

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра геодезии и картографии

О. В. Кравченко

Конспект лекций по дисциплине

СПУТНИКОВЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

для специальностей:

1-31 02 03 «Космоаэрокартография»

1-31 02 01 «География» (по направлениям)

направление 1-31 02 01-03 «География» (геоинформационные системы)

Лекция 1. Общие сведения о спутниковых навигационных системах.

- 1. Понятие спутниковой навигации. Связь с другими науками и дисциплинами.***
- 2. Развитие спутниковой навигации в СССР и России***
- 3. Развитие спутниковой навигации в США***

1. Понятие спутниковой навигации.

Спутниковая система навигации – комплексная электронно-техническая система, состоящая из совокупности наземного и космического оборудования.

Предназначена для определения местоположения (географических координат и высоты), а также параметров движения (скорости и направления движения) для наземных, водных и воздушных объектов.

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

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.

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.

Спутниковая навигация 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.

Кроме навигации координаты получаемые, благодаря спутниковым системам, 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;

Спутниковый мониторинг транс-порта: с помощью систем навигации ведется мониторинг за положением, скоростью автомобилей, контроль за их движением;

Например, с появлением портативных приемников GPS 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.

Сотовая связь: первые мобильные телефоны с GPS появились в 90-х годах.

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 СН ведется наблюдение за движением и колебанием плит.

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 КА на орбитах того же класса, что и у КА "Парус".

И если первая система использовалась исключительно в интересах МО 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 прохождений 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 развёртывании Единой космической навигационной системы **ГЛОНАСС** (**Г**ЛОбальная **Н**Авигационная **С**путниковая **С**истема)".

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 этой навигационной системы было предопределено потребностями новых потенциальных потребителей, нуждавшихся в высокоточной привязке своего положения во времени и пространстве.

В качестве орбит для новой системы первоначально были выбраны средневысокие (20000 км) полусуточные орбиты.

Они обеспечивали оптимальное соотношение между количеством ИСЗ в системе и величиной зоны радиобзора.

Однако впоследствии высота рабочей орбиты была уменьшена до 19100 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 в этом случае 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-х 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 ее спутники серии КОСМОС.

В 1993 г. система официально принята в эксплуатацию МО РФ.

В 1996 г. ГЛОНАСС развёрнута полностью.

Спутники ГЛОНАСС находятся в трёх плоскостях на высоте примерно 19 100 км.



3. Развитие спутниковой навигации в США

4.

GPS (Global Positioning System — Глобальную Систему 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 стороны, в универсальной системе навигации, доступной для массового применения в армии.

Начиная с 1960-х годов Министерство обороны США начало 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** стала *первой* действующей спутниковой навигационной системой. Разработанная в 1964 г. в лаборатории прикладной физики, система Transit состояла из 7 низкоорбитальных спутников, которые излучали очень стабильные радиосигналы.

Изначально разработанная ВМС 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 быстро 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, 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 BBC и ВМФ. Система известна, как система глобального позиционирования NAVSTAR.

Между 1978 и 1985 гг. одиннадцать спутников первого блока были выведены на орбиту.

Круговые орбиты спутников последовательно увеличивались с 925 км до 13000 км, а затем достигли окончательной величины в 20145 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.г. был отмечен несколькими существенными спадами в развитии системы GPS.

Первый спутник второго блока "Блок 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 было официально объявлено, что система поддерживает 100-метровую (стандартную) точность позиционирования для гражданских пользователей всего мира.

Начиная с 1996 г., на орбиту начали выводить спутники нового типа, "Блок 2R". Эти спутники имеют расширенные возможности, включая систему автономной навигации AUTONAV.

В случае невозможности контакта с наземной станцией управления, автоматически включается 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.

Применение GPS в гражданской практике очень бурно расширялось, 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 сделал заявление 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.

Спутники NAVSTAR располагаются в шести плоскостях на высоте примерно 20 145 км.

Группировка NAVSTAR полностью укомплектована в апреле 1994-го и с тех пор поддерживается.



В настоящее время готовятся к развёртыванию следующие системы спутниковой навигации:

Бэйдоу - развёртываемая в настоящее время Китаем подсистема GNSS.

Особенность — небольшое количество спутников, находящихся на геостационарной орбите.

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

Она будет включать 30 спутников, расположенных на высоте 23 200 км и вращающихся в трех орбитальных плоскостях, наклоненных на 56° к плоскости экватора.

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

IRNSS - Индийская навигационная спутниковая система, в состоянии разработки.

Предполагается для использования только в этой стране. Первый спутник был запущен в 2008 году.

Лекции 2-3. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

1. *Принципы определения местоположения с помощью спутниковых систем.*
2. *Космический сектор.*
3. *Сектор управления и контроля.*
4. *Сектор потребителя.*
5. *Дифференциальная подсистема.*

1. Принципы определения местоположения с помощью спутниковых систем.

Рассмотрим систему GPS как получившую более широкое распространение.

Задача определения координат пунктов GPS-методом в принципе решается следующим образом.

Запускаются ИСЗ с траекториями в разных плоскостях с таким расчетом, чтобы из любой точки земной поверхности одновременно наблюдалось несколько спутников.

На спутниках устанавливаются передатчики электромагнитных колебаний и атомные часы.

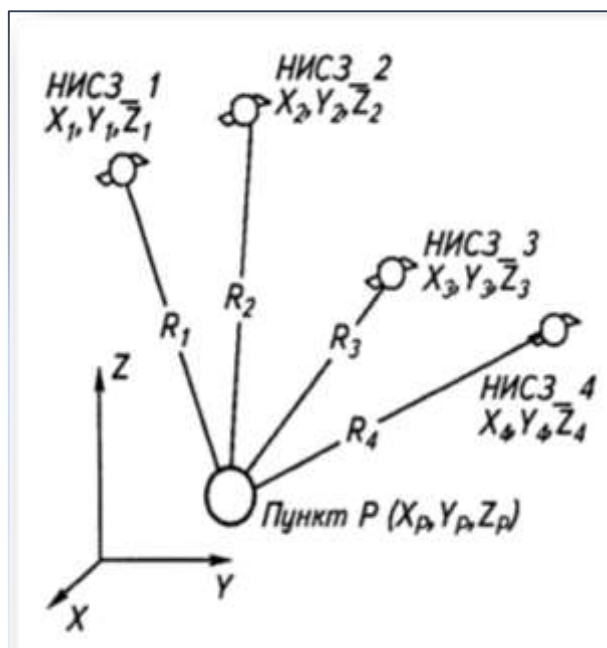
За спутниками ведется постоянное наблюдение с опорных пунктов.

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 определения координат создаваемого пункта на земной поверхности устанавливают на нем приемник электромагнитных колебаний, с помощью которого одновременно измеряют расстояния до нескольких спутников.

С целью определения пространственных прямо-угольных координат X_P , Y_P , Z_P пункта P измеряют расстояние R_1 между определяемым пунктом и ИСЗ.



$$R_1^2 = \Delta X_{1-P}^2 + \Delta Y_{1-P}^2 + \Delta Z_{1-P}^2,$$

где $\Delta X_{1-P} = X_P - X_{\text{НИСЗ1}}$; $\Delta Y_{1-P} = Y_P - Y_{\text{НИСЗ1}}$; $\Delta Z_{1-P} = Z_P - Z_{\text{НИСЗ1}}$

В уравнении три неизвестных параметра — пространственные прямоугольные координаты определяемого пункта: X_P , Y_P и Z_P .

Допустим, что одновременно с расстоянием R_1 измерены также расстояния R_2 и R_3 между определяемым пунктом и еще двумя ИСЗ с известными координатами.

По результатам этих измерений можно написать соответствующие выражения для расстояний R_2 и R_3 .

Будем иметь систему уравнений, в которой число уравнений и число неизвестных равны между собой (три уравнения с тремя неизвестными):

$$\begin{aligned} R_{1-P}^2 &= \Delta X_{1-P}^2 + \Delta Y_{1-P}^2 + \Delta Z_{1-P}^2; \\ R_{2-P}^2 &= \Delta X_{2-P}^2 + \Delta Y_{2-P}^2 + \Delta Z_{2-P}^2; \\ R_{3-P}^2 &= \Delta X_{3-P}^2 + \Delta Y_{3-P}^2 + \Delta Z_{3-P}^2. \end{aligned}$$

Решая данную систему, можно вычислить координаты X_P , Y_P , Z_P .

Рассмотренное геометрическое построение называют **пространственной линейной засечкой**.

Затем от пространственных координат в мировой системе WGS-84 переходят к системе координат, принятой в данном государстве.

В СНС GPS и ГЛОНАСС высокие эксплуатационные характеристики на структурном уровне достигаются путем совместного функционирования трех основных сегментов:

- космического сегмента;
- сегмента управления;

- сегмента потребителей.

Кроме основных сегментов существует такое функциональное дополнение, как дифференциальная подсистема (DGPS), и ряд вспомогательных элементов: специальные каналы наземной и космической связи, средства вывода спутников на орбиту и т.п.

2. Космический сектор.

Точность местоопределения и стабильность функционирования СНС 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 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 оперативно 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 КА, 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.

Разграничение доступа достигается путем кодирования сигналов высокой точности.

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

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

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

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

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**.

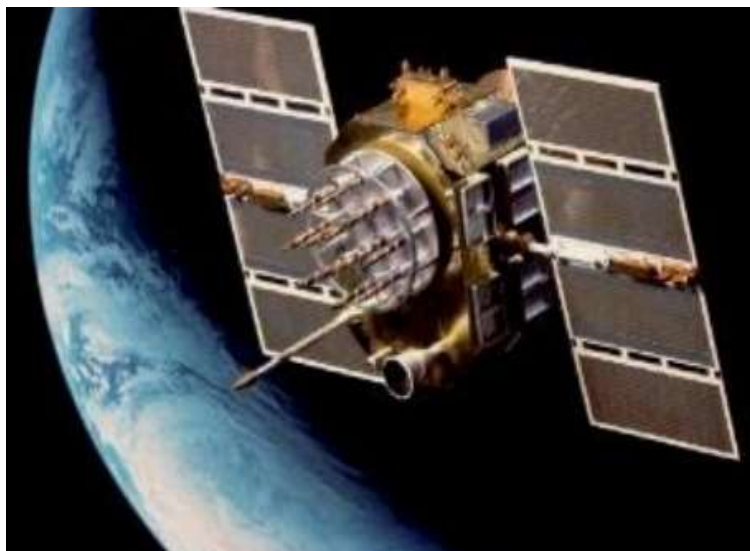
Длина тактовой волны **29,3 м**.

Длительность передачи **P** кода составляет **266,4** суток. 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.

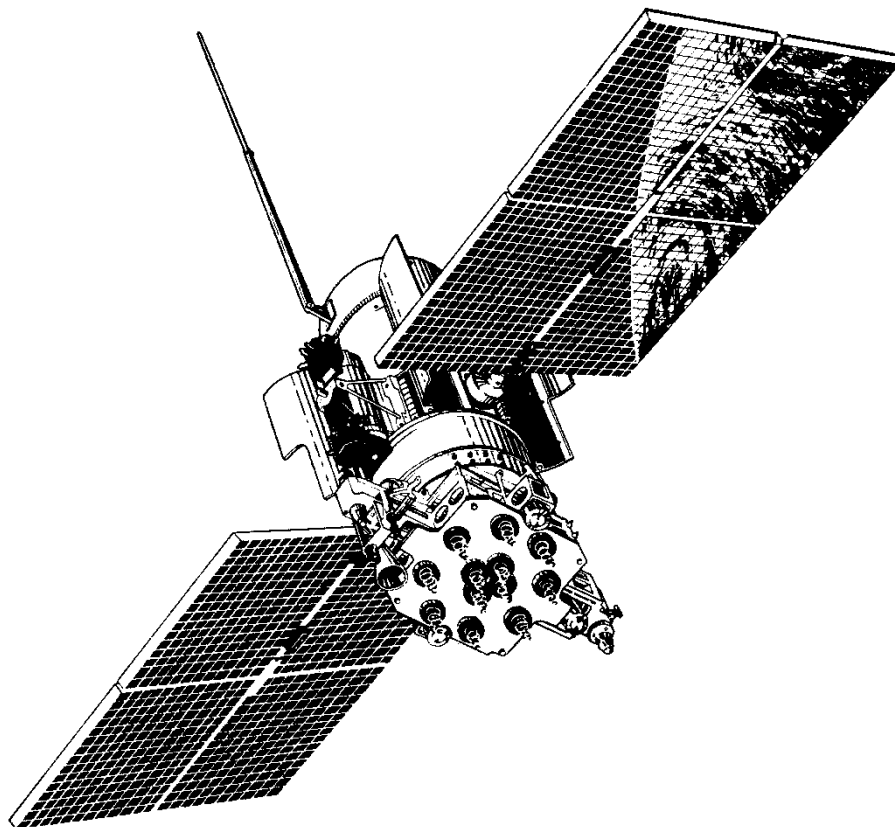
В мае 2010 году запущен спутник GPS **III**.

В результате активирована передача сигнала на частоте $L_5 = 1176,45 \text{ МГц}$.



Сигнал **L5** нового спутника GPS IIF показывает весьма высокую стабильность, и занимает промежуточное положение между сигналами L1 и L2.

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



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:

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

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

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.

3. Сектор управления и контроля.

Для поддержания постоянной работоспособности всего космического сектора и систематического обновления передаваемой потребителю информации,

В современных СНС 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 такие сообщения 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.

Это - ***станции слежения, ведущая станция и загружающие станции.***

Рабочий сектор управления и контроля GPS системы 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.



Отслеживание спутниковых сигналов осуществляется с помощью двухчастотных специализированных приемников, оборудованных атомными часами.

Координаты этих станций известны с высокой степенью точности.

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-Гарсия и Кваджалейн, а также на острове Вознесения.

Управление орбитальной группировкой **ГЛОНАСС** осуществляет наземный комплекс управления.

Он включает в себя **Центр управления системой** (г. Голицыно-2, Московская область) и **сеть станций слежения и управления**, рассредоточенных по всей территории России.



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, о показаниях точного времени, а применительно к движущимся объектам — скорость и направление 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 использование 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 предназначен 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 осуществляет обработку преобразованного в цифровую форму сигнала и поддержку системы слежения.

Спутниковые приемники можно классифицировать по:

- **спутниковым системам**. Подавляющее большинство приемников принимает сигналы только одной системы (GPS, ГЛОНАСС), некоторые двух систем (GPS, ГЛОНАСС) или даже трех (GPS, ГЛОНАСС и Galileo).
- **числу принимаемых частот** (**одночастотные**, принимающие сигналы только на частоте L1 и **двухчастотные**, способные принимать сигналы на частотах L1 и L2).

5. Дифференциальная подсистема.

Спутниковые навигационные системы позволяют определить координаты потребителя с точностью порядка 10... 15 метров.

Но в ряде случаев требуется более высокая точность определения. 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 СНС, 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.

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.

Геостационарная орбита — круговая орбита, расположенная над экватором Земли (0° широты), находясь на которой искусственный спутник обращается вокруг планеты с угловой скоростью, равной угловой скорости вращения Земли вокруг оси, и постоянно находится над одной и той же точкой на земной поверхности.

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.

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 50...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.

ЛЕКЦИЯ 4. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ВЫЧИСЛЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В СНС

1. *Основные преимущества геодезических измерений спутниковыми методами.*
2. *Двухсторонний и односторонний методы дальномерных измерений.*
3. *Методы измерения длин линий, используемые в СНС.*

1. Основные преимущества геодезических измерений спутниковыми методами.

Специфика традиционных геодезических измерений, проводимых на земной поверхности, заключается, прежде всего, в высоких требованиях к точности измерений,

проводимых в среде с постоянно меняющимися параметрами, к которой могут быть отнесены приземные слои атмосферы.

При этом требования к повышению точности постоянно 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 электро-магнитных волн, что породило целый ряд существенных недостатков:

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

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, используемого 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. Двухсторонний и односторонний методы дальномерных измерений.

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

Применительно к спутниковой геодезии двухсторонние методы также находят применение.

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 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 часам спутника.

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 — Δt_u .

Эта 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 $t + \Delta t_u$, получим выражение для псевдодальности:

$$D = c(t + \Delta t_u) = \rho + c \Delta t_u, \quad (3)$$

где c — скорость распространения сигнала в вакууме;

ρ — геометрическая дальность;

$c \Delta t_u$ — 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**

$$\Delta t_{ат.м} = t - t_{вак}$$

здесь $t_{вак}$ — время распространения сигнала в вакууме и, как следствие, атмосферная поправка $c \Delta t_{ат.м}$.

С учетом атмосферной поправки $c \Delta t_{ат.м}$ и величины $c \Delta t_u$ окончательно выражение для псевдодальности будет иметь вид:

$$D = \rho + c \Delta t_u + c \Delta t_{ат.м}. \quad (4)$$

