

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

О. В. Кравченко

**СИСТЕМЫ
ГЛОБАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ
В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

**Курс лекций для студентов специальности
1-75 01 01 «Лесное хозяйство»**

Минск 2018

УДК 630:629.783(075.8)

ББК 43:39.62я78

К78

Рассмотрен и рекомендован к изданию редакционно-издательским советом
Белорусского государственного технологического университета.

Рецензенты:

заведующий кафедрой геодезии и картографии БГУ
кандидат географических наук,
доцент *А. П. Романкевич*;
декан землеустроительного факультета УО БГСХА
кандидат технических наук,
доцент *О. Н. Писецкая*

Кравченко, О. В.

К78 Системы глобального позиционирования в лесном хозяйстве : курс лекций для студентов специальности 1-75 01 01 «Лесное хозяйство» / О. В. Кравченко. – Минск : БГТУ, 2018. – 60 с.

В курс лекций включены вопросы истории создания и развития систем глобального позиционирования GPS и ГЛОНАСС. Изложены основные принципы действия и компоненты систем. Приведены методы измерений, системы координат и времени, используемые в спутниковых технологиях. Выполнен анализ погрешности спутниковых измерений. Рассмотрены вопросы проектирования, организации и обработки результатов спутниковых наблюдений.

Предназначен для студентов специальности 1-75 01 01 «Лесное хозяйство», также будет полезен студентам геодезических и землеустроительных специальностей.

УДК 630:629.783(075.8)

ББК 43:39.62я78

© УО «Белорусский государственный
технологический университет», 2018

© Кравченко О. В., 2018

ВВЕДЕНИЕ

Эффективное ведение лесного хозяйства, рациональное использование лесных ресурсов, мониторинг лесов, инвентаризация и учет лесного фонда – все это требует точной и достоверной топографо-геодезической информации.

На современном этапе топографо-геодезические работы невозможны без внедрения новых технологий, приборов, программных средств.

Научно-технические достижения последних десятилетий позволили создать принципиально новый метод определения координат точек, базирующийся на нахождении расстояний до спутников.

Спутниковые системы глобального позиционирования (GNSS) широко применяются в различных областях народного хозяйства благодаря ряду несомненных преимуществ:

- исключение необходимости взаимной видимости между определяемыми пунктами;
- расстояния между определяемыми пунктами могут составлять десятки километров;
- возможны наблюдения в любую погоду, как в дневное, так и в ночное время;
- измерения и обработка результатов почти полностью автоматизированы;
- возможность получения координат геодезических пунктов в реальном масштабе времени и др.

В курс лекций включены вопросы истории создания и этапов развития GNSS-систем; основных принципов действия и компонентов систем спутникового позиционирования; методов измерений и вычислений, используемых в системах глобального позиционирования; систем координат и времени, применяемых в спутниковых измерениях; основных источников погрешностей спутниковых измерений; вопросов проектирования, организации и обработки спутниковых измерений.

Раздел 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМАХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Лекция 1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ГЛОБАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

1.1. Понятие о системах глобального позиционирования

Система глобального позиционирования (GNSS) – комплексная электронно-техническая система, состоящая из совокупности наземного и космического оборудования, предназначенная для определения местоположения (географических координат и высоты), а также параметров движения (скорости и направления движения) наземных, водных и воздушных объектов.

Координаты пунктов (объектов) нужны не только геодезистам, но и морякам, авиаторам, военным, участникам различных экспедиций и многим др.

Если раньше для создания геодезической основы приходилось строить дорогостоящие сети различных конфигураций, закрепляемые на местности специальными центрами с наружными знаками (пирамидами, сигналами) для обеспечения взаимной видимости между пунктами, то появление спутниковых систем сделало эти работы ненужными.

С помощью только одного спутникового приемника возможно определить координаты объекта с метровой точностью, что достаточно не только для навигационных, но и в ряде случаев для земельно-кадастровых, геологических, мелиоративных и других работ.

Применяя два приемника, можно получить сантиметровую и даже миллиметровую точность взаимного положения пунктов, что обеспечивает решение практически всех геодезических задач.

GNSS базируется на электронных методах геодезических измерений, в первую очередь на электронной дальнометрии, которые широко применяют в наземной геодезии. В случае спутниковых

измерений эти методы претерпели существенные изменения, обусловленные спецификой прохождения сигналов на космических трассах.

Координаты, получаемые благодаря спутниковым системам позиционирования, используются в следующих отраслях народного хозяйства:

Геодезия. С помощью систем навигации определяются точные координаты и границы земельных участков.

Картография. Системы навигации используются в гражданской и военной картографии.

Навигация. С применением систем навигации осуществляется как морская, так и наземная навигация. Например, с появлением портативных спутниковых приемников возникла идея создания принципиально новой автомобильной системы безопасности, которая способна точно отслеживать координаты автомобиля и передавать их на пост контроля, используя обычную сотовую связь.

Появилась возможность принципиально перестроить систему управления движением поездов. Новая система способна отслеживать и оптимизировать движение поездов и автоматически включать режим экстренного торможения при опасном сближении составов.

Спутниковый мониторинг транспорта. С помощью GNSS ведется мониторинг за положением, скоростью автомобилей, контроль за их движением.

Сотовая связь. Первые мобильные телефоны с GNSS появились в 90-х гг. XX в. В некоторых странах, например США, это использовалось для оперативного определения местонахождения человека, звонящего 911. В России начата реализация аналогичного проекта – Эра ГЛОНАСС.

Тектоника. С помощью GNSS ведется наблюдение за движением и колебаниями плит.

1.2. Развитие спутниковой навигации в СССР и России

В 1964 г. на вооружение Советской Армии была принята навигационно-связная система «Циклон-Б» в составе шести космических аппаратов «Парус», обращающихся на околополярных орбитах высотой 1000 км.

Через три года была сдана в эксплуатацию спутниковая радионавигационная система «Цикада» в составе четырех космических аппаратов на орбитах того же класса, что и у космических аппаратов «Парус».

И если первая система использовалась исключительно в интересах Министерства обороны СССР, то вторая предназначалась главным образом для навигации гражданских морских судов.

Оснащение спутниковой навигационной аппаратурой судов торгового флота оказалось очень выгодным. Благодаря повышению точности судовождения, удавалось настолько сэкономить время плавания и топливо, что бортовая аппаратура потребителя окупала себя после первого же года эксплуатации.

В ходе испытаний этих и предшествовавшей им системы «Циклон» было установлено, что погрешность местоопределения движущегося судна по навигационным сигналам этих спутников составляет 250–300 м.

Кроме невысокой точности получения координат, системы отличались малой оперативностью. Для достижения высокой точности требовались несколько проходов искусственных спутников Земли (ИСЗ) в «поле зрения» приемника.

Успешная эксплуатация низкоорбитальных спутниковых навигационных систем морскими потребителями привлекла широкое внимание к спутниковой навигации. Возникла необходимость создания универсальной навигационной системы, удовлетворяющей требованиям всех потенциальных потребителей: авиации, морского флота, наземных транспортных средств и космических кораблей.

В декабре 1976 г. было принято Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О развертывании Единой космической навигационной системы *ГЛОНАСС* (*ГЛО*бальная *НА*вигационная *СП*утниковая Система)».

Это постановление по сути лишь узаконило уже начавшиеся работы по созданию новой системы и определило порядок ее разработки и испытаний.

Система ГЛОНАСС представляет второе поколение российских спутниковых навигационных систем. Создание ее было предопределено запросами новых потенциальных потребителей, нуждавшихся в высокоточной привязке своего положения во времени и пространстве.

В качестве орбит для новой системы первоначально были выбраны средневысокие (20 000 км) полусуточные орбиты. Они обеспечивали оптимальное соотношение между количеством ИСЗ в системе и величиной зоны радиобзора.

Однако впоследствии высота рабочей орбиты была уменьшена до 19 100 км.

Это было сделано исходя из того, что для ИСЗ, имеющих период обращения, равный половине суток, проявляется резонансный эффект, приводящий к достаточно быстрому «разрушению» заданного относительного положения ИСЗ и конфигурации системы в целом.

Очевидно, что для поддержания системы пришлось бы чаще проводить коррекции орбиты каждого ИСЗ. При выбранной высоте орбиты для гарантированной видимости потребителем не менее четырех спутников их количество в системе должно составлять 18. Однако оно было увеличено до 24 с целью повышения точности определения собственных координат и скорости потребителя.

В настоящее время это требование потеряло актуальность, поскольку современная навигационная аппаратура потребителя имеет возможность принимать сигналы от 8 до 12 ИСЗ в зоне радиовидимости одновременно. Это позволяет не заботиться о выборе оптимальной четверки, а просто обрабатывать все принимаемые измерения.

В 1982 г. выведены на орбиты первые спутники серии КОСМОС.

Спутники ГЛОНАСС вращаются в трех орбитальных плоскостях на высоте примерно 19 140 км (рис. 1).



Рис. 1. Положение спутников на орбитах в системе ГЛОНАСС

В 1993 г. система официально введена в эксплуатацию Министерством обороны Российской Федерации. В 1996 г. ГЛОНАСС развернута полностью.

1.3. Развитие спутниковой навигации в США

GPS (Global Positioning System – Глобальная Система Позиционирования) первоначально называли NAVSTAR.

Сначала GPS разрабатывалась как сугубо военная система.

Военные нуждались с одной стороны в средствах наведения высокоточного оружия дальнего радиуса действия и с другой – в универсальной системе навигации, доступной для массового применения в армии.

Начиная с 1960-х гг. Министерство обороны США стало развивать идею создания глобальной, всепогодной, непрерывно доступной, очень точной системы навигации и позиционирования.

Военно-морские силы финансировали две программы, ставшие предшественниками GPS: *Transit* и *Timation*.

Система *Transit* была первой действующей спутниковой навигационной системой. Разработанная в 1964 г. в лаборатории прикладной физики, она состояла из 7 низкоорбитальных спутников, которые излучали очень стабильные радиосигналы.

Изначально разработанная военно-морскими силами США для управления подводными лодками с баллистическими ракетами *Polaris* на борту и иными военными объектами, находящимися на поверхности океана, в 1967 г. система *Transit* стала доступна для гражданских пользователей. Она была очень быстро приспособлена для навигации больших коммерческих судов и небольших частных катеров и яхт. Причем число гражданских пользователей в скором времени превысило число военных.

Несмотря на то, что система *Transit* обеспечивала основные потребности в навигации судов, она имела много недостатков:

- низкое быстродействие;
- потребность в длительном наблюдении спутников;
- возможность позиционировать только стационарные или медленно движущиеся объекты;
- определение только двухмерных координат.

Все это сделало невозможным применение системы в авиации и иных быстро движущихся объектах.

Второй предшественник GPS – система *Timation*. Программа исследований стартовала в 1964 г. и включала в себя запуск двух искусственных спутников, несущих на борту сверхстабильные часы, передачу со спутника сигналов точного времени и определение двухмерных координат приемника.

Измеряя задержку прохождения сигнала от спутников, имеющих заранее известные координаты, можно вычислить расстояние до спутников и рассчитать на основании этого координаты приемника.

Таким образом, был заложен и экспериментально опробован базовый принцип работы GPS.

К сентябрю 1973 г. была создана компромиссная система, вобравшая в себя все лучшие опции от прежних программ военно-воздушных сил и военно-морского флота США. Система известна как система глобального позиционирования NAVSTAR.

С 1978 по 1985 г. 11 спутников первого блока были выведены на орбиту.

Круговые орбиты спутников последовательно увеличивались с 925 км до 13 000 км, а затем достигли окончательной величины в 20 145 км. Также последовательно менялась несущая частота передатчиков: сначала 400 МГц, затем 1227 МГц и позднее достигла современного значения 1575 МГц.

Период с 1980 по 1989 г. был отмечен несколькими существенными спадами в развитии системы GPS.

Первый спутник второго блока «Block 2» был выведен на орбиту с мыса Канаверал в феврале 1989 г. Затем были запущены еще 23 спутника. Запуск в марте 1994 г. 24-го спутника второго блока завершил формирование созвездия GPS.

Еще до запуска последнего спутника официально объявили, что система поддерживает 100-метровую (стандартную) точность позиционирования для гражданских пользователей всего мира.

Начиная с 1996 г. на орбиту начали выводить спутники нового типа «Block 2R». Эти спутники имели расширенные возможности, включая систему автономной навигации AUTONAV. В случае невозможности контакта с наземной станцией управления автоматически включалась система AUTONAV, позволяющая спутнику автономно функционировать без потери точности как минимум 180 дней.

Для обеспечения преимущества военных в использовании GPS было решено ввести преднамеренное ограничение точности для гражданских пользователей (режим избирательного доступа).

Во-первых, вводились преднамеренные ошибки в передаваемые спутниками навигационные данные, во-вторых, намеренно занижалась точность эталонных сигналов времени, доступных гражданским пользователям. Военным, в отличие от гражданских пользователей, всегда были доступны точные навигационные данные.

Спутники NAVSTAR располагаются в шести плоскостях на высоте примерно 20 145 км (рис. 2). Группировка NAVSTAR полностью укомплектована в апреле 1994 г. и с тех пор поддерживается.



Рис. 2. Положение спутников на орбитах в системе NAVSTAR (GPS)

Применение GPS в гражданской практике очень бурно расширилось, и вскоре стандартная 100-метровая точность (SPS, Standard Positioning Service) перестала удовлетворять гражданских пользователей. У крупнейших американских производителей навигационных систем возникли трудности с расширением рынков сбыта.

Наконец 1 мая 2000 г. президент США выступил с заявлением о том, что в полночь с 1 на 2 мая США отключают принудительное ограничение точности. Это позволило в десять раз увеличить точность позиционирования для гражданских пользователей.

1.4. Современные системы глобального позиционирования

Кроме ГЛОНАСС и GPS, в настоящее время готовятся к развертыванию следующие GNSS-системы.

Galileo – Европейская система, находящаяся на этапе создания спутниковой группировки.

По состоянию на ноябрь 2016 г. на орбите находятся 16 спутников: 9 действующих и 7 тестируемых (рис. 3). Планируется полностью развернуть спутниковую группировку к 2020 г.



Рис. 3. Спутник системы Galileo

Таким образом, с учетом спутников GPS и ГЛОНАСС в распоряжении пользователей будет 80 ИСЗ, покрывающих весь земной шар.

Бэйдоу (BeiDou) – развертываемая в настоящее время Китаем подсистема GNSS.

Система Бэйдоу состоит из двух отдельных групп спутников. Первая группа Бэйдоу-1, официально названная как Экспериментальная спутниковая навигационная система, была запущена в 2000 г. в ограниченном тестовом режиме и состояла только из трех спутников. Вторая группа Бэйдоу-2, также известная как COMPASS, находится в стадии создания, которую предполагается завершить к 2020 г. В настоящее время запущен 21 ИСЗ (рис. 4).

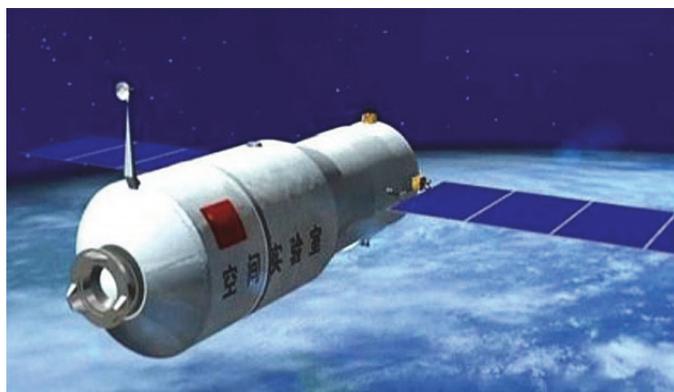


Рис. 4. Спутник системы Бэйдоу

В начале 2000-х гг. китайская Бэйдоу-1 отставала от GPS и ГЛОНАСС минимум на поколение. Экспериментальная спутнико-

вая система работала медленнее, давала худшие результаты и была в десятки раз дороже.

В 2004 г., с началом создания Бэйдоу-2, произошла модернизация технологий и ситуация изменилась в лучшую сторону. Планируется, что новая глобальная спутниковая система Бэйдоу будет состоять из 35 спутников, среди которых 5 будут расположены на геостационарной орбите, а оставшиеся 30 – на средних орбитах, полностью охватывающих Землю.

Как и в других спутниковых системах, будет доступно два уровня позиционирования услуг – открытый и закрытый (для военных). Открытый вариант будет доступен по всему миру для обычных пользователей и, как утверждают разработчики, точность позиционирования составит до 10 м, а скорость до 0,2 м в секунду.

IRNSS – Индийская навигационная спутниковая система.

Первый спутник был запущен в 2008 г. В настоящее время система запущена полностью. На орбитах на высоте 36 000 км вращаются 7 спутников.

1.5. Принципы определения местоположения с помощью спутниковых систем

Сущность спутникового позиционирования заключается в следующем. Вокруг Земли вращаются спутники, непрерывно излучающие радиосигналы и перемещающиеся по нескольким орбитам так, чтобы в любой точке планеты и околоземного пространства можно было принимать сигналы одновременно от нескольких из них.

На спутниках устанавливаются передатчики электромагнитных колебаний и атомные часы. За спутниками ведется постоянное наблюдение с опорных пунктов. Если в какой-то момент времени t одновременно измерить расстояние до спутника от нескольких опорных пунктов, то, решив пространственную засечку, можно определить для этого момента времени пространственные координаты спутника. В результате для любого момента времени координаты спутников будут известными.

Для вычисления координат создаваемого пункта на земной поверхности устанавливают на нем приемник электромагнитных

колебаний, с помощью которого одновременно измеряют расстояния до нескольких спутников (рис. 5).

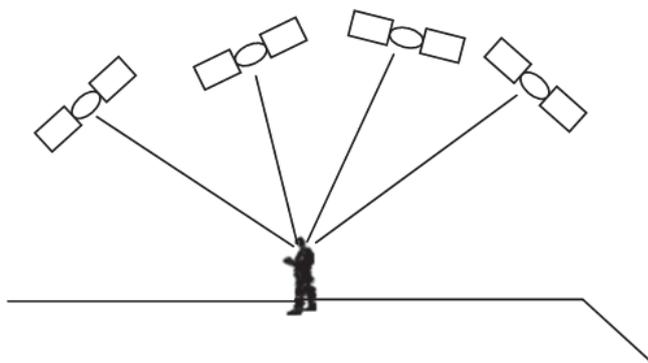


Рис. 5. Определение местоположения с помощью ИСЗ

Поскольку координаты спутников известны и определены расстояния до спутников, то координаты точки на земной поверхности рассчитываются путем решения пространственной линейной засечки.

Так как при обработке наблюдений спутников приходится учитывать параметр «время», то для однозначного решения засечки требуется наблюдать минимум 4 спутника, расположенных примерно через 90° по азимуту и под углом наклона 40° – 60° к горизонту.

Раздел 2

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

Лекция 2. ОСОБЕННОСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ СПУТНИКОВЫМИ МЕТОДАМИ

2.1. Основные преимущества геодезических измерений спутниковыми методами

Специфика традиционных геодезических измерений, проводимых на земной поверхности, заключается прежде всего в высоких требованиях к точности измерений, осуществляемых в среде с постоянно меняющимися параметрами, к которой могут быть отнесены приземные слои атмосферы. При этом требования к повышению точности все время растут, что обуславливает необходимость постоянного совершенствования технических средств и методов.

Большинство созданных к настоящему времени высокоточных геодезических инструментов (теодолитов, тахеометров и др.) достигли достаточно высокого совершенства как за счет удачных технических решений, так и за счет хорошо продуманной технологии их использования. Однако многие из приборов базируются на использовании оптического диапазона электромагнитных волн, что породило целый ряд существенных недостатков:

- необходимость обеспечения прямой и оптической видимости между смежными пунктами;
- трудности организации круглосуточных измерений;
- сложность организации мониторингов для отслеживания различного рода деформационных процессов;
- трудности проведения геодезических измерений в динамике.

Другой существенной особенностью традиционных геодезических измерений является весьма широкое распространение угловых

измерений, которым во многих случаях отдаются предпочтения перед линейными измерениями (прежде всего, по экономическим соображениям). Хотя по своим потенциальным возможностям современные высокоточные светодальномеры обеспечивают более высокий уровень точности.

Еще одна специфика традиционных наземных геодезических методов состоит в необходимости проведения измерений в высокодинамичных приземных слоях атмосферы. Это существенно осложняет процедуру выполнения измерений и снижает потенциальный уровень точности.

Альтернативный подход к выполнению геодезических измерений состоит в использовании пространственных методов измерений с применением в качестве опорных точек мгновенных положений искусственных спутников Земли. При выборе наиболее подходящего диапазона электромагнитных волн, применяемого при выполнении измерений, приходится учитывать тот факт, что создаваемая спутниковая система должна быть всепогодной, т. е. обеспечивать выполнение измерений при любых условиях погоды.

Это требование является вполне обоснованным как для навигации, так и для геодезии. Кроме того, для одновременного обслуживания неограниченного числа потребителей, находящихся в пределах всего земного шара, с помощью весьма ограниченного количества спутников необходимо, чтобы диаграмма направленности установленной на спутнике излучающей системы охватывала всю видимую со спутника земную поверхность.

Обобщение многочисленных, проведенных к настоящему времени исследований свидетельствует о том, что наиболее полно перечисленным выше требованиям отвечает ультракоротковолновый (в частности, дециметровый) диапазон радиоволн. Таким образом, по сравнению с традиционными геодезическими методами спутниковые методы измерений обладают следующими преимуществами:

- исключение необходимости взаимной видимости между определяемыми пунктами;
- расстояния между определяемыми пунктами могут составлять десятки километров;
- возможны наблюдения в любую погоду, как в дневное, так и в ночное время;

- измерения и обработка результатов почти полностью автоматизированы;
- возможно получение координат геодезических пунктов в реальном масштабе времени и др.

2.2. Двухсторонний и односторонний методы дальномерных измерений

При определении длин линий на местности наземными световыми и радиодальномерами широкое распространение получил двухсторонний метод измерения расстояний.

Применительно к спутниковой геодезии двухсторонние методы также используются.

Основной измеряемой величиной в этом методе является время t , затрачиваемое сигналом на прохождение удвоенного расстояния (в прямом и обратном направлениях).

Если скорость распространения такого сигнала c известна, то измеряемое расстояние D определяют по формуле

$$D = \frac{ct}{2}. \quad (1)$$

В этом методе, называемом *двухсторонним*, время излучения и приема сигнала регистрируют по одним и тем же часам. Поэтому проблемы синхронизации часов не возникает.

В спутниковых технологиях находят применение *односторонние (беззапросные) методы* дальномерных измерений, основная особенность которых состоит в том, что передающее устройство размещают на спутнике, а приемное – на наземном пункте. При этом сигнал проходит измеряемое расстояние только в одном направлении – от спутника до приемника. Если в этом случае момент излучения и момент приема сигнала зафиксированы точно синхронизированными часами, расположенными на спутнике и на наземном пункте, то измеряемое расстояние может быть определено по формуле

$$\rho = ct, \quad (2)$$

где t – время прохождения сигналом расстояния от приемника до спутника.

Вследствие несинхронности хода часов на спутнике и в приемнике формула (2) нуждается в уточнении.

Пусть спутник излучил сигнал в момент t_0 , а на приемник этот сигнал пришел в момент $t_0 + t$. Для определения интервала времени t необходимо, чтобы моменты излучения и приема сигналов были зафиксированы *точно синхронизированными часами*, установленными на спутнике и в приемнике. Тогда задача может быть решена следующим образом. Сигнал спутника каждые несколько секунд передает *временную метку*, в которой записан момент ее ухода со спутника, определенный по его часам. Приемник *захватывает* сигнал спутника, считывает временную метку и фиксирует момент ее прихода по своим часам. Разность между моментами ухода метки со спутника и прихода ее на антенну приемника представляет собой искомый интервал времени t , подлежащий измерению. Для этой цели часы на спутнике и в приемнике должны идти *абсолютно синхронно*.

На самом деле этого не наблюдается, поэтому между показаниями этих часов в каждый момент времени имеет место ненулевая разность – $\Delta t_{\text{ч}}$. Данная величина искажает результаты определения дальности. По этой причине полученную изложенным методом дальность называют *псевдодальностью*.

Для установления связи псевдодальности D с геометрической дальностью ρ обратимся к формуле (2). Подставив в нее вместо истинного времени t фактически измеряемое $t + \Delta t_{\text{ч}}$, получим выражение для псевдодальности:

$$D = c(t + \Delta t_{\text{ч}}) = \rho + c\Delta t_{\text{ч}}, \quad (3)$$

где c – скорость распространения сигнала в вакууме;

ρ – геометрическая дальность;

$c\Delta t_{\text{ч}}$ – некоторая линейная величина, отличающая истинную дальность от псевдодальности.

Вследствие того что сигнал от спутника проходит путь не в вакууме, а в атмосфере, возникает *задержка сигнала в атмосфере*:

$$\Delta t_{\text{атм}} = t - t_{\text{вак}},$$

где $t_{\text{вак}}$ – время распространения сигнала в вакууме и, как следствие, атмосферная поправка $c\Delta t_{\text{атм}}$.

С учетом атмосферной поправки $c\Delta t_{\text{атм}}$ и величины $c\Delta t_{\text{ч}}$ окончательно выражение для псевдодальности будет иметь следующий вид:

$$P = \rho + c\Delta t_{\text{ч}} + c\Delta t_{\text{атм}}. \quad (4)$$

2.3. Принципы измерения длин линий, используемые в спутниковой геодезии

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 развиваются и методы, основанные на использовании кодированных сигналов, для которых характерны свои специфические особенности.

Импульсный метод – это метод прямого измерения времени распространения электромагнитных волн. Импульсный дальномер содержит измеритель временных интервалов, запускаемый опорным импульсом от передатчика и останавливаемый импульсом, пришедшим с дистанции.

К положительным моментам этого способа определения длин линий может быть отнесена возможность быстрого и однозначного нахождения 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 самому существенному недостатку, ограничивающему широкое его использование в геодезии.

При разработке глобальных спутниковых систем местоопределения, которая проводилась военными ведомствами в целях навигационного обеспечения судов военно-морского флота, возникла необходимость применения специализированных методов координатных определений, которые были бы доступны только санкционированным пользователям. Такая концепция привела к разработке способа дальномерных измерений, основанного на использовании *кодированных сигналов*.

При *кодовых измерениях* сигнал каждого спутника содержит его *эфемериды* – данные о его местоположении, позволяющие

вычислить координаты спутника в земной системе координат, а также временную метку (время генерации сигнала – с использованием высокоточных атомных часов).

Приемник, принимая сигнал от спутника, идентифицирует спутник по коду его сигнала, считывает временную метку и определяет время прохождения сигнала от спутника до приемника. Это позволяет вычислить дальность от приемника до спутника.

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).

Кодовые измерения применяются при решении задач навигации. В геодезических работах кодовые измерения играют вспомогательную роль – служат для определения приближенных координат пунктов.

При *фазовых измерениях* точные геодезические измерения выполняют на несущих частотах L1 и L2 (в одночастотных приемниках – только на частоте L1). При этом измеряют разности фаз между колебаниями, принятыми от спутника, и колебаниями такой же частоты, выработанными в приемнике.

Фазовые измерения основаны на определении целого числа радиоволн N , укладывающихся на расстоянии между спутником и приемником, и измерении разности фаз ΔN . Тогда расстояние между спутником и приемником определяется по формуле

$$D = (N + \Delta N)\lambda + \delta R, \quad (5)$$

где λ – длина волны несущей частоты L1 или L2;

δR – суммарная поправка, учитывающая влияние тропосферы, ионосферы, ошибок эфемерид спутника, несовпадения хода часов спутника и приемника, инструментальных (аппаратных) погрешностей и др.

Сложность использования уравнения (5) заключается в том, что целое число радиоволн N не может быть измерено и определяется в процессе *разрешения неоднозначности*.

В спутниковых системах расстояния между установленными на земной поверхности приемниками 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, искомая величина N достигает сотни миллионов. Причем при ее определении нельзя ошибиться даже на единицу, так как это приводит к возникновению грубых ошибок, и такие результаты приходится браковать. С учетом этих обстоятельств проблема разрешения неоднозначности при фазовых спутниковых измерениях превращается в весьма ответственную и сложную процедуру.

При использовании двухчастотных приемников разрешение неоднозначности выполняется автоматически, для одночастотных приемников эта операция выполняется в процессе постобработки

Лекция 3. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ГЛОБАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

3.1. Составные части системы спутникового позиционирования

Спутниковые системы позиционирования строятся на основе использования односторонних методов измерения расстояний.

При реализации такого метода спутниковая радиодальномерная система распадается на две основные составные части:

- устанавливаемое на спутнике передающее устройство;
- приемно-вычислительный комплекс, находящийся в распоряжении наземного потребителя.

Вместе с тем для поддержания постоянной работоспособности такой спутниковой системы без ухудшения основных ее технических показателей возникает необходимость в использовании служебной подсистемы управления и контроля. С учетом вышеизложенного современные спутниковые системы позиционирования типа GPS включают в себя три основные составные части, получившие название секторов:

- 1) космический сектор;
- 2) сектор управления и контроля;
- 3) сектор потребителя.

Общее представление о взаимодействии перечисленных секторов позволяет получить схема, приведенная на рис. 6.

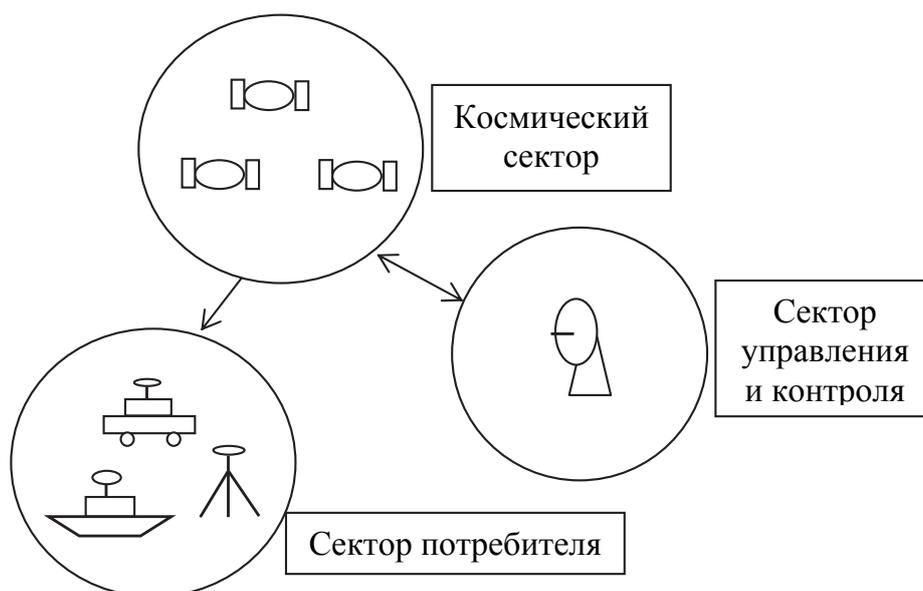


Рис. 6. Схема взаимодействия трех основных секторов системы GPS

Космический сектор включает в себя набор входящих в систему позиционирования спутников.

Сектор управления и контроля состоит из центральной (ведущей) станции и нескольких разнесенных на большие расстояния станций слежения и загрузки.

Сектор потребителя объединяет в себе всю совокупность широко распространенной аппаратуры пользователей, с помощью которой осуществляется прием радиосигналов от спутников.

3.2. Космический сектор

Точность местоопределения и стабильность функционирования GNSS в большой степени зависит от взаимного орбитального расположения спутников и параметров их сигналов. Как правило, требуется, чтобы в зоне видимости потребителя находились не менее 3–5 космических аппаратов (КА).

На практике орбитальная структура строится таким образом, что для большинства потребителей постоянно видны более 6 КА и потребитель имеет возможность выбирать оптимальное созвездие по определенному алгоритму, заложенному в вычислитель приемника.

Кроме действующих КА, космический сектор имеет в своем составе несколько *резервных спутников*, которые могут быть опе-

ративно введены для замены вышедших из строя либо для увеличения степени покрытия определенного региона.

Основное назначение космического сектора – формирование и излучение сигналов, необходимых для решения потребителем задачи позиционирования и контроля исправности самого КА.

В состав стандартного КА входят:

- радиопередающее оборудование для передачи навигационного сигнала и телеметрической информации;
- радиоприемное оборудование для приема команд наземного комплекса управления;
- антенны;
- бортовая ЭВМ;
- бортовой эталон времени и частоты;
- солнечные батареи;
- аккумуляторные батареи;
- системы ориентации на орбите и т. д.

Излучаемые КА сигналы содержат *дальномерную* и *служебную* составляющие.

Дальномерная составляющая используется потребителями непосредственно для определения навигационных параметров – дальности до КА, вектора скорости потребителя, его пространственной ориентации и т. п.

Служебная составляющая содержит информацию о координатах спутников, шкале времени, векторах скоростей, исправности и т. д.

Дальномерная составляющая содержит компоненты *стандартной* и *высокой точности*.

Стандартная точность измерений доступна всем потребителям, а *высокая* – только авторизованным, т. е. имеющим разрешение военных контролирующих органов.

В системе GPS для КА основой является высокостабильный опорный генератор, работающий на частоте $f_0 = 10,23$ МГц.

Сигналы, называемые несущими частотами и обозначаемые как $L1$ и $L2$, формируются умножением основной частоты опорного генератора $f_0 = 10,23$ МГц на некоторые константы и используются для точных измерений дальностей фазовым методом, причем

$$L1 = f_0 f_{L1} = 10,23 \cdot 154 = 1575,42 \text{ МГц}, \lambda = 19,03 \text{ см};$$

$$L2 = f_0 f_{L2} = 10,23 \cdot 120 = 1227,60 \text{ МГц}, \lambda = 24,45 \text{ см}.$$

Разграничение доступа достигается путем кодирования сигналов высокой точности.

Код *C/A* разработан для гражданских целей и трактуется как грубый. Он передается только на частоте $L1$ каждую миллисекунду, что соответствует длине тактовой волны 293 м. Короткая длительность *C/A* кода позволяет легко захватить сигнал спутника на частоте $L1$.

Код *P* трактуется как точный и предназначен для военных приложений. Передается на частотах $L1$ и $L2$. Длина тактовой волны 29,3 м. Длительность передачи *P*-кода составляет 266,4 сут. Он предназначен для защиты от несанкционированного доступа. Общая длительность *P*-кода разбита на недельные отрезки, распределенные по всем спутникам системы, т. е. *P*-код каждого спутника меняется через неделю.

В мае 2010 г. запущен спутник GPS *IIIF*. В результате активирована передача сигнала на частоте $L5 = 1176,45$ МГц. Сигнал $L5$ нового спутника GPS *IIIF* показывает весьма высокую стабильность и занимает промежуточное положение между сигналами $L1$ и $L2$ (рис. 7).



Рис. 7. GPS-спутник *IIIF*

В системе ГЛОНАСС спутники распределены по трем орбитам и расположены на расстоянии 19100 км от поверхности эллипсоида (рис. 8).



Рис. 8. Спутник ГЛОНАСС-М

Для формирования сигналов $L1$ и $L2$ используется установленный на спутнике эталонный генератор основной частоты $f_0 = 5,11$ МГц. Причем значения несущих частот связаны с основной частотой f_0 и номером спутника k следующими зависимостями:

$$L1 = f_0 f_{L1} + 0,5625k, \quad \lambda = 18,7 \text{ см};$$

$$L2 = f_0 f_{L2} + 0,4375k, \quad \lambda = 24,1 \text{ см}.$$

В системе ГЛОНАСС сигнал $L1$ модулируется кодами ВТ (высокой точности) и СТ (средней точности), а сигнал $L2$ – только кодом ВТ.

Длина тактовой волны кода СТ равна 587 м, а кода ВТ – 58,7 м.

Состав спутниковых группировок ГЛОНАСС и GPS по состоянию на 10.01.2018 г. приведен в табл. 1.

Таблица 1

Состав спутниковой группировки ГЛОНАСС и GPS

Количество спутников	ГЛОНАСС	GPS
Всего в составе	25 КА	32 КА
Используются по целевому назначению	24 КА	31 КА
На этапе ввода в систему	–	–
Временно выведены на техобслуживание	–	1 КА
На этапе летных испытаний	1 КА	–

Группировка ГЛОНАСС состоит из 25 КА, один из которых находится на этапе летных испытаний. В системе GPS 32 КА, причем один из спутников временно выведен на техобслуживание.

3.3. Сектор управления и контроля

Для поддержания постоянной работоспособности всего космического сектора и систематического обновления передаваемой потребителю информации в современных GNSS предусматривается специальный постоянно действующий сектор, получивший название *сектора управления и контроля*.

Данный сектор призван выполнять следующие функции:

- осуществлять непрерывное отслеживание всей передаваемой спутниками информации;
- производить обобщение и анализ такой информации с целью своевременной корректировки всех используемых при дальнейшей обработке показателей;

- на основе выполняемого анализа предсказывать эфемериды наблюдаемых спутников и передаваемое со спутников потребителям точное время;
- через строго определенные интервалы времени формировать обновленные навигационные сообщения и передавать их по радиоканалу на соответствующие спутники;
- выявлять неисправности в работе спутников и принимать меры по их устранению;
- осуществлять корректировку орбит спутников не только за счет введения соответствующих поправок, но и посредством дистанционного управления находящимся на борту спутника реактивным двигателем.

Реализация перечисленных функций базируется на четком взаимодействии входящих в этот сектор станций различного назначения: *станции слежения, ведущая станция и загружающие станции.*

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

Пять *станций слежения* осуществляют круглосуточные отслеживания спутников. Они равномерно распределены по всему земному шару (рис. 9).

Отслеживание спутниковых сигналов осуществляется с помощью двухчастотных специализированных приемников, оборудованных атомными часами. Координаты этих станций известны с высокой степенью точности.



Рис. 9. Расположение станций слежения в системе GPS

Рассматриваемые станции слежения работают полностью в автоматическом режиме, а их управление осуществляется с ведущей станции. Определение расстояний до спутников производится на основе использования кодовых сигналов. При этом псевдодальности на станциях слежения измеряются с точностью около 2,5 м каждые полторы секунды. На основе таких измерений уточняются текущие значения эфемерид спутников и осуществляется их предсказание на ближайшее будущее.

Ведущая станция управления, находящаяся в Колорадо-Спрингс, является рабочим центром всей системы GPS.

Операции управления целиком закреплены за этой станцией. Она непрерывно собирает информацию от всех перечисленных выше станций слежения. Наряду с этим осуществляется формирование навигационного сообщения с параметрами орбиты для индивидуального спутника и с поправками к показаниям его часов, а также альманаха.

Три раза в сутки навигационное сообщение передается на спутники с помощью *загружающих станций*. Через станции загрузки ведущая станция может корректировать орбиты спутников как за счет введения соответствующих поправок, так и с помощью управления находящимся на борту спутника реактивным двигателем. Кроме того, данная станция может управлять режимом работы активных резервных спутников, переводя их в необходимых случаях в рабочий режим.

Три наземные загружающие станции расположены на атоллах Диего-Гарсиа и Кваджалейн, а также на острове Вознесения.

Управление орбитальной группировкой ГЛОНАСС осуществляет наземный комплекс управления (рис. 10).



Рис. 10. Станции слежения и управления системой ГЛОНАСС

Этот комплекс включает в себя *Центр управления системой* (г. Краснознаменск, Московская обл.) и *сеть станций слежения и управления*, рассредоточенных по всей территории России.

3.4. Сектор потребителя

Среди основных составных частей глобальной системы позиционирования GPS наибольший интерес для пользователей представляет *приемно-вычислительный комплекс*, составляющий основу сектора потребителя.

Этот сектор объединяет в себе все компоненты, позволяющие потребителю получать интересующую его информацию о местонахождении пункта наблюдений, показаниях точного времени, а применительно к движущимся объектам – скорости и направлении их перемещения.

Специфика работы приемно-вычислительного комплекса существенно зависит от той категории потребителей, на которые принято их подразделять. В частности эксплуатируемая система GPS ориентирована на ее применение военными и гражданскими пользователями.

Характерная особенность работы аппаратуры, предназначенной для военных пользователей, состоит в том, что эта аппаратура должна работать оперативно и надежно в условиях проведения военных действий, обеспечивая при этом требуемую точность местонахождения не только неподвижных пунктов наблюдения, но и движущихся объектов. Применительно к таким условиям принимаются все меры для того, чтобы использование рассматриваемой системы позиционирования было недоступным для потенциального противника.

Гражданские пользователи GPS, в свою очередь, подразделяются на две основные подгруппы. Первая из них ориентирована на использование GPS в навигации, а вторая – на геодезическое использование.

Любой спутниковый приемник в рабочем состоянии принимает и обрабатывает сигналы спутников, расшифровывает навигационные сообщения и преобразует полученную информацию в значения координат, скорости и времени.

В нем можно выделить несколько устройств:

- антенну с соответствующей электроникой;
- радиочастотный блок;

- электронную систему слежения;
- навигационный микропроцессор;
- блок питания.

Антенна приемника предназначена для приема радиоволн.

Радиочастотный блок используется для преобразования принятой антенной радиочастоты в более низкую (промежуточную) частоту, более эффективную для использования другими блоками приемника.

Система слежения осуществляет выделение сигналов определенных спутников, «захватывает» изменяющийся по частоте или времени сигнал, принимает соответствующие навигационные сообщения, расшифровывает их и выполняет необходимые измерения.

Микропроцессор приемника предназначен для обработки преобразованного в цифровую форму сигнала и поддержки системы слежения.

Спутниковые приемники можно классифицировать:

– по *спутниковым системам*. Подавляющее большинство приемников принимают сигналы только одной системы (GPS, ГЛОНАСС), некоторые – двух (GPS, ГЛОНАСС) или даже трех (GPS, ГЛОНАСС и Galileo) систем;

– *числу принимаемых частот* (*одночастотные*, принимающие сигналы только на частоте $L1$ и *двухчастотные*, способные принимать сигналы на частотах $L1$ и $L2$).

3.5. Дифференциальная подсистема

Системы спутникового позиционирования позволяют определить координаты потребителя с точностью порядка 10–15 м, но в ряде случаев требуется более высокая точность. К таким случаям относятся геодезические измерения и картография, строительные работы и т. д.

Добиться существенного увеличения точности определения координат (до единиц и долей сантиметра) удастся при помощи функционального дополнения к GNSS, называемого *дифференциальной подсистемой*.

Основу дифференциальной подсистемы составляет наземная контрольно-корректирующая станция (ККС), координаты которой известны и определены с большой точностью.

Потребитель должен иметь соответствующий приемник, оснащенный модулем для приема радиосигналов ККС. Как правило, расстояние между потребителем и наземной ККС пренебрежимо мало по сравнению с расстоянием до КА. Поэтому с большой долей приближения можно считать, что на расстояниях до 200–300 км потребитель и ККС находятся в идентичном по всем параметрам навигационном поле.

Так, при расстоянии между ККС и потребителем, составляющем 100 км, погрешность определения координат потребителя, вызванная непостоянством ошибок псевдодальности в пространстве, составляет единицы сантиметров, а при расстоянии до ККС порядка 1000 км – десятки сантиметров. На практике стараются располагать ККС не далее 500 км от целевых потребителей.

Принято различать *широкозонные, региональные и локальные дифференциальные подсистемы*, хотя такое деление зачастую является условным.

Широкозонные дифференциальные подсистемы (ШДПС). Основой широкозонной подсистемы является сеть специальных широкозонных ККС, информация о поправках с которых передается на главную станцию.

После дополнительной проверки на главной станции вырабатывается комплекс общих поправок и сигналов целостности. Выработанные сигналы передаются, как правило, на геостационарные спутники, с которых транслируются на приемники потребителей.

Примером развитой ШДПС может являться сервис, предоставляемый компанией “OmniSTAR”. В данном случае поправки транслируются на всю поверхность земного шара через созвездие геостационарных спутников. Сервис является платным. Для клиента, заявившего о приблизительной зоне своего местонахождения, формируется комплекс индивидуальных поправок, именуемый *виртуальной базовой станцией (VBS)*. Могут быть сформированы VBS с континентальным, региональным и локальным охватом.

Применение геостационарных спутников позволяет обеспечить радиус рабочей зоны порядка 5000–6000 км. Достаточно часто ККС, входящие в состав широкозонной подсистемы, обеспечивают и локальный сервис с применением дополнительных каналов передачи данных.

Существуют бесплатные американская система WAAS, европейская система EGNOS, японская система MSAS, основанные на

нескольких передающих коррекции геостационарных спутниках, позволяющих получить высокую точность (до 30 см).

Региональные дифференциальные подсистемы (РДПС) имеют диаметр зоны обслуживания от 400 до 2000 км и предназначены для навигационного обеспечения отдельных регионов континента или моря (океана). В состав РДПС входят одна или несколько ККС, а также аппаратура контроля целостности и средства передачи данных потребителю. Эти данные вырабатываются либо на главной станции, либо непосредственно на ККС.

Локальные дифференциальные подсистемы (ЛДПС) функционируют при дальностях до потребителя в диапазоне от 50 до 200 км и обычно имеют в своем составе одну ККС.

В качестве аппаратуры передачи данных ЛДПС часто применяют имеющиеся радиомаяки, уплотняя их сигнал и включая в него данные от ЛДПС. Такое решение обосновано экономически, но сигнал радиомаяков, часто работающих в средневолновом диапазоне, весьма подвержен помехам и не позволяет передавать данные с большой скоростью.

Локальные дифференциальные подсистемы обычно разделяют по способу их применения на *морские, авиационные и геодезические*.

Морские ЛДПС предназначены для обеспечения мореплавания в проливах, каналах, акваториях портов и гаваней.

Авиационные ЛДПС обеспечивают точный заход на посадку и посадку воздушного судна.

Геодезические ЛДПС используются при проведении исследований движения земной коры, землемерных, крупных строительных и иных специальных работ.

Раздел 3

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ВЫЧИСЛЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В СИСТЕМАХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Лекция 4. МЕТОДЫ СПУТНИКОВОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

4.1. Абсолютные методы спутниковых измерений

Методы спутникового позиционирования в зависимости от числа используемых приемников и способа обработки результатов делят на *абсолютные* и *относительные*.

Абсолютное позиционирование предполагает определение геоцентрических координат точки установки спутникового приемника.

Может быть выполнено способами *автономных* и *дифференциальных* определений.

Автономные определения координат (рис. 11) используют следующую зависимость между координатами определяемой точки (R_A) наблюдаемого с нее спутника (R_S), псевдодальностью (r_A) и ее искажением (δ_r):

$$R_A = R_S - r_A + \delta_r.$$

Вектор R_A вычисляется из решения четырех нормальных уравнений, связывающих поправки к приближенным координатам определяемой точки и к часам приемника. Оценка их точности выполняется по известной формуле:

$$\sigma_i = \mu \sqrt{Q_i},$$

где σ_i – средняя квадратическая погрешность определяемого неизвестного;

Q_i – элемент обратной матрицы;

μ – средняя квадратическая погрешность единицы веса.

Отношения σ / μ называют *геометрическим фактором* (ГФ).

ГФ представляет собой количественную оценку влияния схемы расположения наблюдаемых спутников. Он устанавливается по эфемеридам этих спутников на момент наблюдений.

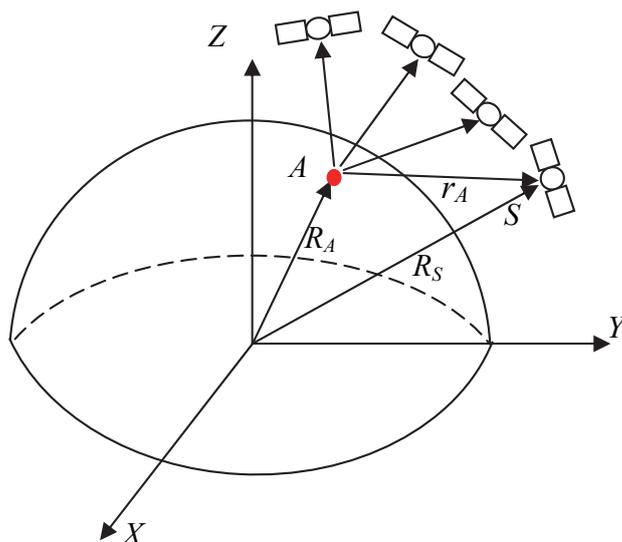


Рис. 11. Автономное определение координат

Точность автономных определений зависит от геометрического фактора и с учетом искажений, вносимых режимом селективного доступа, составляет 30–40 м. При отключении режима селективного доступа средняя квадратическая погрешность однократного определения снижается до 7,5 м.

Дифференциальные определения основаны на использовании синхронных измерений несколькими приемниками, часть которых размещается на пунктах с известными координатами и называется *базовыми*, а другая часть – на определяемых пунктах. Спутниковые измерения на базовых станциях выполняются в непрерывном режиме и позволяют определить для некоторой территории (зоны) дифференциальные поправки к измеренным фазовым дальностям (PDGPS) или найденным по ним координатам (DGPS).

Базовые пункты могут объединяться в так называемые дифференциальные подсистемы (ДПС), которые условно делятся на следующие группы:

– *локальные ДПС*, действующие в радиусе от 50 до 200 км и обеспечивающие точность на уровне от 2,0 до 4,5 м;

- региональные ДПС, действующие в радиусе от 400 до 2000 км;
- глобальные, или широкозонные ДПС, действующие в радиусе до 5000 км (например, EGNOS, WAAS, MSAS, OmniSTAR и др.).

4.2. Относительные методы спутниковых измерений

Относительное позиционирование по праву считается наиболее точным.

Как и в дифференциальном способе, в данном методе используют два синхронно работающих приемника (рис. 12). Один из приемников установлен на опорном пункте ОП-1 и называется базовым или референчным (*base or reference station*), а второй размещается над определяемой точкой ОП-2 и называется ровером (*rover*).

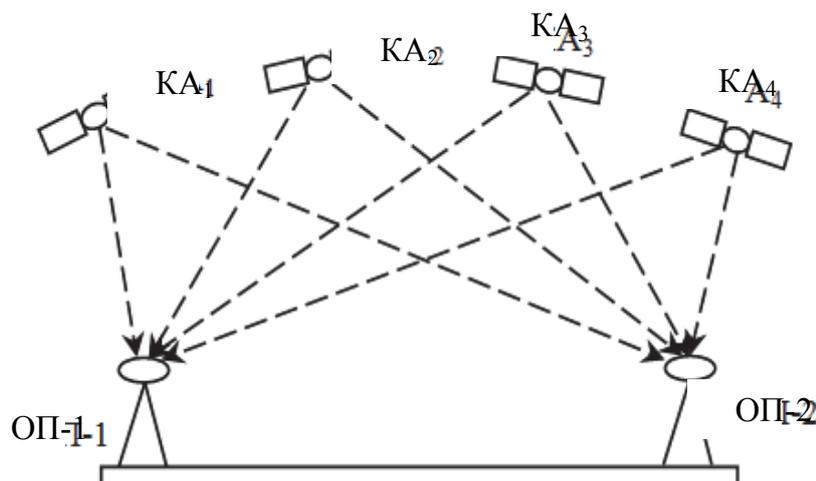


Рис. 12. Принцип относительного позиционирования

При обработке результатов измерений формируются пространственные векторы, определяющие положение ровера относительно базового пункта.

В практике используют несколько режимов относительных определений, которые можно разделить на *статические* (когда оба пункта неподвижны) и *кинематические* (когда ровер перемещается).

Статический режим – наиболее точный и требующий больших (не менее 1,5 ч) затрат времени на наблюдения. Его используют для создания точных геодезических сетей.

Значительная продолжительность наблюдений необходима для получения результатов измерений с сантиметровой и даже миллиметровой точностью. При этом дополнительное время (не менее полчаса на каждый пункт) необходимо на обработку результатов измерений в камеральных условиях – *постобработку*.

Быстрая статика – статический режим, при котором время наблюдений на пункте сокращается до 10–15 мин. Время наблюдений зависит от расстояния между пунктами, количества спутников и геометрии созвездия спутников.

Различают три режима кинематической съемки: *stop-and-go*, *on the fly* и *RTK*.

При выполнении кинематической съемки в режиме *stop-and-go* (*стой–иди*) используются два и более приемников. По крайней мере, один приемник является опорным и остается неподвижным в течение съемки. Все базисные линии на протяжении сессии последовательно определяются относительно опорного приемника. Остальные приемники перемещаются, производя наблюдения на пунктах, координаты которых неизвестны. При этом двигаться нужно так, чтобы на антенну поступали сигналы не менее чем от четырех одних и тех же спутников.

Кинематический режим *on the fly* (*на лету*) используют в том случае, когда есть уверенность, что прием сигналов нужного числа спутников не прервется в течение 20–30 мин. За это время при непрерывной работе приемника он накопит достаточно информации для дальнейшей постобработки.

Кинематика в реальном времени *RTK* (*Real Time Kinematics*). Этот метод является дальнейшим развитием кинематического режима. Сущность его состоит в том, что измерения и обработка производятся одновременно. Для этой цели между опорным и роверным (мобильным) приемниками организуется *цифровой радиоканал* (в оба приемника вводятся соответствующие радиомодемы). По этому каналу роверный приемник получает от опорного всю необходимую информацию. Тут же ее обрабатывает совместно с результатами своих измерений и определяет свои координаты с сантиметровой точностью. При этом не требуется никакой постобработки.

Точностные характеристики кинематических режимов режимов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Точностные характеристики кинематических режимов

Режим	Характеристики	Точность, мм
Статика	Наблюдения в течение от 40 мин до нескольких часов, базисные линии > 10 км	$\pm (0,1 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot D)$
Быстрая статика	Малое время наблюдения (от 5 до 30 мин), короткие базисные линии (менее 10 км)	$\pm (5 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot D)$
Кинематика	Определение положения точек при перемещении ровера	$\pm (10-20 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot D)$
Стой – иди	1-минутные остановки на определяемых пунктах	$\pm (5 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot D)$
OTF (на лету)	Определение координат центров фотографирования в полете 2-частотным приемником	100–150
RTK	Постоянная связь с базовой станцией по радиомодему и определение координат в реальном масштабе времени	$\pm (5 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot D)$

Как видно из табл. 2, наибольшая точность результатов достигается при использовании статического режима съемки, наименьшая кинематического режима OTF (на лету).

Раздел 4

СИСТЕМЫ КООРДИНАТ И ВРЕМЕНИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Лекция 5. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМАХ КООРДИНАТ И ВРЕМЕНИ

5.1. Определения координатных систем

Необходимость в использовании различных координатных систем в спутниковых технологиях становится понятной, если учесть, что для вычисления орбит спутников, прогнозирования их движения применяются одни системы координат (СК), для определения координат пунктов в процессе наблюдений – другие системы, а для использования полученных координат при решении различных прикладных задач требуются совершенно иные системы.

Системы координат, фиксированные в пространстве, называют *инерциальными*. Их оси не изменяют своего направления относительно сверхдалеких внегалактических объектов. Однако в такой системе положение наблюдателя и потенциал земного тяготения были бы функциями времени. Поэтому для их описания применяют системы координат, жестко связанные с Землей.

Системы, вращающиеся вместе с Землей, называют *земными*, в то время как инерциальные системы, не участвующие в суточном вращении, обычно называют *небесными* или *звездными*.

Системы, начало которых совпадает с центром масс Земли, называют *геоцентрическими*. Земные геоцентрические системы называют также *общеземными* или *глобальными*.

Начальный пункт геоцентрической системы расположен в центре масс Земли с ориентацией общего земного эллипсоида вдоль главных осей Земли (рис. 13).

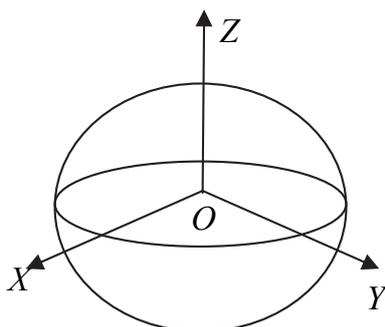


Рис. 13. Геоцентрическая система координат

Ось OZ направлена вдоль оси вращения Земли в сторону Северного полюса. Ось OX лежит на пересечении плоскостей экватора и Гринвичского меридиана. Ось OY расположена в плоскости экватора под углом 90° к востоку от оси OX и завершает правостороннюю ортогональную систему координат с началом в центре масс Земли.

Наряду с геоцентрическими системами используются также *локальные референциальные* системы. Их начало находится в центре некоторого референц-эллипсоида, наилучшим образом подходящего к территории страны или материка. Несовпадение центров локальных референц-эллипсоидов с геоцентром может составлять несколько сотен метров.

5.2. Система координат ПЗ-90

Глобальные системы координат широко используются в геодезии, картографии и навигации. Они обеспечивают взаимную привязку различных локальных и региональных систем отсчета (геодезических дат). Замена множества локальных систем отсчета (СО) единой глобальной СО существенно упростила бы практическое использование карт, снимков и другой геодезической продукции.

Реализация общеземных систем координат (ОЗСК) – это сложная научная задача. Реализацией ОЗСК для системы GPS является Мировая геодезическая система WGS-84, разработанная геодезистами Министерства обороны США. В российской системе ГЛОНАСС используется система координат ПЗ-90. Наиболее точная реализация ОЗСК – это Международная земная система отсчета ITRF, определяемая международным научным сообществом.

Параметры Земли 1990 г. ПЗ-90 были определены Топографической службой Вооруженных сил Российской Федерации. Входя-

щая в состав ПЗ-90 система координат иногда называется СГС-90 (Спутниковая геоцентрическая система 1990 г.).

Параметры Земли ПЗ-90 получены по результатам почти 30 млн фотографических, радиодальномерных, доплеровских, лазерных и альтиметрических измерений спутника ГеоИК с привлечением радиотехнических и лазерных измерений дальностей до спутников системы ГЛОНАСС.

Начало системы расположено в центре масс Земли. Основные параметры системы ПЗ-90 представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры ПЗ-90

Название	Год	Страна	a , км(большая полуось)	b , км (малая полуось)
ПЗ-90	1990	СССР	6 378,136	6 356,751

Спутниковая геоцентрическая система координат ПЗ-90 закреплена на территории СНГ координатами 33 опорных пунктов космической геодезической сети со средними расстояниями 1–3 тыс. км (рис. 14).

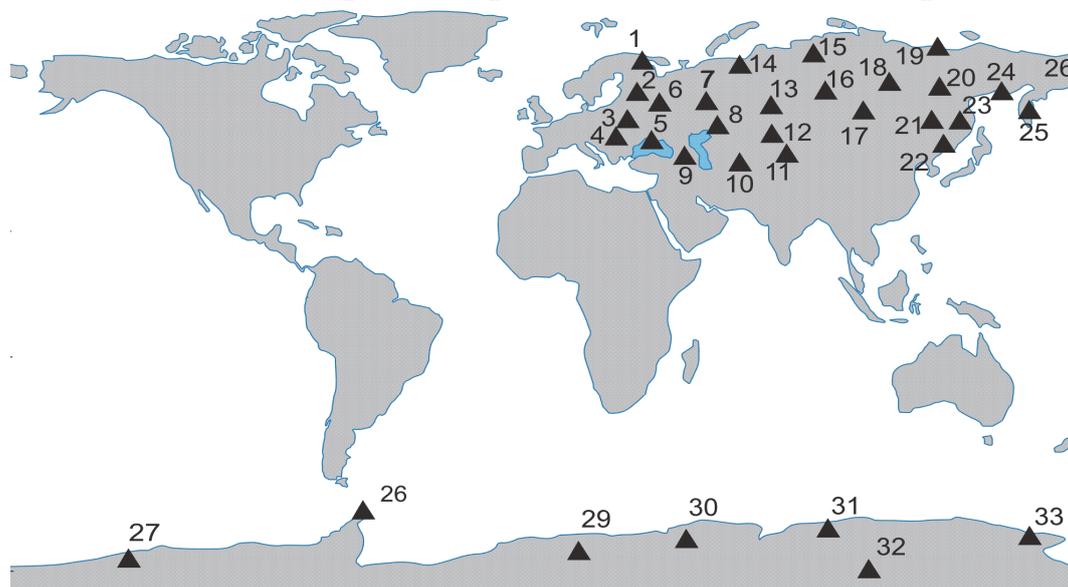


Рис. 14. Схема расположения постоянных пунктов,

закрепляющих геоцентрическую систему координат «ПЗ-90»:

- 1 – Мурманск; 2 – Пулково; 3 – Шепетовка; 4 – Черновцы; 5 – Симферополь;
 6 – Москва; 7 – Сарепул; 8 – Актюбинск; 9 – Казах; 10 – Чарджоу;
 11 – Алма-Аты; 12 – Балхаш; 13 – Омск; 14 – Воркута; 15 – Норильск;
 16 – Енисейск; 17 – Иркутск; 18 – Мирный; 19 – Тикси; 20 – Якутск;
 21 – Благовещенск; 22 – Уссурийск; 23 – Комсомольск-на-Амуре; 24 – Магадан;
 25 – Лизово; 26 – Анадырь; 27 – Русская; 28 – Беллинсгаузен; 29 – Новолазеровская;
 30 – Молодежная; 31 – Мирный; 32 – Восток; 33 – Ленинградская

Погрешности привязки СГС-90 к геоцентру по абсолютной величине не превышают 1,5 м. Для системы ПЗ-90 получены параметры связи с системами СК-42 и WGS-84.

5.3. Система координат WGS-84

WGS-84 – мировая геодезическая система отсчета 1984 г. является четвертой из серии глобальных геоцентрических систем координат, созданных Министерством обороны США.

Начальный пункт системы $OXYZ$ (рис. 13) расположен в центре масс Земли с ориентацией общего земного эллипсоида (ОЗЭ) вдоль главных осей Земли: ось OZ направлена вдоль оси вращения Земли в сторону Северного полюса, ось OX лежит на пересечении плоскостей экватора и Гринвичского меридиана. Ось OY расположена в плоскости экватора под углом 90° к востоку от оси OX и завершает правостороннюю ортогональную систему координат с началом в центре масс Земли.

Размеры земного эллипсоида имеют следующие данные: большая полуось $a = 6378\,137$ м и сжатие $\alpha = 1/298,257$.

По результатам наблюдений на постоянно действующих станциях мировой сети GPS для геодинамики, координаты пунктов которой определены в СК WGS-84, находятся эфемериды спутников GPS.

В процессе многолетних наблюдений с использованием лазерной локации спутников уточняются координаты следящих станций. Эти уточнения периодически принимаются в качестве более современных и точных реализаций СК WGS-84. В свою очередь и текущие эфемериды спутников GPS определяются в соответствующих реализациях WGS-84.

Например, *ITRF 96* – это система координат WGS-84, скорректированная на данные, накопленные к 1996 г. Таким образом, *ITRF* является совокупностью координат и скоростей перемещения станций глобальной спутниковой сети GPS для геодинамики. Эта координатная основа реализуется ежегодно по данным спутниковых наблюдений на более чем 150 станциях с точностью порядка 12 см.

Международная служба GPS для геодинамики регулярно обеспечивает *ITRF* точными эфемеридами спутников и другими необходимыми данными.

Многие государства, в частности европейские, используют данные ITRF для установления собственных национальных геодезических систем, а также для изучения движений, деформаций земной поверхности и изменений уровней морей.

5.4. Система координат 1942 г. (СК-42)

Система координат 1942 года (СК-42) была введена постановлением Совета Министров СССР в 1946 г. одновременно с введением на территории страны единой системы геодезических координат.

К началу 80-х г. XX в., когда были завершены работы по развитию геодезической сети на всей территории страны, а геодезическая служба страны получила на вооружение мощную вычислительную технику, стало возможным решение задачи уравнивания всей Государственной геодезической сети (ГГС) как единого геодезического построения. Эта задача была решена в 1991 г. общим уравниванием Астрономо-геодезической сети (АГС) в количестве более 164 тыс. пунктов.

Результаты уравнивания Государственной геодезической сети 1991 г. показали, что дальнейшее использование СК-42 не могло обеспечивать возрастающие требования к точности решения геодезических задач. Необходима была новая геодезическая сеть с высокой и практически однородной точностью координат на всей территории страны. Решение этой задачи оказалось возможным только с использованием всего комплекса имеющихся в то время высокоточных геодезических данных.

5.5. Система координат 1995 г. (СК-95)

Для повышения достоверности результатов общего уравнивания АГС 1991 г. и точности взаимного положения пунктов ГГС на больших расстояниях было принято решение о совместном уравнивании 164 тыс. пунктов АГС и всех имеющихся на тот момент высокоточных спутниковых данных. Эти данные включали 26 пунктов Космической геодезической сети (КГС), 134 пункта Доплеровской геодезической сети (ДГС) и 35 пунктов гравимет-

рической сети (ГС). Результаты завершеного в 1995 г. совместно-го уравнивания перечисленных построений положили основу системы геодезических координат 1995 г. (СК-95).

Координаты пунктов ГГС в СК-95 однородны по точности.

При установлении СК-95 были сохранены параметры эллипсоида Красовского, и лишь несколько изменены параметры ориентирования эллипсоида в теле Земли. Это позволило минимизировать расхождения координат точек в СК-42 и СК-95 таким образом, что оказалось возможным полностью сохранить изданные ранее топографические карты масштаба 1 : 10000 на территорию Европейской части страны, Средней Азии и Юга Сибири.

Систему координат 1995 г. поддерживают 72 пункта Фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) и Высокоточной геодезической сети (ВГС), в том числе на территории Республики Беларусь 1 пункт ФАГС и 9 пунктов ВГС (рис. 15). Система надежно связана с мировой геоцентрической системой ITRF, что обеспечивает возможность ее дальнейшей модернизации.

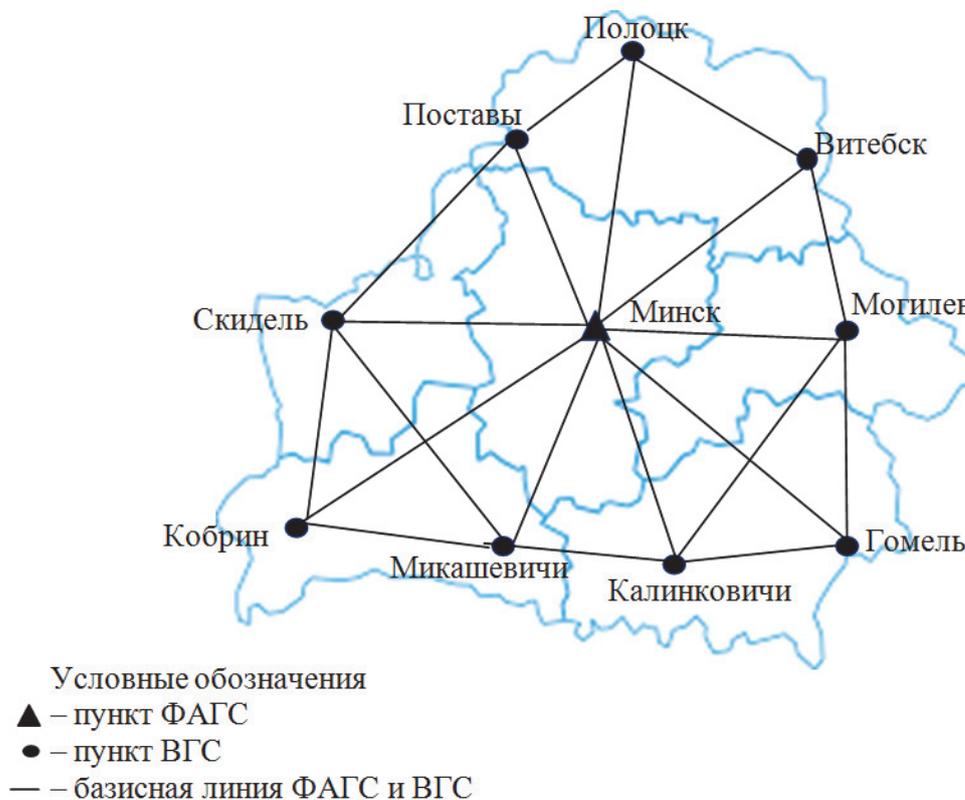


Рис. 15. Государственная геодезическая сеть Республики Беларусь

Система координат 1995 г. (СК-95) введена Постановлением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2000 г. взамен системы координат 1942 г.

В Республике Беларусь в соответствии с Указом Президента Республики Беларусь СК-95 введена с 1 января 2010 г. после завершения работ по модернизации государственной геодезической сети республики.

Введенная на территории Беларуси СК-95 основывается на точных спутниковых GPS-измерениях, результатах уравнивания сети и отличается от СК-95 России.

Аналогичные по характеру работы ранее выполнены соответствующими службами Украины и завершены вводом в действие национальной системы координат УСК-2000.

Раздел 5

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Лекция 6. ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

6.1. Классификация источников погрешностей

При отработке методов высокоточных спутниковых измерений появляется необходимость тщательного исследования влияний всех возможных источников погрешностей выполняемых измерений.

В зависимости от характера воздействия возникающие погрешности подразделяются на две основные группы:

– *систематические погрешности*, которые применительно к спутниковым измерениям получили название *смещений*;

– *погрешности случайного характера*, которые часто отождествляют с понятием «шум».

Для погрешностей первой группы разрабатываются специальные методы их учета.

Влияние второй группы удается чаще всего минимизировать за счет использования большого массива отдельных измерений.

Исходя из анализа измерительного процесса, характерного для систем GPS и ГЛОНАСС, все основные источники ошибок можно условно разбить на *три группы*:

1) погрешности, связанные с неточностью знания исходных данных, из которых определяющая роль принадлежит погрешностям знания эфемерид спутников, значения которых должны быть известны на момент измерений;

2) погрешности, обусловленные влиянием внешней среды, среди которых выделяют такие источники, как воздействие атмосферы (ионосферы и тропосферы) на результаты спутниковых измерений, а также отраженных от окружающих объектов радиосигналов (многопутность);

3) инструментальные источники погрешностей, к которым, как правило, относят неточность знания положения фазового центра антенны приемника, неучтенные временные задержки при прохождении информационных сигналов через аппаратуру, а также погрешности, связанные с работой регистрирующих устройств спутниковых приемников.

Наряду с перечисленными погрешностями приходится учитывать и отдельные факторы. В частности, к таким факторам могут быть отнесены погрешности, возникающие вследствие неоптимального взаимного расположения наблюдаемых спутников (геометрический фактор).

Кроме того, целый ряд ошибок может возникать в процессе перехода от одной координатной системы к другой. Например, от собственной системе GPS глобальной координатной системы WGS-84 к местной, интересующей потребителя координатной системе.

6.2. Источники погрешностей, связанные с неточным знанием эфемерид спутников

При нахождении интересующих потребителя координат точек на земной поверхности спутниковыми методами необходимо наряду с измерением расстояний до спутника знать также его эфемериды, которые определяют местоположение спутника на момент выполнения измерений.

Механизм неточного знания эфемерид связан прежде всего с наблюдаемыми на практике расхождениями между предсказываемой (невозмущенной) и реальной (подверженной влиянию возмущающих сил) орбитами.

К возмущающим силам относят различные факторы как гравитационного, так и негравитационного происхождения.

Проведенные к настоящему времени исследования по количественной оценке отдельных факторов на эфемериды спутника свидетельствуют о том, что наибольшее воздействие на отклонения реальной орбиты от расчетной оказывает *гравитационное поле Земли*.

Наиболее существенное влияние на неточность знания эфемерид спутников, входящих в состав систем GPS и ГЛОНАСС, среди факторов негравитационного происхождения оказывает *солнечное радиационное давление*.

6.3. Учет влияния внешней среды на результаты спутниковых измерений

Влияние внешней среды на результаты спутниковых измерений проявляется как через изменения времени прохождения радиосигналов от спутника до приемника, так и через возникновение *многопутности*, обусловленной отражениями радиосигналов от тех или иных отражающих поверхностей, расположенных в непосредственной близости от приемника.

Применительно к системам GPS и ГЛОНАСС радиосигнал большую часть своего пути проходит в вакууме, но на высотах от нескольких сотен до нескольких десятков километров от земной поверхности находится область ионизированной разреженной атмосферы, получившая название *ионосферы*.

Характерная особенность ионосферы состоит в том, что она вносит весьма существенные задержки в то время, которое затрачивает сигнал на прохождение через такую среду. Ионосферные задержки следует учитывать, если необходимо достичь точности определения координат больше 8 м.

В системе GPS для этой цели применяется постоянный мониторинг состояния ионосферы с помощью всех доступных методов, включая наблюдение за солнечной активностью, а также аппаратное измерение задержки сигнала GPS на различных станциях слежения. На основании собранных данных вычисляются коэффициенты, позволяющие потребителю смоделировать в приемоиндикаторе условия распространения сигнала в ионосфере.

Более скромная наземная инфраструктура системы ГЛОНАСС не позволяет в данное время организовать мониторинг ионосферной задержки в различных регионах Земли.

Наряду с атмосферными влияниями результаты спутниковых измерений подвержены также такому влиянию внешней среды, как *многопутность (многолучевость)*.

Применительно к спутниковым измерениям под *многопутностью* принято понимать такое распространение радиосигналов, при котором эти сигналы достигают антенны спутникового приемника не только по прямому пути, соединяющему спутник с пунктом наблюдения, но и по ломаному, образуемому за счет отражений от различного рода объектов, окружающих приемник. Например, такими объектами могут стать земная и водная по-

верхность, строения и сооружения, наружные геодезические сигналы (рис. 16).

При наличии отраженных радиосигналов, прошедших несколько иной путь повышенной протяженности, в результате радиодальномерных измерений вносится дополнительная погрешность, оказывающая влияние на конечную точность спутниковых измерений. Более того, многопутность может служить причиной существенного ослабления поступающих на вход приемника сигналов, а в отдельных случаях приводить к полному нарушению нормальной работы приемника.

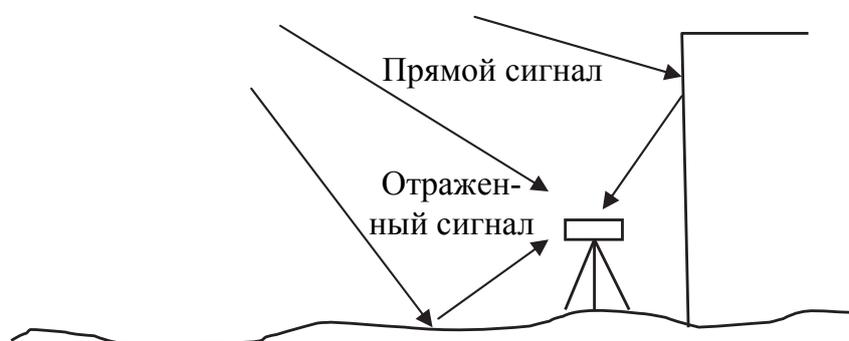


Рис. 16. Влияние многопутности

На основе проведения как теоретических, так и экспериментальных исследований разработаны следующие рекомендации по ослаблению влияния источников погрешностей, обусловленных многопутностью:

– места расположения пунктов наблюдения следует выбирать с таким расчетом, чтобы исключить наличие отражающих объектов вблизи от антенной системы спутникового приемника;

– на пунктах, подверженных влиянию отражений, следует предусматривать сеансы наблюдений повышенной протяженности с тем, чтобы получить циклическую кривую изменения ошибок из-за отражений;

– при обработке результатов наблюдений можно ограничиться принятием в расчет только тех результатов, которые соответствуют таким положениям спутников, при которых отражающие поверхности оказывают наименьшее влияние.

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

Лекция 7. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

7.1. Основные источники инструментальных погрешностей

Инструментальные источники погрешностей связаны с несовершенством работы тех или иных узлов, входящих в состав аппаратуры, расположенной на спутнике, и аппаратуры, находящейся в распоряжении пользователя.

Проведенные к настоящему времени исследования в этой области свидетельствуют о том, что основные источники инструментальных погрешностей связаны:

- с погрешностью хода часов на спутнике и в приемнике;
- особенностями работы передающей и приемной антенн;
- учетом временных задержек в аппаратуре передатчика и приемника;
- несовершенством работы отсчетных устройств, с помощью которых определяется время (или фазовый сдвиг), соответствующее прохождению радиосигнала от спутника до приемника.

7.2. Погрешности, связанные с нестабильностью хода часов

Погрешности, связанные с нестабильностью хода часов при использовании одностороннего метода дальномерных измерений, являются определяющими во всем комплексе погрешностей, характерных для спутниковых измерений.

Роль часов на спутнике и в приемнике выполняют высокостабильные опорные генераторы. Из-за высоких требований к стабильности хода таких часов на спутниках используют атомные генераторы (наиболее стабильны).

В приемных устройствах, находящихся в распоряжении потребителей, ограничиваются применением более дешевых и экономичных кварцевых генераторов.

Несмотря на все меры, направленные на повышение стабильности работы генераторов, они по своим показателям не отвечают предъяв-

ляемым требованиям. Поэтому для учета погрешности показаний часов спутниковых приемников применяется принцип измерения псевдодальностей, базирующийся на наблюдениях четырех спутников.

При наличии избыточного спутника появляется возможность определить поправку $\delta t_{\text{пр}}$, обусловленную неточностью хода часов приемника.

Наряду с самопроизвольными уходами показаний часов на спутнике в них приходится вводить также поправку за *релятивистский эффект*.

Релятивистский эффект возникает в связи с большой скоростью перемещения спутника и несовпадением силы тяжести на нем и на поверхности Земли. Он вызывает замедление течения времени (максимум 70 наносекунд) и относительное изменение частоты сигнала. Последнее частично компенсируется смещением основной частоты, а оставшаяся часть погрешности одинакова для всех каналов спутникового приемника и входит в псевдодальности.

7.3. Погрешности, связанные с особенностями работы передающей и приемной антенн

При измерении расстояний от спутников до приемников с высокой степенью точности важным фактором является знание положения той точки относимости, от которой отсчитываются интересующие нас расстояния.

Применительно к спутниковым системам позиционирования такими точками принято считать *фазовые центры антенн* как на спутнике, так и в приемнике.

В результате спутниковых измерений определяются координаты фазового центра антенны приемника, которые необходимо редуцировать на определяемую точку. С этой целью измеряется высота фазового центра h . Принимая данную высоту за геодезическую, вычисляются искомые поправки δX , δY , δZ по таким формулам:

$$\delta X = -h \cos B \cos L;$$

$$\delta Y = -h \cos B \sin L;$$

$$\delta Z = -h \sin B,$$

где B и L – широта и долгота точки, на которой установлен приемник.

При этом следует иметь в виду, что при центрировании антенны приемника по отвесу из-за несовпадения нормальных высот к поверхностям общеземного эллипсоида WGS-84 и референсного эллипсоида Красовского возникает погрешность, которая при $h = 2$ м и уклонении отвесной линии порядка $20''$ может достигать $0,2$ мм.

Учитываются и иные факторы, снижающие точность определения координат, если модели их влияния в той или иной степени известны, например вращение Земли. При высоте спутника над поверхностью Земли порядка $20\,000$ км время t прохождения сигнала от спутника до приемника составляет около $0,08''$. За это время планета повернется на угол $\omega = 1,2''$, а приемник переместится примерно на 40 м (рис. 17).

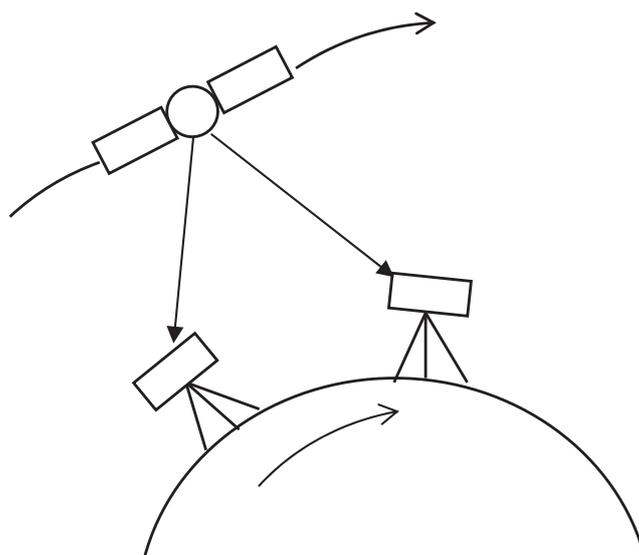


Рис. 17. Влияние вращения Земли

Расчет поправок к пространственным координатам выполняется по значениям t , ω и трудностей не представляет.

Влияние некоторых источников (табл. 4) может быть учтено в процессе обработки измерений, например:

- задержки сигнала, вызванные влиянием ионосферы в диапазоне высот 50 – 500 км и зависящие от частоты радиосигнала, могут быть уменьшены применением 2-частотных приемников;
- искажения эфемерид и показаний часов устраняются при использовании методов относительного позиционирования.

Таблица 4

**Влияние основных источников погрешностей
спутниковых измерений на их точность**

Источник погрешности	Величина погрешности
Эфемериды спутника	20–50 м
Показания часов спутника	10–50 м
Ионосфера (1-частотный приемник)	2–100 м
Ионосфера (2-частотный приемник)	дм
Тропосферы	дм
Влияние отраженных сигналов	5 см
Шумы при измерениях	1–10 м
Задержка сигнала в аппаратуре	мм
Смещение фазового центра антенны	см

В таблице представлена оценка влияния некоторых перечисленных факторов.

7.4. Фактор потери точности

Фактор потери точности (*Dilution of Precision – DOP*) является показателем качества определения местоположения пунктов. Это результат вычисления, в ходе которого учитывается расположение каждого спутника относительно других, составляющих созвездие («геометрия»), с целью прогнозирования точности координат, полученных с помощью данного созвездия. Низкое значение DOP указывает на хорошую геометрию спутников и высокую вероятность получения точных местоположений. Высокое значение DOP указывает на слабую геометрию спутников и низкую вероятность получения точных местоположений.

Этот параметр используется как связующее звено между результирующей точностью позиционирования и точностью измерений расстояний до спутников:

$$m_{\text{рез}} = DOP m_0,$$

где $m_{\text{рез}}$ – средняя квадратическая погрешность определения местоположения искомого пункта;

m_0 – средняя квадратическая погрешность дальномерных определений.

В зависимости от того, какие параметры должны быть определены, используют различные модифицированные понятия DOP (табл. 5).

Таблица 5

Разновидности DOP

Тип DOP	Оказывает влияние на точность
Потеря точности относительных определений (RDOP)	Относительного положения
Потеря точности определения местоположения (PDOP)	Плановых и высотных измерений (широта, долгота и высота)
Потеря точности в плане (HDOP)	Плановых координат (широта, долгота)
Потеря точности по высоте (VDOP)	Высоты
Потеря точности по времени (TDOP)	Поправки часов

PDOP-фактор является лучшим общим показателем точности созвездия, хотя сам по себе PDOP не гарантирует точного определения базисной линии. PDOP, равный 4 и ниже, обеспечивает получение очень точных положений. Фактор PDOP между 5 и 7 является приемлемым, а PDOP, равный 7 или больше, считается неудовлетворительным.

Для того чтобы собрать и получить высококачественные данные, можно задать такое предельное значение PDOP, при превышении которого вычисления положений производиться не будут. Этот предел называется маской PDOP (*PDOP-mask*), и он должен быть установлен в приемнике перед началом регистрации данных.

Рекомендуемое (и выставляемое по умолчанию) значение маски PDOP равно 7. Данное значение PDOP используется при выполнении кинематических съемок, в ходе которых нормой являются очень короткие периоды наблюдений. В случае если значение PDOP равно или превышает 7, приемники издадут сигнал тревоги, который предупреждает пользователя о необходимости оставаться неподвижным до тех пор, пока значение PDOP не упадет ниже порогового.

При проведении статических и быстростатических съемок, которые требуют более длительных периодов наблюдений по сравнению с кинематической съемкой, пороговое значение PDOP либо соответствующий ему предупредительный сигнал не используются.

Таким образом, наиболее эффективным методом ослабления влияния DOP на точность GPS-измерений является выбор наиболее благоприятных периодов наблюдений, которые производятся на стадии планирования спутниковых наблюдений.

Раздел 6

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ОРГАНИЗАЦИЯ И ОБРАБОТКА СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Лекция 8. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ОРГАНИЗАЦИЯ И ОБРАБОТКА

8.1. Общий порядок выполнения работ

Технология проведения работ со спутниковой ГЛОНАСС/GPS аппаратурой включает следующие этапы:

- составление проекта геодезических работ на объекте;
- полевая рекогносцировка, в результате которой делаются заключения об объекте, технологии работ и особенностях материально-технического обеспечения измерений;
- закладка центров;
- организация базовых станций (если этою требует технология);
- планирование сеансов наблюдений, которое включает в себя определение оптимальных временных интервалов измерений, проектирование последовательности сеансов или маршрутов обхода объектов съемки;
- полевые измерения (съемка объектов);
- камеральная обработка, вывод результатов измерений;
- составление технического отчета и оформление необходимой документации;
- полевой контроль, архивирование и сдача материалов.

8.2. Проектирование и организация спутниковых измерений

Методы проектирования и организации спутниковых измерений существенно отличаются от традиционных геодезических методов на всех этапах их проведения.

Проектирование спутниковых измерений выполняется с учетом нестандартных требований, предъявляемых к выбору мест расположения пунктов, на которых прежде всего должны обеспечиваться благоприятные условия наблюдения спутников. В то же время обеспечение взаимной видимости между пунктами не имеет существенного значения. Есть и целый ряд других специфических особенностей при проектировании, которые могут приводить к нарушению нормального приема радиосигналов от спутников, в частности препятствия на пути прохождения сигнала от спутника до приемника. Не следует размещать пункты, с которых будут выполняться спутниковые наблюдения, внутри металлических ограждений, рядом с высокими зданиями, а также другими сооружениями, способными экранировать прямое прохождение радиосигналов от спутников.

При организации и проведении спутниковых наблюдений на пунктах одним из основных требований является обеспечение одновременности работы всех спутниковых приемников, участвующих в одном сеансе наблюдений.

Перед началом проектирования необходимо выполнить предполевое планирование измерений с использованием соответствующей утилиты (например, с использованием утилиты Planning программного обеспечения Trimble Geomatics Office).

Применяя данную утилиту, можно получить альманах (информация о спутниках), который включает данные о спутниках, их положении, времени восхождения и нахождения в пределах «окна» наблюдений на территории съемки (рис. 18).

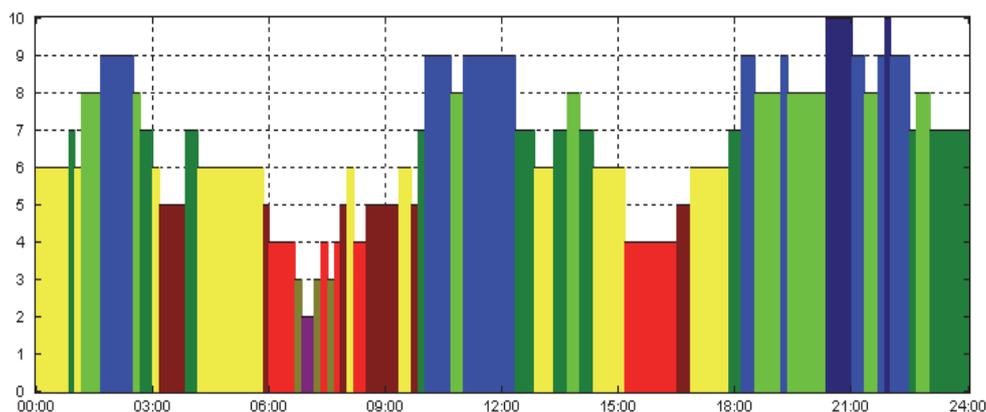


Рис. 18. Видимость спутников над территорией полигона

Организацию спутниковых измерений рассмотрим на примере одночастотных приемников Trimble R3.

Работа станции на пункте включает:

- установку и центрирование штатива;
- установку приемного блока на штативе;
- соединение блока управления с приемным блоком;
- включение станции и ее инициализация;
- после завершения инициализации запуск выбранного режима измерений.

Признаком завершения инициализации служат показания присутствующих в созвездии и «захваченных» приемником спутников и показания GDOP на дисплее.

Центрирование приемника над центром пункта осуществляется при помощи круглого уровня, расположенного на вехе. Точность центрирования инструмента над центром пункта 1,0 мм. При помощи рулетки, входящей в комплект приемника, измеряется высота антенны. Данные о высоте инструмента заносятся в память контроллера в поле.

Рабочие установки (миссии) формируются в контроллере в камеральных условиях перед выездом на полевые работы. Минимальный угол отсечки можно устанавливать 15° , минимальное число спутников – 4, период регистрации – 5 с.

Во время съемки для постобработки необходимо собрать достаточное количество данных во время инициализации, чтобы процессор обработки базовых линий мог успешно обработать их. Для этого в соответствии с рекомендациями время съемки в зависимости от количества наблюдаемых спутников на каждом определяемом пункте установлено в следующих пределах:

- 30 мин при видимости 4 спутников;
- 25 мин при видимости 5 спутников;
- 20 мин при видимости 6 и более спутников.

После завершения производимых на каждом пункте спутниковых наблюдений необходимо выполнять выход из рабочего режима измерений.

8.3. Вычислительная обработка результатов спутниковых наблюдений

Обработка результатов спутниковых наблюдений представляет собой важный этап работы, определяет точность конечных результатов и может быть разделена на несколько этапов.

Применяемые программы различаются по своим возможностям, ориентации на типы или модели приемников, стоимости и др.

Для обработки результатов, полученных с помощью спутниковых приемников Trimble R3, можно использовалось русифицированное программное обеспечение Trimble Geomatics Office или Trimble Business Center.

Обработка спутниковых измерений с помощью программного обеспечения фирмы Trimble включает выполнение основных задач:

- создание и настройка проекта для уравнивания измерений;
- импорт данных со спутниковых приемников (при этом имеется возможность выбора баз данных и их комбинаций, объединения различных сессий наблюдений);
- обработка базовых линий (предобработка);
- уравнивание результатов спутниковых измерений;
- анализ полученных результатов.

Программное обеспечение Trimble Geomatics Office организует данные в проектах. Проект обычно охватывает данные, полученные на одном рабочем объекте, и может содержать измерения, полученные в разное время и с помощью оборудования различного типа.

При создании и настройке проекта необходимо задать систему координат (рис. 19).

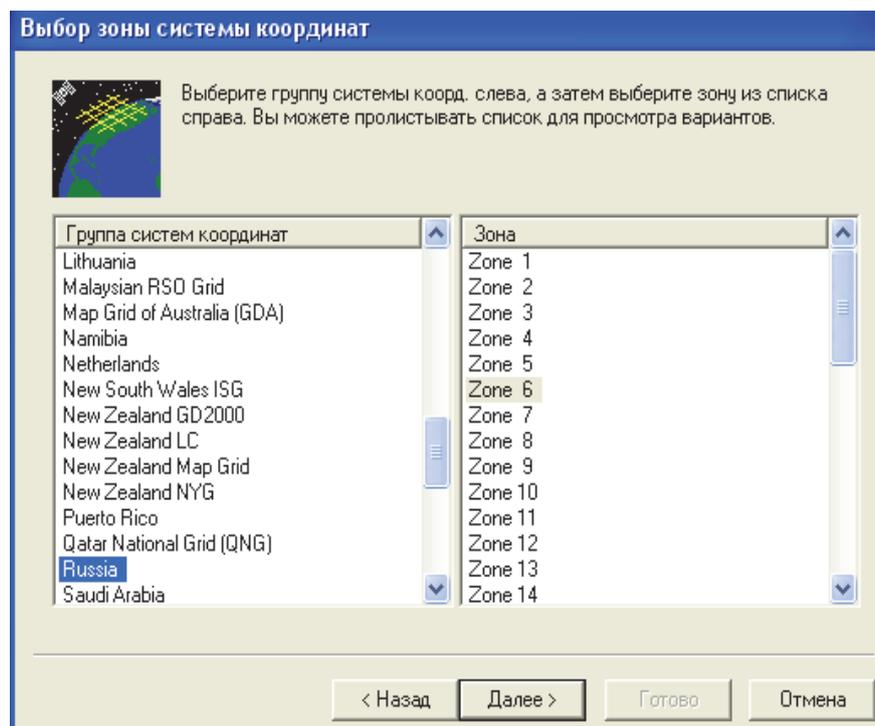


Рис. 19. Выбор системы координат для проекта

После создания проекта следует импортировать в него результаты полевых измерений, а именно dat-файлы с GPS данными (рис. 20). Эти файлы содержат необработанные GPS данные из приемника Trimble, могут включать кинематические данные для постобработки и статические данные.

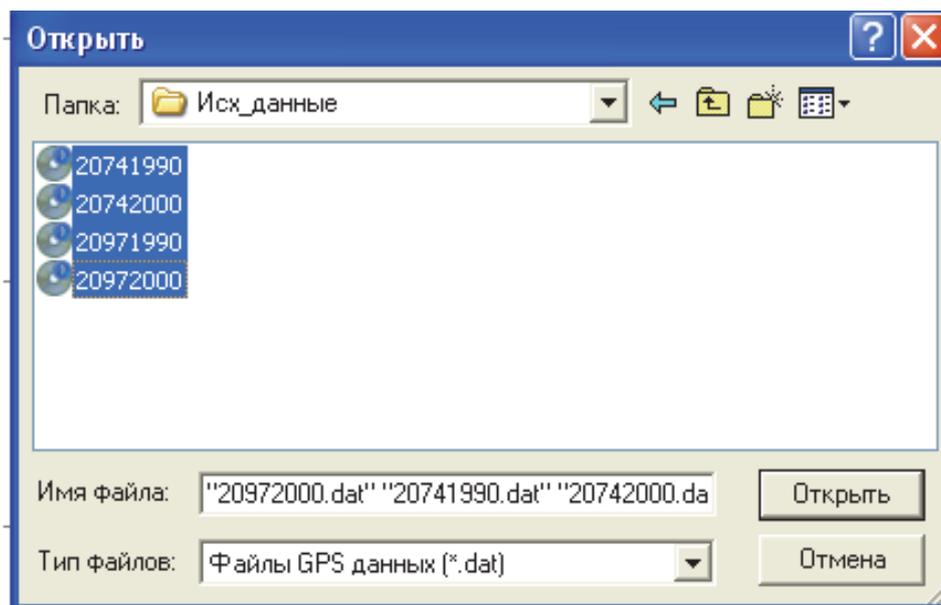


Рис. 20. Импорт dat-файлов приемника в проект

Они не содержат никакой информации о системе координат, поэтому необходимо проверить, правильно ли определена система координат в проекте.

После импорта данных спутниковых измерений в формате dat-файлов с базовой станции и подвижного приемника выполняется обработка базовых линий.

Для обработки базовых линий используется модуль WAVE. Данный модуль позволяет обрабатывать GPS-измерения, включая кинематику, непрерывную кинематику, статику, быструю статику.

Статистика обработки базовых линий отображается в диалоговом окне «GPS обработка» и автоматически сохраняется в стандартном отчете. Сведения, содержащиеся в отчете по обработке GPS-измерений, позволяют определить помехи при приеме сигнала от спутника. Потеря приема сигнала отображается дырами и разрывами данных.

Используя данную информацию, можно исключать все или только часть данных по спутнику за тот период времени, в который прием сигналов со спутника был особенно плохим (рис. 21).

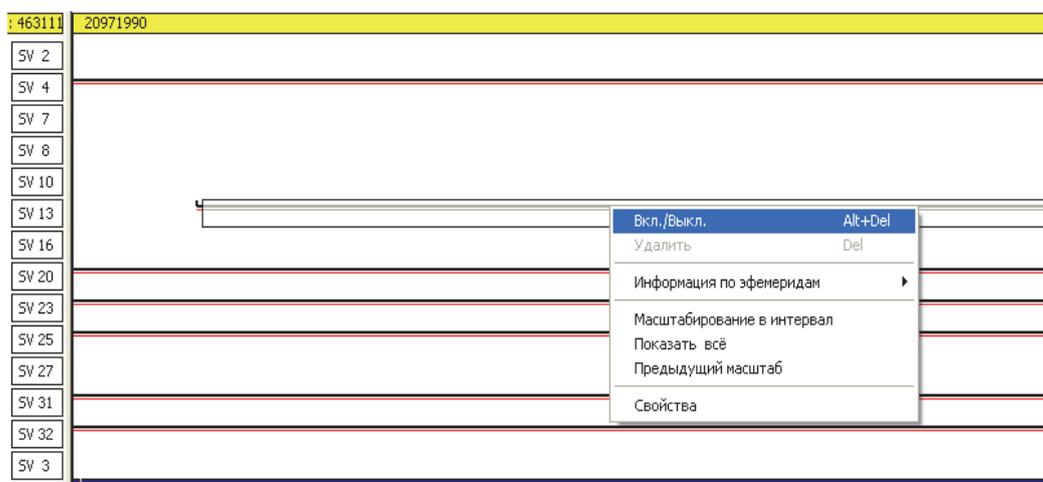


Рис. 21. Анализ данных от спутников

Лучше исключать спутники по одному, чтобы определить, насколько удаление того или иного спутника влияет на решение базовых линий.

На следующем этапе выполняется уравнивание результатов спутниковых измерений с использованием модуля Network Adjustment. Результаты уравнивания сохраняются в специальных отчетах, содержащих информацию как о координатах пунктов, так и о точности полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Генике, А. А. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применения в геодезии: в 2 т. / А. А. Генике, Г. Г. Побединский. – М.: Картгеоцентр, 2004. – Т. 1. – 351 с.
2. Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: монография: в 2 т. / К. М. Антонович. – М.: Картгеоцентр, 2005. – Т. 1. – 334 с.
3. Жуков, А. В. Практикум по спутниковому позиционированию / А. В. Жуков, Б. Б. Серапинас. – М.: МГУ, 2002. – 120 с.
4. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения ФГУП ЦНИЭмаш [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.glonass-iac.ru> (дата обращения 05.01.2018).
5. Trimble Geomatics Office. User manual. Trimble Navigation limited. U.S.A., 2001. – 144 p.
6. Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS / ГКИНП (ОНТА)-02-262-02. М.: ЦНИИГАиК, 2002. – 70 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Раздел 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМАХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ	4
Лекция 1. История развития систем глобального позицио- нирования	4
1.1. Понятие о системах глобального позиционирования ...	4
1.2. Развитие спутниковой навигации в СССР и России	5
1.3. Развитие спутниковой навигации в США	8
1.4. Современные системы глобального позиционирования ..	10
1.5. Принципы определения местоположения с помощью спутниковых систем	12
Раздел 2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ	14
Лекция 2. Особенности геодезических измерений спутнико- выми методами	14
2.1. Основные преимущества геодезических измерений спутниковыми методами	14
2.2. Двухсторонний и односторонний методы дальномер- ных измерений	16
2.3. Принципы измерения длин линий, используемые в спутниковой геодезии	18
Лекция 3. Общие принципы построения систем глобального позиционирования	20
3.1. Составные части системы спутникового позициони- рования	20
3.2. Космический сектор	21
3.3. Сектор управления и контроля	24
3.4. Сектор потребителя	27
3.5. Дифференциальная подсистема	28
Раздел 3. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ВЫЧИСЛЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В СИСТЕМАХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ	31
Лекция 4. Методы спутникового позиционирования	31
4.1. Абсолютные методы спутниковых измерений	31
4.2. Относительные методы спутниковых измерений	33

Раздел 4. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ И ВРЕМЕНИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ.....	36
Лекция 5. Общие сведения о системах координат и времени. 36	
5.1. Определения координатных систем	36
5.2. Система координат ПЗ-90.....	37
5.3. Система координат WGS-84.....	39
5.4. Система координат 1942 г. (СК-42).....	40
5.5. Система координат 1995 г. (СК-95).....	40
Раздел 5. ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	43
Лекция 6. Источники погрешностей спутниковых измерений .. 43	
6.1. Классификация источников погрешностей	43
6.2. Источники погрешностей, связанные с неточным знанием эфемерид спутников	44
6.3. Учет влияния внешней среды на результаты спутниковых измерений	45
Лекция 7. Инструментальные источники погрешностей.....	47
7.1. Основные источники инструментальных погрешностей 47	
7.2. Погрешности, связанные с нестабильностью хода часов 47	
7.3. Погрешности, связанные с особенностями работы передающей и приемной антенн.....	48
7.4. Фактор потери точности	50
Раздел 6. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ОРГАНИЗАЦИЯ И ОБРАБОТКА СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	52
Лекция 8. Проектирование, организация и обработка.....	52
8.1. Общий порядок выполнения работ.....	52
8.2. Проектирование и организация спутниковых измерений	52
8.3. Вычислительная обработка результатов спутниковых наблюдений	54
ЛИТЕРАТУРА	58

Учебное издание

Кравченко Ольга Валерьевна

**СИСТЕМЫ
ГЛОБАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ
В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

Курс лекций

Редактор *Е. И. Гоман*

Компьютерная верстка *А. А. Селиванова*

Корректор *Е. И. Гоман*

Издатель:

УО «Белорусский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/227 от 20.03.2014.

Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.