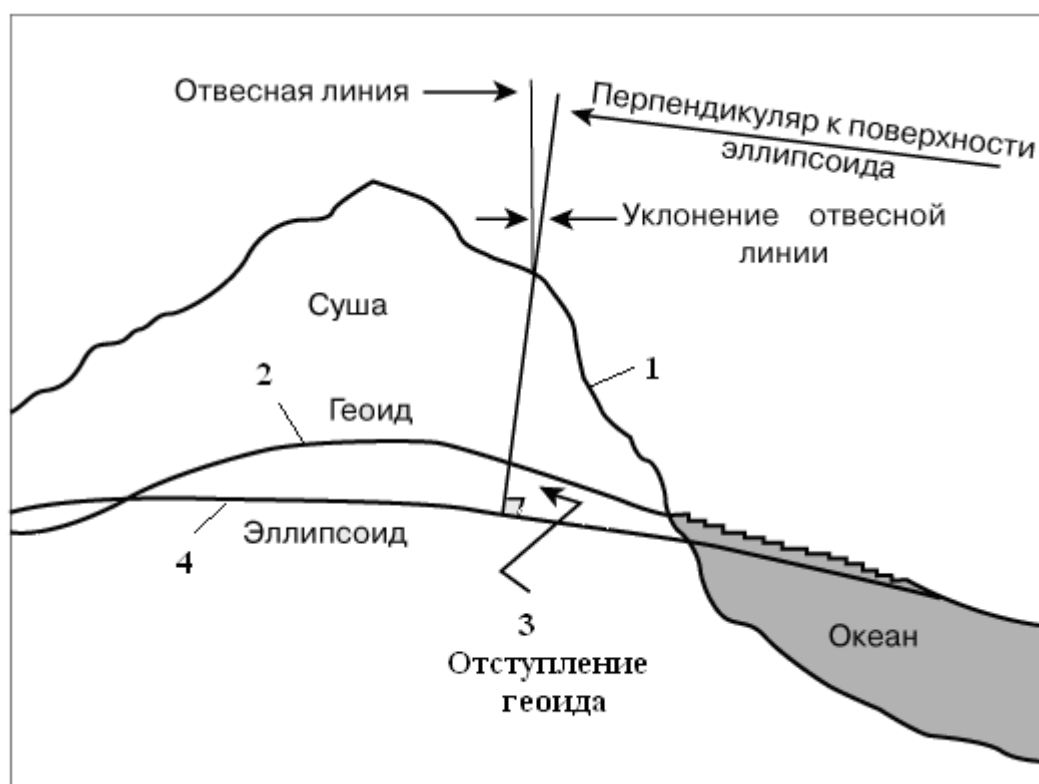


Рис. 3.1. Фигура Земли:

1 – физическая поверхность морского дна и суши; 2 – поверхность геоида; 3 – отступление геоида от эллипсоида; 4 – поверхность общего земного эллипсоида

Для решения большинства практических задач за фигуру Земли принимают правильную математическую поверхность – *эллипсоид вращения* с малым полярным сжатием (рис. 3.2).

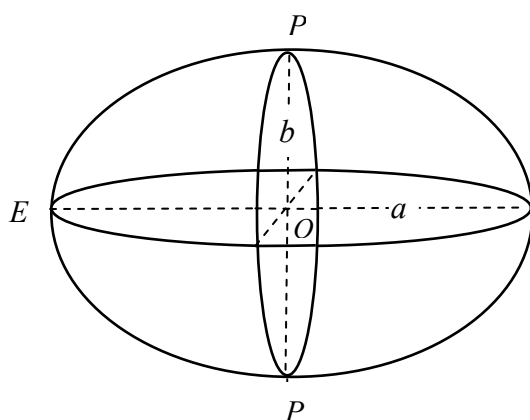


Рис. 3.2. Эллипсоид вращения:  
 $a$  – большая полуось;  $b$  – малая полуось

Полярное сжатие  $\alpha$  вычисляют по формуле  $\alpha = \frac{a-b}{a}$ .

Впервые параметры эллипсоида для территории нашей страны приняты в 1942 г. (*эллипсоид Красовского*). В настоящее время для вычислительных работ используются в основном три эллипсоида с системами координат: WGS-84 (Всемирная Геодезическая система, принятая в 1984 г.); ПЗ-90 (Параметры Земли 1990 г.) и эллипсоид Красовского СК-42 (Система Координат 1942 г.).

Для работ на территории одного государства или нескольких небольших государств удобнее принимать за поверхность относимости другие эллипсоиды, отличающиеся по своим параметрам от WGS-84 или ПЗ-90. Такие эллипсоиды, ориентированные в теле геоида, называются *референц-эллипсоидами*. Для территории России – это эллипсоид Красовского. В табл. 3.1 приведены результаты определения размеров общих земных эллипсоидов мировой геодезической системы [9].

Таблица 3.1

Размеры эллипсоидов

Эллипсоид	$a$	$1:\alpha$
Красовского	6 378 245	1:298,500
WGS-84	6 378 136	1:298,258
ПЗ-90	6 378 137	1:298,257



В спутниковой геодезии для определения положения пунктов на земной поверхности используют следующие системы координат (СК):

- 1) пространственная система прямоугольных координат;
- 2) система геодезических координат;
- 3) система зональных плоских прямоугольных координат в проекции Гаусса – Крюгера;
- 4) система плоских прямоугольных координат.

### 3.2. Пространственная система прямоугольных координат

Пространственная система прямоугольных координат является геоцентрической системой, так как начало координат совпадает с центром масс земного эллипсоида. Эта система используется для определения положения точки на земной поверхности координатами  $X, Y, Z$  (рис. 3.3), а также для определения положения спутников координатами  $\alpha, \delta$  (звездная система) (рис. 3.3). Одной из таких систем является WGS-84.

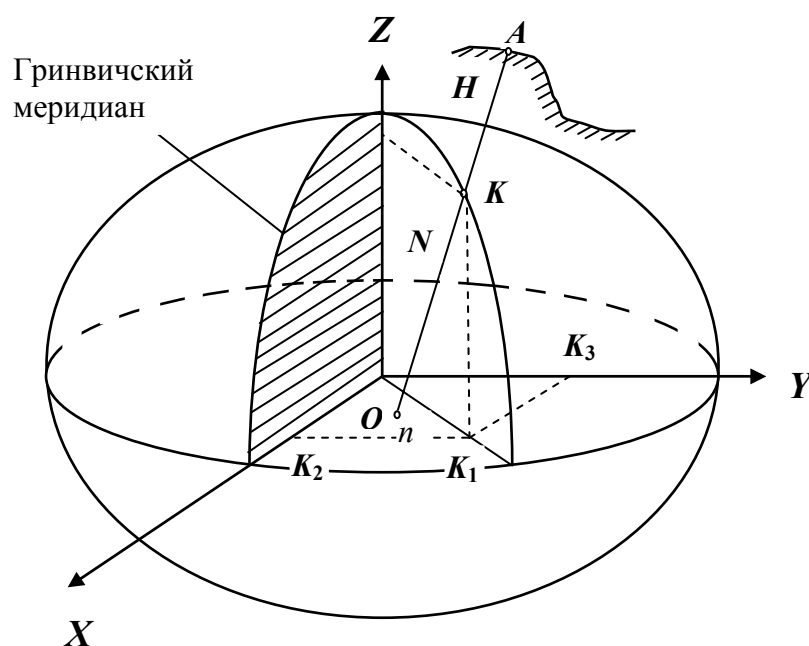


Рис. 3.3. Пространственная прямоугольная система координат:  $OK_2 = X_K$ ;  $OK_3 = Y_K$ ;  $K_1K = Z_K$ ;  $AK = H$ ;  $Kn = N$ , где  $H$  – нормальная высота;  $N$  – радиус кривизны первого вертикала

Пространственная система прямоугольных координат определяет положение точки  $A$  относительно центра  $O$  в пространственной

трехмерной системе координат. За ось  $X$  в этой системе принимается линия пересечения плоскости начального Гринвичского меридиана с плоскостью экватора. Ось  $Y$  располагается в плоскости экватора и направлена под углом  $90^\circ$  к оси  $X$ . Ось  $Z$  направлена из центра  $O$  в точку звездного неба – МУН (*Международное условное начало*), которая находится недалеко от Полярной звезды.

Теория движения искусственных спутников Земли строится в геоцентрической (звездной) системе (рис. 3.4). *Геоцентрическое прямое восхождение*  $\alpha$  – угол, отсчитываемый от плоскости Гринвичского меридиана до плоскости, в которой находится спутник (точка  $S$ ). *Геоцентрическое склонение*  $\delta$  – угол отсчитывается от плоскости экватора по дуге меридиана спутника. *Радиус-вектор*  $R$  – расстояние от центра масс Земли до спутника.  $OS'$  – проекция радиус-вектора  $R$  на плоскость экватора.

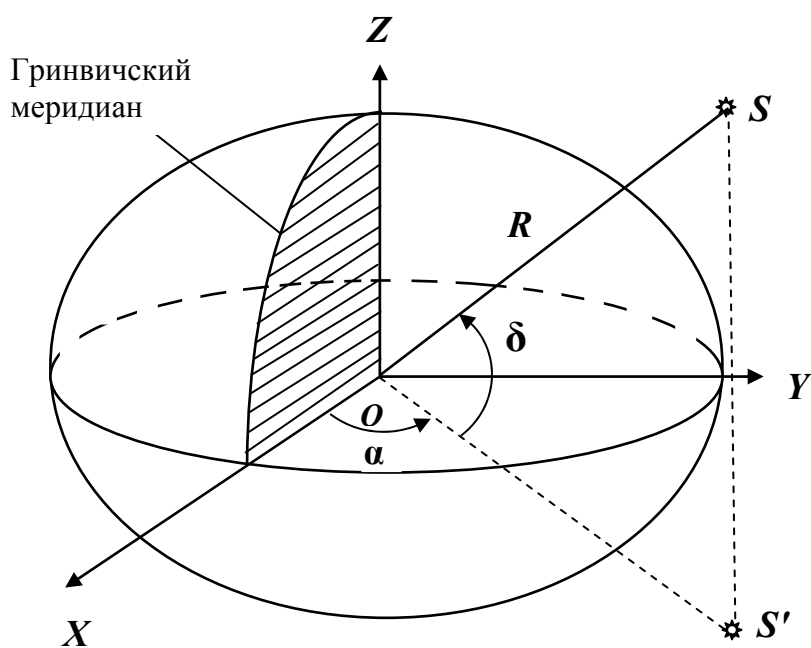


Рис. 3.4. Звездная система координат

При наблюдении спутников с поверхности Земли используют топоцентрическую систему, в которой координаты пункта наблюдения служат началом топоцентрической системы. Оси топоцентрической системы  $(x, y, z)$  параллельны осям геоцентрической системы. При использовании системы GPS совершают переход от WGS-84 к ПЗ-90, а от ПЗ-90 к системе СК-42. Переходы от одной системы к другой осуществляют по разработанным программам на ЭВМ [19].

### 3.3. Система геодезических координат

В этой системе координаты пунктов земной поверхности ( $B$ ,  $L$ ,  $H$ ) определяются относительно эллипсоида: общего земного эллипсоида; референц-эллипсоида (Красовского) [10, 11, 12, 15].

*Геодезической широтой ( $B$ )* точки  $A$  (рис. 3.5) называется угол, образованный нормалью к поверхности земного эллипсоида в данной точке и плоскостью экватора. Широта отсчитывается по меридиану в обе стороны от экватора и может принимать значения от  $0$  до  $90^\circ$ . Широты точек, расположенных к северу от экватора, называются северными, а к югу – южными.

*Геодезической долготой ( $L$ )* точки  $A$  называется двугранный угол между плоскостями геодезического меридиана данной точки и начального (нулевого) геодезического меридиана. Долготы точек отсчитываются от начального меридиана к востоку и западу и называются соответственно восточными и западными. Счет их ведется от  $0$  до  $180^\circ$  в каждую сторону.

*Геодезической высотой ( $H$ )* называется расстояние по нормали от поверхности эллипсоида до точки  $A$ . Началом координаты  $H$  служит нуль-пункт Кронштадтского футштока, в котором поверхности геоида и эллипсоида совпадают.

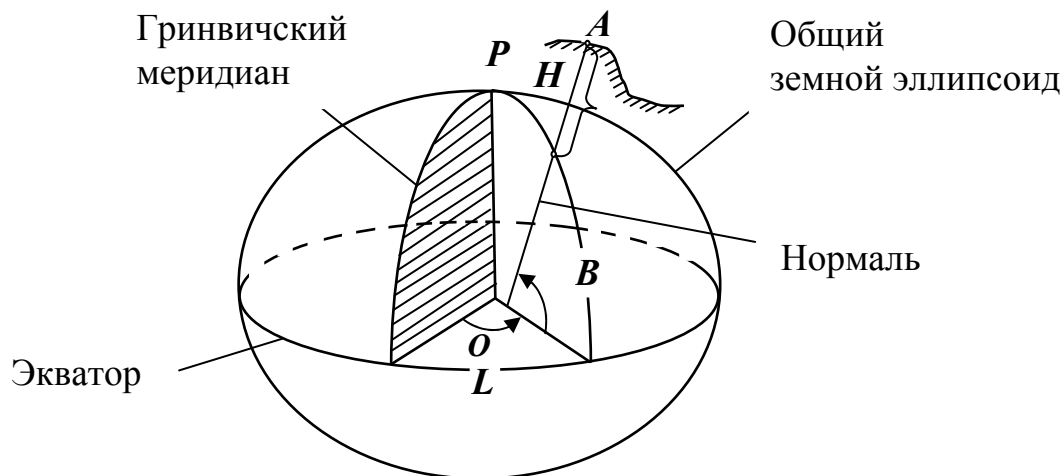


Рис. 3.5. Система геодезических координат

Такая эллипсоидальная система координат применяется при обработке наземных геодезических измерений. При создании спутниковых геодезических сетей, которые являются пространственными и физически не связаны с какой-либо отсчетной поверхностью, наиболее удобна пространственная прямоугольная система  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

### 3.4. Параметры связи систем координат

#### 3.4.1. Переход от геодезической к пространственной системе прямоугольных координат

В процессе обработки геодезических измерений, выполняемых с применением спутников, часто возникает необходимость перехода от одной системы координат к другой: от геодезической эллипсоидальной системы  $B, L, H$  к пространственной геоцентрической системе  $X, Y, Z$ . Переход осуществляют по формулам:

$$\begin{aligned} X &= (N + H) \cos B \cos L; \\ Y &= (N + H) \cos B \sin L; \\ Z &= [(1 - e^2)N + H] \sin B, \end{aligned}$$

где

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}};$$

$$e^2 = (a^2 - b^2) / a^2;$$

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2} \sec B - N;$$

$a$  и  $b$  – соответственно большая и малая полуоси референц-эллипсоида;  $e$  – первый эксцентриситет меридианного эллипса;  $H$  – геодезическая высота пункта над эллипсоидом;  $N$  – радиус кривизны первого вертикала.

#### 3.4.2. Переход от одной пространственной прямоугольной системы к другой

Иногда наряду с геоцентрической геодезической системой координат на практике удобно использовать топоцентрическую систему. В этой системе оси координат параллельно переносят на точку земной поверхности и определяют взаимное положение пунктов.

В спутниковой геодезии возникает задача не только перевычисления координат отдельных пунктов, но и задача перехода от одной пространственной системы к другой (рис. 3.6).

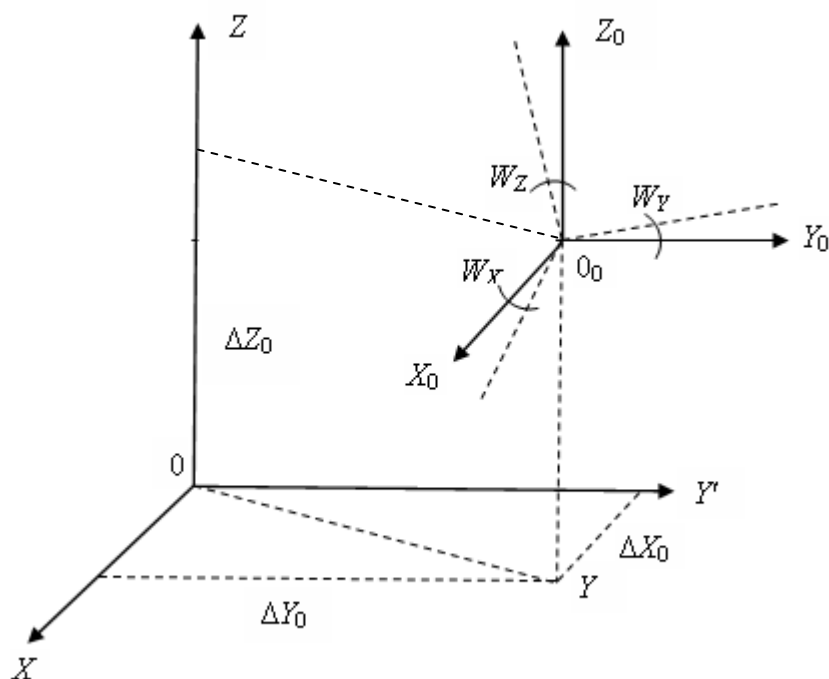


Рис. 3.6. Переход от одной пространственной системы  $X, Y, Z$  к другой пространственной системе  $X_0, Y_0, Z_0$ :

$W_X, W_Y, W_Z$  – угловые развороты осей в системе  $X_0, Y_0, Z_0$  относительно системы  $X, Y, Z$ ; начало координат  $O_0$  смещено относительно начала  $O$  на величины  $\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0$

На рис. 3.6 показаны две системы пространственных прямоугольных координат: первая  $X, Y, Z$  с началом в точке  $O$  (геоцентрическая) и вторая  $X_0, Y_0, Z_0$  с началом в точке  $O_0$  (топоцентрическая). В этом случае переход совершают по формулам:

$$X_0 = X + \Delta X_0 + W_Z Y - W_Y Z;$$

$$Y_0 = Y + \Delta Y_0 + W_Z X + W_X Z;$$

$$Z_0 = Z + \Delta Z_0 + W_Y X - W_X Y.$$

Параметры  $\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0, W_Z, W_X, W_Y$  и коэффициент  $M$  (масштабный коэффициент), характеризующий соотношение масштабов двух систем, называют *элементами трансформирования*. В общем случае могут различаться и линейные масштабы двух систем. Параметры связи некоторых пространственных координатных систем приведены в табл. 3.2 [9].

## Элементы трансформирования систем координат

Параметры связи	Системы координат		
	СК-42 ПЗ-90	СК-42 WGS-84	ПЗ-90 WGS-84
$\Delta X_0$ , м	+25	+25	0
$\Delta Y_0$ , м	-141	-141	0
$\Delta Z_0$ , м	-80	-78,5	+1,5
$W_X$	0"	0"	0"
$W_Y$	-0,35"	-0,35"	0"
$W_Z$	-0,66"	-0,736"	-0,736"
$M$	0	0	0

При решении большинства практических задач угловые развороты координатных осей принимают равными нулю.

### 3.4.3. Особенности определения высот с помощью спутниковых систем

Традиционным способом развития высотной сети является геометрическое нивелирование, в результате которого определяют нормальные высоты.

*Нормальная высота* определяется от поверхности геоида (квазигеоида) и имеет более распространенное физическое значение, чем *эллипсоидальная (геодезическая) высота*, отсчитываемая от поверхности эллипсоида. Соотношение между высотами

$$N^\gamma = N + \zeta,$$

где  $N^\gamma$  – нормальная высота;  $N$  – геодезическая высота;  $\zeta$  – высота геоида (квазигеоида).

Использование метода СОК для передачи нормальных высот без учета разностей высот геоида может привести к значительным погрешностям: до 1 м на расстоянии до 50 км и до 5 м на расстоянии до 200 км [1].

## 3.5. Проекция Гаусса – Крюгера

### 3.5.1. Основные свойства проекции

При решении различных инженерно-геодезических задач и выполнении топографических съемок наиболее целесообразной является система плоских прямоугольных координат, позволяющая существенно упростить вычисления, так как при обработке результатов измерений используются формулы плоской геометрии и тригонометрии [10, 11, 12, 15].

Известно, что плоскость эллипсоида не может быть изображена на плоскости проекций без искажений. Существуют различные способы изображения поверхности эллипсоида на плоскость. При выборе закона изображения необходимо выполнение следующих условий:

- обеспечить всю территорию государства единой системой плоских прямоугольных координат, что приведет к единообразию вычислений и к единой системе создания топографических карт;

- изображаемые на плоскости проекции элементы поверхности эллипсоида должны иметь минимальные искажения, учет которых при высокой точности и строгости должен быть достаточно прост.

Перечисленные условия обеспечивает проекция Гаусса – Крюгера – поперечно-цилиндрическая конформная проекция, позволяющая переходить к системе плоских прямоугольных зональных координат.

*Основные свойства проекции:*

1. Измеренные на поверхности земли углы переносят без искажений как на эллипсоид, так и с эллипсоида на плоскость. Это свойство позволяет сохранить подобие изображений и называется *конформностью* (неизменность формы), однако при этом могут меняться площади изображаемых участков.

2. За ось  $X$  принимают меридиан касания – осевой меридиан зоны, который изображается прямой линией.

3. За ось  $Y$  принимают линию экватора, который также изображается прямой линией.

4. Масштаб искажений по меридиану равен единице, т. е. искажений нет. Чем дальше линия удалена от осевого меридиана, тем больше ее искажение. Максимальные искажения возникают на краю зоны.

### 3.5.2. Система плоских прямоугольных координат в проекции Гаусса – Крюгера (зональная система координат)

Сущность проекции: воображаемый цилиндр (1), на который происходит проекция, охватывает земной эллипсоид (2) по осевому меридиану  $PP'$  (3) (рис. 3.7).

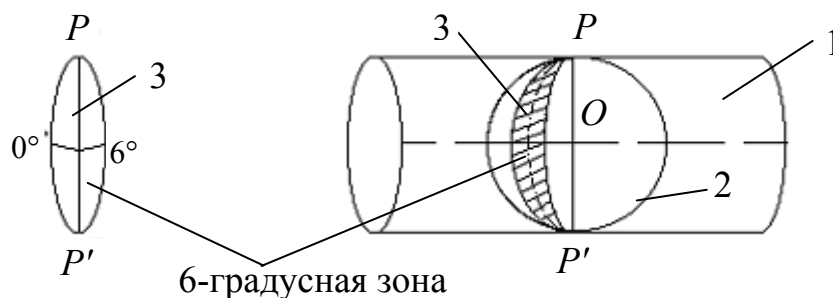


Рис. 3.7. Поперечно-цилиндрическая конформная проекция

Чтобы ограничить величину искажений на плоскости проекции, поверхность эллипсоида разделена меридианами на 60 координатных зон шириной каждая  $6^\circ$  по долготе. Гринвичский меридиан является крайним западным меридианом первой 6-градусной зоны, а нумерация зон возрастает с запада на восток. Форма зоны – сферический двуугольник (рис. 3.8).

Средний меридиан зоны называется осевым. Долгота осевого меридиана зоны  $L_0$  вычисляется по формуле:  $L_0 = 6^\circ n - 3^\circ$ , где  $n$  – номер зоны.

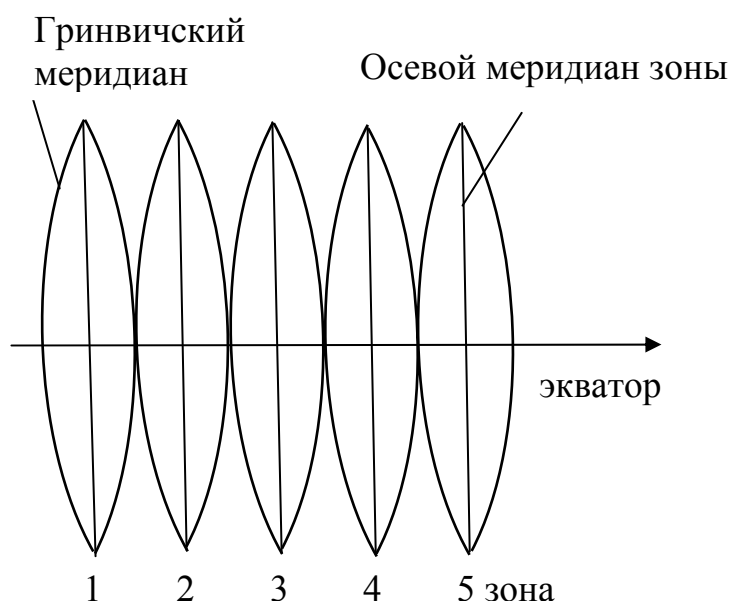


Рис. 3.8. Развертка 6-градусных зон на плоскости



В каждой зоне изображение осевого меридиана принимается за ось абсцисс  $X$ , а изображение экватора за ось ординат  $Y$ . Началом координат в каждой зоне является пересечение осевого меридиана и экватора. Абсциссы отсчитываются от экватора к северу и югу, ординаты – от осевого меридиана к западу и востоку.

Территория России расположена к северу от экватора, поэтому абсциссы  $X$  всегда положительные. Ординаты  $Y$  в каждой зоне могут иметь знаки как  $(-)$ , так и  $(+)$ . Точки, расположенные к западу от осевого меридиана, имеют знак  $(-)$ , к востоку – знак  $(+)$ . Чтобы избежать отрицательных значений ординат, ось  $X$  условно переносят на 500 км к западу от осевого меридиана (рис. 3.9).

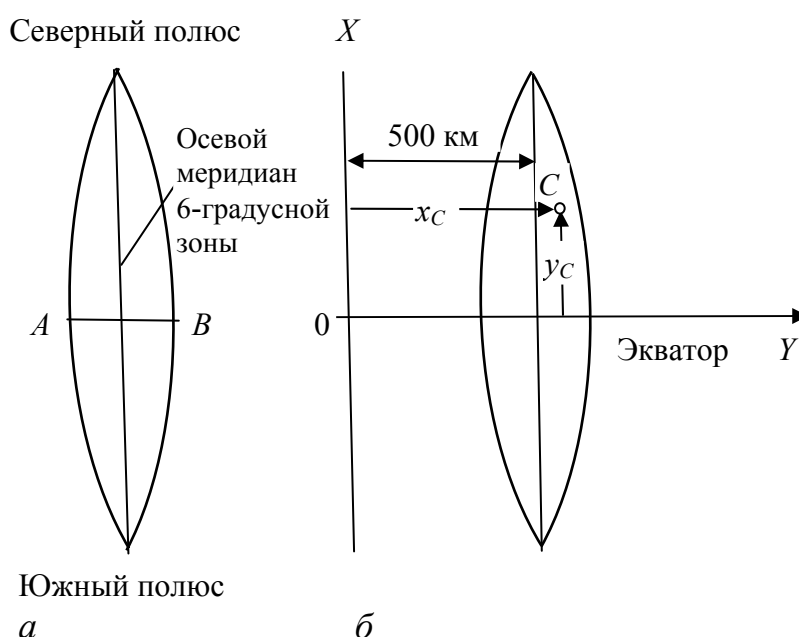


Рис. 3.9. Изображение 6-градусных зон на плоскости:  
*a* – без переноса осевого меридиана; *б* – с переносом на 500 км на запад

В каждой из 60 зон численные значения координат  $X$  и  $Y$  могут повторяться. Поэтому для однозначного определения точки на земной поверхности перед каждой ординатой ставится номер зоны.

Например:  $x_C = 6\ 018\ 275$  м – расстояние между точкой  $C$  и экватором;  $y_C = 18\ 420\ 715$  м, 18 – номер зоны, 420 715 м – расстояние от оси  $X$  до точки  $C$ .

Линии, параллельные осевому меридиану и экватору, образуют прямоугольную сетку, которая изображается на картах. Все карты России созданы в проекциях Гаусса – Крюгера.

При выполнении крупномасштабных кадастровых съемок для уменьшения искажений площадей применяют 3-градусные зоны или изменяют положение осевого меридиана, создавая собственную зону. В этой зоне осевой меридиан проходит посередине определяемой площади. В том случае, когда применяют собственный условный осевой меридиан, проекцию называют проекцией Гаусса.

Переход из одной зоны в другую необходим, если для решения геодезических задач используются пункты, лежащие по разные стороны от пограничных меридианов зон. Например, в триангуляции, для вычисления исходной стороны и ее дирекционного угла, необходимо решать обратную задачу по координатам пунктов, расположенных в разных зонах. Поэтому необходимо преобразовать координаты одного из пунктов в зону соседнего пункта.

Учитывая, что территория России располагается в 29 6-градусных зонах, случаи перевычисления координат встречаются довольно часто. При составлении каталогов геодезических пунктов 1-го и 2-го классов существует правило: для пунктов, лежащих вблизи граничного меридиана, приводить координаты в двух смежных зонах. Эта мера существенно уменьшает число случаев преобразования координат из зоны в зону, но не исключает их.

В спутниковой геодезии при работе в дифференциальном режиме требуется создание базы (исходного пункта), координаты которого определены по координатам нескольких пунктов, расположенных на расстоянии до 10 км и более, также необходимо перевычислять координаты пунктов в одну зону.

Существуют следующие *способы преобразования координат* при переходе из одной зоны в другую:

- 1) перевычисление прямоугольных координат с предварительным переходом к геодезическим;
- 2) перевычисление координат путем редуцирования измеренных направлений;
- 3) перевычисление координат с помощью специальных геодезических таблиц [2].

Эти таблицы используют для преобразования координат:

- 1) геодезических в прямоугольные и обратно;
- 2) прямоугольных из 3-градусной зоны в 6-градусную;
- 3) прямоугольных из одной 6-градусной зоны в другую 6-градусную зону.

### 3.6. Перевычисление координат из одной зоны в другую

#### 3.6.1. Перевычисление прямоугольных координат из одной 6-градусной зоны в другую 6-градусную зону

Перевычисление координат из одной 6-градусной зоны в другую 6-градусную зону выполняют по таблицам [2, с. 63–70]. Таблицы состоят из двух частей. Первая часть предназначена для перевычисления координат в смежную зону, в пределах широт от 0 до 82°; вторая часть предназначена для перевычисления координат через зону, в пределах широт от 70 до 82°. Точность перевычисления координат 0,1–0,5 м.

#### Расчетные формулы

$$X_{II} = X_I + a_0 + a(a)_x + b(b)_x + a^2(a^2)_x + ab(ab)_x + b^2(b^2)_x + \\ + a^3(a^3)_x + a^2b(a^2b)_x + ab^2(ab^2)_x + 0,1b^3(b^3)_x;$$

$$Y_{II} = Y_I + b_0 + a(a)_y + b(b)_y + a^2(a^2)_y + ab(ab)_y + b^2(b^2)_y + \\ + a^3(a^3)_y + a^2b(a^2b)_y + ab^2(ab^2)_y + 0,1b^3(b^3)_y,$$

где  $X_I, Y_I$  – координаты в данной зоне;  $X_{II}, Y_{II}$  – координаты в смежной зоне;  $a_0, (a)_x, (b)_x, \dots, b_0, (a)_y, (b)_y, \dots$  – табличные величины;

$$a = (x_1 - x_0) \cdot 10^{-5}; \quad b = (y_1 - y_0) \cdot 10^{-5},$$

где  $x_0$  – значение абсциссы точки, округленное до 100 км;  $y_0$  – табличная величина.

Значения величин  $y_0, b_0, (a)_y, (b)_x, (a^2)_y, (ab)_x, (b^2)_y, (a^3)_y, (a^2b)_x, (a^2b)_y, (b^3)_x$  даны в таблицах с двумя знаками – плюс и минус. При перевычислении координат из восточной зоны в западную принимают верхние знаки, а при перевычислении из западной зоны в восточную – нижние знаки.

Вычисления можно производить по величинам  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $(a)_x$ ,  $(b)_x$ , ...,  $(a)_y$ ,  $(b)_y$ ..., выбираемым из таблиц как по ближайшему меньшему, так и по ближайшему большему значению  $x_0$ .

Значения  $a$ ,  $b$  вычисляют до 6 знаков после запятой;  $a^2$ ,  $ab$ ,  $b^2$  – до 4 знаков, в остальных случаях – до 2 знаков.

Схема перехода из одной 6-градусной зоны в другую 6-градусную зону представлена на рис. 3.10.

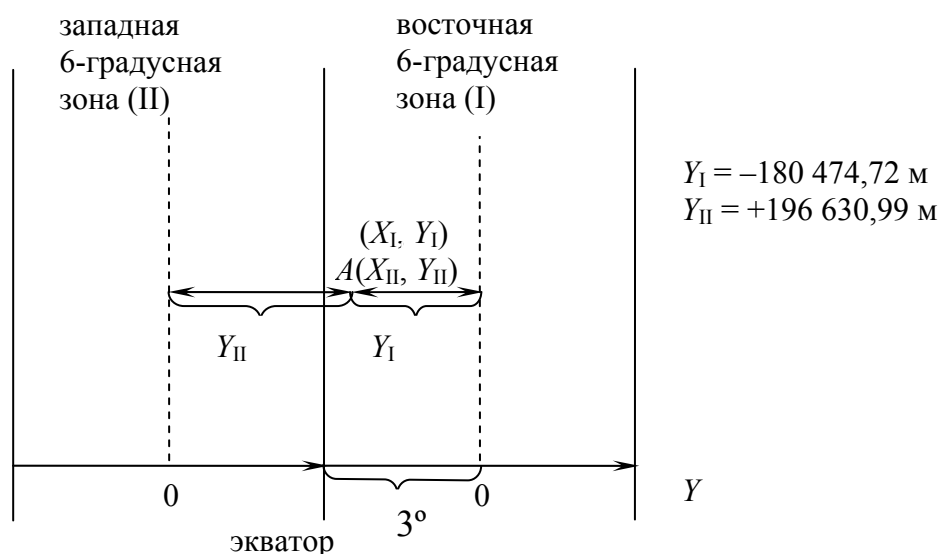


Рис. 3.10. Переход из одной 6-градусной зоны в другую 6-градусную зону:

$X_I$ ,  $Y_I$  – координаты пункта  $A$  в восточной 6-градусной зоне;  
 $X_{II}$ ,  $Y_{II}$  – координаты пункта  $A$  в западной 6-градусной зоне

### 3.6.2. Перевычисление прямоугольных координат из 6-градусной зоны в 3-градусную зону

Перевычисление прямоугольных координат из 6-градусной зоны в 3-градусную и обратно (в пределах широт от  $33^{\circ}30'$  до  $76^{\circ}30'$ ) выполняют по таблицам и расчетным формулам [2, с. 60]. Точность преобразования составляет 1–2 м.

Расчетные формулы:

$$X_{II} = (a + \Delta a \text{ м}) \Delta y_1 + X_0 + \Delta X_0 \text{ м} + \delta x;$$

$$Y_{II} = (b + \Delta b \text{ м}) \Delta y_1^2 \cdot 10^{-10} + 0,998628 \cdot \Delta y_1;$$

$$\Delta y_1 = -(Y_0 + \Delta Y_0 m + \delta Y_0 - Y_I);$$

$$m = (X_I - X_{\text{табл}}) \cdot 10^{-5},$$

где  $X_I, Y_I$  – координаты в 6-градусной зоне;  $X_{II}, Y_{II}$  – координаты в 3-градусной зоне;  $X_0, Y_0, a, b$  – основные величины;  $\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta a, \Delta b$  – разности табличных значений;  $\delta Y_0, \delta x$  – поправки;  $X_{\text{табл}}$  – ближайшее меньшее табличное значение  $X$ .

Значения основных величин и их разностей выбираются по ближайшему меньшему табличному значению  $X_I$  без интерполирования. Значения поправок  $\delta Y_0$  – по  $X_I$  и  $m$ , значения поправок  $\delta x$  – по  $X_I$  и  $\Delta y_1$  также без интерполирования.

Знаки в формулах даны для перевычисления координат в восточную 6-градусную зону, при перевычислении в западную зону знаки в данных и вычисленных значениях ординат ( $Y_I$  и  $Y_{II}$ ) необходимо изменить на обратные.

Схема перехода из 6-градусной в 3-градусную зону представлена на рис. 3.11.

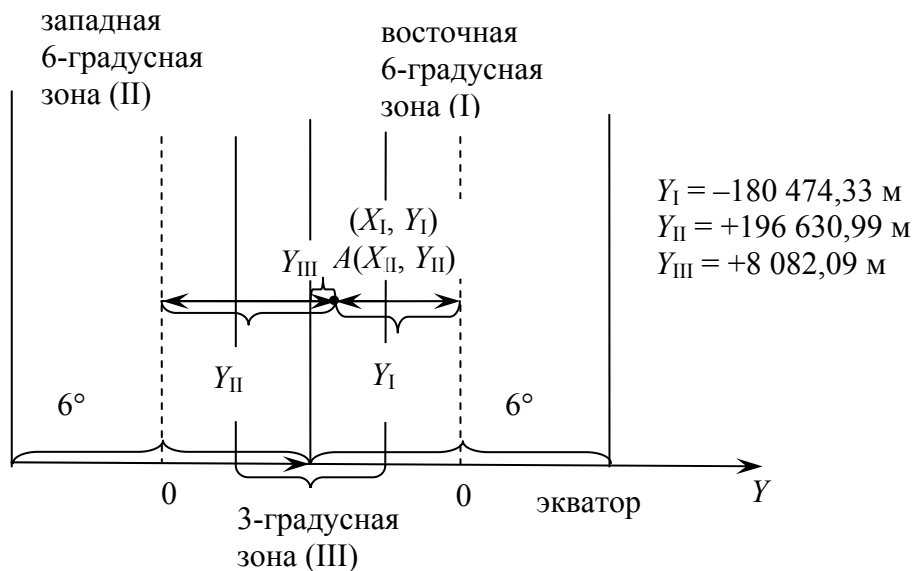


Рис. 3.11. Переход из 6-градусной зоны в 3-градусную зону:

$X_I, Y_I$  – координаты пункта  $A$  в восточной 6-градусной зоне;

$X_{II}, Y_{II}$  – координаты пункта  $A$  в западной 6-градусной зоне;

$Y_{III}$  – ордината пункта  $A$  в 3-градусной зоне

### 3.7. Переход от одной плоской прямоугольной системы к другой плоской прямоугольной системе

Для перехода от одной плоской прямоугольной системы координат к другой необходимо, чтобы минимум два пункта имели координаты в двух системах (рис. 3.12) [11, 15]. Исходными будем считать координаты пунктов 1 ( $X_1, Y_1$ ) и 2 ( $X_2, Y_2$ ) в «старой» системе и координаты пунктов 1 ( $X_1', Y_1'$ ) и 2 ( $X_2', Y_2'$ ) в «новой» системе.

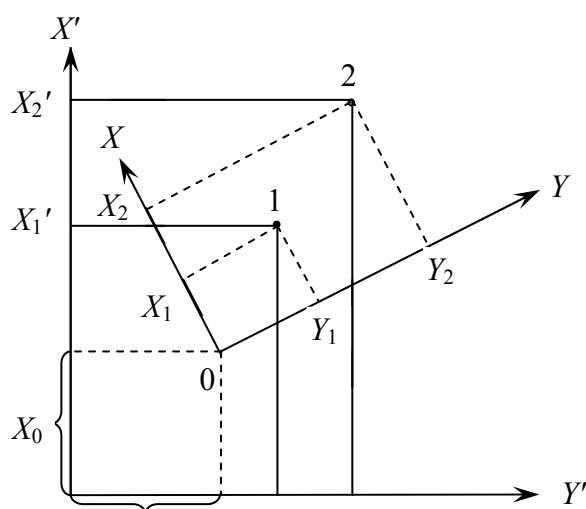


Рис. 3.12. Схема перехода

ДАНО:  $X_1, Y_1$  – координаты точки 1 в «старой» системе;  
 $X_1', Y_1'$  – координаты точки 1 в «новой системе»;  
 $X_2, Y_2$  – координаты точки 2 в «старой» системе;  
 $X_2', Y_2'$  – координаты точки 2 в «новой» системе.

НАЙТИ:  $\delta\alpha$  – разворот осей;  
 $M$  – масштаб искажения;  
 $X_0, Y_0$  – смещение осей.

Определяемыми величинами будут  $\delta\alpha$  – разворот осей одной системы относительно другой;  $M$  – масштаб искажения;  $X_0, Y_0$  – смещение начала координат;  $X_3', Y_3'$ ;  $X_4', Y_4'$  – координаты любых двух пунктов в «новой» системе.

*Последовательность перехода от одной плоской прямоугольной системы к другой плоской прямоугольной системе*

1. Решая обратные геодезические задачи, по координатам точек 1 и 2 вычисляют дирекционные углы  $\alpha_{1-2}, \alpha_{1-2}'$  и горизонтальные проложения  $S_{1-2}, S_{1-2}'$  (в «старой» и в «новой» системах координат).

Формулы для решения обратной геодезической задачи:

$$S_{1-2} = \sqrt{\Delta x_{1-2}^2 + \Delta y_{1-2}^2};$$

$$\Delta x_{1-2} = X_2 - X_1; \quad \Delta y_{1-2} = Y_2 - Y_1;$$

$$\operatorname{tg}\alpha_{1-2} = \frac{\Delta y_{1-2}}{\Delta x_{1-2}}; \quad \alpha_{1-2} = \operatorname{arctg}\alpha_{1-2}.$$

Угол, получаемый по тангенсу из таблиц натуральных значений тригонометрических функций, представляет собой табличное значение румба ( $r_{1-2}$ ). Для перехода от табличного угла к дирекционному углу необходимо учесть знаки приращений координат, зависящие от знаков тригонометрических функций ( $\sin$  и  $\cos$ ).

2. Находят угол разворота осей  $\delta\alpha$ :

$$\delta\alpha = \alpha_{1-2}' - \alpha_{1-2}.$$

3. Определяют величину смещения начала координат:

$$X_0 = X_1' - X_1; \quad Y_0 = Y_1' - Y_1.$$

4. Вычисляют масштаб системы перехода:

$$M = 1 + (S_{1-2}' - S_{1-2}) / S_{1-2}.$$

5. Вычисляют вспомогательные коэффициенты:

$$K_1 = M \cos \delta\alpha; \quad K_2 = M \sin \delta\alpha.$$

6. Вычисляют координаты определяемых пунктов в «новой» системе:

$$X_i' = X_i + \delta x; \quad Y_i' = Y_i + \delta y,$$

где  $\delta x = X_0 + (K_1 - 1)(X_i - X_1) - K_2(Y_i - Y_1);$

$$\delta y = Y_0 + (K_1 - 1)(Y_i - Y_1) + K_2(X_i - X_1).$$

Для контроля вычислений осуществляют обратный переход (из «новой» системы в «старую»). Но за координаты исходных пунктов теперь принимают координаты, полученные при обратном переходе,  $-X_3', Y_3'; X_4', Y_4'$ . Расхождение координат не должно превышать 1 см.

## РАЗДЕЛ 4. РЕДУКЦИОННЫЕ ПЕРЕХОДЫ

### 4.1. Редуцирование длин линий

Измеренные на поверхности Земли элементы геодезической сети редуцируют к поверхности принятого эллипсоида [11, 12, 15].

Под *редукционными задачами* будем понимать вычисление поправок к измеренным элементам (горизонтальным направлениям, длинам линий, углам), которые необходимо вводить для перехода от пространственного положения элементов на физической поверхности Земли к условной уровенной поверхности, к поверхности квазигеоида, на референц-эллипсоид, на плоскость проекции Гаусса – Крюгера.

Возможны и обратные переходы, когда с плоскости проекции переходят к линии, измеряемой на поверхности Земли. Такие вычисления необходимы при подготовке исходных данных для спутникового определения координат и их эталонирования, а также при контрольных измерениях линий светодальномером.

Рассмотрим последовательность решения редуционной задачи: вычисление длины линии, приведенной на физическую поверхность Земли (рис. 4.1).

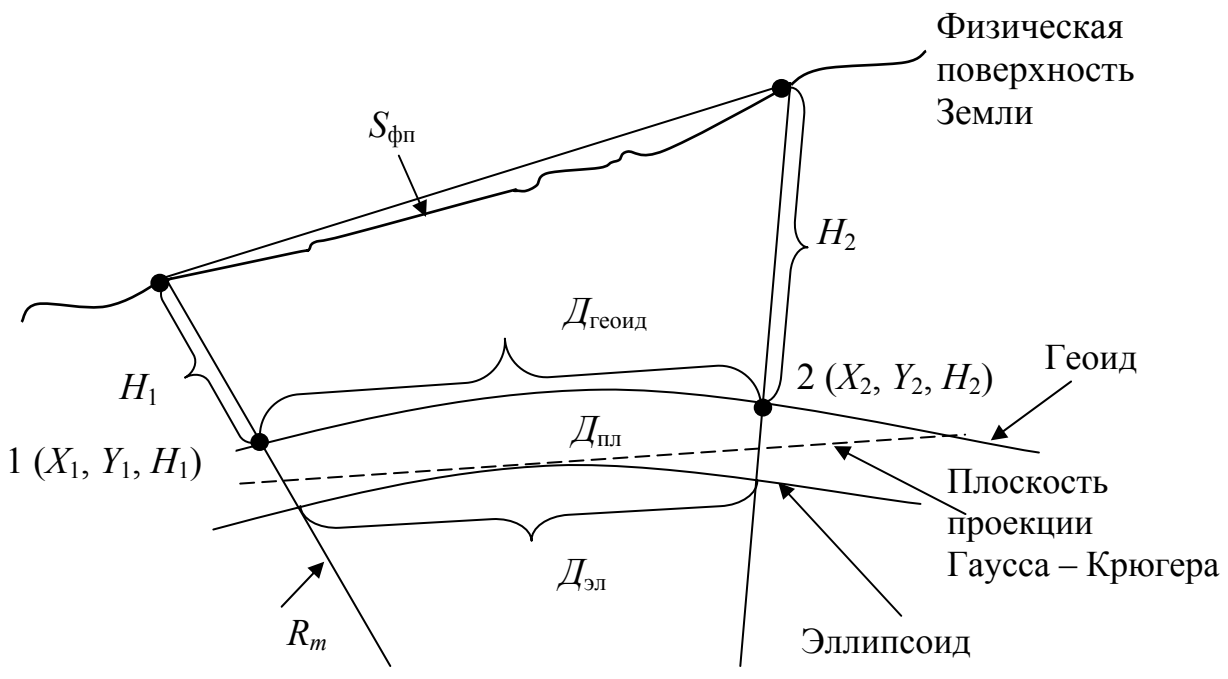


Рис. 4.1. Редуцирование длин линий



## Расчетные формулы

$$S_{\text{фп}} = D_{\text{пл}} \pm \Delta D_{\text{эл}} + \Delta D_{\text{геоид}} + \Delta D_h, \quad (4.1)$$

где  $S_{\text{фп}}$  – длина линии, приведенной на физическую поверхность Земли;  $D_{\text{пл}}$  – длина линии на плоскости Гаусса – Крюгера, определяемая из обратной геодезической задачи;  $\Delta D_{\text{эл}}$  – поправка за переход от плоскости к эллипсоиду;  $\Delta D_{\text{геоид}}$  – поправка за переход от эллипсоида к геоиду;  $\Delta D_h$  – поправка за переход от поверхности геоида к физической поверхности (поправка за наклон);

$$D_{\text{пл}} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}; \quad (4.2)$$

$$\Delta D_{\text{эл}} = \frac{Y_m^2}{2R_m^2} D_{\text{пл}} + \frac{Y_m^4}{24R_m^4} D_{\text{пл}} + \frac{\Delta Y_m^2}{24R_m^2} D_{\text{пл}}; \quad Y_m = \frac{Y_1 + Y_2}{2}, \quad (4.3)$$

где  $Y_1, Y_2$  – прямоугольные координаты начала и конца линии;  $R_m$  – средний радиус Земли, который может быть вычислен:

$$R_m = \sqrt{MN},$$

где  $M$  – радиус кривизны меридиана;  $N$  – радиус кривизны первого вертикала, принимают по средней широте  $B_m$  (например,  $B_m = 55^\circ$ ).

$$\Delta D_{\text{геоид}} = \frac{H_m}{R_m} D_{\text{пл}} + \frac{H_m^2}{R_m^2} D_{\text{пл}} + \frac{D_{\text{пл}}^3}{24R_m^2}, \quad (4.4)$$

где  $H_m$  – средняя отметка концов линии:  $H_m = \frac{H_1 + H_2}{2}$ .

$$\Delta D_h = -\left(\frac{h^2}{2D_{\text{пл}}} + \frac{h^4}{8D_{\text{пл}}^3}\right), \quad (4.5)$$

где  $h$  – превышение концов измеряемой линии:  $h = H_2 - H_1$ .

Вычисление второго и третьего членов в формуле (4.3) и (4.4) выполняют при длинах линий более 10 км и удалении точек от осевого меридиана зоны более 100 км. Знак (–) у членов формулы (4.5) меняют на обратный при переходе от геоида к физической поверхности.

Прямые переходы необходимы при обработке результатов измерений в полигонометрии, трилатерации перед уравнительными вычислениями. Не совершают переходы в полигонометрии 2-го разряда, в теодолитных ходах и в отдельных случаях для 1-го разряда, когда измерения производят недалеко от осевого меридиана зоны (до 5 км) и при длинах линий не более 200 м.

Обратный переход совершают при эталонировании спутниковых приемников посредством сравнения измеренных на физической поверхности земли линий с эталонными значениями этих линий, полученных в результате решения обратных задач с последующим переходом на физическую поверхность.

## 4.2. Редуцирование азимутов и направлений

Рассмотрим последовательность решения задачи по переходу от дирекционного угла к азимуту линии. Вычисления производят по формулам или с помощью таблиц для геодезических вычислений [2]. Участвующие в расчетах значения координат  $X$ ,  $Y$  округляют до километров, длины линий в метрах с точностью до 0,01 м, поправки и дирекционный угол вычисляют с точностью до 0,1 с.

### Расчетные формулы

$$A_{1-2} = \alpha_{1-2} + \gamma_{1-2}' + \delta_{1-2}'' , \quad (4.6)$$

где  $A_{1-2}$  – азимут линии;  $\alpha_{1-2}$  – дирекционный угол;  $\gamma_{1-2}'$  – угол сближения меридианов на плоскости Гаусса – Крюгера в минутах;  $\delta_{1-2}''$  – поправка за кривизну изображения линии на плоскости.

$$\gamma_{1-2}' = K \cdot Y_1 + \delta\gamma' , \quad (4.7)$$

где  $Y_1$  – ордината, км; коэффициент  $K$  выбирают из таблиц [2, с. 11], по значению абсциссы  $X$  (км) или вычисляют по формуле

$$K = \frac{\rho' \operatorname{tg} B}{N} 10^3,$$

где  $\rho'$  – число минут в радиане;  $B$  – геодезическая широта;  $N$  – первый вертикал;  $\delta\gamma'$  – выбирают из таблиц [2, с. 10–15] по абсциссе  $X$  и ординате  $Y$  в километрах или вычисляют по формуле

$$\delta\gamma' = \frac{\rho'(\operatorname{tg} B + \operatorname{tg} B^3 - \operatorname{tg} B \cdot \eta^2) Y^3}{3N^3},$$

где  $\eta^2 = e^2 \cos^2 B$ ;  $e$  – первый эксцентриситет.

$$\delta_{1-2}'' = \frac{1}{3} f (X_1 - X_2) (2Y_1 + Y_2), \quad (4.8)$$

где  $\frac{1}{3}f$  – выбирают по значению геодезической широты  $B$  из таблиц [2, с. 7] или вычисляют по формуле

$$f = \frac{\rho''}{2R_m^2} 10^6.$$

*Правило «паруса»:* при построении на плоскости изображение геодезической линии своей выпуклостью всегда направлено в сторону, противоположную направлению на осевой меридиан (рис. 4.2).

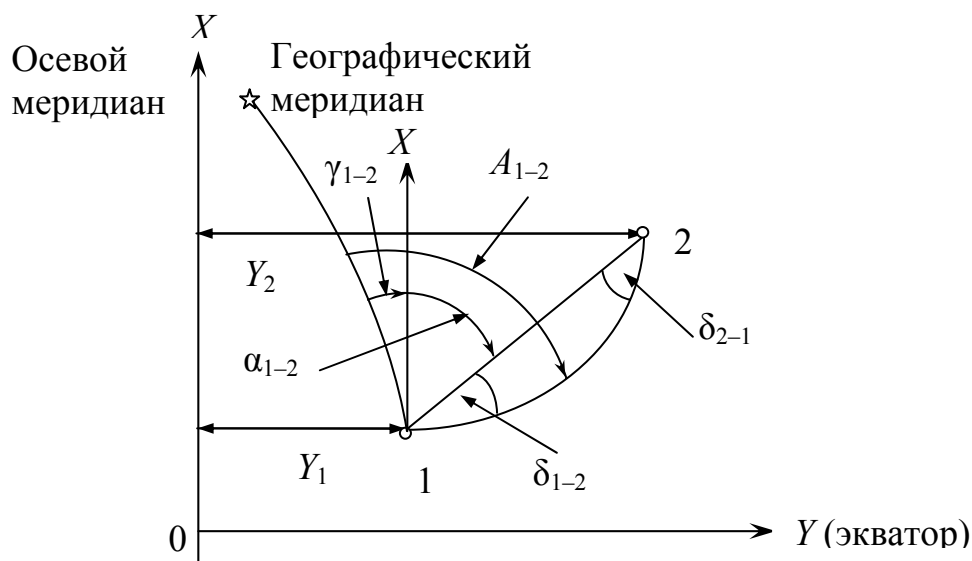


Рис. 4.2. Редуцирование азимутов и направлений

## РАЗДЕЛ 5. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ В СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИИ

### 5.1. Сущность абсолютного метода

При выполнении спутниковых измерений основным определяющим параметром является расстояние между спутником и приемником. Одновременное определение значений расстояний до нескольких спутников позволяет при условии знания координат спутников методом пространственной линейной засечки вычислить координаты пункта наблюдений [1, 10, 11, 16].

В зависимости от цели решаемых задач различают абсолютные и дифференциальные методы координатных определений. В абсолютном методе поставленная задача может быть решена с использованием одного, отдельно работающего GPS-приемника по координатам спутников, которые задаются, как правило, в геоцентрической системе. Координаты начала этой системы  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  равны нулю. На практике чаще всего применяют топоцентрическую систему координат  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ , в которой координаты пункта наблюдения служат началом топоцентрической системы (рис. 5.1).

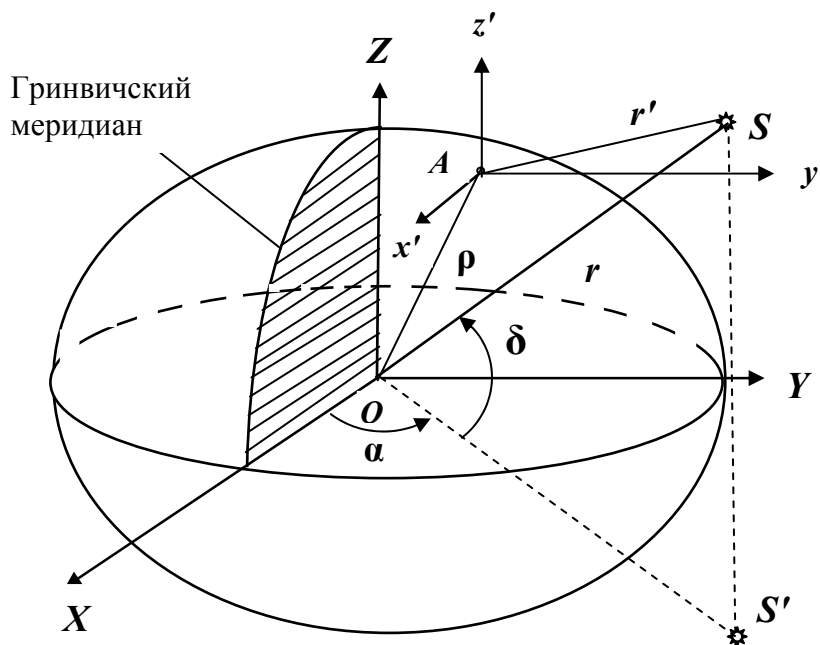


Рис. 5.1. Геоцентрическая  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и топоцентрическая  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  системы координат

Оси координат  $x', y', z'$  параллельны осям геоцентрической системы. В этих системах  $r$  – геоцентрический радиус-вектор спутника  $S$ ;  $r'$  – топоцентрический радиус-вектор спутника  $S$ ;  $\rho$  – геоцентрический радиус-вектор пункта наблюдения  $A$ ;  $\alpha, \delta$  – геоцентрическое прямое восхождение и склонение спутника.

Допустим, что на некоторый момент времени известны пространственные прямоугольные координаты  $X_{S1}, Y_{S1}, Z_{S1}$  одного искусственного спутника Земли  $S1$ . С целью определения пространственных прямоугольных координат  $X_A, Y_A, Z_A$  пункта  $A$  измеряют расстояние  $R_1$  между определяемым пунктом и спутником (рис. 5.2).

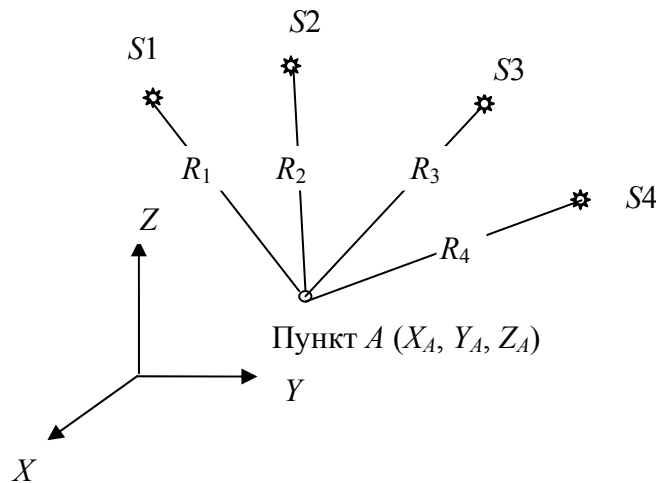


Рис. 5.2. Пространственная линейная засечка

Из рис. 5.2 следует, что в топоцентрической системе теоретическая дальность (пространственный вектор)  $\rho_1$  вычисляется по формуле аналитической геометрии

$$\rho_1 = \sqrt{(X_{S1} - X_A)^2 + (Y_{S1} - Y_A)^2 + (Z_{S1} - Z_A)^2}, \quad (5.1)$$

где  $X_{S1}, Y_{S1}, Z_{S1}$  – координаты первого спутника;  $X_A, Y_A, Z_A$  – координаты определяемого пункта.

Измеренная дальность  $R_1$  не будет равна теоретической дальности  $\rho_1$  ( $\rho_1 < R_1$ ) из-за введения целого ряда различных поправок.

В связи с этим вектор  $R_1$  получил название вектора псевдодальности:

$$R_1 = \rho_1 + (\delta t_P - \delta t_S)C + \delta t_{\text{атм}}C, \quad (5.2)$$

где  $\delta t_P$  – уход шкалы часов приемника от номинала;  $\delta t_S$  – уход шкалы часов спутника от номинала;  $\delta t_{\text{атм}}$  – задержка радиосигнала по времени при прохождении атмосферы околоземного пространства;  $C$  – скорость распространения ЭМВ.

Уход временной шкалы часов спутника  $\delta t_S$  для каждого конкретного спутника постоянно определяют и корректируют при прохождении спутника над контрольно-измерительным комплексом и передают в составе навигационного сообщения каждому потребителю. По своей величине поправка  $\delta t_S$  относительно невелика и погрешность определения координат из-за нее не превышает 1–2 м. С учетом этого при грубых, свойственных абсолютным методам, определениях координат рассматриваемую величину можно считать известной. На спутниках устанавливают атомные часы (весом 30–40 кг), которые позволяют с высокой точностью и стабильностью поддерживать ход часов спутника. Сравнение шкал осуществляется в наносекундах ( $1 \text{ нс} = 10^{-9} \text{ с}$ ).

При прохождении радиосигнала через атмосферу наиболее сильное влияние оказывают близлежащие к поверхности земли слои атмосферы (около 40 км по высоте). Ионосфера влияет в меньшей степени, но менее предсказуема. Особое влияние оказывают магнитные бури, изменяющие магнитное поле Земли. Погрешность из-за незнания поправки  $\delta t_{\text{атм}}$  может достигать 1–2 м. Для ее определения применяют метод моделирования: заставляют радиоволну проходить искусственно созданный участок с параметрами ионосферы и тропосферы, которые меняют в соответствии с фактически измеренными параметрами.

Уход шкалы часов приемника от номинала  $\delta t_P$  может оказаться самой большой погрешностью, так как в приемниках устанавливают *кварцевые часы*, в то время как на спутниках работают атомные генераторы частот, так называемые «*атомные часы*». Точность хода и постоянство кварцевых часов значительно хуже, чем у часов на спутниках. Погрешность, связанная с уходом шкалы часов приемника от номинала, составляет

$$m_{\delta t_P} \leq \pm 40 \text{ м.}$$

В результате формула (5.2) содержит четыре неизвестные величины: три координаты точки стояния  $(X_A, Y_A, Z_A)$  и поправку за уход часов приемника  $m_{\delta t_P}$ . Определить погрешность  $m_{\delta t_P}$  непосредственно инструментально невозможно. Для нахождения этих неизвестных на пункте производят одновременные наблюдения не менее четырех спутников и совместно решают систему уравнений:

$$\begin{aligned}\rho_1 &= \sqrt{(X_{S1} - X_A)^2 + (Y_{S1} - Y_A)^2 + (Z_{S1} - Z_A)^2}; \\ \rho_2 &= \sqrt{(X_{S2} - X_A)^2 + (Y_{S2} - Y_A)^2 + (Z_{S2} - Z_A)^2}; \\ \rho_3 &= \sqrt{(X_{S3} - X_A)^2 + (Y_{S3} - Y_A)^2 + (Z_{S3} - Z_A)^2}; \\ \rho_4 &= \sqrt{(X_{S4} - X_A)^2 + (Y_{S4} - Y_A)^2 + (Z_{S4} - Z_A)^2},\end{aligned}\quad (5.3)$$

где  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$  – теоретические дальности до 1, 2, 3, 4-го спутников.

Допустим, что одновременно с расстоянием  $R_1$  измерены расстояния  $R_2, R_3, R_4$  между определяемым пунктом  $A$  и спутниками  $S_2, S_3, S_4$  с известными (заданными) координатами. Рассматриваемое геометрическое построение называется *пространственной линейной засечкой*.

По результатам этих измерений составим уравнения для фактически измеренных дальностей до четырех спутников:

$$\begin{aligned}R_1 &= \rho_1 + (\delta t_P - \delta t_{S1})C + \delta t_{\text{атм } 1}C; \\ R_2 &= \rho_2 + (\delta t_P - \delta t_{S2})C + \delta t_{\text{атм } 2}C; \\ R_3 &= \rho_3 + (\delta t_P - \delta t_{S3})C + \delta t_{\text{атм } 3}C; \\ R_4 &= \rho_4 + (\delta t_P - \delta t_{S4})C + \delta t_{\text{атм } 4}C.\end{aligned}\quad (5.4)$$

Решая уравнения (5.4), находят три координаты  $X_A, Y_A, Z_A$ , т. е. определяют абсолютное положение пункта  $A$ , и четвертую неизвестную – поправку  $\delta t_P$ . Отсюда следует, что для определения аб-

солотного положения пунктов на земной поверхности необходимо произвести наблюдения до четырех спутников.

При абсолютном методе определения координат погрешность, в лучшем случае, может составить  $\pm 1$  м. Для решения большинства геодезических задач такая точность недостаточна. Чтобы повысить точность определения координат до нескольких сантиметров, применяют дифференциальные методы. В этом случае определяют координаты относительно недалеко (до 100 км) расположенного пункта (базы), координаты которого могут быть:

- 1) известны из геодезических определений;
- 2) получены из абсолютного метода с точностью до 1 м;
- 3) определены дифференциальным методом с использованием ближайших геодезических пунктов.

При дифференциальном методе определяют не сами координаты, а приращения координат относительно пункта, принятого за исходный.

## 5.2. Сущность дифференциального метода

Для дифференциальных измерений необходимо два или более одновременно работающих приемника, расположенных на определяемых, разнесенных на местности, пунктах [1, 10, 11].

Для измерения дальностей могут применяться фазовые методы, кодовые или импульсные (раздел 1.2). Наиболее точным является фазовый метод, при котором разность фаз для измеряемого расстояния определяется с помощью фазометра. Как известно, разность фаз соответствует остатку от целого уложения длин волн. В общем виде измеряемое расстояние можно вычислить по формуле

$$R = \lambda(N - \Delta\Phi) + (\delta t_P - \delta t_S)C + \delta t_{\text{атм}} C, \quad (5.5)$$

где  $\lambda(N - \Delta\Phi) = \rho$ ;  $\lambda$  – длина волны несущей модулированной частоты  $f$  ( $\lambda = 19,5$  см);  $N$  – число уложений длин волн с длиной  $\lambda$  (число целых циклов);  $\Delta\Phi$  – разность фаз (остаток).

Остаток  $\Delta\Phi$  измеряют с помощью фазометра с точностью до 1–2 мм, используя многократные определения.

Если число целых циклов  $N$  правильно определить, то полученное «фазовое расстояние» (или «расстояние по несущей модули-



рованной частоте») будет очень точным (на уровне нескольких миллиметров).

Определение целого числа уложений  $N$  называется *разрешением неоднозначности*.

Существует несколько методов разрешения неоднозначности:

1. *Метод двух частот*. Если измеряют одно и то же расстояние при работе на двух частотах, используя двухчастотные приемники, то появляется возможность определить число уложений  $N_1$  и  $N_2$ , измеряя величины остатков  $\Delta\Phi_1$  и  $\Delta\Phi_2$ .

2. *Метод подбора*. Два одночастотных приемника располагают по стороне линии известной длины (можно использовать короткую линию до 20 м), точность измерения которой не менее 3–5 см. Методом подбора величины  $N$  определяют эту же длину линии дифференциальным методом по спутникам.

Например, расстояние до спутника  $R_i = 21000158,35$  м ( $\pm 1$  м); длина волны  $\lambda = 19,5$  см, тогда  $N_1 = R_i/\lambda$ .

3. *Метод четырех разностей* позволяет не только разрешить неоднозначность, но и практически полностью исключить поправки  $\delta t_P$ ;  $\delta t_S$ ;  $\delta t_{\text{атм}}$ , что значительно повышает точность измерения.

### 5.3. Способы разностей при дифференциальном методе

Рассмотрим формирование разностей для двух спутников и двух приемников (рис. 5.3). Пусть на пунктах  $A$  и  $B$  одновременно измеряются фазовым методом псевдодальности до спутников  $i$  и  $j$  ( $R_{Ai}$  и  $R_{Bi}$ ).

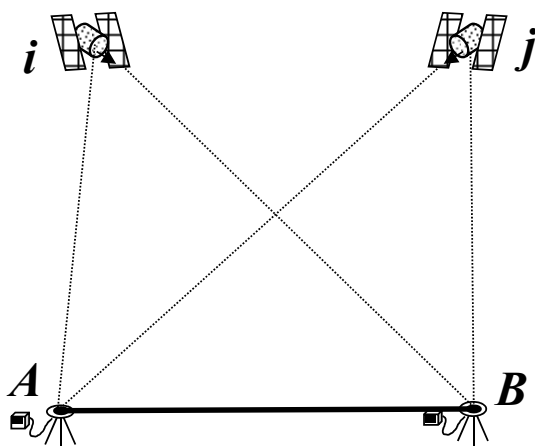


Рис. 5.3. Формирование разностей спутниковых измерений

Тогда для фиксированного момента времени  $t$  можем записать два уравнения:

$$R_{Ai} = \rho_{Ai} - N_{Ai}\lambda + \delta P_A + \delta P_i + \delta P_{Ai}; \quad (5.6)$$

$$R_{Bi} = \rho_{Bi} - N_{Bi}\lambda + \delta P_B + \delta P_i + \delta P_{Bi}. \quad (5.7)$$

Вычитая из уравнения (5.6) уравнение (5.7), получаем выражение для *первых* разностей:

$$R_{ABi} = \rho_{ABi} - N_{ABi}\lambda + \delta P_{AB} + \delta P_{ABi}. \quad (5.8)$$

Если в момент  $t$  наблюдается еще один спутник  $j$ , образуем для него уравнение *первых* разностей:

$$R_{ABj} = \rho_{ABj} - N_{ABj}\lambda + \delta P_{AB} + \delta P_{ABj}. \quad (5.9)$$

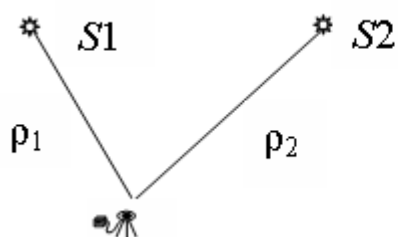
Вычитая из уравнения (5.8) уравнение (5.9), получаем выражение для *вторых* разностей:

$$R_{ABij} = \rho_{ABij} - N_{ABij}\lambda + \delta P_{ABij}. \quad (5.10)$$

Если спутники  $i$  и  $j$  наблюдаются в два момента времени (эпохи)  $t_1$  и  $t_2$ , то, записывая уравнения *вторых* разностей для обеих эпох и находя их разность, получаем уравнение *третьих* разностей:

$$R_{ABij}(t_1, t_2) = \rho_{ABij}(t_1, t_2) + \delta P_{ABij}(t_1, t_2). \quad (5.11)$$

При дифференциальном методе применяют способ разностей в следующих вариантах (рис. 5.4):



1) два спутника, один приёмник  
 $\rho_1 - \rho_2$

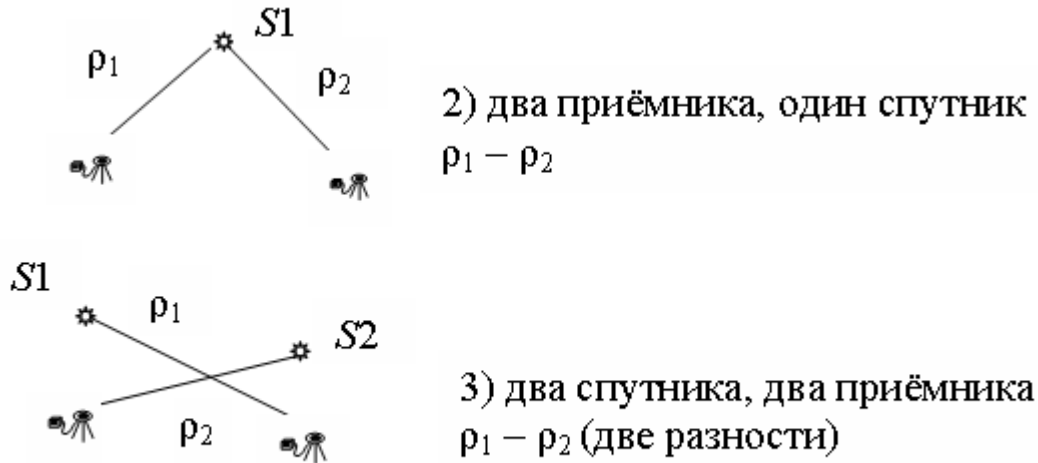
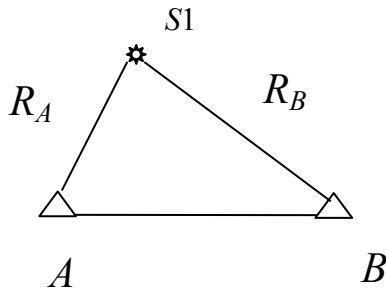


Рис. 5.4. Варианты формирования разностей

Рассмотрим формирование *первых* разностей для второго варианта: два приёмника  $A$  и  $B$ , один спутник  $S1$  (рис. 5.5).



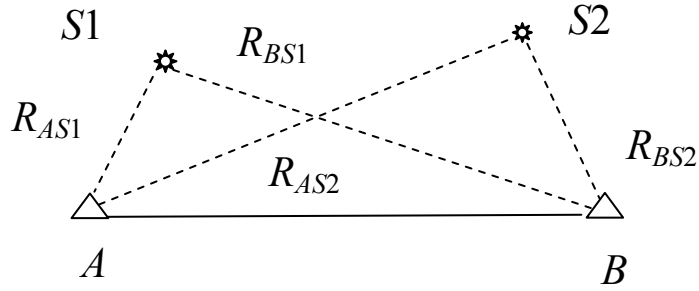
$$\begin{aligned} \Delta R_{AB} = R_B - R_A = & \lambda(N_B - N_A) - \\ & - \lambda(\Delta\Phi_B - \Delta\Phi_A) + \\ & + C[(\delta t_{PB} - \delta t_{PA}) - (\delta t_{SB} - \delta t_{SA})] + \\ & + C(dt_{\text{атм } B} - dt_{\text{атм } A}); \\ & (\delta t_{SB} - \delta t_{SA}) = 0, \end{aligned} \quad (5.12)$$

где  $N_B$  и  $N_A$  – неизвестные величины.

Рис. 5.5. Первые разности

С первыми разностями уничтожаются погрешности показания часов спутника и приемников, т. е. исключаются поправки часов запаздывания в аппаратуре и начальные фазы генераторов. При этом неважно, к одной или разным системам относятся спутники. Ослабевает влияние ошибок эфемерид, уменьшается влияние ионосферы и тропосферы, а шумы измерений растут.

Рассмотрим формирование *вторых* разностей (разности первых разностей) для случая: два спутника  $S1$  и  $S2$ , два приёмника  $A$  и  $B$  (рис. 5.6).



$$\Delta R_{AB} = (\Delta R_A - \Delta R_B) = (\Delta R_A' - \Delta R_B')[(X_B - X_A)(Y_B - Y_A) \times (Z_B - Z_A)] - \Delta N_{AB} \lambda + C(dt_{PB} - dt_{PA}) + C(dt_{атм B} - dt_{атм A}). \quad (5.13)$$

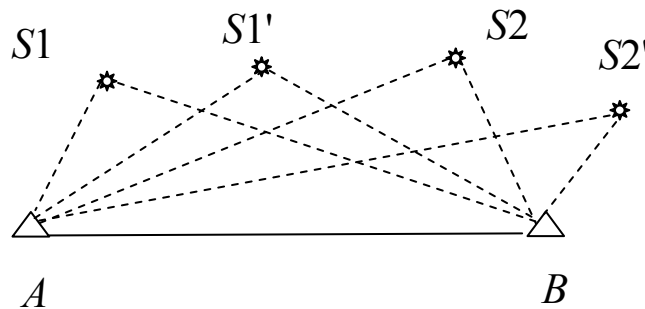
Рис. 5.6. Вторые разности

Условия прохождения лучей в атмосфере на этом участке одинаковые, поэтому со вторыми разностями дополнительно ослабляется влияние атмосферы  $C(dt_{атм B} - dt_{атм A}) = 0$ .

Вторые разности улучшают результаты измерений, но конечного ответа не дают.

Рассмотрим формирование *третьих* разностей. Для образования третьих разностей используют два спутника как четыре:  $S1$ ;  $S2$  и  $S1'$ ;  $S2'$ , которые наблюдают в два момента времени  $t_1$  и  $t_2$  для образования вторых разностей, а затем находят разности вторых разностей для этих двух моментов (рис. 5.7).

Рассматриваемый метод дифференциальной коррекции дает возможность полностью скомпенсировать влияние систематических погрешностей (ионосферных и эфемеридных).



$$\Delta R_{(t_2 - t_1)} = \Delta R_{(t_2 - t_1)}'[(X_B - X_A)(Y_B - Y_A)(Z_B - Z_A)] + C dt_{приемника} + C dt_{атм}. \quad (5.14)$$

Рис. 5.7. Третьи разности

Полученная формула позволяет, имея три спутника и получив три таких уравнения, найти приращения координат точки  $B$  относительно точки  $A$ :  $\Delta X_{AB}$ ,  $\Delta Y_{AB}$ ,  $\Delta Z_{AB}$ .

Таким образом, при дифференциальном методе определяют не координаты пункта, а приращения координат, переходя в дальнейшем к значениям длин линий и координатам.

При способе *четырёх* разностей используют не менее четырех спутников на двух станциях. Вычисляют при этом не только первые разности, но и вторые разности (разности разностей). В этом случае достаточно точно определяются значения  $N$  для каждого приемника и спутника.

Используемые способы разностей позволяют не только вычислять целое число уложений  $N$ , но дают возможность значительно повысить точность определения приращений координат, т. к. в разностях исключаются практически полностью поправки за атмосферу, за расхождение временных шкал приемника и спутников.

Процесс измерения можно разделить на следующие этапы, напоминающие способ последовательных приближений:

1. Устанавливают приемник на пункте  $A$  и  $B$  и, используя кодовые измерения импульсным методом, определяют расстояние до спутника с точностью в несколько метров.

2. Продолжая наблюдения, набирают необходимое количество спутников (минимум 4) для образования трех разностей и, решая уравнения, находят приращения координат  $\Delta X_{AB}$ ,  $\Delta Y_{AB}$ ,  $\Delta Z_{AB}$ . При этом точность повышается до 80 см. Определенные кодовым методом координаты точки  $A$  служат исходными, и по приращениям вычисляют координаты пункта  $B$ . Координаты точки  $A$  могут быть известны.

3. Зная координаты  $A$  и  $B$ , рассчитывают псевдодальность  $R$  и, решая обратную задачу, находят число уложений длин волн  $N_1$  и  $N_2$  по всем дальностям для всех наблюдений спутников.

4. Подставляя найденные значения  $N$  для двух разностей, уточняют значения дальностей и приращений координат, при этом точность повышается до 1–2 см.

Таким образом, происходит измерение пространственного вектора между точкой  $A$ , которую называют *базовой (референцной)*, и точкой  $B$ , которую называют *определяемой (роверной)*. На базовой

точке приемник должен находиться постоянно, а на определяемых пунктах перемещается второй или используются другие приемники.

Основной недостаток рассмотренного дифференциального метода заключается в возможности определения только разностей координат между пунктами, а не абсолютных значений. При таком подходе исходные (абсолютные) значения координат базовой (референцной) точки получают или на основе использования режима работы «по умолчанию», т. е. сравнительно грубого режима абсолютных измерений, или каких-либо других независимых методов.

Однако благодаря высокой точности определения приращений координат дифференциальные методы являются наиболее перспективными при высокоточных геодезических измерениях.

## РАЗДЕЛ 6. ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

### 6.1. Виды погрешностей спутниковых измерений

Как и при любых измерениях, в спутниковых наблюдениях возникают случайные и систематические ошибки [1, 10, 11, 13, 16].

*Случайные погрешности или шумы.* Такое название они получили потому, что их частотные и амплитудные характеристики, накладываясь на радиосигналы, служащие для измерений, создают помехи в приеме этих сигналов, приводят к ухудшению приема и к понижению точности. Характер шумов случайный, т. е. подчиняется закону распределения случайных чисел. Влияние шумов удается минимизировать за счет большого массива измерений.

*Систематические погрешности* применительно к спутниковым измерениям получили название ошибки смещения. Они приводят к смещению временных шкал (задержке по времени), а также к смещению определяемых пунктов в плане и по высоте. Систематические погрешности оказывают наибольшее влияние. Для их учета создаются специальные методы.

*Основные виды систематических погрешностей:*

1. Погрешности из-за неточного знания эфемерид спутника. *Эфемеридами* называются координаты звезды или спутника на любой заданный момент времени. Эти координаты постоянно меняются во времени, их значения транслируются как часть навигационного сообщения спутника и печатаются в спутниковых Ежегодниках.

2. Влияние слоев атмосферы: ионосферы и тропосферы. Тропосфера находится от поверхности Земли до 9–17 км; ионосфера – от 50 до 1000 км в зависимости от солнечной активности. Спутники летают на высоте 20 тыс. км.

3. Инструментальные погрешности.

4. Геометрический фактор – неоптимальное взаимное расположение наблюдаемых спутников.

В зависимости от основополагающего фактора принимаются различные *меры по ослаблению их влияния*:

1. Применение дифференциального метода (первых, вторых, третьих разностей).

2. Моделирование процесса распространения радиоволн в атмосфере.

3. Эталонирование (компарирование) спутниковых приемников на высокоточных полевых компараторах.

4. Правильный выбор мест расположения пунктов и организация спутниковых наблюдений.

## 6.2. Влияние изменения эфемерид спутников

Изменение траектории полета спутника может происходить по следующим причинам:

- а) гравитационное поле Земли;
- б) приливные явления;
- в) влияние гравитационного поля Солнца и Луны;
- г) давление солнечной радиации (солнечный ветер);
- д) ошибки исходных данных.

Наибольшее влияние на изменение эфемерид оказывает гравитационное поле Земли. За 3 часа полета трехчасовая дуга изменяется по отношению к предыдущей траектории по вертикали от Земли на 2 км. Кроме влияния общего гравитационного поля в меньшей степени оказывают влияние различные приливные явления, вызванные перераспределением масс по поверхности Земли. Они приводят к изменению эфемерид от 0,5 до 2 м.

Влияние гравитационных полей Луны и Солнца для трехчасовых дуг составляет от 50 до 150 м, и его необходимо учитывать при расчете эфемерид.

Чтобы уменьшить влияние гравитационного фактора, необходимо производить корректировку орбит спутников с наблюдатель-

ных станций на контрольно-измерительных комплексах при помощи двигателей на спутниках. Корректировку производят не менее чем с трех станций 3 раза в сутки. Поверхность спутника имеет сложную форму и значительные размеры вместе с раскрытыми солнечными батареями (67 см в ширину и 12 м в длину).

Под влиянием солнечной радиации может также происходить смещение дуг за 3 часа полета на 5-6 м (за двое суток на 800 м). Учет этого фактора представляется сложным, т. к.:

- а) интенсивность солнечного излучения не постоянная;
- б) при переходе спутника в зону тени (от Земли) интенсивность значительно уменьшается;
- в) спутник меняет свое положение в пространстве относительно солнечной радиации, из-за чего меняется площадь поверхности, на которую оказывает давление «солнечный ветер».

Уменьшают эту величину влияния, увеличивая продолжительность наблюдений и привлекая несколько разных спутников, вводя теоретические поправки, рассчитанные для спокойного солнца.

### **6.3. Влияние ионосферы**

Ионосфера и тропосфера оказывают различное влияние на распространение электромагнитных волн, поэтому применяются различные методы определения этого влияния, его ослабления или исключения [1, 10, 11, 13].

Ионосфера является наиболее удаленной от земной поверхности частью атмосферы (50–1000 км), на которую воздействуют различные космические излучения и, главным образом, ультрафиолетовая радиация Солнца. Именно эта радиация вызывает наибольшую ионизацию верхних слоев атмосферы, благодаря чему жизнь на Земле защищена от вредного воздействия солнечной радиации. Физические характеристики ионосферы изменяются ото дня к ночи в широких пределах. Пик электронной плотности ионосферы наступает около 2 часов после местного полудня, затем плотность уменьшается. Ночью ионизация не происходит.

Электромагнитная волна, проходя через ионизированную среду, изменяет скорость своего распространения, причем в одном случае – скорость замедляется, а в другом – ускоряется. Замедлению подвержены гармонические колебания несущих частот. Ускорение испытывают сигналы, учитывающие кодовую информацию,



т. е. модулированные сигналы. Эти влияния (замедления, ускорения) приводят к ошибкам измерения псевдодальностей от 5 до 50 м. Чтобы уменьшить погрешности измерений, необходимо учесть влияние ионосферы, особенно при геодезических измерениях, требующих высокой точности.

Для этой цели в последнее время стали применять двухчастотные приемники. При измерениях на двух несущих частотах появляется возможность вычислить свободное от влияния ионосферы значение измеренного расстояния до спутника. Одновременно вычисляется и сама поправка.

Дополнительно повысить точность измерений удастся при использовании дифференциальных методов. В этом случае имеют дело с разностями поправок для лучей, идущих с одного спутника на два приемника или с двух спутников на один приемник. Так как время распространения практически одинаково, участки ионосферы также не отличаются один от другого, то можно считать поправки в расстояние одинаковыми, а следовательно, при образовании разностей они будут исключены. В результате влияние этой ошибки на точность измерения базовых линий лежит в пределах от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Кроме этого наиболее точные работы рекомендуют выполнять в ночное время, когда влияние ионосферы существенно уменьшается.

#### **6.4. Тропосферные задержки сигнала**

Тропосфера (до 9–17 км) не является ионизированной средой и, следовательно, не влияет непосредственно на скорость распространения электромагнитных волн. Ее влияние определяется атмосферными параметрами (метеофакторами): температура, влажность и давление. При этом большое значение имеет рельеф, время дня и года, погода и характер покрова поверхности. Эти параметры рекомендуют измерять непосредственно на точке наблюдения с помощью соответствующих метеоприборов. Атмосферная поправка зависит от высоты спутника над горизонтом. Чем ниже спутник, тем более толстый слой тропосферы проходят радиоволны и, следовательно, возрастает атмосферная поправка и усложняется процесс определения радиопараметров. В связи с этим необходимо производить отбор видимых на небосклоне спутников, отдавая предпочтение наиболее высокорасположенным.

## 6.5. Явление многопутности

Многолучевая интерференция также вносит ошибки в определение местоположения с помощью GPS-приемника. *Многопутностью* (многолучевостью) называется такое распространение сигналов, при котором радиосигналы достигают антенны приемника спутника не только по прямому пути, но и отражаясь от различных рядом расположенных объектов: земля, водная поверхность, постройки, стволы деревьев, геодезические сигналы (рис. 6.1).

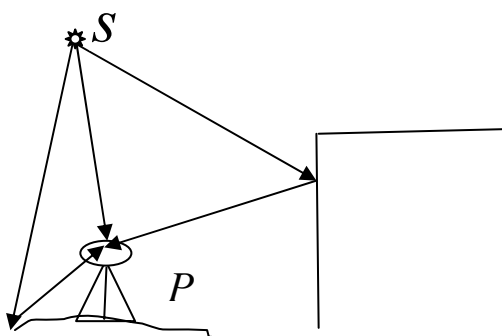


Рис. 6.1. Явление многопутности радиосигнала:  
 $S$  – спутник;  $P$  – приемник;  $\rightarrow$  радиосигнал

Наибольшую многопутность создают гладкие поверхности, такие как асфальтовое покрытие, водное зеркало, ровный слой снега (наст). Значительно меньше влияет травяной покров, пахота.

В результате приходящие на приемник сигналы оказываются ослабленными за счет помех от отраженных сигналов. Компьютерная система приемника может не распознать прямой сигнал и вместо него принять изломанный луч, что сразу приведет к ошибке псевдодальности. Иногда многопутность настолько велика, что может полностью помешать работе приемника. Сказывается это явление как на несущие частоты, так и на кодовые сигналы. Осложняется задача тем, что многопутность не исключается при дифференциальном методе.

Существует целая программа для ослабления этого явления:

1. Места расположения пунктов наблюдения следует выбирать с таким расчетом, чтобы исключить влияние отраженных лучей и их попадание на антенну приемника.

2. Применяют специальные покрытия нижней части антенны отражающим составом, чтобы исключить влияние лучей, отраженных от земной поверхности.

3. При привязке к геодезическим пунктам, имеющим деревянные или металлические сигналы, приемник располагают в стороне от центра. Причем центрирование может достигать нескольких метров. Определяют координаты вспомогательного пункта, затем по известным формулам их пересчитывают на цент знака, используя элементы центрировки.

4. Уменьшают многопутность за счет длительности определений и последующего отбора результатов.

5. Применяют специальные фильтры: плоские экраны-отсекатели.

Совокупность перечисленных выше мер позволяет минимизировать влияние многопутности до уровня, при котором этот источник ошибок не препятствует выполнению высокоточных спутниковых измерений.

### **6.6. Инструментальные источники погрешностей**

Инструментальные погрешности связаны с работой отдельных узлов аппаратуры на спутнике и приемнике. К ним относятся погрешности хода часов на спутнике и в приемнике, задержки при прохождении электрических сигналов в аппаратуре передатчика и приемника, погрешности в измерительной аппаратуре (измерение разности фаз), неточное знание положения в пространстве антенны приемника [1, 10, 11, 13].

Погрешности определения времени связаны с работой атомных генераторов частоты на спутнике и кварцевых генераторов в приемнике. С целью их уменьшения генераторы термостатируют, поддерживая постоянную температуру, и производят периодическую корректировку хода часов. Отвечает за это контрольно-измерительный комплекс. Применение дифференциального метода уменьшает погрешность хода часов. При этом почти полностью исключается уход часов на спутнике.

Оказывает влияние также неточность знания положения фазовых центров антенн на измеряемое расстояние. Особенно трудно определить положение фазового центра на спутнике.

Расстояние до фазового центра приемника записывается в паспорте прибора.

Спутниковый приемник состоит из следующих функциональных элементов: антенны; блока приема радиосигналов; микропро-

цессора; блока управления; блока индикации с дисплеем; запоминающего устройства; устройства связи с внешней ЭВМ; блока питания.

GPS-приемник может быть установлен различными способами:

– на штативе и использоваться с внешней антенной для измерения в режиме «статика» (рис. 6.2);

– на вехе и использоваться с внешней антенной для измерения в режиме «кинематика» (рис. 6.3);

– использоваться как персональный GPS-приемник для сбора данных и выноса в натуру.

*a* – внешняя GPS-антенна  
*b* – штатив, включая трегер и держатель антенны на трегере  
*c* – GPS-приемник  
*d* – аккумулятор  
*e* – держатель на штативе  
*f* – антенный кабель

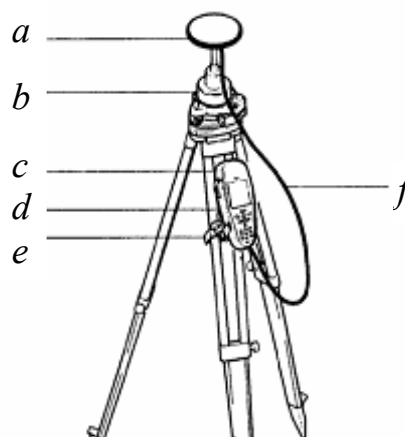


Рис. 6.2. Установка спутникового приемника на штатив для статических измерений

*a* – внешняя GPS-антенна  
*b* – веха  
*c* – держатель на штативе  
*d* – антенный кабель  
*e* – аккумулятор  
*f* – GPS-приемник

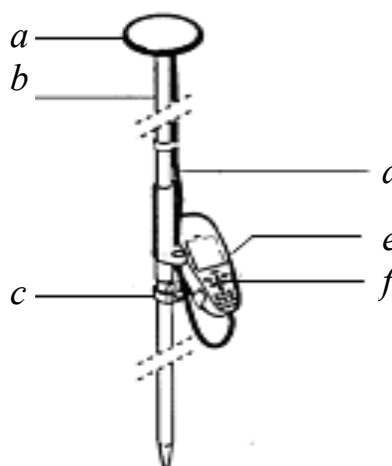


Рис. 6.3. Установка спутникового приемника на вехе

Приемники одного типа могут иметь несколько разных положений фазовых центров приемника. Принимающее устройство мо-

жет не располагаться на геометрическом центре тарелки, следовательно, существуют ошибки центрирования (до 1–2 мм). Кроме положения центра приемника по вертикали существует некоторое смещение относительно геометрической оси в горизонтальной плоскости. Суммарное влияние ошибок, связанных с неточным знанием положения фазовых центров, не превышает 5–10 мм.

Другого рода инструментальные ошибки связаны с задержкой электрических сигналов в цепях и с внутренними шумами. Влияние шумов уменьшают совершенствованием электронных схем приемников и качеством изготовления. Их влияние достигает нескольких миллиметров, но может быть исключено практически полностью с применением дифференциального метода.

### 6.7. Геометрический фактор

Одна из особенностей определения местоположений точек на основе пространственной линейной засечки состоит в том, что результирующая точность координатных определений зависит не только от точности выполняемых дальномерных измерений, но и от геометрии наблюдаемых спутников (*геометрический фактор*). Для иллюстрации механизма понижения точности из-за плохой геометрии спутников рассмотрим приведенный на рис. 6.4 пример двухмерного определения местоположения пункта  $P$  при различных удалениях спутников друг от друга.

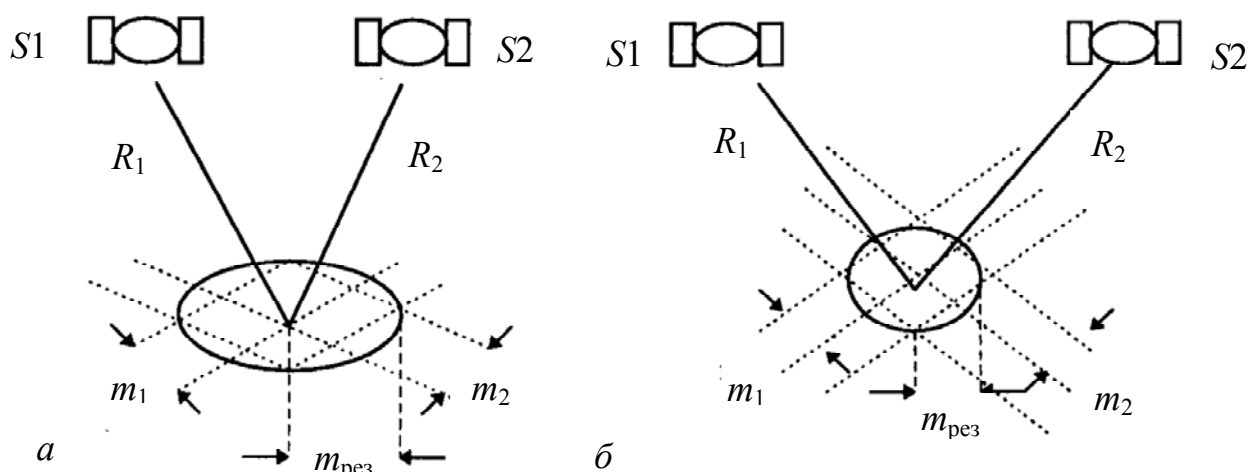


Рис. 6.4. Влияние геометрии спутников на точность спутникового позиционирования:

$a$  – «плохая» геометрия, радиолучи  $R_1$  и  $R_2$  образуют острый угол;  $b$  – «хорошая» геометрия, радиолучи  $R_1$  и  $R_2$  образуют прямой угол;  $m_{рез}$  – результирующая погрешность

Если измеряемые до спутников  $S1$  и  $S2$  расстояния  $R_1$  и  $R_2$  измеряются с погрешностью  $m_1$  и  $m_2$ , то при использовании метода линейной засечки местоположение определяемого пункта  $P$  будет находиться в пределах показанной на рис. 6.4 области, получившей название *эллипса ошибок*. В случае взаимно перпендикулярных направлений на наблюдаемые спутники эллипс деформируется в окружность. На рис. 6.5 показаны различные варианты положения спутников и передний фронт волны, доходящей до земли.

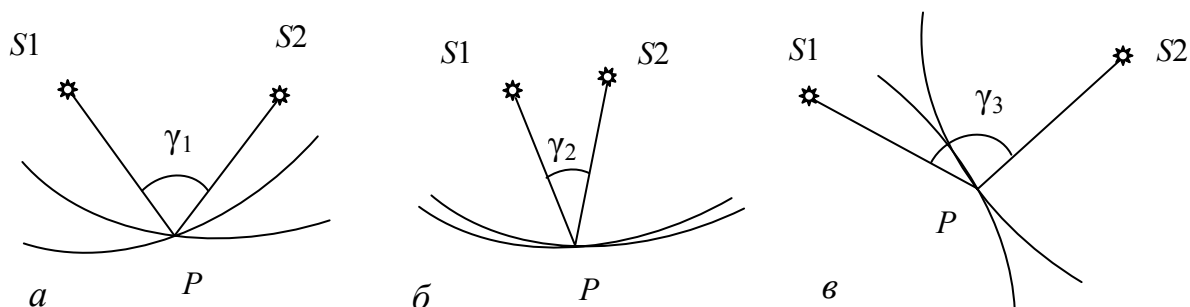


Рис. 6.5. Передний фронт радиоволны, доходящей до земли:  
 $a$  – радиолучи образуют угол  $\gamma_1$ , близкий к  $90^\circ$ ;  $b$  – угол  $\gamma_2$  острый;  $v$  – угол  $\gamma_3$ , близкий к  $150^\circ$

Наиболее благоприятным является вариант  $a$ . В варианте  $b$  положение точки  $P$  строго не определено. Аналогично, когда  $\gamma$  приближается к  $150^\circ$ , радиоволны, встречаясь, не имеют четкой точки пересечения (вариант  $v$ ). Это явление получило название DOP (Dilution of Precision) – загроубение точности. Фактор DOP имеет несколько видов, основные из которых приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

#### Виды фактора понижения точности (DOP)

Вид DOP	Обозначение	Определяемые параметры
Геометрический	GDOP	плановые координаты, высота, время
Позиционный	PDOP	плановые координаты, высота
Горизонтальный	HDOP	плановые координаты
Вертикальный	VDOP	высота
Временной	TDOP	уход часов приемника

Фактор DOP – безразмерная величина, значительно изменяющаяся в течение суток. Наивысшая точность спутниковых определений достигается при наименьших значениях DOP. Существует 10 уровней всплесков ошибок: от 2 до 10 условных единиц. При вычислениях используют данные от 2 до 7 (8) единиц. Если DOP более 7, необходимо спланировать и провести новый сеанс.

Погрешность положения пункта  $M_0$  вычисляют по формуле

$$M_0 = m_S \text{GDOP}, \quad (6.1)$$

где  $m_S$  – погрешность определения спутниковым приемником.

$$m_S = \sqrt{m_{\text{эф}}^2 + m_{\text{ион}}^2 + m_{\text{тр}}^2 + m_{\text{мн}}^2 + m_{\text{пр}}^2 + m_{\text{сп}}^2 + m_{\text{ф}}^2 + m_{\text{ш}}^2}, \quad (6.2)$$

где  $m_{\text{эф}}$  – погрешность из-за неточного знания эфемерид;  $m_{\text{ион}}$  – влияние ионосферы;  $m_{\text{тр}}$  – влияние тропосферы;  $m_{\text{мн}}$  – многопутность радиосигнала;  $m_{\text{пр}}$ ,  $m_{\text{сп}}$  – инструментальные погрешности приемника и спутника: нестабильность работы опорного генератора спутника, задержки сигнала в аппаратуре спутника и приемника;  $m_{\text{ф}}$  – влияние нестабильности и неточного знания положения фазового центра;  $m_{\text{ш}}$  – шумы.

Подставляя средние значения этих погрешностей, получаем:

$$m_S = \sqrt{1^2 + 5^2 + 5^2 + 2^2 + 0 + 0 + 1^2 + 2^2} = \sqrt{60} = 8 \text{ (мм)}.$$

С учетом GDOP  $m_S$  может составлять от 16 до 64 мм.

Таким образом, для уменьшения влияния геометрического фактора необходимо наблюдать спутники, образующие хорошую геометрию с углами  $\gamma$  от 60 до 120°, и не работать при уровнях более шести единиц для точных измерений.

Для работ меньшей длительности и меньшей точности закладывают в программу фактор PDOP и выбирают наилучшее время для наблюдений (рис. 6.6):

$$M_0 = m_S \text{GDOP} \leq 8; \quad M_0' = m_S \text{PDOP} \leq 3.$$

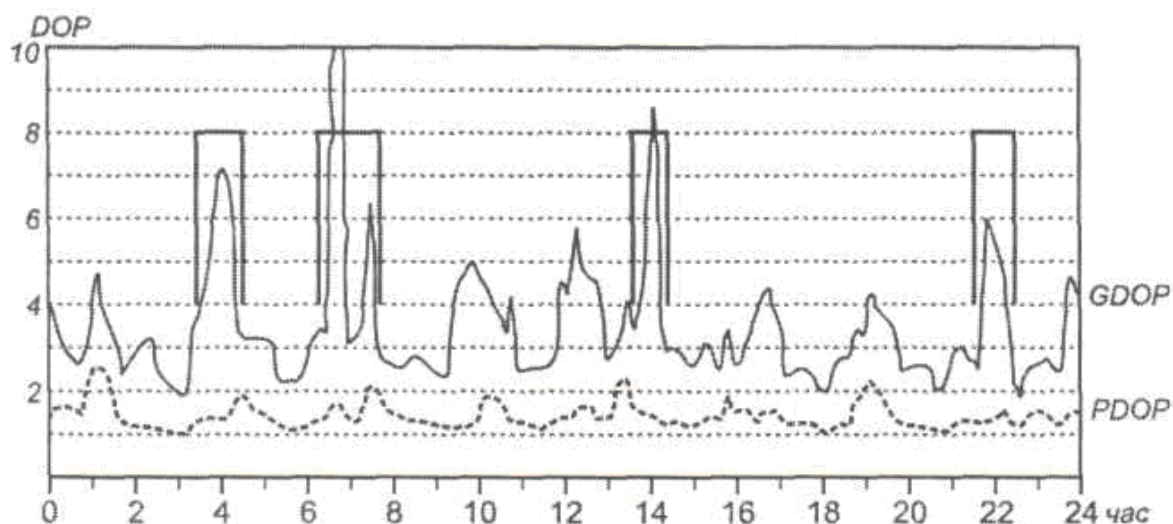


Рис. 6.6. График суточных изменений DOP (GDOP и PDOP) для пункта наблюдения; угол ограничения по высоте спутника над горизонтом  $15^\circ$

На графике прямоугольниками отмечены окна неблагоприятного времени для наблюдения. Интервалы времени с хорошими показателями DOP выявляются на каждый день наблюдений в течение всего периода. Эти интервалы могут уточняться в процессе работ по мере получения нового альманаха эфемерид (информационный файл, передаваемый совместно со спутниковым сигналом).

Поскольку методы организации спутниковых измерений существенно отличаются от традиционных геодезических методов, то в следующем разделе изложены особенности проектирования, организации и проведения полевых работ, базирующихся на использовании спутниковых технологий.

## РАЗДЕЛ 7. ПРОИЗВОДСТВО РАБОТ ПРИ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ

### 7.1. Организация наблюдений на пунктах СОК

Прежде чем начинать проектирование спутниковых сетей, необходимо определиться, для какой цели, с какой точностью, в каком количестве необходимо выполнить определение новых или переопределение старых пунктов. При этом учитывают физико-географическое положение района, среднюю географическую широту и долготу с точностью до нескольких минут. Собирают све-



дения о существующих на участке работ и вблизи него пунктах Государственной геодезической сети всех классов и разрядов. Перед проектированием совершают обследование всех пунктов, устанавливают сохранность знаков и центров и возможность проведения спутниковых наблюдений [5, 6, 7, 8, 17, 18].

Выполнив обследование, приступают к проектированию с учетом всех требований к пунктам спутниковой сети. Хотя сами по себе методы определения координат не требуют прямой видимости между определяемыми пунктами, однако в большинстве случаев видимость хотя бы на один пункт спутниковой сети должна обеспечиваться, желательно с поверхности Земли.

В лесной местности предусматривается на расстоянии не менее 200 м от основного пункта закладка ориентирных пунктов. Их закрепляют временными центрами и определяют одновременно с основным пунктом [7, 8, 17].

При проектировании отдают предпочтение расположению пунктов на открытых местах, вблизи дорог, вдали от линий высоковольтных передач. Выбрав положение пункта, строят абрис или кроки, на котором в произвольном масштабе, начиная от направления на север, составляют зарисовку местных предметов с указанием их высоты и расстояния до предмета. По высоте и расстоянию высчитывают угол возвышения. Таким образом, анализируя круговой обзор с пункта, задают минимальный угол отсчета, который может быть больше  $15^\circ$ . На абрис наносят пути подъезда к пункту, выбирают оптимальные пути перемещения между пунктами.

До начала наблюдений всем пунктам вновь создаваемой сети, включая исходные, присваивают временные уникальные имена, которые наносят на схему создаваемой сети. Число букв в имени пункта не должно превышать данных, указанных в соответствующем руководстве по эксплуатации приемника спутниковых сигналов.

При рекогносцировке пунктов СОК возможны следующие варианты их взаимного расположения:

1. При построении опорных сетей вновь образованная сеть должна состоять из треугольников, близких к равносторонним.

2. Необходимо стремиться к выполнению независимых и однородных измерений в спутниковой сети, а также к включению в ее состав достаточного количества избыточных измерений (рис. 7.1).

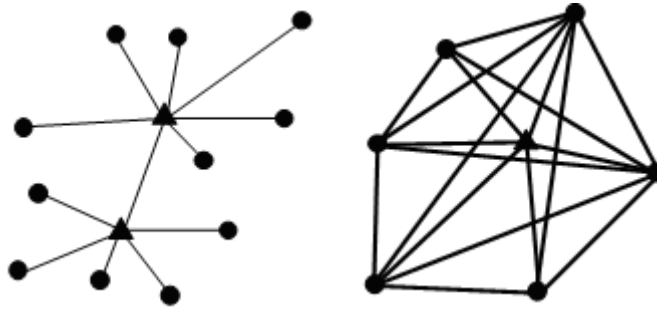


Рис. 7.1. Примеры лучевого и сетевого методов построения GPS/ГЛОНАСС сетей

3. При построении сетей сгущения съемочного обоснования определяемые пункты могут образовывать различного вида геометрические фигуры (треугольники, пятиугольники), а также вытянутые, замкнутые или разомкнутые ходы (рис. 7.2).

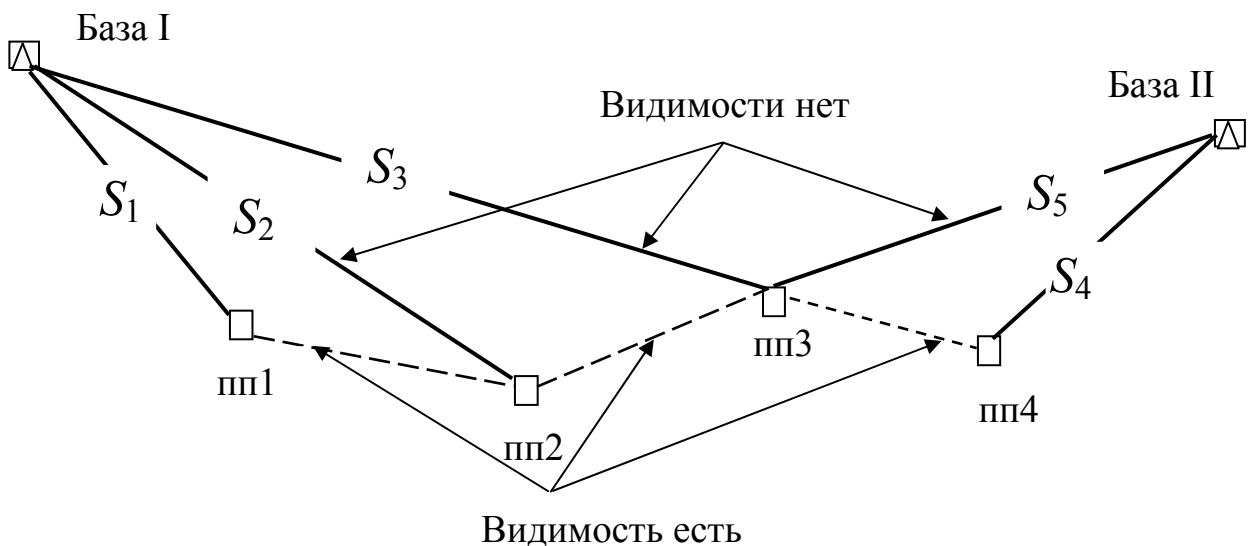


Рис. 7.2. Ход из спутниковых пунктов с неизмеряемыми углами и сторонами:

База I, База II – совмещенные пункты (СОК и ГГС); пп1, ..., пп4 – определяемые пункты;  $S_1, \dots, S_5$  – определяемые расстояния с базы I и II

## 7.2. Проектирование пунктов СОК

Чтобы создаваемая сеть по своим параметрам была не ниже по точности соответствующего класса или разряда полигонометрии, необходимо соблюдать требования, представленные в табл. 7.1 [6].

Рекомендуемые расстояния  $S$  (м) между пунктами СОК

$M_0, \text{ м}$ $m_\alpha, \text{ с}$	0,01 благоприятные	0,02 хорошие	0,03 удовлетворительные
20 (2 разряд)	71	107	214
10 (1 разряд)	143	286	428
4 (IV класс)	357	414	1071

В таблице указанные расстояния  $S$  между пунктами СОК вычислены по формуле

$$S = \frac{M_0 \cdot \rho''}{1,4m_\alpha},$$

где  $M_0$  – средняя квадратическая погрешность определения положения пункта СОК, см;  $\rho'' = 206264,81$  (1 радиан в секундах);  $m_\alpha$  – погрешность определения дирекционного угла,  $m_\alpha = 2m_\beta$ ;  $m_\beta$  – погрешность измерения горизонтальных углов.

Например, если необходимо, чтобы пункты СОК соответствовали полигонометрии 1 разряда и ошибка дирекционного угла  $m_\alpha$  стороны между пунктами СОК не превышала 10", то расстояние  $S$  между этими пунктами должно быть не менее 286 м.

По условиям радиовидимости (условия прохождения радиолучей) различают три уровня погрешностей:

- 1) благоприятные (при ошибке в 1 см);
- 2) хорошие (при ошибке в 2 см);
- 3) удовлетворительные (при ошибке в 3 см).

Для повышения точности ориентирования полигонометрических ходов, которые прокладываются, используя в качестве исходных пункты СОК, необходимо выбирать наиболее удаленные пункты СОК или геодезические пункты.

Все пункты СОК в пределах кадастровой съемки должны принадлежать одному базису и определяться в один период наблюдений.

Пункты должны располагаться в местах, удобных для привязки сетей съемочного обоснования и сетей сгущения, создаваемых обычными методами (т. е. на возвышенностях и открытых склонах).

### 7.3. Рекомендации по построению высотных сетей (данные ВНИМИ)

1. При проектировании плановых пунктов предусматривают включение в сеть двух, трех реперов или пунктов геодезической сети, имеющих отметки. Базовая станция обязательно должна иметь отметку. Это необходимо не только для определения отметок других пунктов СОК, но и для повышения точности планового определения.

2. При создании высотных сетей методом СОК, сопоставимых по точности с методами геометрического нивелирования, необходимо придерживаться следующих нормативов:

– для замены III класса нивелирования работают только при первом режиме радиовидимости, расстояния между реперами должны быть не менее 1 км, если первый репер исходный (базовая станция), а второй определяемый;

– для IV класса нивелирования используют три уровня радиовидимости (1, 2, 3) и расстояния между реперами должны быть не менее: 170 м (первый уровень), 440 м (второй уровень), 1 000 м (третий);

– техническое нивелирование можно выполнять при четырех уровнях радиовидимости и расстояния между исходным и определяемым пунктом могут быть: 20, 60, 140, 1 000 м (соответственно).

Если определяют нивелированием с помощью СОК превышения между определяемыми пунктами, расстояние увеличивают в 1,4 раза. Более точным методом является метод с применением двухчастотных приемников, режим – быстрая статика. При необходимости точность может быть увеличена применением полярной засечки, но для этого необходимо три приемника. Два располагаются на исходных реперах геометрического нивелирования, третий – на определяемом репере. Погрешность определения высот с применением ГНСС составляет 1–3 см.

При выборе метода построения высотных сетей необходимо учитывать экономическую целесообразность, физические затраты, достоинства и недостатки метода. Так, например, ГНСС-технологии легко могут заменить техническое нивелирование, однако классические методы (техническое или тригонометрическое нивелирование) существенно дешевле, чем метод спутникового позиционирования.

## 7.4. Выбор параметров наблюдений

### 1. Выбор временной зоны

Для включения программы приемника в автоматическом или ручном режиме необходимо ввести информацию по временной зоне, в которой происходят наблюдения.

GPS и ГЛОНАСС используют свое собственное время, известное как «системное время» (GPST). Отсчет системного времени ведется с 6 января 1980 г. Оно является непрерывным временем системы, базирующимся на универсальном координированном времени UTC (Universal Time Coordinated) – *Всемирное координированное время* Международной шкалы времени. Время UTC отличается от системного времени GPST своей прерывностью, вызванной необходимостью корректировки хода часов из-за замедления вращения Земли. К настоящему времени расхождение между временем GPST и UTC составляет 40". Это расхождение будет расти за счет введения секундных поправок. При определении временной зоны необходимо учитывать следующие временные параметры [1, 19]:

- 1) системное время GPST;
- 2) универсальное (всемирное) координированное время UTC;
- 3) Гринвичское время GMT (для низкоточных измерений);
- 4) поясное время ZT;
- 5) декретное (введено Декретом советского правительства от 1930 г.; декретная добавка составляет +1 ч к поясному времени).

Поясное время ZT введено в России с 1919 г. При этом поверхность Земли была разделена на 24 часовых пояса через 15° по долготе (1 ч):

$$ZT = UTC + \Delta n,$$

где  $\Delta n$  – номер часового пояса (для Кемерово  $\Delta n = 5$ ).

Превышение времени на 1 ч согласно декретному времени действует круглый год, в отличие от летнего времени. 14 сентября 2009 г. Правительством РФ было принято постановление о применении на территории Кемеровской области пятого часового пояса. Переход на новый часовой пояс в Кузбассе произошел 28 марта 2010 г., когда в России осуществлялся плановый переход на летнее время. В результате разница во времени между Кемерово и Москвой сократилась с 4 до 3 ч.

Поясним взаимосвязь между различными системами отсчета времени в GPS-приемнике:

местное время, г. Кемерово –  $15^h30^m30^s$ ;

московское время –  $12^h30^m30^s$ ;

декретное время (отличается на 1 ч) –  $11^h30^m30^s$ .

Расхождение по времени GPST – UTC (с учетом замедления вращения Земли) –  $00^h00^m42^s$ ; системное время GPST равно

$$11^h30^m30^s + 00^h00^m42^s = 11^h31^m12^s.$$

## 2. Определение приближенных координат района работ

Достаточно с топографической карты с точностью до  $1^\circ$  снять географические координаты  $\varphi$  и  $\lambda$ . Если уже производились работы в соседнем районе, удаленном не более чем на 60–70 км, рекомендуется использовать в качестве приближенных координат координаты пункта, определенного в соседнем районе. Можно вместо географических координат взять геодезические координаты  $B$  и  $L$ . Чем точнее определены исходные координаты, тем меньше времени будет затрачивать приемник на выбор более благоприятного геометрического фактора созвездий спутника.

## 3. Установка минимального угла возвышения

Минимальный угол возвышения зависит от высоты препятствия и расстояния до него. При отсутствии препятствий устанавливается угол в  $15^\circ$ .

## 7.5. Рекомендации по применению режимов

Могут использоваться следующие режимы работы спутниковых приемников [6, 7, 8]:

- статический режим (статика);
- ускоренный статический режим (быстрая статика);
- режим измерений с возвращением (реокупация);
- режим «стой – иди» (движение с короткими остановками);
- кинематический режим – измерения в движении.

*Статический режим* применяется при высокоточных геодезических измерениях, при больших расстояниях между пунктами (15–20 км), когда создают исходную геодезическую сеть в собст-

венной системе координат, при применении нескольких приемников (более двух), имеющих две частоты и не менее 12 каналов. Длительность наблюдений составляет от 2 до 4 часов днем и от 5 до 8 часов ночью при наблюдениях четырех и более спутников.

*Быстрая статика* применяется для расстояний между пунктами от 1 до 15 км, как правило, в собственной системе координат при достаточно высокой точности (1–3 см) и для благоприятных условий измерений (не менее 5 спутников,  $GDOP \leq 8$  и отсутствия сбоев). Рекомендуют для повышения точности увеличивать количество наблюдений в 1,5 раза. Например, если длина линии 5 км, необходимо набрать 20 % от необходимого числа измерений при дневных наблюдениях. При этом продолжительность наблюдений составляет 20–30 мин.

*Реокупация* (режим измерений с возвращением) применяется при создании сетей съемочного обоснования с точностью 3–5 см при недостаточном количестве спутников. В этом случае на определяемом пункте в режиме быстрой статики наблюдают 2, 3 или 4 спутника и переходят на следующий пункт, т. к. для полного объема необходимого числа спутников потребовалось бы еще несколько часов. Выполнив наблюдения на последнем пункте, возвращаются на предыдущий в тот же или в другой день и донаблюдают необходимое число спутников до шести. Все данные будут объединены и обработаны как данные, полученные на этом пункте по всем шести спутникам. Режим реокупации оказывается полезным также в тех случаях, когда не удастся разрешить неоднозначность с данными, собранными при первом сеансе наблюдений на пункте. Оператору только необходимо повторить измерения на пункте, а затем объединить данные.

«Стою – иду» применяется для съемки линейных объектов (например, наиболее важных точек дороги), а также для съемки малых площадей, на которых точки наблюдения располагаются рядом друг с другом и на которых отсутствуют препятствия для прохождения радиосигнала со спутников. Приемники находятся преимущественно в движении. Точность при этом режиме составляет 5–10 см.

*Кинематика* – режим для съемки в движении линейных коммуникаций или второстепенной ситуации при возможности постоянного движения по ее границам. Кинематический режим является

идеальным при отслеживании траектории движущихся транспортных средств (например, при профилировании дорог), движущихся судов и при позиционировании летящих самолетов.

## 7.6. Подготовка аппаратуры

Подготовку и запуск станции для работы на пункте выполняют в следующем порядке.

1. Установить и отцентрировать штатив с помощью оптического отвеса.

2. Установить приемный блок на штатив и соединить с блоком управления – контроллером. Если приемник не имеет встроенного аккумулятора или батареек, то подсоединить кабелем к переносному аккумулятору.

3. Включить станцию, которая должна показать процесс захвата спутников на экране блока управления. Этот процесс называется *инициализацией*.

4. Вручную или автоматически запустить выбранный режим работы.

5. На пункте измерить высоту антенны над центром и занести в блок управления (рис. 7.3). Высота состоит из двух цифровых значений:  $l_1$  – от фазового центра антенны до отсчетного устройства и  $l_2$  – наклонное расстояние до центра.

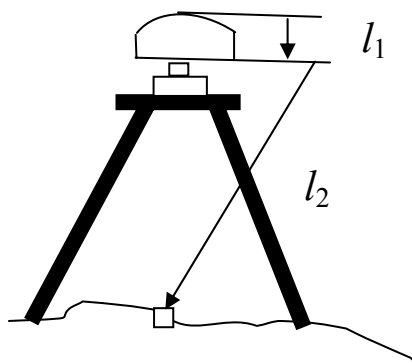


Рис. 7.3. Измерение высоты антенны ( $l_1 = 0,078$  м;  $l_2 = 1,345$  м)

Белая метка или риска на антенне должна быть ориентирована на север. Все блоки (приемник, контроллер, полевой компьютер) соединяют соответствующими кабелями и проверяют уровень зарядки батареи. Могут использоваться внутренние батареи или питание от внешних аккумуляторов. Особое внимание надо обратить



на правильную зарядку батареи. Для зарядки необходимо сначала полностью разрядить батарею. Зарядка производится в соответствии с инструкцией, но не должна превышать установленного времени. В полевых условиях зарядка может производиться от автомобильного аккумулятора, с использованием специального преобразователя напряжения, который поставляется по заказу или приобретается в магазине.

Занеся в компьютер приемника указанные ранее параметры, при выборе автоматического режима достаточно нажать кнопку «включение» и приемник сам начнет производить необходимые измерения и выводить на экран дисплея необходимую начальную информацию. При этом следят за показателем значений фактора GDOP, чтобы всплески ошибок не превышали установленного уровня (от 4 до 8 единиц). Здесь же фиксируют сбои поступления информации и при значительном числе сбоев измерения повторяют.

По окончании работы станцию выключают, предварительно зафиксировав результаты на карточке памяти. По мере заполнения карточек памяти данные с них копируются в персональный компьютер и сохраняются в виде архива. Содержимое карты памяти может быть считано с помощью программного обеспечения через устройство считывания карты памяти или через контроллер.

При работе в режиме быстрой статики или кинематики необходимо следить, чтобы не происходила потеря инициализации.

Инициализацию можно производить или восстанавливать разными способами:

1) оба приемника располагают недалеко друг от друга, причем один из них отцентрирован над исходным пунктом и после одновременного включения и снятия необходимых показаний, указывающих, что оба приемника приступили к измерениям, второй приемник может начинать движение по выбранному заранее маршруту с необходимыми остановками в пути;

2) приемник инициализируется на другом исходном пункте, но обязательно совместно с первым приемником в одно время по одним и тем же спутникам;

3) если потеря инициализации произошла на достаточном удалении от исходного пункта, а вблизи есть определяемый пункт, на котором мы побывали, можно вернуться на этот пункт и восстановить инициализацию.

Завершение спутниковых определений осуществляется, как правило, в соответствии с заранее составленным расписанием. При наличии канала связи оператор сообщает на центральный пункт о том, что он готов окончить или продолжить наблюдения на пункте.

### **7.7. Ведение полевого журнала**

Полевой журнал заполняется в соответствии с требованиями нормативно-технических документов [7, 16, 17, 19].

По окончании работ исполнитель представляет к сдаче:

- 1) файлы с результатами полевых измерений;
- 2) абрис возвышающихся препятствий на пункте;
- 3) кроки (схему) обследования реперов;
- 4) полевой журнал.

В полевой журнал записывают следующую информацию:

- 1) название пункта наблюдения или его условный номер, занесенный в регистрационный файл;
- 2) ФИО наблюдателя;
- 3) серийные номера спутниковой аппаратуры (антенны, приемника, контроллера);
- 4) высоту установки антенны над геодезической маркой;
- 5) время начала и завершения сеанса;
- 6) номера спутников и их местоположение;
- 7) приближенные координаты пункта наблюдения (по информации, отображаемой на экране дисплея приемника).

Кроме того, записывают сведения, которые могут оказаться необходимыми при камеральной обработке, например: резкое изменение погоды, порывы ветра, возникновение внешних помех.

После завершения съемки и возвращения в офис, данные из приемника выгружаются в персональный компьютер, в котором установлено соответствующее программное обеспечение. Например, выгрузка файлов осуществляется программным модулем GPLoad.

### **7.8. Обработка результатов наблюдений**

Различают предварительную и окончательную математическую обработку спутниковых наблюдений.

Исходными данными для предварительной математической обработки служат файлы (файлы измерительной информации), сформированные в приемной аппаратуре при выполнении спутниковых

наблюдений. Предварительную обработку осуществляют с помощью программного обеспечения, как правило, фирмы-разработчика приемной аппаратуры и выполняют ее обычно в два этапа.

На первом из них обрабатывают наблюдения по каждой базовой линии в отдельности. В последующем – совместно уравнивают все базовые линии геодезической сети.

Цель предварительной обработки – вычисление приращений пространственных прямоугольных координат между каждым определяемым и соответствующим базовым пунктами. Если геодезические координаты базового пункта неизвестны, то их принимают равными тем значениям, которые получены по результатам так называемых кодовых наблюдений. Результаты обработки базовых линий фиксируют в соответствующих протоколах, которые используют для дальнейшей математической обработки спутниковых наблюдений, и по их результатам окончательно уравнивают геодезическую сеть и вычисляют плоские прямоугольные координаты определяемых пунктов.

При вычислении координат пунктов непосредственно определяемыми являются приращения координат и вычисленные по ним длины линий. По приращениям находят дирекционные углы и координаты определяемых пунктов. Возможны два варианта:

1. Результаты полевых наблюдений передаются исполнителем на базу, где по специальной программе производят указанные выше вычисления.

2. С помощью радиомодема или телефонной связи данные наблюдений передаются на базу и после вычислений возвращаются к исполнителю в виде линий, координат и отметок.

При использовании радиомодема вся обработка результатов может происходить без значительных потерь времени, т. е. в реальном режиме. При этом после окончания измерений непосредственно на пункте могут быть получены результаты. При наличии полевого компьютера, который располагают рядом с приемником, радиомодем не нужен.

Результаты спутниковых измерений уравнивают и производят оценку точности. Процедура уравнивания является ответственным моментом. Для уравнивания геодезических построений с использованием ЭВМ наибольшее применение находит параметрический способ, обладающий рядом преимуществ по сравнению с корреляционным способом [16].

Наиболее часто применяется программа для уравнивания трилатерации, например: определение координат пункта 1 по трем измеренным расстояниям (вставка пункта в жесткий угол) или определение координат пунктов с двух исходных пунктов (полярная засечка) (рис. 7.4).

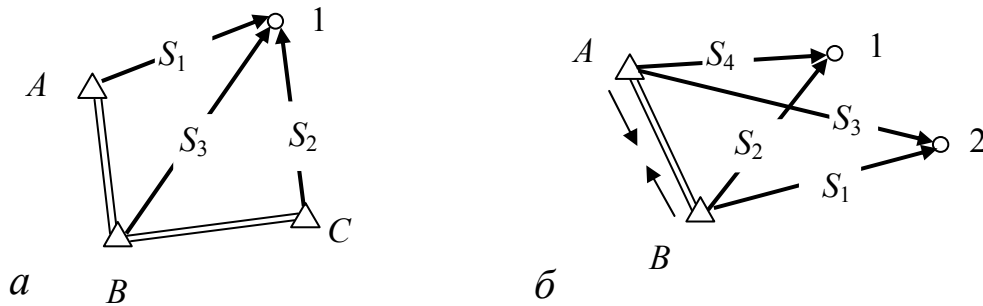


Рис. 7.4. Схемы уравнивания трилатерации:

*a* – вставка пункта в жесткий угол; *б* – полярная засечка;  $S_1$ ;  $S_2$ ;  $S_3$  – расстояния, вычисленные по приращениям координат

Если определяемые точки образуют ход с неизмеряемыми сторонами и углами, то производится уравнивание хода по координатам. Такой ход изображен на рис. 7.5.

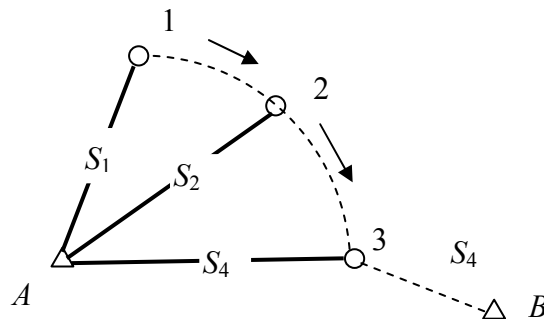


Рис. 7.5. Уравнивание хода по координатам

Известными величинами для уравнивания являются: координаты пунктов  $A (X_A, Y_A)$  и  $B (X_B, Y_B)$ ; расстояния  $S_1, S_2, S_3$ , вычисленные по приращениям координат; вычисляются координаты пунктов 1, 2, 3 и расстояние  $S_4$ .

Возможны два варианта при уравнивании:

1. *Косвенный*, когда одна станция находится неподвижно в пункте  $A$ , а другая перемещается по определяемым пунктам, причем расстояние между ними непосредственно не измеряется. Контрольные измерения выполняют для линии  $S_4$ . Эту же линию находят по координатам точки 3 и пункта  $B$ .

2. *Прямой*, когда передвигаются обе станции: из точки *A* переходят в 1, 2, 3, т. е. линии измеряются непосредственно при замыкании хода на начальном пункте или на другом известном пункте (разомкнутый ход). Вычисляют невязки в координатах конечных точек и распределяют пропорционально удалению от исходного пункта с обратным знаком, как в обычном теодолитном ходе.

Применяют также контрольные измерения отдельных линий другими приборами (светодальномерами, электронными тахеометрами или лазерной рулеткой). Если расхождение  $\Delta S$  не превышает допуска для съемочного обоснования, то уравнивание хода не выполняют и вычисленные координаты принимают в обработку:

$$\Delta S = S_{\text{в}} - S_{\text{к}},$$

где  $S_{\text{в}}$  – вычисленное;  $S_{\text{к}}$  – контрольное измерение.

В настоящее время разработано мощное программное обеспечение для обработки спутниковых геодезических измерений, которое предоставляется фирмами-изготовителями спутникового оборудования, например, Leica Geo Office, GNSS Solutions и др. Это эффективное и надежное средство с высокой скоростью обработки статических и кинематических данных, которое хорошо согласуется с ГИС по предоставлению результатов геодезической съемки. Программное обеспечение имеет ряд вспомогательных функций:

- редактирования/организации систем координат, которые используются в GNSS-съемке;
- преобразования координат из одной системы в другую;
- установки корректировочных секунд, участвующих в преобразовании времени из GPS в UTC для любой даты;
- решения прикладных задач (определение площади, прямая и обратная геодезические задачи, линейные и угловые засечки и др.).

Более подробно с методикой планирования GNSS-съемки, программным обеспечением по предварительной обработке и уравниванию геодезической сети можно познакомиться в руководстве и инструкции по первоначальному запуску и эксплуатации спутникового оборудования.

Пример оформления рабочей программы полевых работ по развитию съемочного обоснования геодезическим спутниковым методом (исполнитель – топографо-геодезическая группа ОАО «Кузбассгипрошахт») приведен в приложении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Глобальное позиционирование представляет собой одну из наиболее динамично развивающихся технологий геопространственных измерений. Точные данные необходимы для управления природными ресурсами и являются основой при создании компьютерных геоинформационных систем, обеспечивающих сбор, хранение и поиск географической информации. Данные ГНСС/GNSS-съемки используются для создания топографо-геодезической основы при разработке полезных ископаемых, проведении изысканий, геофизических, гидрографических съемок, геологической разведке. Значительный объем по установлению границ в землеустройстве и кадастре выполняется с использованием спутниковых технологий. С помощью GPS-приемников ведутся работы по выполнению фотограмметрического картографирования земной поверхности.

Для специалистов маркшейдерского дела и геодезии внедрение в практику спутниковых методов стало почти революционным переворотом, приведшим к коренному пересмотру структуры геодезического обеспечения страны, принципиальным изменениям методики полевых и камеральных работ на земной поверхности.

Опыт многих предприятий подтверждает эффективность применения ГНСС, особенно крупных предприятий, площади земельных отводов которых составляют десятки и сотни квадратных километров.

В современных условиях маркшейдерской службе горного предприятия необходимо не только сохранять традиционные подходы к выполнению своих работ, но и внедрять современные ГНСС-технологии.

Изложенный в учебном пособии материал носит поверхностный, конспективный характер, однако дает представление о внедрении в производство маркшейдерских работ принципиально новых геодезических средств измерений – спутниковых приемников.

Автор надеется, что учебное пособие послужит ориентиром для более углубленного изучения дисциплины и поможет разобратся в потоке интерактивной информации, представляемой в презентациях современного спутникового оборудования с целью практического использования в дальнейшей профессиональной деятельности.

**СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЙ**

Глобальная система спутникового позиционирования (ГССП)	Система радионавигационных искусственных спутников Земли, службы контроля и управления и приемников спутниковых радиосигналов, обеспечивающая координатно-временные определения на земной поверхности и в околоземном пространстве.
Спутниковое определение координат (СОК)	Определение пространственных координат точки с использованием глобальных навигационных спутниковых систем.
GPS (Global Positioning System)	Глобальная система позиционирования (местопределения), разработана в США.
NAVSTAR (Navigational Sattellits Time and Ranging)	Навигационные спутники точного времени и координат (США).
ГЛОНАСС	Глобальная Навигационная Система Спутников (разработана в России).
Базовая станция (база)	Приемник, служащий для выполнения приема на точке, относительно которой производят спутниковые определения в данном сеансе.
Подвижная станция (ровер)	Приемник, служащий для выполнения приема на точке, местоположение которой определяют в данном сеансе.

Дальность	Теоретическое расстояние между спутником и приемником.
Псевдодальность	Расстояние между спутником и приемником, вычисленное по времени распространения сигнала без поправки на расхождение часов спутника и приемника.
Неоднозначность	Неизвестное число целых циклов фазы несущих колебаний, обусловленное временем прохождения радиосигнала от спутника до приемника.
Сеанс (сессия)	Непрерывная регистрация сигналов навигационных спутников приемниками в течение времени, необходимого для решения поставленной задачи.
Псевдослучайный код	Излучаемый спутниками непрерывный радиосигнал, состоящий из кодовых последовательностей.
C/A-код (радиосигнал стандартной точности)	Грубый, общедоступный код GPS, дающий низкоточные данные.
P-код (радиосигнал высокой точности)	Точный код GPS. Доступ к P-коду осуществляется правительством США только для санкционированных потребителей.
Задержка сигнала	Временная задержка, которой подвержены передаваемые со спутника радиосигналы, из-за влияния ионосферы и тропосферы.



Несущие колебания	Радиоволны, у которых, по крайней мере, одна характеристика (частота, амплитуда или фаза) может подвергаться модуляции (закономерному изменению).
Несущая частота	Частота немодулированных колебаний.
Угол отсечки	Минимальный угол возвышения спутника над горизонтом.
МУН (Международное условное начало)	Точка звездного неба близ Полярной звезды, условно принятая за средний северный полюс Земли. Используется в геоцентрической системе координат для определения северного направления оси вращения Земли.
Время GMT (Гринвичское среднее время)	Среднее солнечное время, отнесенное к Гринвичскому меридиану, используется как первичный базис стандартного времени в пределах всего земного шара
Время UTC (Universal Time Coordinated)	Всемирное координированное время, измеряемое атомными часами, показания которых периодически корректируются.
TAI (Time Atomic International)	Международное атомное время. Единицей измерения является атомная секунда – интервал времени, близкий к 1/86400 части суток.
UT (Universal Time)	Всемирное астрономическое время (задается суточным вращением Земли).

Время GPST	Непрерывная шкала отсчета времени, основанная на координированном универсальном времени (UTC) от 6 января 1980 г.
Ошибка хода часов	Разность в показаниях времени часов относительно единого системного времени GPST.
Многопутность (многолучевость)	Явление многолучевого распространения радиосигнала при одновременном обнаружении приемником прямых сигналов и отраженных от земных объектов, окружающих приемник.
Спутниковое созвездие	Конфигурация группы спутников, видимых с точки наблюдений в проекции на небесную сферу.
Инициализация	Процедура измерений для предварительного разрешения неоднозначности перед началом спутниковых измерений в кинематическом режиме.
Эфемериды спутников	Координаты положения спутников на момент времени, интересующий пользователя.
Геометрический фактор DOP (коэффициент потери точности)	Коэффициент, связанный с конфигурацией (геометрией расположения) наблюдаемых спутников. При этом происходит потеря точности в определении координат и времени.
PDOP (наиболее используемый фактор)	Коэффициент потери точности совокупного определения местоположения (трехмерные координаты).

GDOP	Коэффициент потери точности, учитывающий погрешности определения времени (трехмерные координаты плюс взаимный уход показаний часов).
HDOP	Коэффициент потери точности (планового) местоположения.
VDOP	Коэффициент потери точности определения вертикального (высотного) местоположения.
TDOP	Коэффициент потери точности определения времени.
Тропосфера	Ближайшая к земной поверхности (неионизированная) часть атмосферы, простирающаяся до высот 40–50 км.
Ионосфера	Слой заряженных частиц (ионов) в атмосфере Земли на высоте от 50 до 1000 км над поверхностью.
Высота антенны	Расстояние от точки на корпусе антенны до центра определяемой точки.
Сектор контроля и управления	Размещенное на земной поверхности оборудование для непрерывного отслеживания поступающих от спутников сигналов и контроля над работой всей системы.
Космический сектор (спутниковое созвездие)	Составная часть спутниковой системы, расположенная в космосе, т. е. спутники.

Сектор пользователей	Составная часть спутниковой системы, включает в себя приемники для приема сигналов со спутников.
WGS-84	Всемирная геодезическая координатная система 1984 г.
ПЗ-90	Российская система геодезических параметров Земли 1990 г., используется в ГЛОНАСС.
СК-42	Система координат Гаусса – Крюгера, принята в России в 1942 г.
Дифференциальное определение местоположения	Определение относительных координат между двумя или более приемниками, которые одновременно отслеживают одни и те же спутниковые сигналы.
Абсолютное определение местоположения	Определение координат пункта по координатам спутников в геоцентрической системе.
Статический режим	Порядок выполнения дифференциальных наблюдений при использовании не менее двух неподвижных приемников (время наблюдения 1 час и более).
Режим быстрой статики (вариант статического режима)	При благоприятных условиях и при некотором снижении требований точности время сеанса выбирается от 5 до 20 мин.
Постобработка	Окончательная обработка данных в камеральных условиях с целью получения координат пунктов.

Режим реокупации  
(вариант статического  
режима измерений с  
возвращением)

Используется, когда при неблагоприятных условиях допускается выполнять наблюдение 3-х спутников (при недопустимом значении DOP). Непременным условием режима является повторная установка приемника на этом же пункте (не менее чем через 1 ч) и наблюдение уже других спутников, а затем совместная обработка всех полученных данных.

Кинематический режим

Порядок выполнения дифференциальных наблюдений при использовании одного неподвижного и не менее чем одного непрерывно движущегося приемника.

Режим «стой – иди»  
(вариант кинематического режима)

Вариант кинематического режима, предусматривающий остановку на точке, подлежащей определению, однако требующий, чтобы при перемещении от одной точки к другой сохранялась связь не менее чем с 4-мя спутниками, в противном случае на этой точке необходимо оставаться до полного разрешения неоднозначности.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Пример оформления рабочей программы полевых работ  
топографо-геодезической группы ОАО «Кузбассгипрошахт»  
по развитию съемочного обоснования

**Объект:** Кемеровская обл., Прокопьевский район, поле разреза «Таежный». Ближайший населенный пункт – деревня Большая Талда. Ближайшие промышленные центры – города Новокузнецк, Прокопьевск и Киселевск, находящиеся соответственно в 65, 45 и 43 км к юго-востоку и югу от участка горных работ «Таежный» (карта масштаба 1:2500).

**Назначение:** при проектировании промышленной площадки и корректировке проекта поля разреза «Таежный» с увеличением мощности до 8,5 млн т угля в год для размещения породных отвалов Казаченковский, Западный, Южный и Новый возникла необходимость в развитии съемочного обоснования для съемки масштаба 1:500 с высотой сечения рельефа через 0,5 м.

**Краткая географическая характеристика района работ:** территория, расположенная восточнее реки Еланый Нарык, представляет собой слабозалесенную плоско-волнистую лесостепь, восточная часть является переходной формой к затаеженной предгорной холмистой равнине. **Рельеф** характеризуется значительной расчлененностью, отметки поверхности изменяются в пределах 250–400 м. Самые низкие отметки соответствуют речным долинам и логам. **Климат** района резко континентальный. Наиболее холодные месяцы январь и декабрь со средней температурой  $-16,5$  °С. Абсолютный минимум в это время достигает  $50$  °С. Наиболее жарким месяцем является июль, среднемесячная температура которого достигает  $+18,8$  °С. Район относится к зоне умеренного увлажнения. Глубина сезонного промерзания грунтов составляет 2,4 м.

**Аппаратура:** 1) РМ3 – геодезический GPS приемник ProMark3 зав. № 0120470074186; 2) РМ21 – геодезический GPS приемник ProMark2 зав. № 010682; 3) РМ22 – геодезический GPS приемник ProMark2 зав. № 010685.

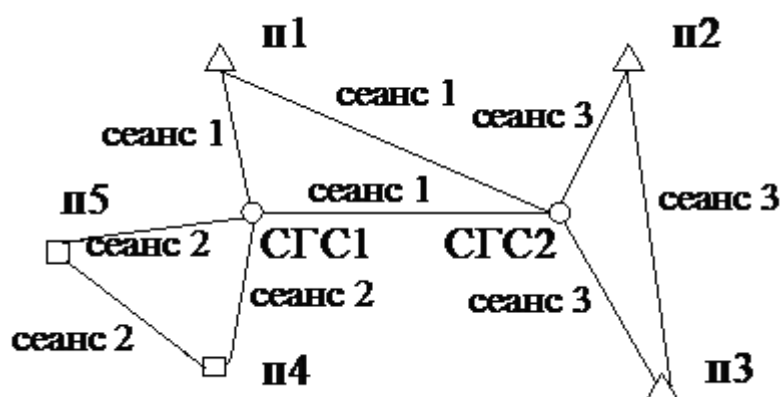
**Программное обеспечение:** программный пакет GNSS Solutions, входящий в комплект приемника ProMark3.

**Метод спутниковых определений:** статический. Время спутникового наблюдения определяется по таймеру. Исходя из того, что самый дальний исходный геодезический пункт располагается в 6 км, наблюдения проводятся до появления в приемнике значения 10 км. Продолжительность наблюдений – не менее 25 мин. Для определения периода времени, благоприятного для выполнения спутниковых наблюдений, используется фактор PDOP. Спутниковые определения не рекомендуется выполнять при значениях фактора PDOP более 7. Идеальная конфигурация спутникового созвездия достигается в случае, когда один из спутников находится в зените, а остальные равномерно распределены по окружности с центром в определяемой точке так, что их возвышение над горизонтом составляет более  $15^\circ$ . Не рекомендуется выполнять наблюдения при температуре меньше  $-20^\circ\text{C}$ .

#### **Порядок производства работ на пунктах объекта**

№ сеанса	Условные номера приемников / названия пунктов геодезической основы или съемочного обоснования		
1	1) СГС1	2) СГС2	3) п1
2	1) СГС1	2) п4	3) п5
3	1) СГС2	2) п3	3) п2

#### **Схема измерений**



СГС1, СГС2 – определяемые точки съемочной сети;  
 п1, п2, ..., п5 – исходные геодезические пункты триангуляции или полигонометрии I–IV классов, 1–2 разрядов

### ***Журнал спутниковых наблюдений***

Объект (№ договора) _____
Район работ _____
Дата наблюдений _____
Приемник РМ31; РМ21; РМ22 _____
<b>Название пункта</b> в приемнике _____
Описание _____
Наклонная высота антенны _____ м
Начало наблюдения _____ (ч : мин)
Число спутников на начало набл. _____
Фактор PDOP на начало набл. _____
Фактор PDOP в процессе набл. _____
Наличие препятствий для набл. _____
Окончание набл. _____
Число спутников в конце набл. _____
Фактор PDOP в конце набл. _____
<b>Наблюдатель</b> _____
<b>Проверил</b> _____
Роспись, ФИО

### ***Порядок выполнения работ по развитию съемочного обоснования спутниковым геодезическим методом***

Этап	Результат
Подготовительные работы	Программа инженерно-геодезических изысканий, рабочая программа полевых работ по развитию съемочного обоснования геодезическим спутниковым методом, выписка координат и высот геодезических пунктов, картографические материалы
Рекогносцировка	Скорректированная рабочая программа полевых работ
Сеансы наблюдений	Журнал спутниковых наблюдений
Вычисления	Набор ведомостей «Данные спутникового определения координат», ведомость расчета средних значений координат и высот точек СГС с оценкой погрешности положения точек
Повторные наблюдения при обнаружении недопустимых погрешностей	Набор ведомостей «Данные спутникового определения координат», ведомость расчета средних значений координат и высот точек СГС с оценкой погрешности положения точек
Составление списка координат и высот	Список координат и высот пунктов съемочной сети, определенных геодезическим спутниковым методом



**Ведомость расчета средних значений координат и высот точек СГС с оценкой погрешности положения точек**

Исходный пункт	Определяемая точка	Координаты определяемой точки с трех исходных пунктов, м			Расхождение со средним положением в плане, м		Длина вектора, м	Погрешность положения определяемой точки относительно исходных пунктов, м
		X	Y	Z	dX	dY		
Определение точки СГС1								
п1	СГС1(2)	X <sub>1-1</sub>	Y <sub>1-1</sub>	Z <sub>1-1</sub>	dX <sub>1</sub> = X <sub>1-1</sub> - X <sub>ср</sub>	dY <sub>1</sub> = Y <sub>1-1</sub> - Y <sub>ср</sub>	L <sub>n1-СГС1</sub>	dZ <sub>1</sub> = Z <sub>1-1</sub> - Z <sub>ср</sub>
п2(п4)	СГС1(2)	X <sub>2-1</sub>	Y <sub>2-1</sub>	Z <sub>2-1</sub>	dX <sub>2</sub> = X <sub>2-1</sub> - X <sub>ср</sub>	dY <sub>2</sub> = Y <sub>2-1</sub> - Y <sub>ср</sub>	L <sub>n2-СГС1</sub>	dZ <sub>2</sub> = Z <sub>2-1</sub> - Z <sub>ср</sub>
п3(п5)	СГС1(2)	X <sub>3-1</sub>	Y <sub>3-1</sub>	Z <sub>3-1</sub>	dX <sub>3</sub> = X <sub>3-1</sub> - X <sub>ср</sub>	dY <sub>3</sub> = Y <sub>3-1</sub> - Y <sub>ср</sub>	L <sub>n3-СГС1</sub>	dZ <sub>3</sub> = Z <sub>3-1</sub> - Z <sub>ср</sub>
средние		$X_{ср} = \frac{\sum X_i L_i}{\sum L_i}$	$Y_{ср} = \frac{\sum Y_i L_i}{\sum L_i}$	$Z_{ср} = \frac{\sum Z_i L_i}{\sum L_i}$				$M_0 = \sqrt{\frac{\sum dX_i^2 + dY_i^2}{3}}$ $M_h = \sqrt{\frac{\sum dZ_i^2}{3}}$
Допустимая погрешность (п. 5.25 СП 11-104-97)								
					Средняя погрешность положения двух определяемых пунктов в плане		$M_0 = \frac{M_0(СГС1) + M_0(СГС2)}{2}$	
					Абсолютная погрешность взаимного положения двух определяемых точек СГС1 и СГС2		$M_S = \frac{M_0}{\sqrt{2}}$	
					Относительная погрешность положения двух определяемых точек СГС1 и СГС2		$M_S / S$ , где S – расстояние между СГС1 и СГС2	
Вычисления произвел _____ . Дата _____								

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глобальная спутниковая система определения местоположения GPS и ее применение в геодезии / А. А. Генике [и др.]. – М. : Картгеоцентр, 1999. – 272 с.
2. Сборник таблиц для геодезических вычислений. – М. : Редакционно-издательский отдел ВТС, 1953. – 220 с.
3. Радиогеодезические и электронно-оптические измерения / В. Д. Большаков [и др.]. – М. : Недра, 1985. – 303 с.
4. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / под ред. В. Н. Харисова [и др.]. – М. : ИПРЖР, 1998. – 400 с.
5. Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : в 2 т. Т. 1 / К. М. Антонович. – М. : ФГУП «Картоцентр», 2005. – 344 с.
6. Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : в 2 т. Т. 2 / К. М. Антонович. – М. : ФГУП «Картоцентр», 2006. – 360 с.
7. Руководство по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS. – М. : ЦНИИГАиК, 2003. – 124 с.
8. Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС И GPS. – М. : ЦНИИГАиК, 2002. – 73 с.
9. Яценков, В. С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. – М. : Горячая линия – Телеком, 2005. – 272 с.
10. Маслов, А. В. Геодезия / А. В. Маслов, А. В. Гордеев, Ю. Г. Батраков. – М. : КолосС, 2006. – 598 с.
11. Земельно-кадастровые геодезические работы / К. Ю. Немывакин [и др.]. – М. : КолосС, 2008. – 184 с.
12. Геодезия : учеб. пособие для вузов / Г. Г. Поклад [и др.]. – М. : Академический проспект, 2008. – 592 с.
13. Дементьев, В. Е. Современная геодезическая техника и ее применение : учеб. пособие для вузов / В. Е. Дементьев. – 2-е изд. – М. : Академический проспект, 2008. – 591 с.

14. Теория и практика высокоточных геодезических измерений / под ред. В. П. Савиных. – М. : Академический проспект, 2009. – 394 с.

15. Куштин, И. Ф. Геодезия : учеб.-практ. пособие / И. Ф. Куштин, В. И. Куштин. – Ростов н/Д : Феникс, 2009. – 909 с.

16. Назаров, А. С. Автоматизированная обработка материалов топографо-геодезических и земельно-кадастровых работ (на примере CREDO) : учеб. пособие для вузов / А. С. Назаров, Ю. К. Неумывакин, М. И. Перский ; под ред. А. П. Пигина. – М. : КРЕДО-ДИАЛОГ, 2009. – 112 с.

17. Инструкция по межеванию земель / Комитет Российской Федерации по земельным ресурсам и землеустройству. – М. : Роскомзем, 1996. – 30 с.

18. Спутниковая система межевания земель. Проспект. – М. : Госземкадастрсъёмка, 2003. – 12 с.

19. Современные геодезические технологии: каталог геодезического оборудования. – М. : ЗАОПРИН, 2010. – 120 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	3
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>РАЗДЕЛ 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ</b> .....	6
1.1. Принцип измерения дальномерных расстояний.....	6
1.2. Сведения об электромагнитной волне.....	7
1.3. Модуляция электромагнитных волн.....	10
1.4. Способы регистрации разности фаз.....	13
<b>РАЗДЕЛ 2. СПУТНИКОВЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ</b> .....	15
2.1. Назначение Глобальных систем спутникового позиционирования (ГССП).....	15
2.2. Общие сведения о методе СОК и организации спутниковых наблюдений.....	16
2.2.1. Сущность спутникового позиционирования.....	16
2.2.2. Сектор контроля и управления.....	17
2.2.3. Космический сектор.....	19
2.2.4. Сектор пользователя.....	21
<b>РАЗДЕЛ 3. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИИ И СВЯЗЬ МЕЖДУ НИМИ</b> .....	22
3.1. Фигура и размеры Земли и некоторых земных эллипсоидов.....	22
3.2. Пространственная система прямоугольных координат.....	24
3.3. Система геодезических координат.....	26
3.4. Параметры связи систем координат.....	27
3.4.1. Переход от геодезической к пространственной системе прямоугольных координат.....	27
3.4.2. Переход от одной пространственной прямоугольной системы к другой.....	27
3.4.3. Особенности определения высот с помощью спутниковых систем.....	29
3.5. Проекция Гаусса – Крюгера.....	30
3.5.1. Основные свойства проекции.....	30
3.5.2. Система плоских прямоугольных координат в проекции Гаусса – Крюгера (зональная система координат).....	31
3.6. Перевычисление координат из одной зоны в другую.....	34
3.6.1. Перевычисление прямоугольных координат из одной 6-градусной зоны в другую 6-градусную зону.....	34
3.6.2. Перевычисление прямоугольных координат из 6-градусной зоны в 3-градусную зону.....	35
3.7. Переход от одной плоской прямоугольной системы к другой плоской прямоугольной системе.....	37

<b>РАЗДЕЛ 4. РЕДУКЦИОННЫЕ ПЕРЕХОДЫ</b> .....	39
4.1. Редуцирование длин линий.....	39
4.2. Редуцирование азимутов и направлений.....	41
<b>РАЗДЕЛ 5. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ В СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИИ</b> .....	43
5.1. Сущность абсолютного метода.....	43
5.2. Сущность дифференциального метода.....	47
5.3. Способы разностей при дифференциальном методе.....	48
<b>РАЗДЕЛ 6. ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ</b> .....	53
6.1. Виды погрешностей спутниковых измерений.....	53
6.2. Влияние изменения эфемерид спутников.....	54
6.3. Влияние ионосферы.....	55
6.4. Тропосферные задержки сигнала.....	56
6.5. Явление многопутности.....	57
6.6. Инструментальные источники погрешностей.....	58
6.7. Геометрический фактор.....	60
<b>РАЗДЕЛ 7. ПРОИЗВОДСТВО РАБОТ ПРИ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ</b> .....	63
7.1. Организация наблюдений на пунктах СОК.....	63
7.2. Проектирование пунктов СОК.....	65
7.3. Рекомендации по построению высотных сетей.....	67
7.4. Выбор параметров наблюдений.....	68
7.5. Рекомендации по применению режимов.....	69
7.6. Подготовка аппаратуры.....	71
7.7. Ведение полевого журнала.....	73
7.8. Обработка результатов наблюдений.....	73
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	77
<b>СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЙ</b> .....	78
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ</b> .....	85
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	89

Корецкая Галина Александровна

СПУТНИКОВЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ  
В МАРКШЕЙДЕРИИ

Учебное пособие

Редактор О. А. Вейс

Подписано в печать 02.10.2012. Формат 60×84/16.  
Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе. Уч.-изд. л. 6,00.  
Тираж 80 экз. Заказ  
КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.  
Типография КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.