

**Негосударственное частное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Национальный открытый институт г. Санкт-Петербург»**

Петушков А.В., Тарелкин Е.П.

**Спутниковые системы  
и  
технологии позиционирования**

**Учебное пособие**

Рекомендовано Саморегулируемой организацией  
НП «Изыскатели Санкт-Петербурга и Северо-Запада»  
для студентов, обучающихся по направлениям  
120100.62 «Геодезия и дистанционное зондирование»  
и 120700.62 «Землеустройство и кадастры»  
и слушателей курсов повышения квалификации

Санкт-Петербург  
2015

**УДК 528.7**

**ББК 26.11**

**ПЗ1**

**ПЕТУШКОВ, АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**ТАРЕЛКИН, ЕВГЕНИЙ ПЕТРОВИЧ**

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 120100.62 «Геодезия и дистанционное зондирование» и 120700.62 «Землеустройство и кадастры». В пособии изложены теоретические вопросы дисциплины.

**УДК 528.7**

**ББК 26.11**

ISBN 978-5-906759-17-7

© Петушков А.В., 2015

©Тарелкин Е.П., 2015

©НОИР 2015

© ИКЦ 2015

## Предисловие

Согласно Федеральному государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования подготовки бакалавров по направлению *“Геодезия и дистанционное зондирование”*, объектом профессиональной деятельности выпускника являются: поверхность Земли, территориальные и административные образования; искусственные и естественные объекты на поверхности и внутри Земли и других планет и их спутников, а также околоземное космическое пространство; геодинамические явления и процессы; гравитационные, электромагнитные и другие физические поля.

Согласно Федеральному государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования подготовки бакалавров по направлению *“Землеустройство и кадастры”*, объектом профессиональной деятельности выпускника являются: земельные и другие виды природных ресурсов; категории земельного фонда; территории административных образований; территориальные зоны; зоны с особыми условиями использования территорий; зоны специального правового режима; землепользования и земельные участки в зависимости от целевого назначения и разрешённого использования; земельные угодья; единые объекты недвижимости и кадастрового учёта; информационные системы и технологии кадастра недвижимости; геодезическая и картографическая основы землеустройства и кадастра недвижимости.

Область профессиональной деятельности бакалавров включает:

- получение измерительной пространственной информации о поверхности Земли, отображение поверхности Земли или отдельных её территорий на планах и картах;
- осуществление координатно-временной привязки объектов, явлений и процессов на поверхности Земли;
- организация и осуществление работ по сбору и распространению геопространственных данных как на территорию Российской Федерации в целом, так и на отдельных её регионах с целью развития их инфраструктуры.

Цель изучения дисциплины – сформировать у будущих бакалавров знания о методах, технике и организации работ, связанных с изучением земной поверхности и отображением её на планах и картах, а также дать представление о других видах измерений.

Задачи дисциплины:

- сформировать знания об основах работы геодезических спутниковых навигационных систем;
- сформировать умения в выборе технологии спутниковых геодезических определений;
- сформировать навыки в работе с геодезической спутниковой аппаратурой.

Большое значение в изучении дисциплины имеет самостоятельная работа обучающихся. Она имеет целью закрепление и углубление полученных знаний и навыков, подготовку к предстоящим занятиям и зачёту по дисциплине, а также формирование навыков умственного труда и самостоятельности в поиске и приобретении новых знаний. Данное учебное пособие окажет помощь в самостоятельном изучении дисциплины и закреплении полученных знаний.

# Оглавление

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	<b>7</b>
<b>1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ</b>	<b>8</b>
1.1 Двусторонний и односторонний методы дальномерных измерений	8
1.2 Принципы измерения длин линий, используемые в спутниковых определениях	10
<b>2. СТРУКТУРА И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ СПУТНИКОВОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ GPS И ГЛОНАСС</b>	<b>13</b>
2.1 Космический сегмент	13
2.2 Сегмент управления	15
2.3 Сегмент пользователя	15
<b>3. НАВИГАЦИОННОЕ СООБЩЕНИЕ, ЭФЕМЕРИДЫ. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ СПУТНИКОВОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ</b>	<b>18</b>
3.1 Навигационное сообщение	18
3.2 Геометрическая сущность спутникового позиционирования	20
<b>4. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ, ИЗМЕРЯЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ</b>	<b>22</b>
4.1 Кодовый режим	22
4.2 Фазовый режим	23
4.3 Допплеровский режим	23
4.4 Кодовые псевдодальности	24
4.5 Фазовые измерения	25
4.6 Интегральный доплер	26
<b>5. СПОСОБЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ</b>	<b>27</b>
5.1 Автономное определение координат	27
5.2 Дифференциальный способ	28
5.3 Статика	30
5.4 Ускоренная (быстрая) статика	32
5.5 Кинематика	32
5.6 Кинематика реального времени (RTK)	34
<b>6. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ И ВРЕМЕНИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ</b>	<b>35</b>
6.1 Системы координат	35
6.2 Счёт времени	40
<b>7. ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ОШИБОК И МЕТОДЫ ИХ ОСЛАБЛЕНИЯ</b>	<b>42</b>
7.1 Основные источники ошибок	42
7.2 Геометрический фактор	43
7.3 Влияние внешней среды	44

7.3.1 Влияние ионосферы	44
7.3.2 Влияние нижних слоёв атмосферы	45
7.3.3 Многолучёвость (многопутность)	46
<b>8. ОБРАБОТКА И УРАВНИВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ</b>	<b>47</b>
8.1 ОБЩАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРИ ОБРАБОТКЕ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	47
8.2 НЕОДНОЗНАЧНОСТЬ (МНОГОЗНАЧНОСТЬ) РАЗНОСТИ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	48
<b>9. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ</b>	<b>53</b>
9.1 ПОСТРОЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ	53
9.2 ПОСТРОЕНИЕ КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ	54
9.3 ПОСТРОЕНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ РОССИИ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	54
9.4 СОЗДАНИЕ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ГОРОДСКИХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	56
<b>10. ПРОИЗВОДСТВО СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ</b>	<b>60</b>
10.1 ВЫПОЛНЕНИЕ СЪЁМКИ	60
10.1.1 Установка антенны	60
10.1.2 Инициализация приёмника	60
10.1.3 Выполнение наблюдений	61
10.1.4 Завершение сессии наблюдений	62
10.1.5 Привязка к исходному пункту	63
10.2 ОБРАБОТКА ДАННЫХ	63
10.2.1 Передача данных наблюдений	63
10.2.2 Обработка данных	64
10.3 КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕКТОРА БАЗЫ И ПОСТРОЕНИЯ СЕТИ	66
10.3.1 Однобазовые векторы	66
10.3.2 Сети	68
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>71</b>
<b>ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ</b>	<b>72</b>
<b>СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ</b>	<b>74</b>
<b>УКАЗАТЕЛЬ ПЕРСОНАЛИЙ</b>	<b>82</b>
<b>СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ</b>	<b>83</b>
ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА	83
ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА	83
РУКОВОДЯЩИЕ ДОКУМЕНТЫ И СПРАВОЧНАЯ ЛИТЕРАТУРА	84
<b>АННОТАЦИЯ САЙТОВ ИНТЕРНЕТ</b>	<b>85</b>

## Введение

Спутниковая геодезия возникла в конце 50-х годов после запуска первых ИСЗ. За прошедший период эта область геодезии непрерывно совершенствовалась, пройдя различные стадии развития, которые условно можно разделить на три периода.

*1. Период с 1958 по 1970 гг.* Развитие основных методов спутниковых наблюдений, включающих в себя методы вычисления и анализа спутниковых орбит, фотографирования спутников с помощью специально разработанных камер. Были предприняты первые попытки построения глобальных геодезических сетей с использованием спутников, создания моделей гравитационного поля Земли.

*2. Период с 1970 по 1980 гг.* Разработка новых методов наблюдений: лазерные измерения расстояний до спутников, спутниковая альтиметрия, создаются доплеровские спутниковые системы Транзит (США) и Цикада (Советский Союз). Выполнены глобальные определения формы геоида, позволившие уточнить фигуру Земли, на качественно новом уровне стали решаться проблемы изучения скорости вращения Земли, закономерностей движения её полюсов, деформаций земной коры и других параметров.

*3. Период с 1980 г. по настоящее время.* Широкомасштабное использование спутниковых технологий в геодезии, геодинاميке, топографии и других смежных областях, создание многофункциональных радионавигационных систем Навстар (США) и ГЛОНАСС (Советский Союз), Галилео (Западная Европа), Компасс (Китай). При этом названные системы ориентированы на глобальные определения местоположения, а Галилео на северные широты. Реализация фазовых методов измерений позволила достичь миллиметрового уровня точности при измерении линий длиной от нескольких метров до тысячи и более километров.

# 1. Основные принципы действия спутниковых систем определения местоположения

## 1.1 Двусторонний и односторонний методы дальномерных измерений

В двустороннем методе измерения расстояний сигналы, несущие в себе информацию о величине пройденного ими пути, проходят искомое расстояние дважды (в прямом и обратном направлениях). Такая концепция позволяет избавиться от целого ряда ошибок, связанных с несинхронностью работы генераторов, формирующих такие сигналы и участвующих в измерительном процессе.

В спутниковой геодезии двусторонние методы также как и в традиционной геодезии находят применение. На их основе работают лазерные спутниковые дальномерные системы, где отражающим объектом является спутник

Другим примером являются спутниковые альтиметры. Измерительная аппаратура располагается на спутнике, а в качестве отражающей поверхности используется земная поверхность (поверхность морей и океанов).

Основной измеряемой величиной в упомянутых системах является время, затрачиваемое сигналом на прохождение удвоенного расстояния между земной поверхностью и спутником. Если скорость распространения такого сигнала известна, то без учёта релятивистских эффектов интересующее нас расстояние  $\rho$  может быть подсчитано по формуле

$$\rho = v\tau / 2 \quad , \quad (1)$$

где: —  $v$  — скорость распространения сигнала (скорость света в вакууме, а влияние атмосферы учитывают посредством введения соответствующей поправки);

-  $\tau$  — время прохождения сигналом удвоенного расстояния между земной поверхностью и спутником.

Положительным моментом данного метода является тот факт, что интересующее нас время излучения и приёма информационного сигнала осуществляется по одним и тем же часам, в результате чего не возникает проблемы синхронизации часов.

В спутниковых системах для точного определения местоположения применяются односторонние методы дальномерных измерений.

Основная особенность односторонних методов измерения расстояний между спутником и наземным пунктом состоит в том, что передающее устройство размещается на спутнике, а приёмник — на наземном пункте. При этом информационный сигнал проходит измеряемое расстояние только в одном направлении, а именно, от спутника до приёмника.

Если при этом моменты излучения и приёма данного сигнала зафиксированы точно синхронизированными часами, которые расположены на спутнике и на наземном пункте, то интересующее нас расстояние может быть определено по формуле, аналогичной формуле (1)

$$\rho = vt$$

Множитель  $1/2$  в формуле отсутствует из-за одностороннего прохождения сигналом определяемого расстояния.

Поскольку электромагнитные излучения за одну наносекунду ( $1 \text{ нс} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ ) проходят расстояние около 30 см, то для обеспечения характерного для геодезии сантиметрового уровня точности необходимо синхронизировать ход часов на спутнике и в приёмнике с погрешностью не хуже нескольких сотых долей наносекунды. Современный технический уровень не позволяет создать часы с отмеченной выше длительной стабильностью их показаний, причём в достаточно миниатюрном исполнении.

В одностороннем методе дальномерных измерений присутствуют как позитивные, так и негативные моменты. К позитивным показателям относится возможность одновременного определения расстояний от одного, установленного на спутнике передающего устройства, до неограниченного количества приёмных устройств, составляющих основу аппаратуры потребителя. Исключение из последней каких-либо радиопередатчиков, которые являются, как правило, потребителями значительного количества электроэнергии и которые приводят к существенным усложнениям аппаратуры, также следует отнести к положительным качествам такого метода. Вместе с тем необходимость строгого учёта поправок, обусловленных несинхронностью работы опорных генераторов (а следовательно, и часов) на спутнике и в аппаратуре потребителя, несомненно следует отнести к негативным показателям одностороннего метода.

## **1.2 Принципы измерения длин линий, используемые в спутниковых определениях**

При измерении длин линий наземными свето- и радиодальномерами широкое распространение получили импульсные и фазовые методы, а также их сочетания. Эти же методы составляют основу спутниковых дальномерных измерений. Вместе с тем в спутниковой геодезии получили развитие и методы, основанные на использовании кодированных сигналов, для которых характерны свои специфические особенности. Импульсные принципы дальномерных измерений применительно к спутниковым методам позиционирования находят применение в лазерных дальномерных системах и в спутниковых альтиметрах. К положительным сторонам этого способа определения длин линий может быть отнесена возможность быстрого и однозначного определения измеряемого расстояния, что крайне необходимо при решении навигационных задач. Вместе с тем свойственный импульсным принципам более низкий уровень точности в сравнении с фазовыми методами измерения дальностей следует отнести к наиболее существенному недостатку, ограничивающему широкое его использование в геодезии.

При разработке глобальных спутниковых систем определения местоположения, которая проводилась военными ведомствами в целях навигационного обеспечения судов военно-морского флота, возникла необходимость применения специализированных методов координатных (а следовательно, и дальномерных) определений, которые были бы доступны только санкционированным пользователям. Такая концепция привела к разработке способа дальномерных измерений, основанного на использовании кодированных сигналов. С точки зрения построения на их основе дальномерных систем данные сигналы представляют собой последовательность посылок единичного и нулевого уровня, которая приводит в конечном счёте к формированию сигнала прямоугольной формы, причём кодированию подвергается длительность единичных и нулевых посылок. В процессе выполнения измерений с помощью глобальных спутниковых систем на передающем конце измеряемой линии (на спутнике) формируется соответствующий кодированный сигнал, а на приёмном конце линии (в аппаратуре

потребителя) должен быть сформирован опорный сигнал отклика, представляющий собой аналогичный закодированный сигнал.

При практическом использовании данного метода для целей измерения дальностей интересующее нас время прохождения определяется за счёт введения соответствующей задержки в опорный сигнал отклика, фиксируя при этом максимальное корреляционное совпадение с принимаемым от спутника аналогичным кодированным сигналом.

Рассматриваемый принцип дальномерных измерений, базирующийся на использовании кодированных сигналов, сочетает в себе отдельные характерные особенности свойственные как импульсному, так и фазовому принципу определения дальностей. Так, например, при его применении удаётся избежать необходимости разрешения неоднозначности, т. е. по данному показателю кодовый метод подобен импульсному методу. В то же время при анализе особенностей определения моментов совпадения опорного и принимаемого сигнала часто вводят понятие смещения по фазе одного кодированного сигнала относительно другого, что характерно для фазовых методов измерения расстояний.

По своим точностным показателям кодовый принцип существенно уступает фазовому, а поэтому при решении геодезических задач ему отводится лишь вспомогательная роль (в частности, приближенное определение координат точки стояния).

Применительно к геодезическому использованию спутниковых систем основными являются фазовые методы, базирующиеся на применении в качестве информационных сигналов несущих гармонических колебаний дециметрового диапазона радиоволн. Основным параметром, используемым при фазовых дальномерных измерениях, является текущая фаза.

Одна из негативных особенностей фазовых измерений состоит в том, что при отсутствии какой-либо предварительной информации о предыдущих измерениях фазометр позволяет определить разность фаз только в пределах одного периода (т.е. одного фазового цикла), в то время как необходимо вести подсчет и числа полных периодов изменения фазы  $N$  за время прохождения информационным сигналом искомого расстояния.

Для нахождения величины  $N$  (этот процесс принято называть разрешением неоднозначности) в наземных фазовых

дальномерных системах используют такие вспомогательные методы, как метод измерений на нескольких различных масштабных частотах или метод плавного изменения масштабной частоты, причём при выполнении измерений в статических условиях упомянутая процедура, как правило, не создаёт существенных затруднений. В спутниковых системах расстояния между установленными на земной поверхности приёмниками и наблюдаемыми спутниками непрерывно изменяются, в результате чего изменяется и определяемая величина  $N$ . Кроме того, из-за использования при фазовых измерениях весьма высоких частот, исчисляемых гигагерцами, а также из-за больших значений измеряемых длин, исчисляемых десятками тысяч километров, величина  $N$  достигает сотни миллионов, причём при её определении нельзя ошибиться даже на единицу, так как это приводит к возникновению грубых ошибок. С учётом этих обстоятельств, проблема разрешения неоднозначности при фазовых спутниковых измерениях превращается в весьма ответственную и сложную процедуру.

Ещё одна особенность фазовых спутниковых измерений связана с односторонним методом дальномерных измерений, получившим в спутниковых системах позиционирования широкое распространение.

Как уже отмечалось, при односторонних методах приходится учитывать поправки, обусловленные неодинаковыми показаниями часов на спутнике и в приёмнике. Применительно к фазовым измерениям возникает, прежде всего, необходимость учёта начальных фаз сравниваемых колебаний, которые возбуждаются различными генераторами (в частности, генератором, находящимся на спутнике, и генератором, установленным в приёмнике).

Наряду с перечисленными выше кодовыми и фазовыми принципами измерения расстояний между спутником и приёмником в современных спутниковых системах позиционирования типа GPS находят также применение вспомогательные методы, базирующиеся на эффекте Доплера. Следует при этом заметить, что в случае применения фазовых принципов измерения расстояния реализация упомянутого доплеровского метода не нуждается в привлечении специализированных аппаратных средств, так как данный метод представляет собой одну из разновидностей фазового метода.

## **2. Структура и основные характеристики систем спутникового позиционирования GPS и Глонасс**

Систему спутникового позиционирования делят на три сегмента (подсистемы):

- космический (спутниковый) сегмент – созвездие ИСЗ;
- сегмент управления – сеть наземных станций контроля и управления;
- сегмент пользователей – аппаратура потребителей (GPS-приёмники).

Космический сегмент состоит из группировки функционирующих в данную эпоху спутников. Сегмент управления и контроля содержит главную станцию управления и контроля, станции слежения за спутниками и станции закладки информации в бортовые компьютеры спутников. Сегмент пользователя — это совокупность спутниковых приёмников и программного обеспечения, находящихся в распоряжении пользователей.

### **2.1 Космический сегмент**

Современная система GPS и Глонасс состоит из 24 спутников (21 основных и 3 запасных) которые обращаются на трёх орбитах (Глонасс) и на шести орбитах (GPS) (рис. 1). Орбиты спутников практически круговые и расположены на высотах 19100 км – Глонасс и 20183 км – GPS. Система Глонасс имеет три орбитальные плоскости, наклонение орбит  $64,8^\circ$ . Плоскости орбит спутников GPS наклонены на угол около  $55^\circ$  к плоскости экватора и сдвинуты между собой на  $60^\circ$  по долготе. В каждой из 6 орбитальных плоскостей расположены три равноотстоящих друг от друга на  $120^\circ$  спутника. Спутник в соседней восточной плоскости находится на  $40^\circ$  севернее спутника, расположенного в соседней западной орбитальной плоскости. Радиусы орбит — около 26 тыс. км. Период обращения спутников равен 12 часам звёздного времени (звёздные сутки равны 23 часа 55 минут 56.6 секунд). Каждый спутник проходит над одной и той же точкой ежедневно примерно на 4 минуты раньше вчерашнего.

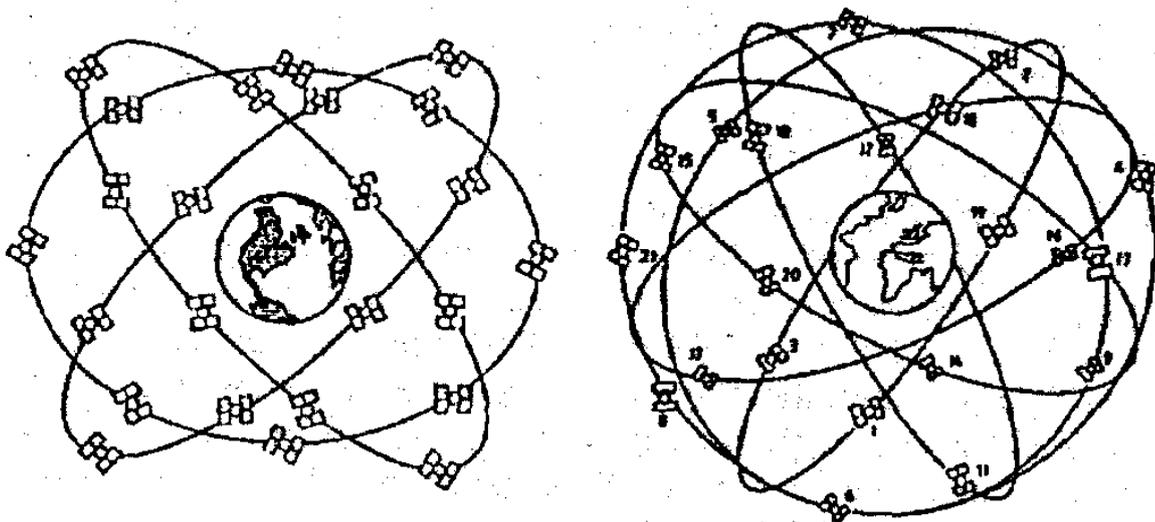


Рис. 1 Расположение спутников на орбитах в СНС Глонасс и GPS

На борту каждого спутника имеются стандарты частоты, из которых наибольшую стабильность имеют водородные генераторы, солнечные батареи, двигатели корректировки орбиты, приёмо-передающая аппаратура, компьютер. Сигналы, формируемые местным опорным генератором, называют стоповыми. Две солнечные батареи площадью 7,2 м<sup>2</sup> каждая обеспечивают спутник энергией и заряжает аккумуляторы для работы спутника в тени Земли. Стандарты частоты координируют и управляют основной частотой – кварцевым стандартом частоты, генерирующим колебания частотой 10,23 МГц, из которых создают две несущие частоты L – диапазона:

L 1= 1575,42 МГц (длина волны 19,05 см),

L 2= 1227,60 МГц (длина волны 24,45 см).

На несущую частоту методом импульсно-фазовой модуляции накладывают информацию и через антенну передают на Землю. Модуляцией сигнала называют изменение какого-либо параметра электрического сигнала: при амплитудной модуляции изменяется амплитуда сигнала, при частотной – частота сигнала, при импульсно-фазовой – фаза сигнала скачком изменяется на 180°.

В системе ГЛОНАСС каждый спутник имеет свою частоту и общий код для всех спутников.

Спутники GPS излучают одинаковые частоты L1, L2, но каждый спутник имеет свой личный код – свою последовательность переключения фазы на 180°, по которой

распознают спутник. Причём частота L1 модулируется двумя видами кодов: C/A – кодом (код свободного доступа) и частота L2 – только P-кодом. Систему кодов, формируемых для спутников системы GPS, называют кодом Голда. Обе несущие частоты дополнительно кодируются навигационным сообщением, в котором имеются данные об орбитах ИСЗ, о параметрах атмосферы, о поправках системного времени.

## **2.2 Сегмент управления**

Сегмент управления (наземный сегмент) ГЛОНАСС состоит из: центра управления системой (ЦУС); контрольных станций (КС); командных станций слежения (КСС); квантово-оптических станций (КОС); систем контроля фаз (СКФ); аппаратуры контроля поля (АКП).

Станции контроля и управления системой NAVSTAR GPS имеют главную станцию управления (авиабаза Фалькон в штате Колорадо), пять станций слежения, расположенные на американских военных базах на Гавайских островах, островах Вознесения, Диего-Гарсия, Кваджелейн.

Для уточнения параметров атмосферы и траекторий движения ИСЗ, кроме того, выполняются наблюдения на государственных и частных станциях слежения за ИСЗ. На главной станции получаемая информация обрабатывается в суперкомпьютерах. В результате вычисляют и прогнозируют эфемериды спутников, определяют поправки в часы ИСЗ, формируют навигационные сообщения спутника. Наземные антенны передают на ИСЗ эти навигационные сообщения. Расположение наземных передающих антенн позволяет иметь ежедневно не менее трёх сеансов связи системы слежения с каждым спутником

## **2.3 Сегмент пользователя**

Пользователь СНС — это человек или коллектив, имеющий в своём распоряжении всю необходимую для работы спутниковую аппаратуру и программное обеспечение. Следовательно, сегмент пользователя — это

совокупность находящихся в работе спутниковых приёмников и другой аппаратуры. Одновременно с проведением измерений в приёмнике выполняется автоматическая обработка содержащихся в каждом навигационном радиосигнале меток времени и цифровой информации.

Таблица 1 Сравнительные характеристики систем ГЛОНАСС и GPS

Показатель	ГЛОНАСС	GPS
1	2	3
Число КА в полной орбитальной группировке	24	24
Число орбитальных плоскостей	3	6
Число КА в каждой плоскости	8	4
Наклонение орбиты	64,8°	55°
Высота орбиты, км	19 130	20 180
Период обращения спутника	11 ч. 15 мин. 44 с	11 ч. 58 мин. 00 с
Система координат	ПЗ-90	WGS-84
Масса навигационного КА, кг	1450	1055
Срок активного существования, лет	5	7,5
Средства вывода КА на орбиту	"Протон-К/ДМ"	Delta 2
Число КА, выводимых за один запуск	3	1
Эталонное время	UTC (SU)	UTC (NO)
Длина строки, с	2	6
Тип псевдошумовой последовательности	m-последовательность	код Голда
Число элементов кода: С/А	511	1023
Структура навигационного сообщения		
Скорость передачи, бит/с	50	50
Вид модуляции	BPSK (Манчестер)	BPSK NRZ
Длина суперкадра, мин.	2,5 (5 кадров)	12,5 (25 кадров)
Длина кадра, с	30 (15 строк)	30 (5 строк)

Цифровая информация описывает положение данного спутника в пространстве и времени (эфемериды) относительно единой для системы шкалы времени и в геоцентрической связанной декартовой системе координат. Кроме того, цифровая информация описывает положение других спутников системы (альманах) в виде кеплеровских элементов их орбит и содержит некоторые другие параметры. Результаты измерений и принятая цифровая информация являются исходными данными для решения навигационной задачи по определению координат и параметров движения. Навигационная задача решается автоматически в вычислительном устройстве приёмника, с использованием метода наименьших квадратов. При этом в системе GPS в обработку принимаются измерения со спутников, у которых угол возвышения превышает 15 градусов. В результате решения определяются три координаты местоположения потребителя, скорость его движения и осуществляется привязка шкалы времени потребителя к высокоточной шкале координированного всемирного времени (UTC). Для более детального сравнения систем GPS и ГЛОНАСС их основные параметры приведены в табл. 1.

### **3. Навигационное сообщение, эфемериды. Геометрическая сущность спутникового позиционирования**

#### **3.1 Навигационное сообщение**

Навигационное сообщение называют также спутниковым сообщением или навигационным спутниковым сообщением. В англоязычной терминологии — это *navigation message*. Далее для краткости будем использовать термин сообщение. Сообщение передаётся за 30 секунд. Но не вся информация передаётся в этот краткий отрезок времени. Например, альманах передаётся в течение нескольких сообщений. Сообщение содержит пять блоков (кадров). Каждый блок транслируется в течение 6 секунд и содержит 10 слов. Каждый блок начинается с телеметрического слова — *telemetry word (TLM)*. Оно содержит синхронизирующий формат и диагностическое сообщение — сообщение или часть сообщения о статусе спутника и системы в целом. Далее идёт ключевое слово — *hand-over word (HOW)*. Этот термин можно перевести как слово, передаваемое из рук в руки. По смыслу *HOW* — это временная метка.

Первый блок содержит параметры часов спутника и коэффициенты модели ионосферы. Параметры часов — это поправка и ход часов спутника. Информацию о параметрах модели ионосферы используют только при работе с одночастотными приёмниками. Второй и третий блок содержат эфемериды спутника, транслирующего данное сообщение. Эти эфемериды называют ширококвещательными. Их получают из результатов наблюдения спутников со станций слежения.

Наблюдение спутников станциями слежения, первичная обработка результатов, передача их на главную станцию управления и контроля, обработка результатов там, передача их на станции закладки информации и сама закладка требуют времени. Следовательно, хранящиеся в памяти бортовых компьютеров и транслируемые ширококвещательные эфемериды в момент их трансляции уже устарели. Поэтому транслируемые эфемериды — это результат предсказания, экстраполяции. По этой причине эфемериды закладывают в

память бортовых компьютеров спутников как можно чаще — примерно каждый час.

Четвёртый блок зарезервирован для передачи служебной информации. Приёмники гражданских пользователей не имеют возможности регистрации этой информации.

Пятый кадр содержит альманах спутников и информацию о состоянии системы. Альманах — это приближенные эфемериды всех спутников системы и данные о здоровье каждого спутника. Каждый спутник в течение 12,5 минут транслирует информацию о созвездии спутников. Чтобы получить альманах до начала наблюдений и использовать эти данные на этапе планирования необходимо выставить приёмник на открытое место, подержать его там включённым минут 15-20, выключить и скачать данные на офисный компьютер. В процессе наблюдений свежий альманах получают вообще без дополнительных затрат времени.

Эфемериды спутника — это набор данных об орбите спутника и о положении спутника на орбите. Пользователя GPS интересуют геоцентрические координаты спутника в системе WGS-84 в момент ухода сигнала с этого спутника. Аппаратура пользователя вычисляет координаты спутника, используя данные, содержащиеся в файле эфемерид. Эфемеридная информация отнесена к референцному (опорному, исходному) моменту. Этот момент указан в файле эфемерид. В сообщении приведён также AODE (Age of Data) — «возраст» эфемеридных данных, то есть интервал времени, прошедший с момента последней закладки данных в память бортового компьютера. Напомним, что параметры эфемерид являются оскулирующими и относятся к референцному моменту. Далее конспективным образом перечислена информация, содержащаяся в широковещательных эфемеридах, корень квадратный из большой полуоси эллипса орбиты, эксцентриситет орбиты, прямое восхождение восходящего узла орбиты спутника, скорость изменения прямого восхождения восходящего узла орбиты спутника — это угол наклона плоскости орбиты к плоскости экватора, аргумент перигея, скорость изменения угла наклона, средняя аномалия на референцный момент. Эти величины являются основными элементами кеплеровой орбиты, показывающие параметры невозмущённой орбиты и положение спутника на этой орбите в данный момент времени. Помимо этого от

спутника приходит следующая информация: отклонение значения среднего движения от предвычисленного; амплитуды косинусоидального и синусоидального членов в формуле для поправки в аргумент широты; амплитуды косинусоидального и синусоидального членов в формуле для поправки в радиус орбиты; амплитуды косинусоидального и синусоидального членов в формуле для поправки в угол наклона орбиты. Формулы для возмущений оскулирующих элементов учитывают только влияние на движения спутника сжатия Земли.

### **3.2 Геометрическая сущность спутникового позиционирования**

В системах спутникового позиционирования КА выполняют роль геодезических опорных пунктов. На каждый момент измерений их координаты должны быть известны. Координаты объекта находят способом пространственных засечек по измерениям при помощи аппаратуры на спутниках и на Земле. Измеренные параметры определяют поверхности положения, в точке пересечения которых лежит искомый объект (пункт). В системе первого поколения TRANSIT на основе эффекта Доплера измеряли разности расстояний от приёмника до двух положений спутника на орбите. Поверхностями положений являлись гиперболоиды вращения. В современных системах измеряют дальности до КА и скорости изменений дальностей вследствие перемещений ИСЗ относительно пользователя. Измеренным скоростям соответствуют конические поверхности положения (конусы), а измеренным дальностям — сферические (сферы). В геодезических целях преимущественно пользуются дальностями, по которым реализуют пространственные линейные засечки (рис. 2).

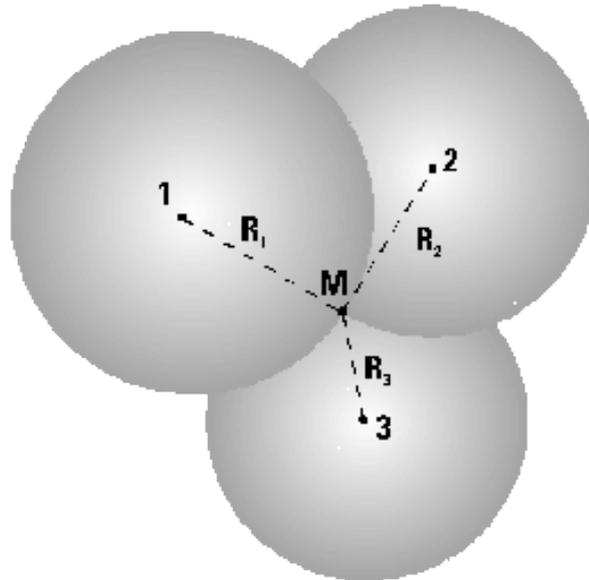


Рис. 2 Геометрическая сущность пространственной засечки

Если с определяемого пункта  $M$  измерить расстояния  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  до трёх пунктов 1, 2, 3 и провести из них как из центров радиусами  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  сферы, то эти сферы пересекутся в точке  $M$  и определяют её положение. Сферы пересекутся ещё в одной точке —  $M'$  (на рис. 2 не показана), однако точки  $M$  и  $M'$  лежат по разные стороны плоскости, проходящей через точки 1, 2, 3 и сделать правильный выбор нетрудно. В этом заключается геометрическая сущность задачи. Когда известны координаты спутников, задачу легко решить аналитически и вычислить координаты пункта  $M$ . На деле измеряют искажённые расстояния. Их называют псевдодальностями. Чтобы правильно вычислить координаты пункта по псевдодальностям, надо их измерять не до двух или трёх, а до большего числа спутников с известными координатами. Кроме того, как это принято в геодезии, всегда должны быть избыточно измеренные величины. Избыточные результаты повышают качество определений, ибо обеспечивают контроль и позволяют выполнять уравнивание по методу наименьших квадратов.

## 4. Методы измерения, измеряемые величины

### 4.1 Кодовый режим

Кодовый режим — это режим, изначально заложенный в систему. Сигнал каждого спутника содержит его эфемериды — данные о местоположении спутника, позволяющие вычислить координаты спутника в геодезической (земной) системе координат. Кроме того, кодовый сигнал содержит передаваемую каждые шесть секунд временную метку. Момент ухода временной метки со спутника, определённый по часам спутника, подписан на ней. Приёмник захватывает сигнал спутника, идентифицирует спутник по коду его сигнала, считывает временную метку и определяет время прохождения сигнала от спутника до приёмника. Это позволяет вычислить дальность от приёмника до спутника.

Все было бы именно так, если бы часы приёмника и спутника шли синхронно. В приёмнике пользователя стандартов частоты нет. Устанавливать их там было бы слишком дорого, как следствие сдвиг шкалы времени в аппаратуре пользователей может быть на несколько порядков больше, чем на КА. Именно поэтому в данном случае дальность называют псевдодальностью. Таким образом, что в кодовом, что в навигационном режимах измеряемой величиной является кодовая псевдодальность. Однако поправка часов приёмника относительно часов спутника на момент наблюдений практически одинакова по отношению к измерениям псевдодальностей до всех наблюдаемых в данный момент спутников, что позволяет её рассматривать как систематическую ошибку. Поправку часов можно исключить, если измерять псевдодальности как минимум до 4 спутников. Четыре измерения позволяют вычислить четыре параметра — три координаты, определяющие положение приёмника в земном пространстве, и сдвиг шкалы времени (уход частоты) в приёмнике. Следовательно, для мгновенного определения местоположения необходимо, чтобы на антенну приёмника одновременно приходили сигналы не менее чем от четырёх спутников системы. Созвездие спутников системы обеспечивает это требование.

## 4.2 Фазовый режим

Фазовый режим — это режим высокоточных геодезических измерений. В нем одновременно участвуют, по крайней мере, два приёмника. В этом режиме получают координаты вектора базы, то есть разность координат пунктов, на которых установлены антенны спутниковых приёмников. Ошибка определения вектора базы составляет от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Измерения выполняют на несущей частоте сигнала спутника, освобождённого от кода процедурой квадратурования. Измеряемой величиной является мгновенная разность фаз сигнала спутника и сигнала генератора приёмника. Здесь уместно сказать о терминах абсолютные и относительные определения. По более или менее сложившейся терминологии под абсолютными определениями понимают определение координат пункта, то есть работу в кодовом навигационном режиме. Под относительными определениями понимают определение местоположения одного пункта относительно другого — твёрдого, исходного пункта. Таков разностный фазовый режим геодезических измерений. Относительными определениями можно также назвать дифференциальный навигационный кодовый режим, когда местоположение и вектор скорости подвижного носителя определяют относительно дифференциальной станции.

## 4.3 Допплеровский режим

Изменение частоты радиосигнала, передаваемого со спутника, вследствие его перемещения относительно приёмника относительно приёмника называют эффектом Доплера. Допплеровский режим, точнее режим интегрального доплера, является как бы побочным по отношению к фазовому. Допплеровская частота пропорциональна скорости изменения фазы, поэтому доплеровскую частоту получают попутно с измерением фазы, без каких-либо дополнительных затрат. Несмотря на «бесплатность» этот режим даёт богатую информацию о местоположении пункта. Следует напомнить, что первые спутниковые радионавигационные системы были исключительно доплеровскими.

Как сказано, режимы наблюдений неразрывно связаны друг с другом. Геодезиста более всего интересует высокоточный фазовый режим, однако приближенные значения координат пунктов, необходимые для уравнивания, он получает из кодовых и доплеровских измерений. Перемещение по объекту и поиск исходных пунктов также очень облегчает использование кодового навигационного режима.

#### **4.4 Кодовые псевдодальности**

Каждый спутник системы излучает несущие колебания со скоростью порядка 300 тыс. км/сек и длиной волны около 20 см, манипулированные по фазе кодовыми последовательностями. Здесь скажем, что все спутники GPS работают на одних и тех же несущих частотах, но каждому спутнику присущ его индивидуальный код. Спутниковый приёмник генерирует копии кода каждого спутника и идентифицирует спутники именно по форме кода. Сразу после включения приёмника он начинает захват сигналов спутников. Другими словами, приёмник выполняет корреляционную обработку сигнала спутника и генерируемых этим приёмником копий кодов, перебирая эти копии. Отличие функции корреляции от нуля означает, что спутник идентифицирован, а его сигнал — захвачен.

После захвата сигнала первого же спутника приёмник начинает скачивать кодовую информацию, содержащуюся в навигационном спутниковом сообщении. В частности, скачивается альманах. Иногда приёмник самостоятельно принимает решение перейти к скачиванию информации с другого, более «удобного», по его мнению, спутника, как правило, находящегося ближе всего к зениту пункта наблюдения. Вся процедура отражается на дисплее, оператор может это наблюдать, но не может вмешаться. После захвата сигналов достаточного количества спутников приёмник начинает определять навигационные координаты своей антенны по измеренным кодовым псевдодальностям. Для определения всех трёх координат антенны необходимо работать с четырьмя спутниками. Такой режим обозначают 3D (3 Dimensional) — трёхмерный. В навигационных приёмниках предусмотрена возможность работы в двумерном режиме 2D. Приёмник, пока он успел захватить сигнал только трёх спутников, определяет

плановые координаты пункта. После захвата сигнала четвертого спутника приёмник переходит в режим 3D.

Кодовые псевдодальности определяют из корреляционной обработки кодового сигнала спутника и копии этого сигнала, генерируемой приёмником. С/А-кодовый и Р-кодовый сигналы спутника сопровождаются временными метками, генерируемые спутниковым стандартом частоты и времени — часами спутника. Аналогично кодовые сигналы приёмника сопровождаются временными метками, генерируемыми часами приёмника. В ходе корреляционной обработки осуществляют поиск максимума коэффициента корреляции двух сигналов. В результате получают относительную временную задержку двух сигналов как временной интервал между одноимёнными временными метками. Этот временной интервал, исправленный за задержки сигнала в атмосфере и ещё за влияние ряда факторов и умноженный на скорость сигнала, даёт псевдодальность. Её вычисляют по формуле для случая однократного прохождения сигнала по дистанции. Отличие в том, что результат искажён поправкой часов приёмника относительно часов спутника. По физической сути измерение кодовых псевдодальностей выполняют, реализуя временной метод измерений с кодовой модуляцией сигнала, проходящего дистанцию однократно.

В кодовом режиме работают все спутниковые приёмники — от недорогого чисто кодового навигационного приёмника, помещающегося на ладони, до самого совершенного и дорогого геодезического фазового приёмника.

#### **4.5 Фазовые измерения**

В геодезическом приёмнике измеряют мгновенную разность фаз сигнала спутника и колебания приёмника. Напомним, что фазовые измерения являются наиболее точными. За высокую точность приходится расплачиваться усилиями, потраченными на разрешение многозначности фазовых измерений. Сигнал спутника не является гармоническим, как это необходимо для фазовых измерений. Напротив, он модулирован по фазе сложным псевдошумовым кодом. Чтобы выполнить фазовые измерения, необходимо убрать кодовую модуляцию. Так и делают, используя операцию квадратурования. Принимаемый сигнал умножают на самого себя. В результате получается сигнал,

частота которого равна удвоенной несущей частоте сигнала спутника. Это колебание усиливают и именно на нем выполняют фазовые измерения. При этом кодовую информацию не игнорируют. Её в полной мере используют для получения навигационных координат пунктов и для приёма навигационного сообщения.

Таким образом, при кодовых измерениях играет роль несинхронность показаний часов спутника и приёмника, а при фазовых измерениях играет роль несинфазность колебаний опорных генераторов спутника и приёмника. Аппаратурно, то есть путём организации каких-то дополнительных каналов связи между приёмником и спутником, эти параметры определить невозможно. Поэтому несинфазность исключают из результатов обработки путём формирования разностей фазовых измерений. В формуле фазового метода измеряемая величина разности фаз меняется со временем из-за изменения дальности до спутника. Вследствие эффекта Доплера со временем меняется значение частоты принимаемого сигнала.

#### **4.6 Интегральный доплер**

Допплеровские измерения в режиме интегрирования доплеровской частоты позволяют получать разность расстояний от определяемого пункта до двух исходных пунктов. В случае спутниковых измерений роль исходных пунктов выполняют спутники. Напомним, что в разностных наземных системах определяемый пункт получают как точку пересечения изолиний — гипербол. В случае спутниковых измерений, когда решается не плоская, а пространственная задача, речь идёт не о изолиниях, но об изоповерхностях. В случае доплеровских измерений такой поверхностью является гиперболоид; местоположение пункта определяют как точку пересечения гиперболоидов. Их должно быть как минимум три, следовательно, одновременно необходимо наблюдать три пары спутников. Геометрия наблюдений в этом случае такова, что гиперболоиды пересекаются под довольно острыми (тупыми) углами. Это гораздо хуже, чем при дальномерных измерениях, когда изоповерхности — сферы могут пересекаться под углами, близкими к  $90^\circ$ . Тем не менее, гиперболическую засечку, раз она уже есть, используют при обработке результатов в качестве полезного дополнительного материала.

## 5. Способы позиционирования

Все способы позиционирования можно разделить на:

1. Абсолютные (автономные (autonomous), дифференциальные (differential, DGPS, DGLONASS), реального времени (RT DGPS));

2. Относительные (relative, baselines):

2.1. Статические (статика (statics), ускоренная статика (fast, rapid statics), псевдостатика (pseudostatics, reoccupation));

2.2. Кинематические (непрерывная (continuous), "стой и иди" ("stop and go"), реального времени (Real Time K. — RTK)).

Способами абсолютного позиционирования определяют полные координаты пунктов. Относительным позиционированием находят приращения координат или вектор между двумя пунктами. При относительном позиционировании основные измерения выполняются фазовым методом; параллельно с этим, в целях нахождения приближенных значений координат и разрешения неоднозначности фазовых циклов, измеряют кодовые псевдодальности.

Точность способов существенно различна: от долей сантиметра до сотни метров. Наибольшую точность обеспечивают дифференциальные и особенно относительные способы, которые превосходят абсолютные методы примерно в 100 раз. В их основе лежит предположение, что измерения с двух станций до спутника искажены примерно одинаково. Чем станции ближе друг к другу, тем это утверждение точнее. При этом эфемериды спутника, передаваемые в составе навигационного сообщения, имеют ошибки метрового диапазона.

Одиночные пункты разрядной и межевой сетей определяются, как правило, лучевым методом, требующим независимого контроля в определении координат. Максимальная точность достигается применением сетевого метода, когда исходные и определяемые пункты связаны отнаблюденными векторами, представляющими собой аналог геодезической сети.

### 5.1 Автономное определение координат

Автономно координаты определяют пространственной линейной засечкой по кодовым псевдодальностям, измеренным до четырёх и большего числа спутников. Способ автономный в

том смысле, что наблюдатель определяет местонахождение независимо от измерений на других станциях. Способ чувствителен к любым искажениям. Средние квадратические ошибки (СКО) в дальностях даны в таблице 2.

Таблица 2 Ошибки в кодовых дальностях

Источник ошибки	СКО, м
КА — нестабильность частоты, уход шкалы времени	1
КА — эфемериды	1
Атмосфера — задержки в верхних и нижних слоях	4,5
АО — нестабильность частоты, уход шкалы времени, шумы, многолучёвость	1,5
SA — избирательный доступ	9,5

В целом СКО псевдодальностей составляет порядка 5 м, а в режиме SA — 10м. Как следует из таблицы наибольшую ошибку вносит атмосфера, а в ней – ионосфера. Чтобы оценить, как точно будут определены координаты, надо учесть так называемый геометрический фактор (ГФ). Геометрический фактор характеризует потери точности из-за геометрии засечки (геометрии расположения спутников). ГФ очень важная характеристика качества измерений: чем ГФ больше, тем хуже засечка. Точность автономного способа повышают продолжительными (до 10-15 минут) наблюдениями на точке и совместной обработкой всех измерений. Таблица 5 содержит приближенные оценки случайных ошибок, а систематические, обусловленные задержками сигналов в АО, исключают. Для этого псевдодальности измеряют как минимум до 4 спутников.

## 5.2 Дифференциальный способ

Ошибки в кодовых псевдодальностях большие и доходят до десяти метров. При этом, важно учитывать не только их величины, но и характер влияния. Многие из них можно устранить или, как в случае с атмосферой, существенно уменьшить. В дифференциальном способе, в отличие от автономного, псевдодальности до спутников измеряют с двух станций на Земле. Одна ставится на пункте с известными координатами. Ее называют базовой или референц-станцией (base

or reference station). Другая, подвижная (rover), размещается над определяемой точкой. На базовой станции измеренные псевдодальности сравнивают с расстояниями, вычисленными по координатам, и определяют их разности. Эти разности, так называемые дифференциальные поправки (differential corrections), передают на другую станцию для исправления измерений. Способ основан на предположении, что многие погрешности, кроме АО, одинаково влияют на измерения с каждой станции. В самом деле. Погрешности, возникающие на данном КА и из-за действия режима SA, на обеих станциях практически одни и те же.

Воздействия атмосферы на разных линиях могут несколько различаться по причинам:

- а) разные длины трасс;
- б) локальные неоднородности на трассах.

Когда расстояние между станциями менее 10 км, искажения на обеих трассах практически одинаковы.

Ошибки в эфемеридах в значительной мере исключаются. Чем меньше расстояние между станциями, тем точнее коррекции. Что же касается искажений, вносимых АО, то их можно учесть, как и в автономном позиционировании.

Поправки вводят или после измерений при обработке (постобработка), или передают их по дополнительному цифровому радиоканалу и учитывают в ходе измерений в реальном времени. Поправки быстро теряют актуальность, поэтому одновременно транслируют данные о скорости их изменения. Дифференциальные коррекции применяют и к фазовым измерениям.

Точность дифференциального позиционирования зависит от приёмников, ГФ, программного обеспечения и колеблется от первых дециметров до нескольких метров. Коррекции к фазовым дальностям повышают точность до сантиметрового уровня.

Для передачи дифференциальных поправок используются средневолновый (275-2000 кГц) и УКВ (390-1550 МГц и 3-300 ГГц) радиоканалы. Геодезические приёмники обычно имеют вход, позволяющий принимать в форматах RTCM SC-104 поправки в псевдодальности по каждому спутнику.

Существуют более 500 базовых станций, расположенных в разных странах мира, которые в своих прибрежных зонах передают дифференциальные коррекции в стандартном

международном формате RTCM SC-104. Эти станции являются собственностью разных организаций и предлагают поправки свободно или за плату. Организованы службы, которые передают коррекции через спутники связи. В ряде стран созданы сети постоянно действующих базовых станций. Например, в Швеции 21 станция обеспечивает дифференциальные измерения по всей стране. В Российской Федерации также начато создание таких станций. Навигационные дифференциальные подсистемы (ДПС) условно подразделяют на локальные, региональные и широкозонные. Локальные ДПС имеют зону действия в радиусе 50 — 200 км от контрольно-корректирующей станции (ККС). Точность определения текущего местоположения: от 2 до 4,5 м. К локальным относят также геодезические ДПС с дальностью до 50 км и с дециметрово-сантиметровой точностью. Рабочая зона региональных ДПС простирается от 400 — 500 до 2000 км. Они могут иметь одну или несколько ККС.

### 5.3 Статика

Наиболее ощутимые выгоды от внедрения идеи исключения ошибок достигнуты в способах относительных измерений. Как и в дифференциальном способе, аппаратуру устанавливают на двух станциях, например А и В. Одну из них также называют базовой или референц-станцией. Никаких коррекций не определяют, а формируют разности из наблюдений на станциях. В статике по разностям, свободным от многих искажений, вычисляют соединяющий эти станции вектор  $D$  в трёхмерном пространстве.

Базовая станция должна иметь точные координаты, чтобы по измеренным приращениям можно было бы вычислить координаты остальных пунктов геодезической сети.

Благодаря измерению приращений координат и применению фазового метода погрешности в результатах сведены к нескольким сантиметрам. Этот способ является основным в геодинамических и важнейших геодезических работах.

Способ статики является наиболее точным и трудоёмким. Точность статики зависит от продолжительности измерений. Измерения в течение 5 минут обеспечивают дециметровую точность. Обычно продолжительность наблюдений на паре станций составляет около одного часа. За это время происходит

накопление измерений, выполняемых через интервалы от 1 секунды до 5 минут.

При отслеживании минимум 5 КА для многих приёмных систем характерны следующие значения СКО ( $D$  км расстояние до базовой станции в км), приведённые в таблице 3.

Таблица 3 Средние квадратические ошибки определения координат

Положение	СКО	Расстояние до базовой станции
в плане	$(5+1*D_{км})\text{мм}$	при $D_{км} < 10$
в плане	$(5+2*D_{км})\text{мм}$	при $D_{км} > 10$
по высоте	$(10+2*D_{км})\text{мм}$	при $D_{км} > 10$

При увеличении продолжительности наблюдений с 1 до 6 часов СКО уменьшается более чем в 1,5 раза. Меньшую продолжительность наблюдений имеет способ ускоренной статики, где имеет место активный поиск чисел неоднозначности. Главная цель — как можно быстрее разрешить неоднозначность. Время этих измерений согласовано с количеством наблюдаемых спутников. Так, при 5 спутниках наблюдения длятся до 20, а при 6 — до 10 минут. Ещё менее трудоёмки наблюдения в псевдостатике. Подвижный приёмник на станции принимает сигналы примерно в течение 10 минут. Затем его переносят на другие пункты. По истечении часа приёмник возвращают на прежние пункты и продолжают сбор данных. Таким образом, непрерывность измерений на базовой станции сохраняется, а на подвижной станции они зафиксированы только в начале и в конце часового интервала.

Одновременное наблюдение спутников GPS и ГЛОНАСС позволяет достичь сантиметровой точности в 3-6 раз быстрее.

В сравнении с другими методами геодезической съёмки, статическая съёмка требует большей продолжительности сеанса наблюдений. Вместе с тем надо отметить, что метод позволяет разрешить сопутствующие измерениям проблемы, такие как пропуск цикла и многолучёвость и обеспечить высокий уровень точности.

## 5.4 Ускоренная (быстрая) статика

Быстрая статика в значительной мере то же самое, что и статика, за исключением, что сеанс измерений может проводиться за более короткий период времени и требует двухчастотных GPS-приёмников.

В общем, быстрая статическая съёмка является эффективной при длине базовой линии в пределах 10 км, времени синхронных наблюдений около 20 минут и периоде сбора данных 15 секунд.

Однако эффективная длина базовой линии и время сеанса может варьироваться в зависимости от количества отслеживаемых спутников, значения геометрического фактора ухудшения точности, наличия или отсутствия пропусков циклов, влияния многолучёвости, а также других факторов и внешних условий.

Благодаря укороченному времени сеанса, эффективность работы в режиме быстрой статической съёмки возрастает. С другой стороны объём полученных данных меньше, чем при статической съёмке, так что точность и надёжность результатов может оказаться ниже.

Для увеличения точности получаемых данных используют программное обеспечение для планирования работ, чтобы гарантировать достаточное количество спутников и хорошее значение геометрического фактора, а также другие оптимальные условия на период измерения.

## 5.5 Кинематика

Для съёмочных и других работ на малых площадях, требующих значительных передвижений на местности, предложен ряд разновидностей способов кинематического позиционирования. Измерения начинают со станций А и В, координаты которых и, следовательно, вектор между ними уже должны быть известны.

Процесс привязки подвижного приёмника к базовому вектору называют инициализацией (от англ. initiate — начать). Её цель — разрешить неоднозначность на известном базисе. Применяют несколько способов инициализации.

1. Положение вектора известно точнее 5 см. Приёмники устанавливают на его концах и наблюдают несколько минут.

2. Базовый вектор неизвестен. Его определяют статическим позиционированием.

3. Применяют способ перестановки антенн (Antenna Swapping). Антенну одного приёмника устанавливают над пунктом базовой станции, антенну другого — в стороне на 5 — 10 м. Выполняют измерения. Затем, не трогая треног, антенны меняют местами и вновь выполняют измерения. После этого антенны возвращают на исходные позиции и проводят измерения.

4. Инициализация в полете (On The Fly — OTF). Исходное положение приёмника определяют по псевдодальностям. Используя СКП псевдодальностей, оценивают объём пространства, содержащий точные значения расстояний. Перебором вариантов в этом пространстве рассчитывают числа неоднозначности. Неоднозначность разрешают за несколько секунд.

Инициализацию производят по 4 и более спутникам. Затем работающий приёмник перемещают в некоторую другую точку, определяют её координаты и т.д. Измерения ведут по одним и тем же спутникам. В случае потери сигналов спутников измерения повторяют, начиная с пункта с известными координатами. В практике позиционирования применяют сложные технологические схемы с повторными заходами на определяемые пункты и на пункты с известными координатами.

Способ непрерывной кинематики позволяет "цифровать" контуры на местности: не останавливаясь, перемещаются с приёмником по контуру и через заданные интервалы времени фиксируют его координаты. Способ "Стой-иди" предусматривает возможность остановиться на точке, выполнить более длительные измерения, а затем продолжить движение. В этих способах полевые наблюдения и обработка разделены во времени. Когда имеется цифровой радиоканал, данные с базового приёмника передают на подвижный, и применяют способ кинематики реального времени. Ориентировочно точность

кинематического позиционирования характеризуется СКО порядка десятков сантиметров:

## **5.6 Кинематика реального времени (РТК)**

Кинематическая съёмка в реальном масштабе времени (РТК) — это методика работ для получения точных координат в реальном времени, и требует специального контроллера для обработки и сохранения результатов.

При съёмке в режиме РТК так же, как и при кинематической съёмке, один приёмник служит в качестве базовой станции и осуществляет наблюдения с антенной, закреплённой на штативе или другой неподвижной подставке. Другой же приёмник работает на подвижном основании и проводит измерения с антенной на вешке и перемещаемой по определяемым точкам.

В отличие от кинематической съёмки с постобработкой, базовая станция и подвижный приёмник, связаны при помощи радиотелеметрической системы или другой системы связи. Данные коррекции по фазе несущей и другие данные, получаемые на базовой станции, передаются на подвижный приёмник через модем. Благодаря этим передаваемым данным и собственным данным, на подвижном комплекте немедленно проводится анализ данных по базовой линии, и сразу выдаются результаты вычислений.

Для проведения геодезической съёмки в режиме РТК необходима инициализация контроллера, осуществляющего разрешение неоднозначности. В некоторых приёмниках применена технология OTF (на лету), так что инициализация может осуществляться даже в процессе движения.

Обычно, OTF инициализация требует двухчастотных данных и, по крайней мере, наличия пяти спутников. Инициализация длится не более одной минуты.

## 6. Системы координат и времени, используемые в спутниковых системах

### 6.1 Системы координат

Для описания движения спутников применяют звёздную референцную систему координат, а координаты точек определяют в геодезических системах координат, начало которых связано с Землёй. Геодезические системы координат подробно изучают в дисциплинах “Геодезия” и “Высшая геодезия”. Здесь отметим, что в спутниковых системах широко применяются сферические и геоцентрические системы координат. Преобразования из одной системы координат в другую базируется на применении элементов матричной алгебры. Так в матрице вращения для получения прямоугольной ординаты через сферические координаты входит косинус долготы, а матрица масштабных преобразований является прямоугольной. Мгновенная звёздная система координат связана с положением точки весеннего равноденствия, а начало координат орбитальных систем координат совпадает с центром масс земли. Высоты в геодезических системах координат отсчитываются от поверхности принятого эллипсоида.

Геодезические системы отсчёта (Reference Systems) устанавливают параметры, определяющие фигуру, размеры, гравитационное поле Земли и закрепляют гринвичскую геоцентрическую прямоугольную систему координат.

Важнейшими параметрами Земли являются:  $fM_z$  — произведение гравитационной постоянной на массу;  $\omega$  — угловая скорость вращения;  $a$  — экваториальный радиус;  $f$  — сжатие;  $c$  — скорость света в вакууме. Включение скорости света в число параметров обусловлено тем, что современные линейные измерения основаны на определении времени распространения электромагнитных волн — скорость света устанавливает линейный масштаб геодезических построений.

Поверхность и полюса Земли подвержены геодинамическим процессам: ось суточного вращения движется в теле Земли и перемещается относительно небесных тел. Поэтому координатная ось  $Z$ , как определено рекомендациями Международной службы вращения Земли IERS (International

Earth Rotation Service), направлена на точку условного земного полюса (СТР — Conventional Terrestrial Pole), соответствующему среднему полюсу за 1900-1905 гг., исправленному на нутацию; ось X находится в плоскости меридиана Гринвича, при этом оси X и Y лежат в плоскости экватора и образуют правую систему координат. Начало координатной системы расположено в центре масс Земли. Составной частью координатных систем являются опорные геодезические сети (Reference Frame). Они фиксируют положение координатной системы в теле Земли. Различия разных общеземных координатных систем обусловлены именно особенностями построения и обработки геодезических сетей. В IERS новейшими методами космической геодезии установлена сеть станций ITRF (IERS Terrestrial Reference Frame). Сети закрепляют начало координат в центре масс Земли с точностью до 10 см, ориентируют ось Z на условный земной полюс с погрешностью в сотых долях угловой секунды и устанавливают ось X в плоскости меридиана Гринвича до тысячных долей секунды. Со временем геоцентрические координаты пунктов опорных сетей вследствие непрерывного их совершенствования и геодинамических процессов изменяются. Эти изменения могут достигать 1-2 см в год. Поэтому каталоги координат обновляют и указывают их эпоху, например, ITRF-89, ITRF-94 и т.д.

К общеземным относится установленная ранее система GRS-80 (Geodetic Reference System, 1980), параметры которой послужили основой ряда других координатных систем Европы, Австралии и Америки. В настоящее время в связи с широким применением спутниковых систем позиционирования в мире получила распространение координатная система WGS-84 (World Geodetic System, 1984).

Она реализует координаты типа ITRF. Начало координат этой системы зафиксировано в центре масс Земли с точностью около 1 м. Её физические параметры практически соответствуют параметрам системы GRS-80.

В России без интеграции с западными странами создана система ПЗ-90 (Параметры Земли 1990 г.). Система ПЗ-90 закреплена координатами трёх десятков опорных пунктов Космической геодезической сети России, при этом 7 пунктов установлены в Антарктиде. Погрешность взаимного положения пунктов при расстояниях между ними до 10 000 км менее 30 см.

Начало координат совмещено с центром масс Земли с точностью около 1 м.

Помимо международных, существуют национальные системы отсчёта, называемые в нашей стране референчными. Центры их эллипсоидов часто не совмещены с центром масс Земли. Они устанавливают квазигеоцентрические координаты. Например, в системе координат 1942 г. на референц-эллипсоиде Красовского (СК-42) центр эллипсоида смещён с центра масс Земли более, чем на 155 м.

Положения точки в пространстве, определённые по координатам указанных геоцентрических систем, могут различаться до десятка метров. Различия же координат геоцентрических и квазигеоцентрических систем значительно больше и могут превысить сотню метров.

Рассмотрим поподробнее системы координат: WGS-84, ПЗ-90, СК-95, СК-42 и их взаимосвязь.

Система координат 1942 года создана в СССР по материалам астрономо-геодезических и гравиметрических сетей нашей и других стран. Средняя квадратическая ошибка положения пунктов относительно начального (Пулково) равна единицам метров на западе и достигает 15 метров на востоке.

Совместным решением Главного управления геодезии и картографии (ГУГК) и Военно-топографического управления Генерального Штаба Министерства Обороны (ВТУ ГШ МО) от 4 июня 1942 года в качестве референц-эллипсоида при уравнивании был принят эллипсоид (в последующем получившего имя Красовского).

Однако положение центра референц-эллипсоида относительно центра масс Земли остаётся неизвестным без привлечения дополнительной информации. Например, высот геоида над общим земным эллипсоидом или координат некоторого количества пунктов, известных в референцной и общеземной геоцентрической системе координат

Во второй половине двадцатого века в СССР были созданы космическая геодезическая сеть КГС (предназначена для задания геоцентрической системы координат) и доплеровская геодезическая сеть ДГС (для распространения геоцентрической системы координат).

В результате совместного уравнивания трёх самостоятельных, но связанных между собой, геодезических

построений различных классов точности: КГС, ДГС, АГС по их состоянию на период 1991-93 годов, появилась новая система координат СК-95, которая сменила СК-42.

Объем измерительной астрономо-геодезической информации, обработанной для введения системы координат 1995 года, превышает на порядок соответствующий объем информации, использованной для установления системы координат 1942 года (СК-42).

В совместном уравнивании АГС представлена в виде пространственного построения. Высоты пунктов АГС относительно референц-эллипсоида Красовского определены как сумма их нормальных высот и высот квазигеоида, полученных из астрономо-гравиметрического нивелирования. В процессе нескольких приближений совместного уравнивания высоты квазигеоида для территории отдалённых восточных регионов дополнительно уточнялись с учётом результатов уравнивания. С целью контроля геоцентричности системы координат в совместное уравнивание включены независимо определённые геоцентрические радиус-векторы 35 пунктов КГС и ДГС, удалённых один от другого на расстояния около 1000 км, для которых высоты квазигеоида над общим земным эллипсоидом получены гравиметрическим методом, а нормальные высоты — из нивелирования.

Система координат 1995 года установлена так, что её оси параллельны осям геоцентрической системы координат. Положение начала СК-95 задано таким образом, что значения координат пункта ГГС Пулково в системах СК-95 и СК-42 совпадают.

Между единой государственной системой геодезических координат 1995 года (СК-95) и единой государственной геоцентрической системой координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90) установлена связь, определяемая параметрами взаимного перехода (элементами ориентирования).

Переход от системы геодезических координат 1995 года к геоцентрической системе координат ПЗ-90 выполняется по следующим формулам:

$$\begin{aligned} X_{\text{ПЗ-90}} &= X_{1995} + \Delta X_0, \\ Y_{\text{ПЗ-90}} &= Y_{1995} + \Delta Y_0, \\ Z_{\text{ПЗ-90}} &= Z_{1995} + \Delta Z_0, \end{aligned}$$

где :  $\Delta X_0$ ,  $\Delta Y_0$ ,  $\Delta Z_0$  — линейные элементы ориентирования, задающие положение начала системы координат 1995 года в геоцентрической системе координат ПЗ-90.

Численные значения элементов ориентирования составляют:

$$\Delta X_0 = +25,90 \text{ м}; \Delta Y_0 = -130,94 \text{ м}; \Delta Z_0 = -81,76 \text{ м}.$$

Направления координатных осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  используемой геоцентрической системы координат определены координатами пунктов КГС; начало координат этой системы установлено под условием совмещения с центром масс Земли.

Геоцентрическая система координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90) закреплена координатами 30 опорных пунктов на территории СНГ, полученных по наблюдениям спутника Гео-ИК с точностью 1-2 м. Основные параметры общеземного эллипсоида, полученные по 30 млн. спутниковых измерений на суше и на мировом океане, имеют следующие значения:

- большая полуось 6378 136 м;
- сжатие 1/298,257839303.

Мировая геодезическая система отсчёта 1984 года (WGS-84) является четвертой из серии глобальных геоцентрических систем координат, созданных Министерством обороны США, начиная с 1960 года.

Исходное определение и реализация WGS-84 удовлетворяют требованиям к картографированию территорий и геодезическим требованиям. Точность плановых координат в этой системе, равная 1-2 м, была более чем достаточной для крупномасштабного картографирования. Точность высот зависела от того, как были определены превышения. Если для этой цели использовалось нивелирование I-го класса, высоты определялись очень точно (до одного см) по отношению к локальному уровню моря. При нивелировании превышения оценивались по высотам по отношению к эллипсоиду WGS-84, и использовались высоты геоида, определённые по модели WGS геоида.

В таблице 4 представлены параметры некоторых референц-эллипсоидов.

Таблица 4 Геометрические параметры эллипсоидов

Система координат	Эллипсоид	Полуось а, м	Сжатие
СК-42	Красовского	6 378 245	1/298,3
ПЗ-90	ПЗ-90	6 378 136	1/298,257839303
WGS-84	WGS-84	6 378 137	1/298,257223563
ITRF-93	GRS-80	6 378 137	1/298,257222101

Взаимосвязь между геоцентрическими государственными геодезическими системами координат выражается семью элементами. Этими элементами являются три угловых элемента, показывающих поворот осей системы:  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$ ; три линейных элемента — координаты смещения центра системы:  $\Delta X_0$ ,  $\Delta Y_0$ ,  $\Delta Z_0$  и показатель масштаба:  $m \cdot 10^{-6}$ . В таблице 5 приведены параметры перехода основных систем координат.

Таблица 5 Параметры связи координатных систем СК-42, ПЗ-90, WGS-84, СК-95.

Параметры преобразования	Системы координат			
	СК-42 ПЗ-90	СК-42 WGS-84	ПЗ-90 WGS-84	СК-95 ПЗ-90
$\Delta X_0, \text{м}$	+ 25	+ 25	0	+25,90 м
$\Delta Y_0, \text{м}$	-141	-141	0	-130,94
$\Delta Z_0, \text{м}$	-80	-78,5	+ 1,5	-81,76
$\omega_x$ ,	0"	0"	0"	0"
$\omega_y$ ,	- 0,35"	- 0,35"	0"	0
$\omega_z$ ;	-0,66 <sup>М</sup>	-0,736"	-0,076"	0

В 1987 г. Международной ассоциацией геодезии создана подкомиссия для установления европейской системы параметров ETRS (European Terrestrial Reference System). Системе ETRS принадлежат опорные сети EUREF (European Reference Frame), объединяющие в единую систему геодезические сети стран Европы.

## 6.2 Счёт времени

Время, определяемое через период вращения Земли, называют, звёздным, а поддерживаемое с помощью атомных часов — атомным.

На спутниках эталонные генераторы высокостабильных колебаний одновременно являются хранителями времени. На борту каждого космического аппарата (КА) сигналы формируются от четырёх цезиевых атомных стандартов с относительной нестабильностью частоты за сутки около  $10^{-13}$ нс. Передаваемые радиосигналы несут метки времени. По этим меткам на Земле при помощи станций службы времени производится сверка временных шкал с государственными эталонами. По ним же синхронизируют измерения и в аппаратуре пользователей. Единицей измерений атомного времени (АТ) является атомная секунда — интервал времени, в течение которого совершается 9192631770 колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133.

Существует Международное атомное время TAI (Time Atomic International) и время спутниковой системы. Естественно их шкалы не совпадают. Время GPS (GPST) было установлено в полночь с 5 на 6 января 1980 г. и на 19 с меньше времени TAI. Атомное время течёт равномерно и постепенно расходится с так называемым Всемирным временем UT (Universal Time), соответствующим среднему времени Гринвичского меридиана, которое соотнесено с суточным вращением Земли. Различают всемирное время UT0, получаемое из астрономических наблюдений, UT1 — исправленное за смещение мгновенного полюса относительно его среднего положения и UT2 — исправленное UT1 поправками за сезонные вариации вращения Земли.

Поскольку шкалы АТ и UT между собой не согласуются, введена промежуточная шкала так называемого координированного времени UTC (Universal Time Coordinated). UTC — атомное время, которое корректируется на 1 с, когда его отклонение от UT1 превышает 0,9 с. Коррекция выполняется в последнюю секунду 31 декабря или 30 июня, или в обе даты.

## 7. Основные источники ошибок и методы их ослабления

### 7.1 Основные источники ошибок

В спутниковых навигационных системах, также как и в геодезии, систематические ошибки стараются устранить до уравнивания путём определённых методик наблюдений и использования математических моделей, описывающих характер влияния того или иного фактора на движение спутника и измеряемую величину — псевдодальность. Наибольшее влияние из числа таких факторов оказывает гравитационное поле Луны. Существенно влияние и солнечного радиоактивного давления, оцениваемого для трёхчасовых дуг на уровне 5-6 метров. Хотя большую часть времени радиосигнал проходит в вакууме, учёт ошибок атмосферы, особенно ионосферы, имеет большое значение и вызывает определённые проблемы. Широко известны модели Клобушара, где ионосферные задержки в ночное время принимаются неизменными, и Хипфилда, в которой преломляющие свойства атмосферы подразделяются на сухой и влажный компоненты. Отсюда наиболее точные работы следует выполнять ночью. Проблемным вопросом является определение фазового показателя преломления в ионизированном газе (ионосфере  $0$ , значение которого всегда меньше единицы). К систематическим ошибкам относятся и нестабильность хода часов, которая вносит наибольшую ошибку в определение координат, и многопутность (многолучёвость), обусловленная искажением сигналов вследствие их отражения от предметов, окружающих приёмник.

Случайные ошибки устраняют путём увеличения числа измерений. Избыточные измерения позволяют не только повысить точность координатных определений, но и оценить их точность. Данные процедуры проводятся в ходе уравнивания по методу наименьших квадратов, где минимизируется сумма квадратов невязок измеренных величин и, как результат, получают вероятнейшие значения искомых величин. Уравнивание необходимо проводить с учётом весов, характеризующих степень доверия результату измерения. Данное обстоятельство приобретает особую актуальность в связи с

проведением широкомасштабных спутниковых определений, где необходимо обеспечить единство линейных спутниковых и традиционных измерений, все в большей степени уступающих спутниковым. Так при создании сетей сгущения спутниковые системы производительнее тахеометрии в три раза.

## 7.2 Геометрический фактор

Уменьшение точности определения местоположения из-за геометрии наблюдений, носит название геометрического фактора (ГФ). Применительно к спутниковым наблюдениям — это коэффициент, определяющий, во сколько раз ошибка определения больше ошибки измерения. Он не может быть меньше единицы, но чем меньше, тем лучше. Величина геометрического фактора зависит от того, под какими углами пересекаются изоповерхности, то есть от геометрии наблюдений.

Существует несколько видов ГФ: по плановому положению, по высоте (вертикали). Сумма их квадратов даёт квадрат ГФ по пространственному положению. Геометрический фактор становится меньше при наблюдении более 4 спутников. Основным из показателей ГФ является пространственный. Опыт работы говорит, что при высокоточных измерениях он не должен превышать трёх единиц. При рядовых работах, например, при определении координат разрядной сети или межевых знаков, ГФ не должен превышать семи. К сожалению, пока не существует инструкций, регламентирующих предельные значения такого рода параметров, да и вообще других допусков на точность и продолжительность измерений. Сейчас все делается лишь на основе собственного опыта. Для оценки качества засечки можно пользуются эмпирической шкалой (таблица 6).

Таблица 6 Оценка качества геометрического фактора

Величина ГФ	Вербальная оценка
Менее 4	Хорошо
Порядка 5-7	Удовлетворительно
Более 7	Плохо

ГФ имеет ясный геометрический смысл. Представим пункт наблюдений, из которого направлены на четыре наблюдаемых спутника векторы единичной длины. Если соединить концы

векторов, то образуется трёхгранная пирамида. Объём этой пирамиды является величиной, обратной ГФ. Ясно, что чем больше объём пирамиды, тем меньше ГФ, тем точнее определяется местоположение приёмника. Например, хорошо, если наблюдается один спутник вблизи зенита пункта и спутники, находящиеся невысоко над горизонтом и более-менее равномерно распределённые по азимуту. На практике в области приёма антенны приёмника находится много спутников, порой до десяти. Приёмник вычисляет и выдаёт на дисплей ГФ для спутников, наиболее удачно в геометрическом смысле расположенных относительно приёмника.

### **7.3 Влияние внешней среды**

На пути от спутника до приёмного устройства на Земле радиосигнал претерпевает возмущения в ионосфере, нижних слоях атмосферы, особенно в тропосфере, а также вблизи поверхности Земли.

#### **7.3.1 Влияние ионосферы**

Ионосфера простирается примерно на высотах от 50 км до 1000 (1500) км над поверхностью Земли. В ионосфере содержатся свободные электроны и ионы. Под воздействием радиоволн заряженные частицы приходят в вынужденное колебательное движение. Путь и скорость волн изменяются. Наибольшее влияние оказывают электроны.

Для радиоволн такая среда становится диспергирующей. В ней скорость распространения зависит от длины волны. По этой причине не всякой длины волны могут проникнуть через ионосферу в космос, окна прозрачности в радиодиапазоне открыты только для волн длиннее 1см и короче 10м. В годы минимальной активности Солнца и особенно ночью окно прозрачности может распахнуться для волн большей длины. Миллиметровые волны через атмосферу не проникают.

Спутниковые системы первого поколения TRANSIT и ЦИКАДА использовали несущие волны длиной 2 и 0,75 метра. Системы второго поколения ГЛОНАСС и GPS работают на несущих волнах длиной около 0,2 метра.

Концентрация электронов зависит от угла возвышения спутника, географического местоположения, времени суток, года и активности Солнца. В средних широтах искажения могут достигать десятков метров. В среднем они равны 10 м. Для конкретного сеанса измерений ионосферные погрешности являются медленноменяющимися и сильно коррелированными. Важным является то, что искажения зависят от квадрата частоты и их величину можно регулировать выбором длины волны. Так, основная несущая волна L1 в ГЛОНАСС и GPS в десять раз короче, чем в системах первого поколения. Поэтому в современных системах выбором длин радиоволн влияние ионосферы уменьшено практически в сто раз.

В измерения, выполненные на одной частоте, вносят поправки за искажения в ионосфере. Зависимость искажений от частот позволяет исключать их измерением на двух частотах.

### 7.3.2 Влияние нижних слоёв атмосферы

В нижних слоях атмосферы скорость распространения радиоволн зависит от показателя преломления атмосферы, который зависит только от метеоусловий.

В нижних слоях атмосферы скорость не зависит от длины радиоволны и исключить её влияние измерениями на двух частотах, как это делалось в отношении ионосферы, невозможно.

Для описания изменений показателя преломления с высотой часто пользуются экспоненциальной моделью.

Влияние атмосферы наименьшее, когда спутник в зените.

Разработан ряд формул для поправок за атмосферу. В качестве исходных данных используют метеорологические параметры пункта наблюдений.

При высотах спутника над горизонтом менее  $10^\circ$  атмосферные задержки сигналов превышают 10 м. Поэтому, когда высоты спутника превышают  $15^\circ$ , а иногда и  $20^\circ$ , наблюдений не производят. Формулы поправок за влияние атмосферы дают представление о величинах искажений дальности. На деле применение измеренных на станции метеоданных, за исключением измерений в горах, не даёт преимуществ перед использованием моделей стандартной атмосферы. Наоборот, многие исследователи отмечают, что они

иногда даже ухудшают результаты; особенно снижается точность определения высот.

### 7.3.3 Многолучёвость (многопутность)

К антенне приходят радиолучи непосредственно от спутника, а также радиолучи, обогнувшие вследствие дифракции мелкие предметы, и отражённые от земной поверхности, зданий и других объектов местности. Многолучёвость ведёт к искажению дальностей. Если к приёмной антенне подошёл прямой радиолуч от спутника и отражённый от поверхности земли, то отражённый луч отличается от прямого по амплитуде и по фазе. Из-за неизбежных потерь при отражении его амплитуда уменьшается, изменяясь пропорционально коэффициенту отражения. Фаза изменяется по двум причинам: во-первых, в результате сдвига фазы при отражении и, во-вторых, из-за потери фазы за счёт разности хода лучей.

Коэффициент отражения и угол сдвига фазы зависят от диэлектрической проницаемости и удельной электрической проводимости отражающей поверхности, длины волны, угла скольжения и поляризации радиолуча.

Влияние многолучёвости на кодовые измерения более значительны; чем при фазовых. Их оценивают погрешностями в несколько метров. В геодезических антеннах устанавливают металлические экраны, отсекающие отражённые от земной поверхности лучи. В некоторых приёмниках встроены программы подавления многолучёвости.

## 8. Обработка и уравнивание спутниковых определений

### 8.1 Общая последовательность при обработке спутниковых измерений

На этом этапе работ разрешают многозначность фазовых измерений и вычисляют вектор базы в WGS-84. Другими словами, вычисляют компоненты вектора, соединяющего пункты, на которых установлены приёмники.

Обработка спутниковых данных проводится в последовательности, характерной для топографо-геодезических работ: первичная, предварительная, окончательная. Непосредственно в процессе спутниковых определений выполняется первичная обработка, а данные о спутниках для вычисляемой линии формируются на этапе окончательной обработки. Необходимо знать, что величины ионосферных поправок содержатся в файле навигационного сообщения.

При правильной организации работы на объекте наблюдатели (операторы) выполняют первичную обработку данных сразу вслед за выполнением измерений. Оператор, прибыв после наблюдений на базу (в камеральное помещение, в офис) и поставив на зарядку аккумуляторы, приступает к постобработке. Задача состоит в том, чтобы выяснить, успешными ли были наблюдения прошедшего дня и насколько полученные результаты согласуются с тем, что было сделано ранее. При выявлении проблем вносят корректировки в планы на следующий день.

Зарегистрированные приёмниками данные (необработанные данные, сырые данные, raw data) скачивают в офисный компьютер. Программное обеспечение таково, что оно может контролировать действия оператора и корректность вводимой информации. Например, приёмник не позволит выключить себя, если оператор забыл ввести высоту антенны. Вместе с тем, аппаратура не может контролировать все действия оператора. Центрирование антенны над пунктом — процедура бесконтрольная. При измерении высоты антенны над пунктом и при введении её значения в память приёмника оператор может допустить ошибку, а программное обеспечение не сможет эту ошибку выявить. Выполняя постобработку, оператор выявляет ошибки в исходной информации: в высоте антенны, в имени

файла, в идентификаторе пункта. В обязательном порядке при вычислении верных значений базисных линий осуществляется контроль в показаниях часов, который не должен превышать одной микросекунды.

Обработав очередную базу, оператор выясняет, как результат согласуется с исходными данными и с результатами, полученными им ранее. Речь идёт о том, как согласуются полученные разности координат с каталожными разностями координат исходных пунктов и каковы координатные невязки замкнутых фигур. Как сказано ранее, согласование результатов спутниковых измерений с созданными ранее сетями создаёт проблемы. Что касается невязок замкнутых фигур, то векторная сумма баз должна быть равна нулю. Существенное отклонение от этого условия свидетельствует о низкой точности или о грубых ошибках в результатах. Не существует инструкции, оговаривающей допуски, поэтому данный вопрос решают, исходя из личного опыта. Основное время при постобработке занимает разрешение неоднозначности.

## **8.2 Неоднозначность (многозначность) разности фазовых измерений**

Существуют две проблемы: разрешение неоднозначности: учёт начальных фаз колебаний генераторов спутника и приёмника. Приёмник не только измеряет разность фаз, но и непрерывно регистрирует результат этого измерения. Такая процедура называется счётом целых фазовых циклов, которая применяется в геометрическом методе разрешения неоднозначности. В наземных системах счёт идёт достаточно медленно: единицы циклов в секунду или в минуту. В спутниковой системе приёмник считает тысячи циклов в секунду.

Существуют сбои в счёте и это — отдельная проблема. В целом многозначность разрешают способом, во многом аналогичном способу радиолога и способу фазового зонда, используемым в наземных системах. Отличие в том, что расстояние до спутника в начальный момент измерений в спутниковой системе с достаточной точностью знать нельзя. Сюда примыкают проблемы, связанные с неопределённостью начальных фаз. Необходимо учитывать, что при наземных измерениях наблюдатель имеет достаточно времени для

разрешения многозначности, а при спутниковых измерениях многозначность необходимо разрешить «мгновенно», быстрое перемещение спутника не даёт возможности повтора. Проблемы этим не ограничиваются. Напомним, что GPS создавалась как навигационная кодовая система, изначально не предназначенная для фазовых измерений. В ней нет стройной сетки частот, специально предназначенной для разрешения многозначности. Все сказанное приводит к тому, что разрешение многозначности — самая большая проблема в спутниковых измерениях. Решить эту проблему удаётся, формируя разности результатов фазовых измерений. В геодезических измерениях участвуют несколько приёмников, как минимум два. Каждый приёмник одновременно принимает и регистрирует сигнал нескольких спутников. Рассмотрим два элементарных случая: один приёмник одновременно принимает и регистрирует сигнал двух спутников; два приёмника одновременно принимают и регистрируют сигнал одного спутника (рис. 3, 4).

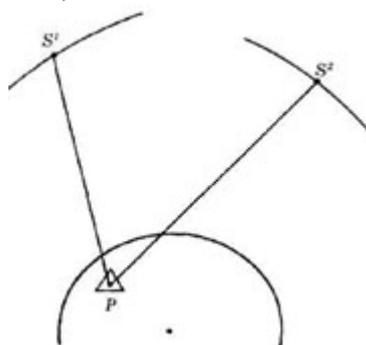


Рис. 3 Разность «спутник-спутник»

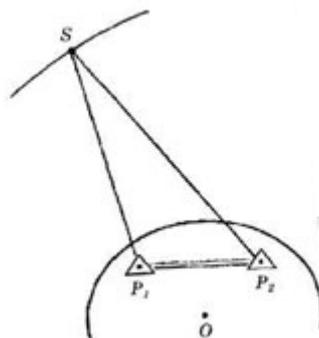


Рис. 4 Разность «приёмник-приёмник»

На этапе постобработки программное обеспечение формирует разности фазовых измерений. Другими словами, в первом случае формируют разность фаз сигналов от двух спутников на одном приёмнике. Во втором случае формируют разность фаз сигналов от одного спутника на двух приёмниках.

Это называют первой или одинарной разностью «спутник-спутник» и «приёмник-приёмник».

Если сформировать разность для двух вариантов спутник-спутник или приёмник-приёмник, то в разности исключается начальная фаза колебаний спутника или приёмника. Чтобы исключить и ту и другую начальные фазы, необходимо сформировать вторую или двойную разность. Двойную разность получают, выбрав из результатов данные, полученные из одновременных наблюдений двух спутников двумя приёмниками. Этот вариант приведён на рис. 5. Другими словами: вторая разность — это разность двух первых разностей. При формировании разностей фазовых измерений система перестаёт быть дальномерной и превращается в разностную. Изоповерхности становятся гиперблоидами и геометрический фактор (угол засечки), как правило, ухудшается. Первая разность содержит разность целых уложений длин волн в расстояниях до спутника. Вторая разность содержит разность целых уложений длин волн, содержащихся в первых разностях.

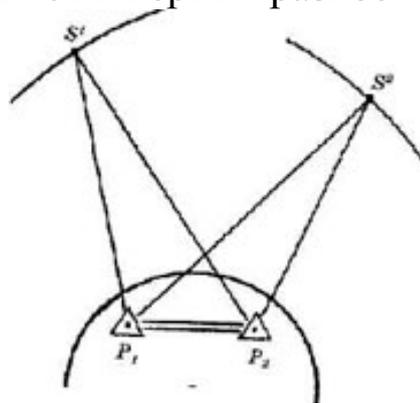


Рис. 5 Вторые разности

Вторая разность имеет замечательную особенность. Поскольку во второй разности исключаются начальные фазы колебаний спутника и приёмника, то теоретически число уложений длин волн во второй разности действительно является целым. Поэтому есть право при обработке округлять число уложений длин волн до целого числа. Так и делают. Более того — вторые разности — это основа обработки в том смысле, что именно на основе вторых разностей получают окончательные результаты. Самой большой проблемой при этой обработке является разрешение многозначности. Необходимо определить набор целых чисел  $N_0$  в начальный момент наблюдений для каждой пары пунктов и для каждой пары спутников,

наблюдаемых с этих пунктов. Проблема аналогична задаче радиолога или фазового зонда, но решается она совершенно по-другому. В третьих разностях проблема многозначности не решена, но снята.

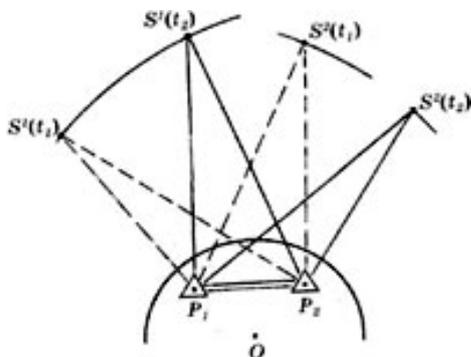


Рис. 6 Третьи разности

Третья разность — это разность двух вторых разностей. Геометрия иллюстрирована рис. 6. В начальный момент времени формируют вторую разность и продолжают непрерывную обработку до второго момента. В разности исключается параметр многозначности. Это и означает, что проблема многозначности снимается. Расплачиваться за это приходится тем, что ухудшается геометрия наблюдений, то есть изоповерхности пересекаются под углами, далёкими от прямых углов. В результате ошибка определения вектора базы лежит в пределах 1-3 м. Такая точность неприемлема для геодезии, тем не менее, третьи разности в процедуре обработки результатов используют.

В геодезии обработку результатов измерений выполняют по способу наименьших квадратов, основанному на составлении и решении системы линейных уравнений. В GPS, также как и в большинстве других геодезических методов, уравнения, связывающие измеряемые величины и определяемые параметры, линейными не являются. На этот случай предусмотрена процедура линеаризации уравнений. Функцию измеренной величины от определяемых параметров раскладывают в ряд Тейлора и ограничиваются членами с первыми частными производными. При этом необходимо знать приближенные значения определяемых параметров и предвычисленное по этим значениям приближенное значение измеряемой величины. Приближенные значения координат вектора базы, используемые впоследствии при окончательном решении по вторым разностям, получают из решения по третьим разностям.

Существует несколько подходов к составлению пакета программ для обработки результатов измерений. Зачастую алгоритм обработки или его детали пользователю недоступны. Тем не менее, общий подход к обработке состоит в следующем. Программное обеспечение формирует первые разности фазовых измерений, из них формирует вторые разности, а затем — третьи разности. Первое, самое приближенное решение вектора базы получают из кодовых и доплеровских измерений. Уточняют его из решения по третьим разностям и уточнённый результат используют в качестве приближенного для решения по вторым разностям, который и является основным при высокоточных геодезических определениях. Как было сказано, наиболее трудным этапом при обработке по вторым разностям является разрешение многозначности.

## **9. Использование спутниковых технологий для построения геодезических сетей**

Геодезические сети, создаваемые спутниковыми методами, принято в мировой практике подразделять на глобальные, континентальные, национальные, региональные и локальные геодезические сети. Применительно к территории России предусмотрено построение на основе спутниковой технологии фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС), представляющей собой высшее звено в структуре координатного обеспечения территории нашей страны. Последующими звеньями в государственной опорной геодезической сети по своему рангу являются высокоточная геодезическая сеть (ВГС) и спутниковая геодезическая сеть 1 класса (СГС-1). Вместе с тем достаточно интенсивно развиваются локальные геодезические сети, базирующиеся на совместном использовании спутниковых и традиционных наземных методов.

### **9.1 Построение глобальной геодезической сети**

Характерные для современных спутниковых систем позиционирования особенности, проявляющиеся в возможности точного и оперативного определения координат пунктов, расположенных в пределах всего земного шара, были использованы в последние десятилетия для создания глобальной опорной геодезической сети. Систематические спутниковые наблюдения, проводимые на пунктах глобальной сети, позволяют периодически уточнять координаты этих пунктов, вычислять точные значения эфемерид наблюдаемых спутников, входящих в рассматриваемые системы позиционирования. Кроме того, они позволяют изучать геодинамические явления, происходящие в земной коре, в пределах всего земного шара, и в таких составных частях атмосферы, как ионосфера и тропосфера. Так по данным Потсдамского центра анализа, полученным с использованием GPS, смещение пунктов мировой сети за пятилетие составило 0,03 м. Точность определения координат пунктов, входящих в глобальную опорную геодезическую сеть, на начальной стадии характеризовалась средними квадратическими ошибками на уровне около 15 мм в плане и около 35 мм по высоте. По мере

совершенствования методики наблюдений и обработки, отмеченные ошибки были уменьшены до 5 мм в плане и 8 мм по высоте.

## **9.2 Построение континентальных геодезических сетей**

Стремление к созданию на отдельных континентах геодезической координатной основы повышенной точности с учётом характерных для конкретных континентов факторов, оказывающих влияние на изменения с течением времени значений определяемых координат, обусловило целесообразность построения континентальных опорных геодезических сетей. Одним из примеров такой сети может служить Европейская геодезическая опорная сеть. Создание такой сети на базе использования спутниковых технологий, включающей в себя около 90 пунктов, было начато в конце 80-х годов. При её построении с участием 16 европейских стран наряду с использованием GPS были предусмотрены измерения с помощью спутниковых лазерных дальномерных систем и радиоинтерферометров со сверхдлинной базой. Полученная при этом точность, базирующаяся на формализованном учёте случайных ошибок измерений, оказалась на уровне менее 1 см по всем трём координатным осям. В то же время из сравнения с лазерными и интерференционными измерениями реальная точность оценивается на уровне нескольких сантиметров.

## **9.3 Построение государственной геодезической сети России на основе спутниковых технологий**

Наряду с глобальной и континентальными геодезическими сетями, создаваемыми на основе применения спутниковых методов, аналогичные подходы используются и при построении национальных опорных геодезических сетей, охватывающих как территории отдельных стран, так и их составных частей. К числу таких стран относится и Россия, на территории которой в соответствии с Концепцией перехода топографо-геодезического производства на автономные методы спутниковых координатных определений создаётся новая высокоэффективная государственная геодезическая сеть, базирующаяся на применении методов спутниковой геодезии. Концепция перехода

топографо-геодезического производства на автономные методы спутниковых координатных определений разработана с целью обеспечить наиболее рациональное и эффективное в существующих условиях практическое определение координат и высот пунктов земной поверхности на всей территории страны с точностями, требуемыми для решения возможно более широкого круга научно-технических и производственных задач. В соответствии с Концепцией указанная цель может быть достигнута, если на территории страны (или группы заинтересованных стран) будет существовать единая по точности сеть надёжно закреплённых на местности геодезических пунктов со средними расстояниями между ними порядка 30 — 35 км (средняя плотность 1 пункт на 1000 км. кв.). В этом случае любой заинтересованный потребитель, располагающий как минимум двумя двухчастотными спутниковыми приёмниками, может выполнять интересующие его координатные определения дифференциальным методом относительно пунктов указанной сети. По крайней мере, один из этих пунктов всегда будет находиться на расстоянии не далее 20 - 25 км от места определений. Именно до таких расстояний полностью реализуется инструментальная точность современных спутниковых приёмников при продолжительности наблюдений около часа. В менее обжитых районах плотность опорной сети может быть уменьшена до 1 пункта на 2000 км. кв. Отрицательное влияние на точность увеличивающихся расстояний между опорными пунктами и пунктами, определяемыми потребителями, можно компенсировать увеличением времени наблюдений. В малообжитых и труднодоступных районах допускается увеличение расстояний между пунктами опорной сети до 100 км. В этом случае для привязки развиваемых потребителем локальных сетей к единой государственной системе координат с требуемой точностью, возможно увеличение продолжительности наблюдений до нескольких часов и даже суток. Взаимное положение опорных пунктов должно быть известно со средними квадратическими ошибками не более 1,0-1,5 см. Такая опорная сеть в настоящее время может быть создана существующей спутниковой аппаратурой при следующих условиях:

1) создаваемая сеть будет опираться на построения более высокого уровня, обеспечивающие исключение деформаций регионального и глобального характера;

2) создаваемая сеть будет отнесена к единой для всей страны геоцентрической системе координат.

Концепция послужила базовым документом при разработке «Основных положений о государственной геодезической сети» и «Инструкции по построению государственной геодезической спутниковой сети», в соответствии с которыми предусмотрено создание на территории России и других заинтересованных государств трёх уровней или классов государственной геодезической спутниковой сети:

1) фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС);

2) высокоточная геодезическая сеть (ВГС);

3) спутниковая геодезическая сеть 1 класса (СГС-1).

Постоянно действующие пункты ФАГС: Билибино, Зеленчук, Екатеринбург, Иркутск, Магадан, Менделеево, Нижний Новгород, Новосибирск, Норильск, Петропавловск-Камчатский, Пулково, Светлое, Тикси, Хабаровск, Москва, Южно-Сахалинск, Якутск.

Периодически определяемые пункты ФАГС: Анадырь, Архангельск, Астрахань, Аян, Владивосток, Калининград, Котлас, Мурманск, Ростов-на-Дону, Самара, Тура, Чита, Чокурдах.

#### **9.4 Создание и реконструкция городских геодезических сетей с использованием спутниковых технологий**

Спутниковые технологии широко используются в различных странах мира при построении и реконструкции региональных и локальных геодезических сетей. В последние годы спутниковые технологии стали применяться в широких масштабах при землеустроительных работах, при создании и эксплуатации крупных инженерных сооружений (атомные электростанции, гидротехнические сооружения) и при решении других задач прикладной геодезии, создание и реконструкция локальных опорных геодезических сетей в крупных городах. Помимо государственной геодезической сети (ГГС) Основными положениями о государственной геодезической сети предусмотрено создание геодезических сетей специального

назначения. Геодезические сети специального назначения создаются в тех случаях, когда дальнейшее сгущение пунктов ГГС экономически нецелесообразно или когда требуется особая высокая точность геодезической сети. Геодезические сети специального назначения создаются в единых государственных системах координат или в местных системах координат, устанавливаемых для отдельных участков местности. Под местной системой координат понимается система координат с началом, отличным от начала координат действующей государственной системы геодезических координат. Такая система устанавливается на отдельные участки местности площадью до 5000 км. кв., либо в пределах территории одного административного района или подобной ему административно-территориальной единицы субъекта Российской Федерации, а также в пределах территории города. При создании и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых приёмников необходимо учитывать следующие особенности:

наличие практически во всех городах локальной системы координат, созданной с целью уменьшения расхождений при измерениях на физической поверхности и на крупномасштабных планах;

необходимость сохранения городской системы координат при любых реконструкциях, переуравниваниях и других работах с целью сохранения большого количества точных (5-10 см) топографических и кадастровых планов;

наличие в крупных городах специальных геодезических сетей, предназначенных для строительства метро и редуцированных, как правило, на свою поверхность относимости;

наличие в ряде городов специальных геодинимических сетей, точность которых отличается от точности городских геодезических сетей.

Специфика построения геодезических сетей в городах обусловлена, прежде всего, многопрофильной деятельностью различных городских организаций, у которых возникает необходимость в получении разнообразной геодезической информации и которые предъявляют различные требования к плотности и местам расположения пунктов сети, а также к точности координатных определений. Фактическая точность городской геодезической сети в большинстве городов

соответствует требованиям для выполнения стандартных топографо-геодезических работ в городах (топографические съёмки масштабов 1:500 и мельче, вынос в натуру проектов и др.). Наибольшие отклонения, выявленные при очередном цикле реконструкции и переуравнивания, составляют, как правило, не более 10 см. Гораздо худшие результаты имеют участки городской сети в присоединённых к городу территориях, где ранее была своя местная система координат либо геодезическая основа на этих территориях создавалась методом наращивания без совместного уравнивания геодезической сети на всей территории города. На таких участках отклонения достигают 20 см и более. Противоречия между фактическим состоянием и требованиями по точности и однородности городской геодезической сети решаются, как правило, при очередном цикле реконструкции и переуравнивания, включающего в себя следующие этапы:

- сбор сведений о геодезических работах, выполненных на территории города;

- анализ местной системы координат и топографической съёмки, базирующейся на различных участках геодезической сети;

- проектирование и выполнение работ по созданию и восстановлению участков сети в местах её утраты и в перспективных районах;

- совместное переуравнивание городской сети с использованием старых и новых данных;

- анализ расхождения координат совмещённых пунктов, подбор ключа местной системы координат, минимизирующего эти расхождения;

- составление новых каталогов координат городской геодезической сети и замена ими старых;

- выдача рекомендаций по дальнейшему использованию материалов топографической съёмки в зависимости от полученных расхождений.

Пункты новой сети должны быть совмещены с пунктами существующей высотной сети, определённой геометрическим нивелированием не ниже второго класса. Для математической обработки спутниковых измерений на требуемом уровне точности один пункт (желательно несколько) должен быть привязан к международной спутниковой сети с целью

определения его абсолютных координат в системе WGS-84 с дециметровой точностью. Уравнивание новой сети и преобразование координат её пунктов из WGS-84 в требуемые системы координат, например в СК-42, необходимо в пространственной системе координат. Такое уравнивание и преобразование координат обеспечит определение в каждом пункте новой сети высот квазигеоида с точностью, которой обладают спутниковые измерения. Каталог высот квазигеоида и карта, построенная на его основе, дадут возможность определить нормальные высоты других определяемых пунктов без выполнения гравиметрической съёмки и тем самым снять известную высотную проблему при сгущении новой сети и её дальнейшей эксплуатации заинтересованными организациями.

## 10. Производство спутниковых наблюдений

### 10.1 Выполнение съёмки

Рассмотрим действия, выполнение которых необходимо перед выполнением наблюдений.

#### 10.1.1 Установка антенны

Во избежание многопутности (эффектов отражения) рекомендуется парковать автомобиль как можно дальше (не ближе 10 метров) от антенны.

Антенна монтируется на опорах, штативах с треггерами или на протяжённом (или призмённом) столбе, оборудованном стабилизирующими стойками. Такой протяжённый столб со стабилизирующими стойками называется биподом, и его использование может значительно ускорить проведение съёмки. При выполнении кинематических или псевдокинематических съёмок достаточно бипода, так что антенна поддерживается на постоянной высоте и уменьшается время на установку.

Неправильно измеренная высота антенны является единственной наибольшей проблемой при проведении съёмки, и это приводит к большому числу ошибок. Наилучший способ избежать этой проблемы (при использовании штативов) заключается в измерении высоты антенны дважды — в начале и в конце съёмки.

#### 10.1.2 Инициализация приёмника

При статической съёмке инициализация некоторых приёмников требует предварительного программирования или ввода параметров прямо на пункте. Некоторыми из таких параметров являются: выбор скорости накопления данных, ширина полосы, минимальное число отслеживаемых спутников, начальное и конечное время сессии, предельный угол высоты спутника (обычно 15 градусов), указание имени файла для записи данных. Большинство современных приёмников имеет несколько каналов и наблюдает все видимые спутники. Потому может потребоваться предварительное исключение номеров некоторых спутников из наблюдений. Обычно данные альманаха (с

эфемеридами спутника), полученные после первого включения, сохраняются, иначе должны быть указаны данные хотя бы для одного спутника.

В кинематическом режиме до начала съёмки в процессе инициализации выполняется определение фазовых неоднозначностей, с помощью которых фаза, наблюдения которой завершено, преобразуется в дальность. Это определение выполняется тремя различными способами. В первом способе можно начать с короткой известной базы, что позволит разрешить неоднозначность после пяти минут наблюдений. Другой метод заключается в выполнении статической съёмки для определения вектора между фиксированным пунктом и неизвестным начальным пунктом кинематической съёмки. Третий метод заключается в выполнении обмена антеннами между фиксированным пунктом и начальным пунктом. С другой стороны, если бы фиксированные пункты были на местности данного проекта, начальный пункт можно было бы разместить вблизи (например, в 10 метрах) фиксированного пункта и можно было бы применить метод обмена антенн.

### 10.1.3 Выполнение наблюдений

Обсудим возможные необходимые действия наблюдателя — синхронизация времени наблюдений на разных пунктах, измерение метеопараметров, контроль процесса измерений, повторение процесса инициализации наблюдений.

При проведении геодезических съёмок следует на каждом пункте в течение сессии собирать очень точные метеоданные (показания сухого и влажного термометров, давление атмосферы), причём на возможно наибольшей высоте над землёй. В экстремальных случаях можно использовать радиометры для измерения содержания водяного пара в атмосфере. Учёт наблюденных метеоданных не улучшает результаты для коротких баз по сравнению с использованием стандартных моделей тропосферной рефракции. Но собранные метеоданные можно будет использовать в будущих исследованиях.

В приложениях кинематической съёмки после инициализации фиксированный приёмник и перевозимый приёмник помещаются в исходный и неизвестный начальный пункты на несколько минут наблюдений. Затем перевозимый

приёмник отправляют на пункты, координаты которых необходимо определить. Поскольку четыре (или более) спутников (с низким PDOP) непрерывно наблюдаются обоими приёмниками, векторы от исходного пункта можно измерить с высокой точностью. Если (в случае четырёх спутников) сигнал со спутника потерян или произошёл скачок фазы, необходимо повторить инициализацию. Такое может произойти из-за затенения (например, препятствием) спутникового сигнала зданиями, деревьями, мостами и т.д. В этом случае, перевозимый приёмник нужно вернуть на пункт с известными координатами для реинициализации. На практике пункты съёмки необходимо наблюдать дважды, чтобы можно было сделать проверку результатов определения. Также в съёмку следует включать несколько пунктов с известными координатами, если это возможно, для обеспечения контроля определений.

Туман или дождь не влияют на передачу данных. Однако удары молнии могут разрушить инструмент. Рекомендуется выключить приёмники и отсоединить антенны во время грозы.

#### 10.1.4 Завершение сессии наблюдений

Последняя рекомендация заключается в подготовке описания пункта на местности по завершении сессии. Это описание должно содержать, по меньшей мере, следующую информацию:

1. название пункта;
2. идентификатор станции, используемый в названии файла;
3. данные о наблюдателе;
4. серийные номера приёмника и антенны;
5. высота антенны;
6. моменты старта и стопа наблюдений;
7. наблюдаемые спутники;
8. приближенное положение пункта;
9. имевшие место проблемы.

В дополнение к этому, полезно сделать фотоснимок марки и нарисовать схему окрестностей марки (или проверить имеющуюся схему).

### 10.1.5 Привязка к исходному пункту

Привязку создаваемой сети к исходному пункту наиболее просто выполнить, если около него нет препятствий, так что антенну можно поместить прямо на марку. Во многих случаях, однако, это невозможно, если контрольный монумент располагается на местности со многими препятствиями или если имеются проблемы с многопутностью. В этих случаях привязку к исходному пункту осуществляют известными способами классической геодезии.

## 10.2 Обработка данных

### 10.2.1 Передача данных наблюдений

Современные приёмники сохраняют наблюдения во внутренней памяти, тогда как более старые приёмники выводят их на флоппи-диск или на ленту. Первый шаг обработки заключается в переписывании данных из приёмника на жёсткий диск компьютера. Переписывание выполняется с помощью программ, поставленных производителем. Файлы наблюдений для данной сессии содержат фазы и другие наблюдаемые величины, бортовые эфемериды и данные для станции — идентификатор станции, высоту антенны и, возможно, приближенное положение пункта.

Главной задачей при передаче файлов является обеспечение правильности наименования файлов и значения высоты антенны, чего можно достичь применением формы резюме (табл. 7), содержащей назначение сессиям станций, измеренных высот антенн, стартовых (начальных) и стоповых (конечных) моментов сессий.

Таблица 7 Контрольное резюме

Сессия	Приёмник						Время UT	
	А		Б		В		Старт	Стоп
	Пункт	Высота	Пункт	Высота	Пункт	Высота		
a	ГКП1	1,234	ГКП2	1,574	ГКП3	1,342	01:00	02:00
b	ГКП1	1,234	001	1,782	002	1,543	02:29	03:30
c	003	1,344	010	1,328	002	1,452	04:01	05:00
d	011	1,324	010	1,563	012	1,437	05:31	06:30
e	001	1,564	013	1,453	012	1,455	06:59	08:00

Иногда наблюдатель вводит неправильный идентификатор для станции. Этот идентификатор следует немедленно исправить до начала обработки. Документом, используемым для контроля, должно быть описание положения станции, из которого извлекается информация для таблицы 7. Из этих данных известно, что на пункте 1 с 02:29 по 03:30 UT (Всемирного времени) находился приёмник Б. Если бы название этого пункта было искажено, можно было бы посмотреть на стартовое и стоповое времена в файле данных, обратив также внимание на навигационные долготу и широту. Эти параметры, содержащиеся в каждом файле данных, устанавливаются в этом файле соответствие между данным времени и положением, которые должны соответствовать значениям из резюме в таблице 7. Используя этот способ, можно идентифицировать и переименовать неправильно названные файлы.

Большинство программ обработки автоматически извлекает высоту антенны из файла данных для пункта, хранимых в приёмнике. После исправления названий различных файлов следует проверить и исправить все высоты антенн. В этом опять может помочь таблица 7. Данную таблицу полезно включить и в отчёт о проекте.

После исправления всех файлов необходимо сделать по меньшей мере по две копии файлов с данными (например, на дискетах), причём одну копию лучше хранить в другом месте.

### 10.2.2 Обработка данных

В случае удалённых и обширных съёмок следует хотя бы раз в день осуществлять проверку данных. Этот контроль может также включать обнаружение скачков фазы и их восстановление. Если процесс не выполняется приёмником во время наблюдений, то обычно реализуется программой предварительной обработки данных.

В настоящее время обработка наблюдений выполняется обычно в пакетном режиме. Все пакетные файлы создаются на основе трёх- или четырёх- символьных идентификаторов пунктов, так что первой задачей при обработке данных является обеспечение правильного наименования всех пунктов. Полезно вначале давать номера исходным пунктам, а затем последовательно присвоить номера определяемым пунктам.

Такая нумерация должна выполняться в процессе планирования и рекогносцировки, чтобы облегчить ведение записей.

Современные программы обработки используют пакетный режим для вычисления векторов баз. Обычно наблюдения данного дня записываются в подкаталог на жёстком диске. Программа обработки обычно находится в другом каталоге. Есть два типа программ обработки:

1. обрабатывающие вектор за вектором;
2. дающие одновременно многобазовое решение.

Повекторная обработка наиболее распространена, и её следует использовать до многобазовой обработки, поскольку в некоторых случаях один из пунктов может иметь грубую ошибку, и при совместной обработке всех векторов эта ошибка распределится по векторам и будет завуалирована. Повекторная обработка обеспечивает лучший контроль ошибочных баз или пунктов. Ошибочный пункт легче изолировать, заметив, что статистика (например, стандартная ошибка) для векторов, исходящих из этого пункта, хуже, чем статистика для других векторов. Кроме того, можно просуммировать векторы для замкнутой фигуры, и, если сумма не является малым числом, то это указание на то, что какой-то пункт в сессии плохой.

Обработка индивидуального вектора состоит из следующих шагов:

1. Вычисление наилучших (дающих меньшие невязки наблюдений) положений пунктов по кодовым псевдодальностям.
2. Образование фазовых данных по фазовым данным, записанным приёмником, и спутниковым орбитальным данным. Могут быть исправлены временные метки.
3. Создание разностей фаз и вычисление их корреляций.
4. Вычисление оценки вектора из обработки тройных разностей фаз.
5. Вычисление оценки вектора и вещественных значений неоднозначностей фаз из обработки двойных разностей фаз.
6. Приведение вещественных значений неоднозначностей к целым значениям и принятие решения о продолжении вычислений с этими целыми значениями.
7. Вычисление оценки вектора из обработки двойных разностей фаз с использованием наилучших оценок целых значений неоднозначностей фаз (наилучшее решение).

8. Вычисление нескольких других оценок вектора, используя целые значения неоднозначностей фаз, несколько (например, на 1) отличающихся от значений, полученных на шаге 6.

9. Вычисление отношения среднеквадратической ошибки (СКО) наблюдаемых значений фазы от смоделированных (с помощью вычисленных значений векторов и выбранных на шаге 6 целых неоднозначностей фаз) к СКО для наилучшего решения. Это отношение должно быть, по меньшей мере, в пределах от двух до трёх, что указало бы на то, что выбранное решение, по меньшей мере в два-три раза, лучше наилучшего следующего решения.

### **10.3 Контроль качества определения вектора базы и построения сети**

#### 10.3.1 Однобазовые векторы

Для оценки качества съёмки используется много различных показателей. При первом анализе просматривают статистику индивидуальных векторов. Для определения ошибочного вектора, сравнивают статистики для хорошей базы со статистиками для плохой базы.

В таблице 16 приведены данные для трёх баз, собранные с помощью одночастотных приёмников. Первая и третья базы наблюдались по 30 минут, вторая — 60 минут. Для всех трёх баз почти все время наблюдалось пять спутников. Интервал сбора данных составлял 20 сек.

Результаты были извлечены из выводных файлов (файлов решений). Первая колонка в таблице 16 указывает тип решения:

- TRP — полученного из обработки тройных разностей,
- FLT — полученного из обработки двойных разностей, причём неоднозначности фаз определяются как вещественные числа,
- FIX — полученного из обработки двойных разностей, причём неоднозначности фаз зафиксированы на целочисленных значениях.

Следующие три колонки представляют компоненты вектора базы (то есть разностями геоцентрических декартовых координат). В колонках с пятой по седьмую находятся стандартные ошибки для разностей координат, представленных в

колонках со второй по четвертую. В восьмой колонке записано значение отношения выбранного фиксированного решения к следующему наилучшему решению. Последняя колонка представляет среднеквадратическую ошибку (СКО) в метрах.

Таблица 8 Статистика баз

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	DX, [м]	DY, [м]	DZ, [м]	SDX, [м]	SDY, [м]	SDZ, [м]	Отн., [м]	СКО, [м]
TRP	-303.457	135.317	158.292	1.419	1.011	0.520		0.003
FLT	-303.431	135.314	158.284	0.068	0.062	0.027		0.003
FIX	-303.437	135.327	158.263	0.003	0.006	0.004	30.1	0.004
TRP	2890.453	-594.500	-477.233	0.743	0.366	0.356		0.002
FLT	2890.383	-594.520	-477.221	0.028	0.017	0.012		0.004
FIX	2890.382	-594.526	-477.215	0.002	0.007	0.002	233.1	0.004
TRP	-191.888	-343.451	-546.721	6.686	0.699	1.488		0.004
FLT	-192.221	-343.366	-546.721	0.538	0.069	0.102		0.007
FIX	-192.217	-343.192	-546.689	0.027	0.107	0.051	1.7	0.052

Статистика баз в таблице указывает на хорошие базы и на базы, с которыми есть проблемы. Наиболее важным показателем качества решения является отношение. Его значение является показателем как хороших, так и плохих баз, и оно должно бы быть больше трёх, особенно для коротких баз длиной до 5 км. Если это значение велико, как для второй базы в таблице, база измерена точно. В этом случае разность решений FIX и FLT мала, и изменение СКО для решений FIX и FLT допустимо. Вторая база является примером хорошей базы с "нормальной" статистикой. Третья база является плохой, что видно по нескольким признакам. Во-первых, отношение равно 1.7, тогда как для подобной (по длине вектора и по длительности сеанса наблюдений) первой базы оно равно 30.1. Для третьей базы стандартные ошибки компонент вектора существенно больше, хотя число наблюдений на этой базе в действительности было больше. Разность решений FIX и FLT также велика, достигая 0.174 м для компоненты DY. При обработке этой базы программе было указано вычислить решение FIX, даже если значение "отношения" не указывало на пригодность решения FIX. Это "вынужденное" вычисление решения FIX часто даёт приемлемые решения, но для коротких баз с коротким интервалом наблюдений оно даёт ошибочные результаты. Другим

показателем того, что наблюдения не соответствуют решению, является большой скачок значения СКО — с 0.007 до 0.052 — увеличение в семь раз. Сравните это поведение с поведением СКО для первых двух баз, где увеличение СКО незначительно при переходе к другому типу решения.

Статистика для третьей базы явно указывает, что решение FIX для неё не годится.

### 10.3.2 Сети

В случае сетей наилучшим средством выявления проблемы с базами является использование программного обеспечения для вычисления невязки сети путём суммирования векторов по заданному периметру.

Первым этапом в проверке является подготовка простой схемы, изображающей измеренные базы. В зависимости от программного обеспечения, базы следует пронумеровать в соответствии с данными в файлах наблюдений, либо, в некоторых случаях, можно выбрать путь (ход) по сети, задав определённые узловые пункты в сети. Для выявления плохой базы нужно использовать разные комбинации векторов с включением и исключением исследуемой базы. Обычно следует просмотреть выводные файлы для линий, чтобы определить, какая из баз более подозрительна. Подозрительную базу нужно или наблюдать заново, или исключить пункт путём удаления или приписывания малого веса.

Второй контрольной процедурой для сети является уравнивание сети с минимальным наложением условий (часто называемое свободным уравниванием). Программы уравнивания выполняются по методу наименьших квадратов (МНК), позволяющему уравнивать измеренные вектора и получить вероятнейшее значение координат.

При пакетной обработке данных навигационное положение пункта часто используется в качестве начальных координат для вычисления вектора, и решение линеаризуется в окрестности этого значения. При выполнении свободного уравнивания обычно один из пунктов и направление берутся за исходные, а координаты всех векторов смещаются, чтобы согласоваться с заданными координатами начального пункта. Следовательно, список величин, на которые каждый пункт был смещён, чтобы

быть согласованным с фиксированным пунктом, известен и может быть распечатан. Полезно просмотреть этот список смещения для определения, ошибочны ли начальные координаты для любого из векторов более некоторой допустимой величины.

Введение весов для измеренных векторов проблематично. Многие из программ уравнивания строят матрицу весов, основанную на корреляционной матрице векторов и на стандартных ошибках из выходных файлов. Формальные стандартные ошибки вычисления векторов обычно в 3-10 раз меньше реальных ошибок. Следовательно, составленную из этих оптимистических ошибок весовую матрицу нужно отмасштабировать (домножить на скаляр), чтобы получить реальные оценки для ошибок сети. В документации к программам обычно указывается, какие значения скаляров следует использовать.

Для программ уравнивания, не использующих корреляционных матриц для векторов, требуется иметь априорные оценки ошибок векторов. Допустимая ошибка для съёмки (1:100 000) на интервале две сигмы составляет  $10 \text{ мм} + 10 \times 10^{-6} \times$  (длина базы в мм). Эту ошибку можно выбрать в качестве априорного значения для уравнивания, но вначале её значение нужно поделить на два, чтобы получить ошибку для доверительного интервала одна сигма. Когда используется эта априорная ошибка  $5 \text{ мм} + 10 \times 10^{-6} \times$  (длина базы в мм), уравнивание даёт для стандартной ошибки единицы веса значение, равное или меньшее единицы, и тогда можно сделать вывод о том, что работа отвечает предъявляемым требованиям.

Другой метод проверки качества GPS сети заключается в просмотре невязок (разностей), получаемых из уравнивания. Обычно, имеется два списка невязок. В одном приводятся действительные величины, на которые были исправлены компоненты векторов для достижения точного замыкания сети. Эти невязки должны бы быть малыми для коротких баз и большими для более длинных баз. Грубые или большие ошибки распределились бы по всей сети, и их трудно было бы выявить. Рекомендуется для этого использовать программы вычисления невязок замыкания в комбинации с программами уравнивания. Во втором списке невязок большинство программ представляет нормализованные, или стандартизированные, невязки. Эти значения безразмерны, и они являются результатом

масштабирования (домножения на скаляр) действительных невязок. Значение 1.0 для нормализованной невязки указывало бы на то, что значение обычной невязки таково, каковым оно ожидалось при использовании априорной модели весов. Если значение нормализованной невязки меньше 1.0, это говорит, что невязка меньше ожидаемой. Если значение нормализованной невязки больше 1.0, это говорит, что невязка больше ожидаемой. При уравнивании некоторые нормализованные невязки могут иметь значения, близкие к 2.0. Если более 5 % таких невязок больше 2.0 и некоторые значения больше 3.0, следует и далее искать и, возможно, исключить некоторые неверные базы.

При выполнении кинематической съёмки хода по методу "трёх штативов", или геометрической фигуры можно уравнивать способом, подобным используемому при уравнивании статической съёмки.

## Заключение

Координаты пунктов GPS сети вычисляются таким же образом, как координаты пунктов триангуляции и полигонометрии. При выполнении уравнивания по МНК должны использоваться соответствующие параметры эллипсоида. Если координаты для съёмки желательно вычислить в другой системе координат, для нового уравнивания должны использоваться фиксированные контрольные координаты и соответствующие параметры эллипсоида.

Внедрение спутниковых технологий позволяет избежать ряда существенных недостатков традиционных методов геодезических определений, а именно:

- 1) обеспечения прямой видимости между смежными исходными и определяемыми пунктами;
- 2) высокий уровень случайных ошибок, обусловленных прохождением визирных лучей в приземных слоях атмосферы;
- 3) влияние погодных условий на точность и сроки наблюдений;
- 4) статические условия наблюдений;
- 5) ограниченность пространственных размеров исследуемых территорий;
- 6) раздельное определение плановых координат и высот;
- 7) низкая производительность труда, уступающая спутниковым определениям в 10 - 15 раз;

## **Вопросы для самостоятельной подготовки**

### **Раздел № 1. Основные принципы действия спутниковых систем определения местоположения.**

1. Особенности геодезических измерений спутниковыми методами.
2. Двусторонний и односторонний методы дальномерных измерений.
3. Принципы измерения длин линий в спутниковых навигационных системах.
4. Схема построения спутниковой навигационной системы.
5. Преобразования систем координат.
6. Принципы формирования кодовых последовательностей.
7. Понятие о содержании кодового сообщения.
8. Основные функции сектора управления и контроля.
9. Обработка данных в приёмной аппаратуре.

### **Раздел № 2. Методы измерений и вычислений, используемые в спутниковых навигационных системах.**

10. Абсолютные и относительные методы спутниковых определений.
11. Основные разновидности дифференциальных методов.
12. Принцип измерения псевдодальностей.
13. Первые, вторые и третьи разности в фазовых измерениях.
14. Интегральный доплеровский счёт.
15. Принципы разрешения неоднозначностей в фазовых измерениях.
16. Выявление пропусков фазовых циклов.
17. Общая схема обработки измерительных данных.

### **Раздел № 3. Системы координат и времени, используемые в спутниковых системах.**

18. Общие сведения о системах координат.
19. Системы отсчёта времени, используемые в спутниковых системах.
20. Звёздные системы координат.
21. Геодезические системы координат и их преобразование.
22. Общеземная система координат.
23. Геоцентрические системы координат ПЗ-90 и WGS-84.

24. Методы преобразования координатных систем и параметры перехода.
25. Особенности определения высот на основе спутниковых систем.

#### **Раздел № 4. Основные источники ошибок спутниковых определений и методы их ослабления.**

26. Классификация источников ошибок спутниковых определений.
27. Ошибки эфемерид спутников.
28. Влияние ошибок внешней среды на спутниковые определения.
29. Инструментальные источники ошибок.

#### **Раздел № 5. Обработка и уравнивание спутниковых определений.**

30. Специфика проектирования и организации спутниковых измерений.
31. Составление технического проекта.
32. Спутниковые измерения и их контроль.
33. Первичная, предварительная и окончательная обработка спутниковых измерений.
34. Уравнивание геодезических сетей, созданных на основе спутниковых измерений.

#### **Раздел № 6. Применение спутниковых технологий для решения геодезических задач.**

35. Построение глобальной геодезической сети.
36. Развитие государственной геодезической сети Российской Федерации.
37. Создание и реконструкция городских геодезических сетей.
38. Решение геодинамических задач.
39. Применение спутниковых технологий в прикладной геодезии.
40. Использование спутниковых измерений для аэрофотосъёмочных работ, топографических съёмки и решения навигационных задач.

## Словарь терминов

**Азимут** — в геодезии угол между направлением на север и направлением на какой-либо предмет. Отсчитывается по часовой стрелке. В зависимости от направления на север, различают: магнитный (отсчитываемый от магнитного меридиана), геодезический (отсчитываемый от геодезического меридиана) и астрономический (отсчитываемый от астрономического меридиана) азимуты.

**Альтиметр** — высотомер

**Возмущённое движение (орбита)** — реальное движение ИСЗ, испытывающее влияние возмущающих факторов (неравномерность гравитационного поля Земли, притяжение Луны и Солнца, давление солнечных лучей и солнечного ветра и др.).

**Высота в Балтийской системе высот** — высота точки относительно поверхности квазигеоида. Её называют также нормальной высотой.

**Высота геодезическая** — расстояние по нормали от точки до поверхности земного эллипсоида.

**Высота нормальная** — см. Высота в Балтийской системе высот.

**Высотный репер** — см. Репер.

**Геодезический пункт** — закреплённая на местности физическая точка, координаты которой определены геодезическими методами. Физическая точка обычно размещается на марке, которая образует центр пункта. Геодезический пункт может быть окружён окопкой, и на нём может быть установлен наружный знак.

**Геодезия** — наука об определении фигуры, размеров и гравитационного поля Земли, измерении объектов на местности о пространственном позиционировании и ориентировании объектов в заданной системе координат с использованием инструментальных методов для создания карт и планов, проведения хозяйственных мероприятий, проектирования и строительства сооружений, дорог, каналов и т. п.

**Геоид** — уровенная поверхность гравитационного поля Земли, на океанах и морях совпадающая с поверхностью невозмущённых водных масс и продолженная под островами и

материками так, чтобы вектор силы тяжести в каждой точке был перпендикулярен этой поверхности.

**Горизонтирование** — процедура приведения геодезического прибора или инструмента в положение, когда вертикальная ось прибора совпадает с вектором силы тяжести или плоскость инструмента находится в горизонтальной плоскости.

**Декартова** (система координат) — прямолинейная система координат на плоскости или в пространстве (обычно с взаимно перпендикулярными осями и одинаковыми масштабами по осям).

**Доплера эффект** — изменение частоты и длины волн, регистрируемых приёмником, вызванное движением их источника и/или движением приёмника. Эффект назван в честь австрийского физика К. Доплера.

**Землеустройство** — система мероприятий, обеспечивающих регулирование земельных отношений, изучение, планирование, организацию использования и охраны земель, создание новых и упорядочение существующих землепользований, земельных фондов, административно-территориальных образований и других объектов землеустройства с обозначением границ в натуре (на местности), устройство территории сельскохозяйственных организаций и улучшение природных ландшафтов.

**Зенитное расстояние** — угол между отвесной линией и направлением на визирную цель. Угол отсчитывается «сверху — вниз», поэтому, зенитное расстояние направления, лежащего в плоскости горизонта равно  $90^\circ$ , лежащего выше горизонта — менее  $90^\circ$ , лежащего ниже горизонта — более  $90^\circ$ .

**Инженерные изыскания** — изучение природных условий и факторов техногенного воздействия в целях рационального и безопасного использования территорий и земельных участков в их пределах, подготовки данных по обоснованию материалов, необходимых для территориального планирования, планировки территории и архитектурно-строительного проектирования.

**Кадастр** — систематизированный свод сведений, составляемый периодически или путём непрерывных наблюдений над соответствующим объектом. Например, кадастр природных ресурсов — совокупность научно обоснованных и достоверных данных о количественном и качественном составе каждого природного объекта, ресурса, а также субъектах прав на

них (собственников, пользователей, арендаторов). Различают отраслевые, территориальные и государственные кадастры. В частности, отраслевые кадастры ведутся по отдельным элементам природной среды. К ним относятся земельный, водный, лесной кадастры, кадастр животного мира, кадастр охотничьих животных, кадастр полезных ископаемых.

**Кадастр, государственный земельный** — систематизированный свод документированных сведений о местоположении, целевом назначении и правовом положении земель Российской Федерации, получаемых в результате проведения кадастрового учёта земельных участков, сведений о территориальных зонах и расположенных на земельных участках и прочно связанных с этими земельными участками объектах.

**Кадастровый план** — план, на которой нанесены только требуемые объекты недвижимости. По зарамочному оформлению кадастровый план существенно отличается от топографического плана.

**Кадастровая съёмка** — вид съёмки, при которой, в отличие от топографической съёмки, определяется положение только объектов недвижимости (границы земельных участков, строения и т.п.).

**Квадратирование** — операция, когда принимаемый сигнал умножают на самого себя. В результате получается сигнал, частота которого равна удвоенной несущей частоте сигнала спутника.

**Квазигеоид** — по материалам наземных наблюдений строго определяемая поверхность, на морях и океанах совпадающая с поверхностью геоида. Под островами и континентами отступает от поверхности геоида на величины в несколько сантиметров в равнинных районах и до двух метров в горных районах. Используется в Балтийской системе высот как поверхность, от которой отсчитываются нормальные высоты.

**Кеплеровские элементы орбиты ИСЗ** — совокупность данных, описывающих параметры орбиты ИСЗ (размер полуоси, эксцентриситет, период обращения, наклон орбиты и т.д.).

**Код Голда** — тип псевдослучайных последовательностей. Значимость этих последовательностей происходит из-за их очень низкой взаимной корреляции. Применяются в CDMA и GPS.

**Контроллер** — устройство управления в электронике и вычислительной технике.

**Марка** — в геодезии объект, на котором находится физическая точка. Различают марку, как центр геодезического пункта, координаты которого соотнесены с физической точкой. Визирная марка — предмет, на физическую точку которой производится наведение геодезического прибора.

**Меридиан** — линия, соединяющая какие либо точки с заданными характеристиками. В геодезии различают магнитный, геодезический и астрономический меридианы. Магнитный меридиан — проекция силовой линии геомагнитного поля на поверхность Земли. Все магнитные меридианы представляют собой сложные кривые, сходятся в северном и южном магнитных полюсах Земли. Геодезический меридиан — линия сечения поверхности земного эллипсоида плоскостью, проходящей через оба полюса Земли. Астрономический меридиан точки представляет собой след сечения земной поверхности плоскостью, проходящей через направление отвесной линии в этой точке и параллельной оси вращения Земли.

**Метод наименьших квадратов** — метод уравнивания результатов измерений, содержащих избыточные величины, основанный на принципе наименьших квадратов.

**Многолучёвость** — явление, связанное с распространением одного и того же сигнала по разным путям (траекториям) и вызывающее возникновение интерференции в точке приёма.

**Навигационное сообщение** — информация, передаваемая навигационным ИСЗ. Состоит из нескольких блоков, содержащих сведения: параметры часов спутника, коэффициенты модели ионосферы, эфемериды спутника, транслирующего данное сообщение, служебную информацию.

**Невозмущённое движение (орбита)** — идеальное движение (орбита) ИСЗ, подчиняющаяся законам Кеплера и не учитывающее влияния возмущающих факторов.

**Нивелирование** — общее названия вида геодезических работ, при которых определяется превышение между точками с целью вычисления их высот в заданной системе.

**Нормаль** — в геодезии линия, перпендикулярная поверхности земного эллипсоида в данной точке.

**Общеземной эллипсоид** — земной эллипсоид, центр которого совпадает с центром масс Земли, а малая полуось совпадает с осью вращения Земли в пределах точности измерений, достигнутых на данном этапе развития геодезии.

**Оптический центрир** – устройство в теодолите, малая зрительная труба, для размещения теодолита точно над центром пункта.

**Оскулирующие элементы орбиты ИСЗ** — элементы орбиты, рассматриваемые как функции времени, через которые координаты и составляющие скорости в возмущённом движении выражаются теми же формулами, что и в невозмущённом движении.

**Отвес** — устройство, позволяющее определить положение отвесной линии. Различают нитяной и оптический отвесы. Первый из них представляет собой груз на нити, второй — оптический прибор, устанавливающий визирную линию по линии действия силы тяжести.

**Отвесная линия** — линия, совпадающая с вектором силы тяжести в данной точке.

**Ошибки измерений** — самопроизвольно проявляющиеся изменения в результатах измерений (в том числе геодезических) из-за влияния различных факторов: инструментальные, личные, внешней среды и т. п. Различают ошибки случайные и систематические.

**Ошибки систематические** — ошибки, которыми отягощены результаты измерения и которые проявляются всегда, с одним знаком и одинаковые по абсолютной величине.

**Ошибки случайные** — ошибки, которые имеют результаты любых измерений, но у которых нельзя предсказать заранее знак и абсолютную величину.

**Ошибка средняя квадратическая** — характеристика качества произведённых измерений или точностная характеристика геодезического прибора. Теоретические положения по средней квадратической ошибке излагаются в курсе дисциплины «Теория математической обработки измерений».

**Параллель (геодезическая)** — линия на поверхности эллипсоида, получаемая сечением плоскости, перпендикулярной малой полуоси. В каждой своей точке параллель перпендикулярна меридиану. Экватор также является параллелью.

**Полуось** — в геодезии линия, характеризующая размер земного эллипсоида. Различают большую (от центра эллипсоида до экватора) и малую (от центра эллипсоида до полюса) полуоси.

Для эллипсоида Красовского размер большой полуоси равен 6378245 м. Малая полуось земного эллипсоида совпадает с осью вращения Земли (для общеземного эллипсоида) или параллельна ей (для референц-эллипсоида).

**Полюс** — крайняя точка чего-либо. В геодезии различают геомагнитный, геодезический и астрономический полюса (разделение условное). Геомагнитный полюс — точка, где сходятся силовые линии магнитного поля Земли. Геодезический полюс — точка, получаемая пересечением малой полуоси поверхности эллипсоида. Астрономический полюс — точка на поверхности Земли, через которую проходит ось вращения планеты.

**Полярное сжатие** — см. Сжатие.

**Поправка** — некая величина, прибавляемая к другой величине, например, к результатам измерений, с целью уменьшения влияния ошибок.

**Принцип наименьших квадратов** — принцип уравнивания результатов измерений, содержащих избыточные величины и основанный на том, что поправки в измеренные величины должны подчиняться правилу: сумма квадратов поправок должна быть минимальна.

**Проложение** — в геодезии: 1) проекция реальной (наклонной линии) на проективную плоскость; линия, приведённая к горизонту; 2) термин, применяющийся к реализации некоторых методов геодезии, например, проложение полигонометрического хода, проложение нивелирного хода и т.п.

**Псевдодалность** — произведение скорости распространения сигнала в вакууме на разность между временем приёма сигнала по шкале времени аппаратуры потребителя и временем передачи этого сигнала с ИСЗ по бортовой шкале времени.

**Псевдошумовой код** — специальный код. Сигнал, модулированный таким кодом, выглядит как шум (случайная последовательность импульсов), но при этом несёт полезную информацию.

**Радиолаг** — радионавигационная система, основанная на фазовом способе измерения расстояний до опорных пунктов с последующим построением и вычислением трилатерации.

**Референц-эллипсоид** — земной эллипсоид с заданными параметрами, центр которого находится вблизи центра масс Земли, а его малая полуось параллельна оси вращения Земли.

**Референцная станция** — приёмник спутниковой навигационной системы (часто специализированный), предназначенный для обеспечения данными дифференциальной коррекции при определении точного местоположения объектов с помощью глобальных навигационных спутниковых систем.

**Сегмент** — составная часть системы глобального спутникового позиционирования. Различают сегменты: космический, управления, пользовательский.

**Сжатие** (полярное сжатие) — в геодезии величина, характеризующая форму земного эллипсоида. Определяется как отношение разности большой и малой полуосей к размеру большой полуоси. Для эллипсоида Красовского сжатие равно 1:298,3.

**Систематическая ошибка** — см. Ошибки систематические.

**Случайная ошибка** — см. Ошибки случайные.

**Средняя квадратическая ошибка** — см. Ошибка средняя квадратическая.

**Стоповый сигнал** — сигнал, формируемые местным опорным генератором ИСЗ.

**Сфероид** — см. Эллипсоид.

**Угол наклона** — угол между плоскостью горизонта и направлением на визирную цель. Если направление выше плоскости горизонта — угол положительный, если ниже — отрицательный.

**Уклонение отвесной линии** — угол между нормалью к поверхности земного эллипсоида и отвесной линии.

**Уравнивание** — математическая процедура, предназначенная для нахождения поправок в измерения, соответствующих наибольшей плотности вероятности. Наиболее часто уравнивание производят по методу наименьших квадратов (МНК).

**Фазометр** — прибор для измерения фазы колебания

**Центрирование** — размещение геодезического инструмента или визирной цели над центром геодезического пункта (по отвесной линии).

**Экватор** — в геодезии линия на поверхности эллипсоида, получаемая сечением плоскостью, перпендикулярной малой полуоси и проходящей через центр эллипсоида.

**Эксцентриситет** – величина несовпадения центров осей двух устройств, долженствующих быть соосными.

**Эллипсоид (сфероид)** — геометрическая фигура, получаемая вращением эллипса вокруг одной из осей. При вращении вокруг малой оси получают эллипсоид, характеризующийся полярным сжатием.

**Эфемериды ИСЗ** — цифровая информация, описывающая положение данного спутника в пространстве и времени относительно единой для системы шкалы времени и в геоцентрической связанной декартовой системе координат.

## Указатель персоналий

**Доплер** Кристиан (1803-1853) — австрийский физик. Основные труды выполнены по абберации света, теории микроскопа и оптического дальномера, теории цветов и некоторым другим темам. В 1842 Доплер теоретически обосновал зависимость частоты колебаний, воспринимаемых наблюдателем, от скорости и направления движения источника волн и наблюдателя относительно друг друга. Это явление впоследствии было названо его именем (эффект Доплера).

**Красовский** Феодосий Николаевич (1878-1948) — российский астроном-геодезист, член-корреспондент АН СССР. Разработал программу развития государственной геодезической сети. Обработав результаты массовых высокоточных геодезических измерений, вывел параметры земного эллипсоида, названного его именем.

**Машимов** Мухамбет Машимович (1930 — 2001) — выдающийся учёный-геодезист, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, автор фундаментальных трудов: «Уравнивание геодезических сетей» и «Планетарные теории геодезии».

**Молоденский** Михаил Сергеевич (1909 — 1991) — российский геофизик, геодезист и астроном, член-корреспондент АН СССР. Разработал теорию определения фигуры и гравитационного поля Земли, предложил отсчитывать высоты точек от квазигеоида.

# Список рекомендуемой литературы

## Основная литература

1. Кусов В. С. Основы геодезии, картографии и космоаэро съемки : учебник для студентов учреждений высшего профессионального образования / В. С. Кусов. – 2-е изд., испр. – Москва : Академия, 2012. – 256 с.
2. Курошев Г. Д. Космическая геодезия и глобальные методы позиционирования : учебное пособие / Г. Д. Курошев. – Санкт-Петербург : Издательство Санкт-Петербургского университета, 2011. – 182 с.

## Дополнительная литература

1. Ворошилов А. П. Спутниковые системы и электронные тахеометры в обеспечении строительных работ : учебное пособие / А. П. Ворошилов. – Челябинск : АКСВЕЛЛ, 2007. – 163 с
2. Генике А. А. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии / А. А. Генике, Г. Г. Побединский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Картгеоцентр, 2004. – 255 с.
3. Геодезия : учебник для студентов учреждений высшего профессионального образования / Е. Б. Ключин, М. И. Киселев, М. Ш. Михелев, В. Д. Фельдман ; ред. Д. Ш. Михелев. – 11-е изд., перераб. – Москва : Академия, 2012. – 496 с.
4. Гиршберг М. А. Геодезия : учебник / М. А. Гришберг. – Москва : ИНФРА-М, 2013. – 384 с.
5. Захаров А. И. Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности : монография / А. И. Захаров, О. И. Яковлев, В. М. Смирнов. – 2-е изд. – Москва : ЛИБРОКОМ, 2013. – 248 с.
6. Золотова Е. В. Геодезия с основами кадастра : учебник для вузов / Е. В. Золотова, Р. Н. Скогорева. – 2-е изд., испр. – Москва : Академический Проект ; Фонд Мир, 2012. – 416 с.

7. Курошев Г. Д. Геодезия и топография : учебник для студентов вузов / Г. Д. Курошев, Л. Е. Смирнов. – 3-е изд., стер. – Москва : Академия, 2009. – 176 с.
8. Липкин И. А. Спутниковые навигационные системы / И. А. Липкин. – 2-е изд. – Москва : Вузовская книга, 2012. – 288 с.
9. Перфилов В. Ф. Геодезия : учебник для вузов / В. Ф. Перфилов, Р. Н. Скогорева, Н. В. Усов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 2008. – 350 с.
10. Поваляев А. А. Глобальные спутниковые системы синхронизации и управления движением в околоземном пространстве : учебное пособие / А. А. Поваляев, А. В. Вейцель, Р. Б. Мазепа ; ред. А. А. Поваляев. – Москва : Вузовская книга, 2012. – 188 с.
11. Яковлев О. И. Спутниковый мониторинг Земли: Радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы / О. И. Яковлев, А. Г. Павельев, С. С. Матюгов. – Москва : ЛИБРОКОМ, 2010. – 208 с.

### **Руководящие документы и справочная литература**

1. ГОСТ Р 53864-2010. Глобальные спутниковые навигационные системы. Сети геодезические спутниковые. Термины и определения. М.: Стандартинформ. — 2011
2. ОСТ 68-15-01. Измерения геодезические. Термины и определения. М.: ЦНИИГАиК. — 2001.
3. ОСТ 68-12.0.01-02. Отраслевая система стандартов по безопасности труда. Основные положения. М.: ЦНИИГАиК. — 2002.
4. ОСТ 68-14-99. Виды и процессы геодезической и картографической производственной деятельности. Термины и определения. М.: ЦНИИГАиК. — 2000.
5. Основные положения о государственной геодезической сети Российской Федерации. — ГКИНП (ГНТА)-01-006-03. — М.: ЦНИИГАиК. — 2004.
6. Положение о федеральном картографо-геодезическом фонде (постановление Правительства РФ от 08 сентября 2000 г. № 69).
7. Положение о порядке передачи гражданам и юридическим лицам в федеральный картографо-геодезический фонд копий геодезических и картографических материалов и

- данных. — ГКИНП(ГНТА)-17-273-03. — М.: ЦНИИГАиК. — 2003.
8. Инструкция о порядке контроля и приёмки геодезических, топографических и картографических работ. — ГКИНП(ГНТА)-17-004-99. — М.: ЦНИИГАиК. — 1999.
9. РТМ 68-14-01. Спутниковая технология геодезических работ. Термины и определения. М.: ЦНИИГАиК. — 2001.

### **Аннотация сайтов Интернет**

1. Сайт научного электронного журнала по геодезии, картографии и навигации. — Режим доступа: <http://www.geoprofi.ru/>
2. Сайт Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК). — Режим доступа: <http://www.miiigaik.ru/sitemap/>
3. Сайт Государственного университета по землеустройству. — Режим доступа: <http://www.guz.ru/>
4. Сайт Центрального научно-исследовательского института геодезии, аэросъемки и картографии (ЦНИИГАиК). — Режим доступа: <http://cniigaik.ru/info/>
5. Сайт Сибирской Государственной геодезической академии (СГГА), г. Новосибирск. — Режим доступа: <http://www.ssga.ru/>
6. Официальный сайт Министерства сельского хозяйства Российской Федерации. — Режим доступа: [www.mcsx.ru/](http://www.mcsx.ru/)
7. Официальный сайт Министерства экономического развития Российской Федерации. — Режим доступа: [www.economy.gov.ru/](http://www.economy.gov.ru/)
8. Официальный сайт некоммерческого партнерства «Кадастровые инженеры». — Режим доступа: [www.roscadastre.ru/](http://www.roscadastre.ru/)
9. Официальный сайт ГИС-ассоциации. — Режим доступа: [www.gisa.ru/](http://www.gisa.ru/)
10. Сайт саморегулируемой организации «Изыскатели Санкт-Петербурга и Северо-Запада». — Режим доступа: [www.izisk.spb.ru](http://www.izisk.spb.ru)

11. Официальный сайт Федеральной службы регистрации, кадастра и картографии (Росреестра) РФ. – Режим доступа: <https://rosreestr.ru/>
12. Официальный сайт Управления Росреестра по Ленинградской области. – Режим доступа: <http://www.to47.rosreestr.ru/>
13. Сайт Научного геоинформационного центра РАН. – Режим доступа: <http://www.ngic.ru/>
14. Официальный сайт Федерального космического агентства. – Режим доступа: <http://www.federalspace.ru/>
15. Официальный сайт КБ Панорама, Ногинск. – Режим доступа: <http://www.gisinfo.ru/edu/edu.htm>
16. Официальный сайт фирмы «Ракурс» — разработчика ПО по фотограмметрии. – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/>
17. Официальный сайт фирмы Erdas Imagine – разработчика ПО по фотограмметрии. – Режим доступа: <http://www.erdas.com/>
18. Официальный сайт Американского общества фотограмметрии и дистанционного зондирования. – Режим доступа: <http://www.asprs.org/>
19. Российское общество содействия развитию фотограмметрии и дистанционного зондирования. – Режим доступа: <http://rsprs.euro.ru/>
20. Официальный сайт Международного общества содействия развитию фотограмметрии и дистанционного зондирования. – Режим доступа: <http://www.isprs.org/>

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное пособие

ISBN 978-5-906759-17-7

Петушков А. В. Спутниковые системы и технологии позиционирования : учебное пособие / А. В. Петушков, Е. П. Тарелкин. – Санкт-Петербург : НОИР г. Санкт-Петербург, 2015. – 88 с.

Ответственный за выпуск Грызлова А.В.  
Редактор Федорова Т.Л.

Подписано в печать 24.12.2014

Заказ № 1024/14

Формат 60x84 1/16

Усл. печ.л. 4,9.

Тираж 300 экз.

Отпечатано в ООО «Информационно-консалтинговый центр» по заказу НЧОУ ВПО «Национальный открытый институт г.Санкт-Петербург»

197183 г. Санкт-Петербург, ул. Сестрорецкая дом 6  
Тел. +7-812-430-07-16 доб. 224