

Глушков Валерий Васильевич

***Заместитель начальника
Инновационного центра
«Российской корпорации ракетно-
космического приборостроения и
информационных систем»,
профессор МИРЭА***

Лекция №1

Основы спутниковой навигации

Изучаемые вопросы:

- 1. Введение в дисциплину.*
- 2. Краткая история становления и развития спутниковой навигации.*
- 3. Основы решения навигационной задачи.*
- 4. Основные системы координат и времени, используемые в спутниковой навигации.*

Рекомендуемая литература:

- 1. Малышев В.В., Куршин В.В., Ревнивых С. Г. Введение в спутниковую навигацию. – Изд. МАИ-Принт, 2008. -192 с.: ил.**
- 2. Власов И.Б. Глобальные навигационные спутниковые системы: Учеб. Пособие. Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.-200с.: ил.**
- 3. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. - М.: Изд. Горячая линия-Телеком, 2005. - 272 с.: ил.**
- 4. Соловьев Ю.А. Спутниковая навигация и её приложения. М., ЭКО-ТРЕНДЗ, 2003.**
- 5. Официальный сайт Роскосмоса. Эл. источник: <http://www.federalspace.ru/launch/2016/>.**

В рамках дисциплины **«Программная инженерия»** по согласованию руководителей вашего университета и «Российской корпорации ракетно-космического приборостроения и информационных систем» (сокращенное наименование АО «Российские космические системы») вам предлагается прослушать курс **«Основы спутниковой навигации и ее практического применения»**.

Наличие этого курса в вашей учебной программе, по замыслу ее инициаторов, позволит студенту-выпускнику ознакомиться хотя бы в первом приближении с некоторыми направлениями деятельности организаций ракетно-космической промышленности (на примере АО «Российские космические системы») и сделать для себя вывод о целесообразности (или нецелесообразности) намерения реализовать свои накопленные за годы учебы в университете знания и навыки на ракетно-космическом поприще.

Бакалавриат, как известно, является первой ступенью вашего образования. Следующие ступени – это магистратура и аспирантура. Задумываться о дальнейшем своем образовании и специализации студенту нужно уже сейчас. При этом следует иметь в виду, что специализации высшего уровня обучения должны быть исключительно инновационными, т.е. нацеленными на решение новых, прорывных задач в различных областях человеческой деятельности. Одной из площадок решения таких задач является АО «Российские космические системы».

Основными направлениями деятельности корпорации «Российские космические системы» являются создание, развитие и целевое использование:

- 1. Глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС, включая наземный комплекс управления, функциональные дополнения системы, навигационную аппаратуру потребителей.**
- 2. Космических систем геодезического и гидрометеорологического обеспечения, связи и ретрансляции, дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), планет и других космических объектов, радиотехнического обеспечения научных исследований космического пространства, системы поиска и спасания судов и самолетов, терпящих бедствие.**
- 3. Бортовых приборов и комплексов космических аппаратов (КА).**
- 4. Наземных пунктов приема и обработки информации систем ДЗЗ, автоматизированных комплексов управления КА, ракет-носителей и разгонных блоков.**
- 5. Полигонных измерительных комплексов.**
- 6. Автоматизированных систем управления, измерения, мониторинга ресурсов и объектов.**

Корпорация «Российские космические системы» является головной организацией в ракетно-космической промышленности по некоторым из перечисленных направлений деятельности и, в частности, по созданию, развитию и целевому использованию системы ГЛОНАСС

Главной целью изучения курса «Основы спутниковой навигации и ее практического применения» является формирование у обучающихся комплексного восприятия теории современной спутниковой навигации и технологий практического ее применения в интересах социально-экономического развития нашей страны.

Для реализации поставленной цели в процессе преподавания курса решаются следующие задачи:

- **ознакомление** с краткой историей становления и развития спутниковой навигации;
- **изучение** основ спутниковой навигации;
- **ознакомление** с основными системами координат и времени, используемыми в спутниковой навигации;
- **изучение** состава, принципов построения и функционирования глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС);
- **изучение** обобщенных структурных схем, принципов использования типовых навигационной аппаратуры потребителя и высокоточной аппаратуры потребителя ГНСС;
- **ознакомление** с методами спутниковых координатных определений, ошибками, влияющими на точность определений в рамках ГНСС;
- **ознакомление** с особенностями применения спутниковой навигации: на автомобильном и железнодорожном транспорте; в строительстве; при ликвидации чрезвычайных ситуаций; при решении социальных задач; при выполнении высокоточных геодезических работ

Навигация (лат. navigatio, от navigo – плыву на судне), как трактуется в учебниках по штурманскому делу, – это процесс управления движением судна по безопасному и опти-мальному маршруту на основе инструментального определения его местоположения (ко-ординат), скорости, направления движения и величины пройденного пути.

С этой целью во время плавания штурман ведет непрерывный учет (счисление) положения судна по направлению его движения и пройденному пути на основе показаний судового компаса, указывающего направление на северный магнитный полюс, и лага, предназначенного для измерения скорости движения судна, а также данных о морском течении и дрейфе судна.

Однако как бы тщательно ни велось счисление, оно всегда будет расходиться с действительным местоположением судна из-за ошибок в принятых поправках показаний компаса и лага, неточностей учета элементов течения и дрейфа, а также отклонений судна от курса под влиянием других факторов.

Поэтому во время плавания для исключения ошибок счисление постоянно корректи-руют посредством так называемых обсерваций – периодических определений местопо-ложения судна теми или иными навигационными способами.

Примерно до середины XX в. местоположение судна (географические широта и долгота) в открытом море определялось, в основном, посредством наблюдения небесных светил с помощью простейшего астрономического прибора (секстанта) и фиксации времени обсервации хронометром (высокоточными палубными



Секстант

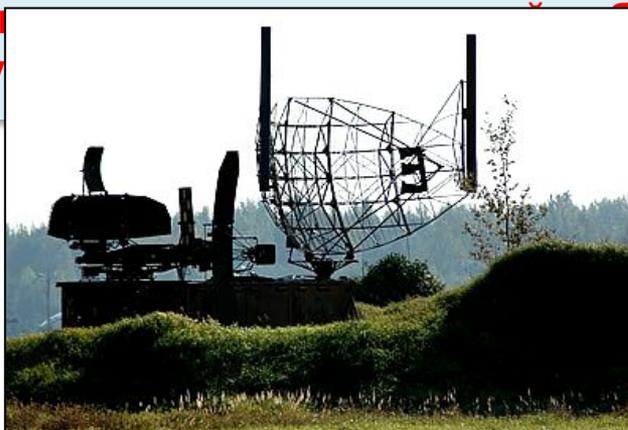
Однако даже при самых тщательных измерениях этими приборами точность определения координат составляла не более 1 морской мили (1,8 км), что не всегда удовлетворяло требованиям безопасности плавания особенно в прибрежных водах.

Кроме того, **определение местоположения судна астрономическим способом существенно зависело от метеоусловий – выполнить измерение угловых высот светил над морским горизонтом при наличии тумана, дождя, снега и даже облачного неба было невозможно.**

В связи с упомянутыми недостатками астрономического способа определения местоположения судна примерно с 1940–х гг. стала широко внедряться в практику радионавигация, базирующаяся на радиопеленгаторах, радиомаяках и радионавигационных системах. Эти приборы не зависели от погодных условий и вполне удовлетворяли требования по точности (точность 0,1–1,5 км).

Радиомаяки и радиопеленгаторы нашли свое применение в практике мореплавания благодаря изобретению А.С. Поповым радиоприемника в 1895 г. Первые радиомаяки и радиопеленгаторы были созданы в 1910–1914 гг. Они располагались на морском побережье и обеспечивали навигацию на расстоянии 100–200 км от берега.

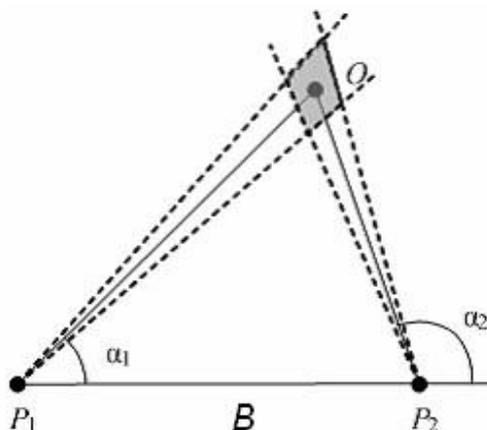
Радионавигационная система – это комплекс из нескольких однотипных или разнотипных радионавигационных устройств, взаимодействующих между собой и обеспечивающих точное определение местоположения движущихся объектов и решение других комплексных задач навигации.



Наземная станция радиотехнической системы ближней навигации

Методы определения местоположения судна -1

1. Угломерный метод определения местоположения подвижного объекта (судна) O по пеленгам α_1 и α_2 радиопеленгаторов P_1 и P_2 .

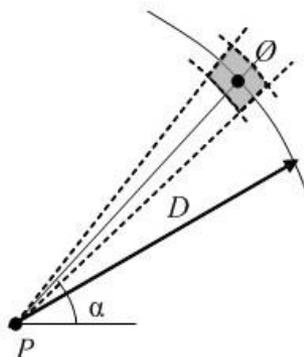


Из курса геометрии известно, что положение точки O однозначно определяется по стороне B (базы), и прилежащим к ней углам. При размещении радиопеленгатора на судне его координаты можно определить по пеленгам двух радиомаяков, координаты которых известны.

Рассмотренный метод использовался только для построения систем ближней радионавигации.

Методы определения местоположения судна -2

2. Угломерно-дальномерный метод определения местоположения подвижного объекта (судна) **O** по трем параметрам: пеленгу α (определяется радиопеленгатором); координатам радиомаяка **P** (известны); расстоянию **D** (измеряется акустическим эхолотом).



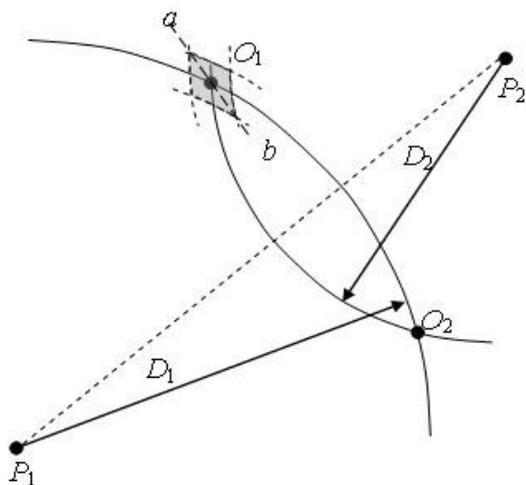
В этом методе с радиомаяка радиосигнал и звуковой сигнал излучаются одновременно. Но поскольку скорости распространения радиосигнала c и звукового сигнала v различны, то звуковой сигнал принимается на судне с временной задержкой $\Delta t = D/v - D/c$. А так как $c \gg v$, то расстояние между судном и радиомаяком будет определяться соотношением

$$D \approx v\Delta t$$

Максимальная дальность действия радиоакустического измерителя ограничивается дальностью распространения звука (в воде она равна 12–15 миль или 19–24 км). Рассмотренный метод использовался только для построения систем

Методы определения местоположения судна-3

Угломерный и угломерно-дальномерный методы оказались непригодными для построения систем дальней радионавигации. В связи с этим в конце 1930–х гг. в США приступили к разработке системы радионавигации, обладающей высокой точностью и дальностью действия до 400 км. Эта система получила название Шоран (SHORAN – Short Range Navigation). В ее рамках был реализован дальномерный метод определения местоположения подвижного объекта



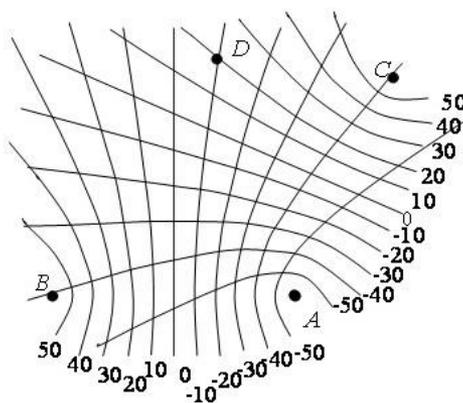
В состав систем Шоран вошли бортовой (самолетный) приемопередатчик и две наземных станции-ответчики. Приемопередатчик (объект **O**) излучает короткие радиоимпульсы. Станции-ответчики (P_1 и P_2), приняв эти импульсы, ретранслируют их обратно в приемопередатчик. Там по задержке принятых импульсов измеряется дальность (D_1 и D_2) до каждой из наземных станций и находится местоположение объекта (самолета).

Однако при расстояниях более 400 км точность дальномерного метода местопределения резко снижалась. Это было обусловлено тем, что с увеличением расстояния и при уменьшении угла пересечения линий постоянной дальности ошибка в направлении линии **ab** увеличивается.

Методы определения местоположения судна-4

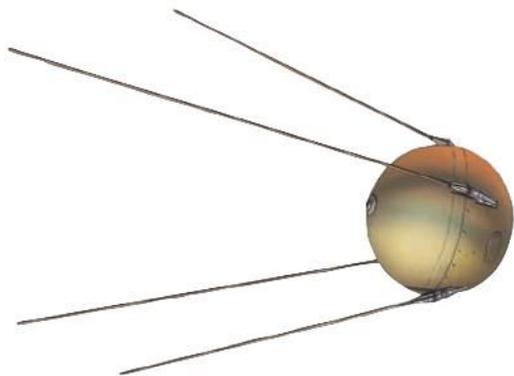
Положительное решение было найдено с разработкой разностно-дальномерного (гиперболического) метода определения положения подвижного объекта, основанного на измерении разности расстояний от объекта до радиостанций ($D_1 - D_2$).

Для определения местоположения объекта в рамках этого метода требуется два семейства гипербол – линий, для которых разность расстояний от двух точек является постоянной. Эти линии (точнее – сетку изолиний) можно получить с помощью трех радиостанций A , B и C с известными координатами и известными разностями расстояний от объекта до станций B и C .



Например, если на подвижном объекте было определено, что он находится на разности расстояний между станциями A и C равной 20 и на разности расстояний между станциями A и B равной -10 , то этот объект однозначно находится в точке D .

Первый ИСЗ (его кодовое название ПС-1 – «простейший спутник первый»), обращающийся вокруг Земли только под действием силы ее притяжения, был предназначен для решения ряда исследовательских задач по определению характера прохождения электромагнитных волн в ионосфере (части верхней атмосферы, расположенной на высоте более 50 км), по проверке возможностей функционирования электронной аппаратуры в условиях открытого космического пространства, под воздействием жестких космических излучений, резкого перепада температуры, глубокого вакуума, механических ударов микрометеоритов и пр.



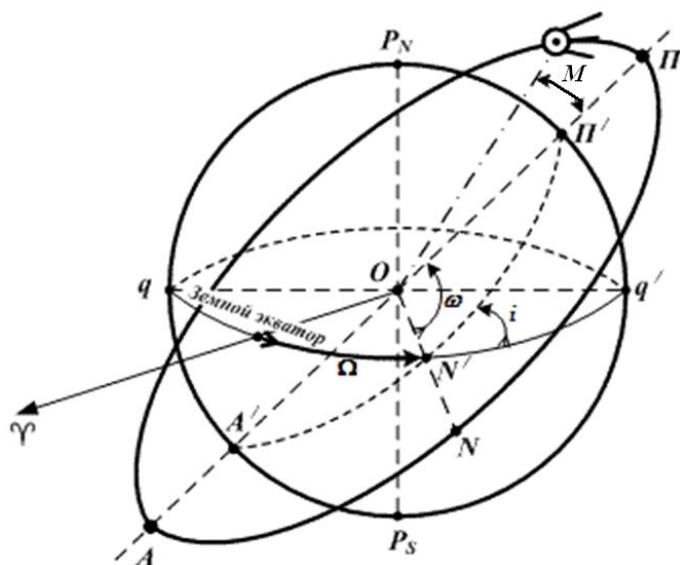
$i = 65,1^\circ$; $P = 228$ км; $A = 947$ км,
 $T = 96,7$ мин.

Корпус ИСЗ ПС-1 состоял из двух полуболочек диаметром 0,58 м, изготовленных из алюминиевого сплава со стыковочными шпангоутами, соединенными между собой 36 болтами. Герметичность стыка обеспечивала резиновая прокладка. В верхней (на рис. передней) полуболочке располагались две антенны, состоявшие из двух штырей по 2,4 м и по 2,9 м.

Внутри корпуса ИСЗ были размещены: блок электрохимических источников; радиопередающее устройство; вентилятор; термореле и воздухопровод системы терморегулирования; коммутирующее устройство бортовой электроавтоматики; датчики температуры и давления; бортовая кабельная сеть.

Пространственное положение орбиты, положение на орбите любого ИСЗ и его направление движения можно охарактеризовать шестью элементами Кеплера, в числе

которых:



1. i – наклонение плоскости орбиты ИСЗ к плоскости земного экватора;

2. Ω – прямое восхождение восходящего узла N орбиты ИСЗ;

3. ω – угловое расстояние перигея (Π) от восходящего узла N орбиты ИСЗ;

4. e – эксцентриситет орбиты ИСЗ;

5. p – параметр орбиты ИСЗ: $p = b^2/a$, где a – большая полуось орбиты, b – малая полуось орбиты;

6. M – средняя аномалия для ИСЗ, движущегося по невозмущенной орбите: $M = M_0 + n(t - t_0)$, где M_0 – средняя аномалия на начальную эпоху t_0 , t – эпоха, на которую производится вычисление, n – среднее движение ИСЗ.

Элементы №№ 1÷5 характеризуют пространственное положение орбиты ИСЗ и направление его движения, элемент № 6 (M) – положение ИСЗ на орбите.

По известным значениям параметров орбиты ИСЗ можно вычислить его положение (пространственные координаты) относительно земной поверхности на любой текущий момент времени.

Идея спутниковой навигации

Принимая и анализируя радиосигнал, исходящий от ИСЗ ПС-1 (последний излучал радиоволны на двух частотах 20,005 и 40,002 МГц в виде телеграфных посылок длительностью 0,3 с, которые мог принять и услышать любой радиолюбитель), советские ученые из Института радиотехники и электроники Академии наук СССР под руководством В.А. Котельникова и американские ученые из Университета Дж. Хопкинса под руководством Р.Кершнера фактически одновременно обнаружили, что частота принимаемого сигнала увеличивается при приближении ИСЗ к пункту приема сигналов (ППС) и уменьшается при удалении от него (эффект Доплера). Это позволяло составить строгую математическую зависимость величины изменения частоты от расстояния между ИСЗ и ППС и открывало возможность реального определения мгновенного местоположения ИСЗ на орбите, а затем с использованием его – местоположение любого стационарного или мобильного объекта, оснащенного приемником спутниковых сигналов, т.е. решить навигационную задачу.

Так родилась идея спутниковой навигации, в рамках которой можно было определять местоположение морского судна значительно точнее, чем это можно было достичь астрономическим способом и скрытно от вероятного противника, что невозможно было обеспечить наземными радионавигационными системами.

Первый отечественный навигационный космический аппарат (НКА)

Первый отечественный НКА «Залив» («Космос-192») СНС первого поколения «Циклон» был запущен в 1967 г.



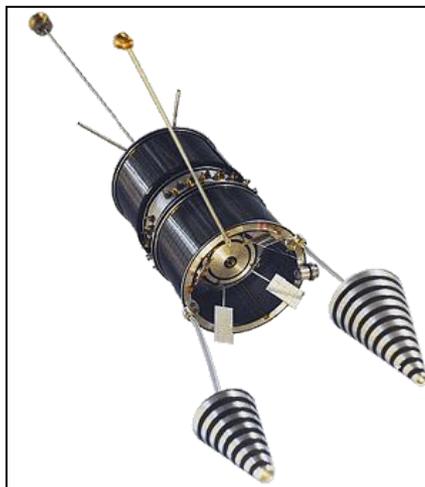
НКА «Залив» обеспечивал непрерывное – в течение всего времени активного существования (технический ресурс 0,5 года) – излучение радионавигационного сигнала на частотах **150 МГц** и **400 МГц**. При этом точность, характеризуемая средней квадратической погрешностью определения координат, составляла: для мобильного объекта **~ 500 м**; для стационарного – **~ 50 м**.

К 1969 г. на орбитах функционировало уже три НКА «Залив», а в 1971 г. СНС «Циклон» была сдана в опытную эксплуатацию для навигационно-связного обеспечения кораблей и подводных лодок Военно-Морского Флота СССР. **Всего было запущено на орбиту 25 НКА «Залив».**

Более совершенный отечественный НКА

«Парус»

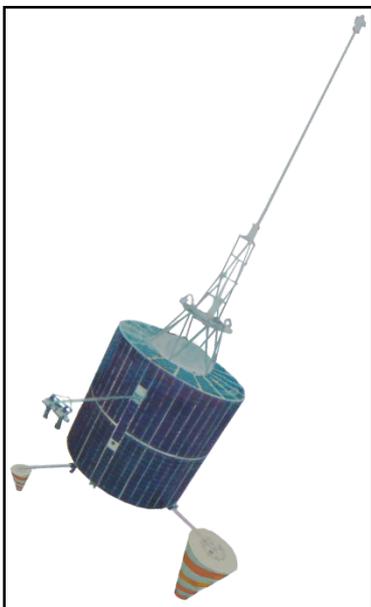
В 1974 г. был запущен первый более совершенный НКА «Парус» («Космос-700»), а два года спустя СНС «Циклон» была принята на вооружение. В ее состав вошли шесть НКА «Парус», обращающихся на высотах 800–1000 км в шести орбитальных плоскостях, равномерно распределенных вдоль экватора. Последний запуск 99-го НКА «Парус» был осуществлен в 2010 г.



Все НКА «Парус» излучали навигационные сигналы на двух частотах в диапазонах **150** и **400** МГц. В диапазоне **150** МГц использовались четыре номинальных значения частоты: **149,91; 149,94; 149,97; 150,03** МГц. Ресурс существования НКА «Парус» составлял 1 год.

СНС

В 1976 г. была разработана СНС «Цикада», предназначенная для удовлетворения потребностей не только ВМФ, но и морского торгового и рыболовного флотов. Первый НКА «Цикада» («Космос–883») был выведен на орбиту в 1976 г. Всего было запущено на орбиту 21 НКА «Цикада».



В 1979 г. СНС «Цикада» была принята в эксплуатацию. В ее состав вошли наземная подсистема управления и контроля, четыре одноименных НКА, выведенные на близкруговые орбиты $H=1000$ км, $T=105$ мин., $i=83^\circ$ и равномерным распределением плоскостей орбит вдоль экватора.

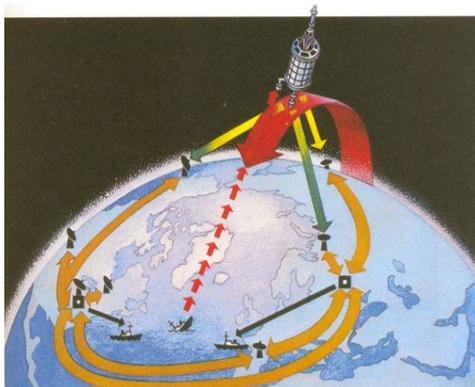
СНС «Цикада» позволяла морскому судну через каждые **30 мин.** (на широте 80°) и **110 мин.** (на экваторе) входить в радиокontakt с одним из НКА и определять свои координаты (в плане) по измерениям доплеровского сдвига частоты с точностью порядка **80-100 м** при продолжительности навигационного сеанса до **6 мин.**

Ресурс активного существования НКА «Цикада» составлял уже 2 года.

Эксплуатация системы «Цикада» была прекращена после 2008 г.

Проект КОСПАС– САРСАТ

В начале 1980-х гг. НКА «Цикада» были дооборудованы аппаратурой обнаружения терпящих бедствие объектов, оснащенных специальными радиобуями или радиомаяками. Первый модернизированный НКА-спасатель под названием «Надежда» («Космос–1383») был запущен в 1982 г. с полигона «Плесецк». Этот НКА стал основным элементом международной космической системы поиска и спасания судов, самолетов и отдельных людей, терпящих бедствие (проект КОСПАС–САРСАТ: **КО**смическая **С**истема **По**иска **А**варийных **С**удов – советская система, **САРСАТ (SARSAT)** – американо-франко-канадская система.



Система КОСПАС–САРСАТ функционирует следующим образом: от радиобуя, сброшенного с терпящего бедствие судна, радиосигнал (на рис. это красные стрелы) поступает на НКА–спасатель, потом ретранслируется на близлежащие к судну станции. Там информация автоматически обрабатывается, по результатам обработки вычисляются координаты радиобуя, которые передаются в национальные центры, а затем – поисково–спасательной службе (на рис. это коричневые стрелы).

За время функционирования системы КОСПАС–САРСАТ (1982–2012 гг.), оснащенной низковысотными НКА, было спасено свыше 30 тыс. человек.

Необходимость создания более совершенной СНС - СНС второго поколения

Уже за начальный период эксплуатации СНС первого поколения выяснилось, что ей присущ ряд недостатков, среди которых основными были не столь высокая, как требовалось, точность координатных определений мобильных объектов, большая дискретность определений (на высоте полета НКА порядка 1000 км непрерывные измерения могли быть обеспечены при наличии только 45–70 НКА, ограниченность использования СНС (определение плановых координат только для морских судов), небольшой технический ресурс.

Это предопределило необходимость создания более совершенной СНС второго поколения с улучшенными точностными характеристиками и более широкими возможностями. К ее разработке приступили в 1979 г.

Новая СНС получила название **ГЛОНАСС** (от первых букв словосочетания **Г**ЛОбальная **Н**Авигационная **С**путниковая **С**истема).

В США разработка СНС второго поколения началась в 1973 г. в рамках программы GPS (Global Positioning System – Система Глобального Позиционирования).

В начале 1980-х гг. упомянутые советскую и американскую навигационные системы стали обобщенно именовать аббревиатурой **ГНСС** (**Г**лобальная **Н**авигационная **С**путниковая **С**истема).

Основы решения навигационной задачи

Навигационные спутниковые измерения основаны на использовании периодических колебательных процессов. Простейшими являются гармонические (синусоидальные) колебания, описываемые уравнением:

$$u = U \sin(\omega t + \phi_0)$$

Здесь u – текущее значение колебаний, U – амплитуда, ω – круговая частота, ϕ_0 – начальная фаза колебаний. Период T и частота f этих колебаний связаны между собой соотношениями:

$$T = 2\pi/\omega, \quad f = 1/T$$

За время T электромагнитная волна, распространяющаяся со скоростью, близкой к скорости света c , проходит путь λ , называемый длиной волны:

$$\lambda = cT = c/f$$

Условия распространения, технические возможности генерирования и приема существенно зависят от длины волны. По длинам волн электромагнитные колебания делят на диапазоны...

Основы решения навигационной задачи - 1

Определение навигационного параметра (геометрическая дальность D от потребителя до НКА) осуществляется по известному значению скорости распространения радиосигнала v и измеренному радионавигационному параметру T - значению времени прохождения сигнала от передатчика до приемника:

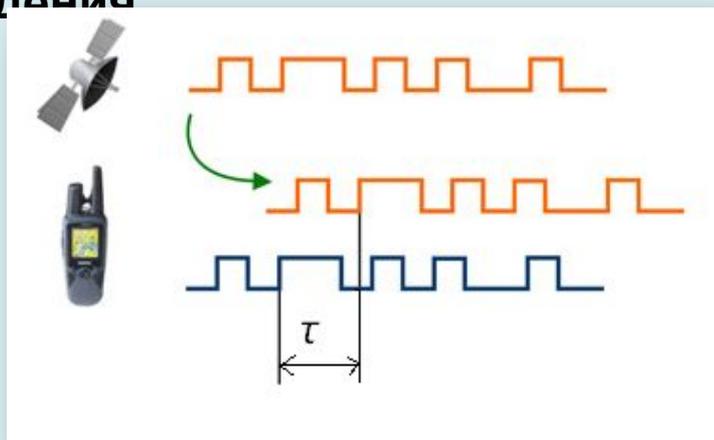
$$D = vT = v(t_2 - t_1),$$

где t_1 – момент излучения сигнала бортовым передатчиком НКА; t_2 - момент прихода сигнала в приемник определяемого объекта (t_1 и t_2 - определяют синхронизированными (т.е. сверенными между собой) часами, которые расположены соответственно в передатчике НКА и в приемнике потребителя).

Основы решения навигационной задачи

- 2

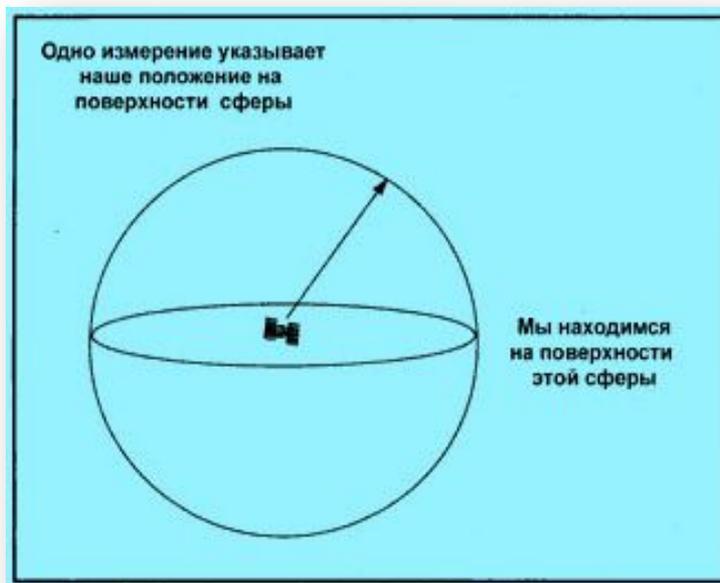
На практике задача точного определения параметра τ решается за счет генерации и передачи с НКА модулированного сигнала. Точно такой же сигнал генерируется в приемнике потребителя, а анализ отставания принятого сигнала от внутреннего позволяет определить время его прохождения



**Графическое изображение процесса
определения радионавигационного параметра τ**

Основы решения навигационной задачи - 3

Когда измеряется дальность D_1 до одного НКА с известными координатами, местоположение определяемого объекта располагается на поверхности воображаемой сферы с центром, находящимся в этом НКА, и радиусом, равным измеряемой дальности D_1 . В этом случае **определить местоположение объекта НЕВОЗМОЖНО.**



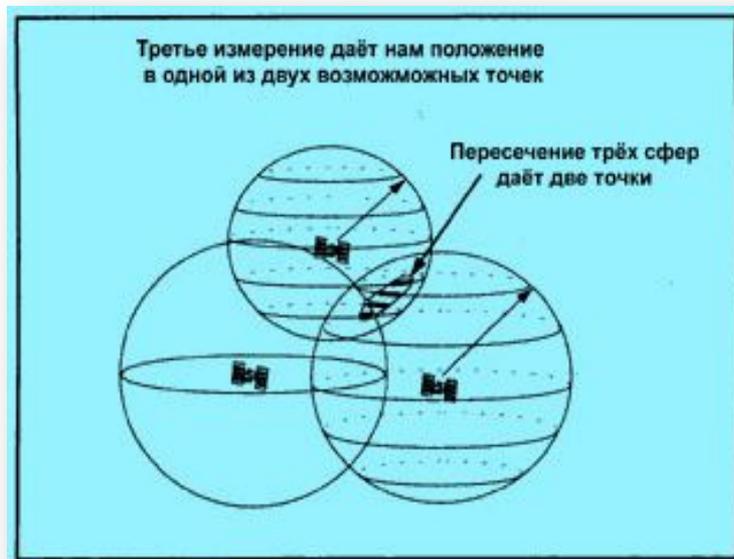
Основы решения навигационной задачи - 4

Когда одновременно с D_1 измеряется дальность D_2 до второго НКА, то область местонахождения определяемого объекта значительно сокращается, поскольку она будет находиться на линии пересечения двух сфер с радиусами D_1 и D_2 . Но и в этом случае точно **определить местоположение объекта невозможно.**



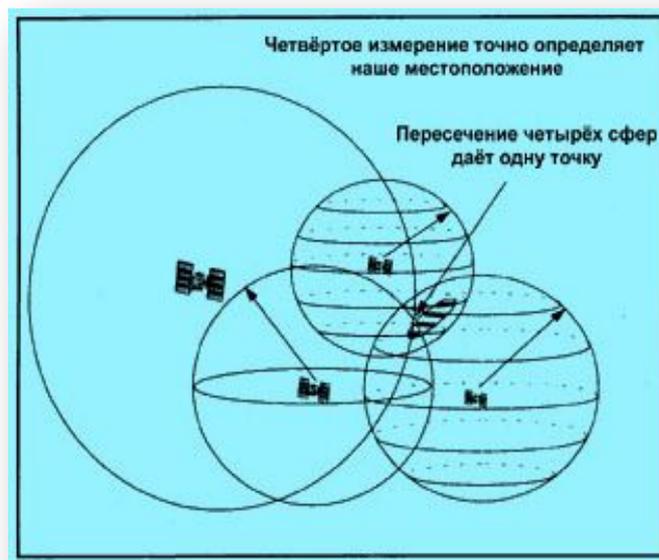
Основы решения навигационной задачи - 5

Когда одновременно с измерением дальностей D_1 и D_2 измеряется D_3 до третьего НКА местоположение объекта **определяется**, но только двумя точками пересечения окружности со сферой радиуса D_3 . Причем одна из этих точек будет истинной, а другая фиктивной. Проблема неоднозначности решается автоматически вычислителями приемника потребителя.



Основы решения навигационной задачи - 6

Однако для надежного исключения неоднозначности (надежного определения положения потребителя) **целесообразно использовать дополнительные измерения дальности D_4 до четвертого НКА.**



На практике же вектор состояния потребителя определяется по измерениям так называемой **псевдодальности** D' до НКА (псевдодальномерный метод), которая отличается от геометрической (истинной) дальности D значением поправки $b=vt'$, обусловленной несинхронностью (несовпадением) бортовой шкалы времени НКА и шкалой времени навигационной аппаратуры потребителя:

$$D' = D + b = [(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2]^{1/2} + b, \quad (1.2)$$

где x_i, y_i, z_i – известные на момент измерения координаты j -го НКА, которые передаются потребителю в составе навигационного сигнала; x, y, z – координаты потребителя.

При определении вектора состояния потребителя по измерениям псевдодальности в качестве навигационного параметра выступает D' , поверхностью положения является сфера с центром в точке расположения НКА, но радиус этой сферы изменен на неизвестную величину b .

Измерение псевдодальностей до трех НКА приводит к системе трех уравнений с четырьмя неизвестными $\{x, y, z, b\}$. В решении этой системы уравнений возникает неопределенный параметр и для устранения возникшей неопределенности необходимо выполнить дополнительное измерение псевдодальности до четвертого НКА. Полученная таким образом **система четырех уравнений имеет точное решение, и, следовательно, местоположение потребителя при измерениях псевдодальностей определяется как точка пересечения четырех поверхностей положения.**

Основы решения навигационной задачи - 8

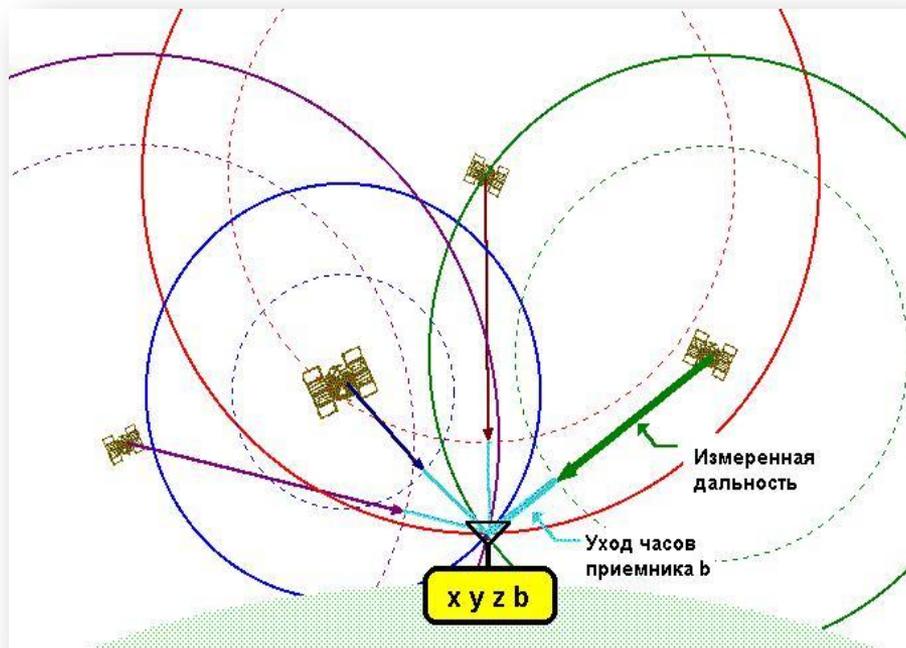
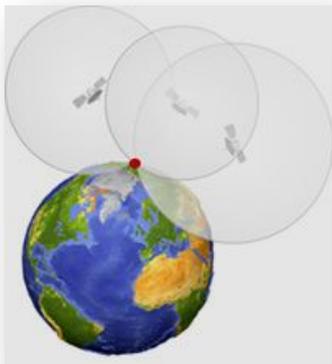


Схема определения местоположения потребителя на основе измерений дальностей (псевдодальностей) до четырех НКА

Сплошными кривыми линиями показаны окружности, в центре которых расположены НКА. Радиусы этих окружностей соответствуют геометрическим дальностям D , т.е. геометрическим расстояниям между НКА и потребителем. Пунктирными линиями показаны окружности с радиусами, соответствующими измеренным псевдодальностям D' (на рис. показан случай, когда величина b больше нуля, т.е. часы потребителя опережают системное время, поэтому измеренные псевдодальности D' меньше геометрических дальностей D).

В основу спутниковой навигации положено как минимум четыре идеи:

- 1. Определение** вектора состояния потребителя по измеренным расстояниям (псевдодальностям) до НКА.
- 2. Обеспечение** точной привязки НКА и потребителя по времени.
- 3. Определение** вектора состояния НКА.
- 4. Компенсация** погрешностей измерений и используемых математических моделей.

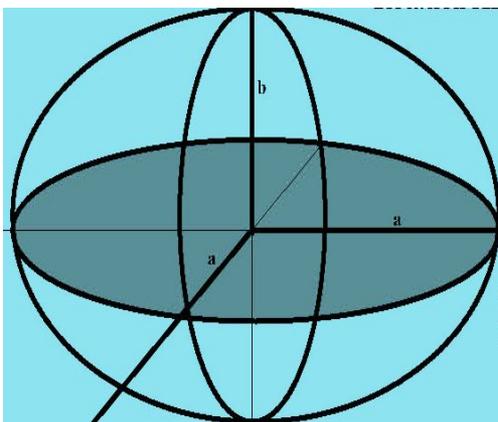


Основные системы координат

Важнейшей компонентой векторов состояния НКА и потребителя являются координаты, при помощи которых определяется их положение. **Координаты – это величины, определяющие положение точки (тела) в пространстве (на плоскости). Совокупность координат всех точек пространства (плоскости) является системой координат.**

Количество систем координат довольно велико и они классифицируются по ряду признаков, например, по назначению, по виду используемой поверхности, на которой определяются координаты, законом проектирования точек земной поверхности на эту поверхность, по виду координатных линий, по расположению начала системы координат и др. В практике спутниковой навигации наибольшее применение нашли геодезическая криволинейная и пространственная прямоугольная системы координат. Эти координаты, впрочем, как и все другие, математически строго связаны между собой, что позволяет осуществлять переход (пересчет) из одной системы в другую.

Геодезическая криволинейная система координат позволяет описывать положение сколь угодно удаленных между собой наземных пунктов, решать различные задачи по связи между ними, вычислять расстояния между пунктами, углы и площади. Эта система координат непосредственно связана с конкретно выбранным эллипсоидом. Как правило, это эллипсоид вращения, задаваемый двумя полуосями – большой (a) и малой (b).



Эллипсоид вращения –
математическое
подобие
Земли

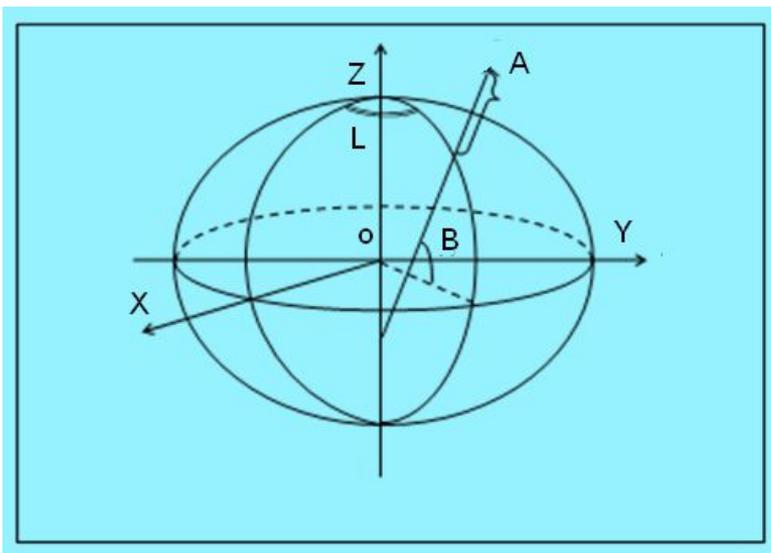
Для определения эллипсоида указывают его a и, вместо b , сжатие (α) или квадрат эксцентриситета (e^2). Эти параметры связаны следующими соотношениями:

$$\alpha = (a - b)/a, e^2 = (a - b)^2/a^2$$

Эллипсоид подбирают таким образом, чтобы он наилучшим образом соответствовал фигуре геоида (физическому подобию Земли) либо в пределах всей Земли в целом (общеземной эллипсоид), либо в пределах ограниченных ее областей (референцный эллипсоид). В таком случае геодезическая система координат будет определяться соответственно как общеземная и референцная.

В случае общеземного эллипсоида его центр совпадает с центром масс Земли, а плоскость его экватора – с плоскостью земного экватора.

Положение точки (например, точки **A**) относительно земного эллипсоида в геодезических координатах определяется широтой (**B**) долготой (**L**) и высотой (**H**).



Общеземная геодезическая (**B**, **L**, **H**) и пространственная прямоугольная (**X**, **Y**, **Z**) системы координат

Геодезическая широта **B** – это угол между нормалью и плоскостью экватора. Счет широт ведется от 0° до 90° к северу от экватора (со знаком плюс) и к югу (со знаком минус).

Геодезическая долгота **L** – это двугранный угол между плоскостью начального меридиана и плоскостью меридиана данной точки. Счет долгот ведется от начального меридиана к западу (со знаком минус) и к востоку (со знаком плюс) от 0° до 180° .

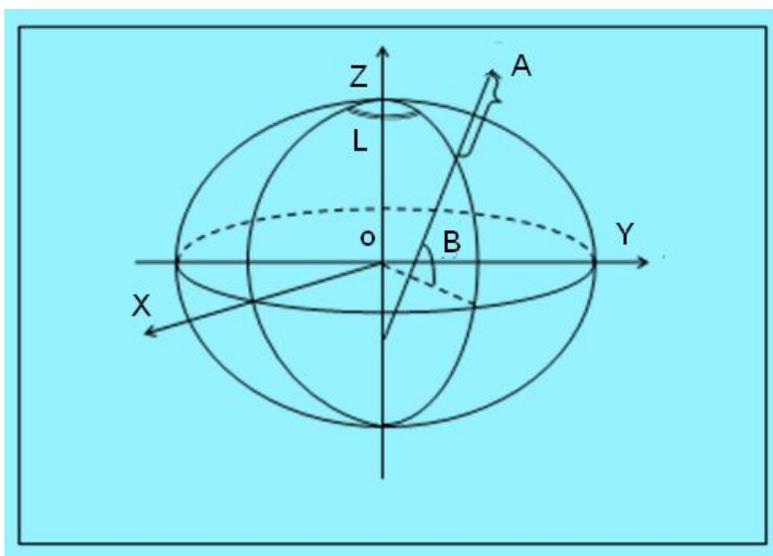
Геодезической высотой **H** называется отрезок нормали, отсчитываемый от поверхности эллипсоида до данной точки. Если точка расположена над эллипсоидом, то высота положительная, если внутри эллипсоида – отрицательная.

B и **L** выражаются в угловой мере (градусы,

Согласно соответствующего постановления Правительства РФ с 1 июля 2002 г. при осуществлении геодезических и картографических работ в нашей стране используется система геодезических координат - Единая государственная референцная система координат 1995 года (СК–95). Эта система координат будет правомерна до 1 января 2017 г. Затем вместо нее будет использоваться геодезическая система координат 2011 года (ГСК–2011).

Система пространственных прямоугольных координат

Систему пространственных прямоугольных координат применяют при решении задач с использованием приемной аппаратуры спутниковых навигационных систем.



Начало этой системы **o** находится в точке пересечения большой и малой осей эллипсоида. Положение любой точки в пространстве задается абсциссой **X**, ординатой **Y** и аппликатой **Z**.

Ось **X** лежит в плоскости экватора и направлена в точку пересечения начального меридиана с экватором, ось **Z** совпадает с малой осью эллипсоида и направлена на север, а ось **Y** дополняет систему координат до правой.

Что касается плоскостей, то плоскость **XOZ** лежит в плоскости начального меридиана, а плоскость **XOY** перпендикулярна ей.

Связь пространственных прямоугольных координат **(X,Y,Z)** с геодезическими координатами **(B,L,H)** осуществляется выражениями:

$$\left. \begin{aligned} X &= (N + H) \cos B \cos L \\ Y &= (N + H) \cos B \sin L \\ Z &= [(1 - e^2)N + H] \sin B \end{aligned} \right\} , \text{ где } \begin{aligned} N &= \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}, \\ e^2 &= 2\alpha - \alpha^2, \end{aligned}$$

Если начало системы координат совпадает с центром масс Земли, то ее называют геоцентрической, если с центром референц-эллипсоида – называют квазигеоцентрической.

В настоящее время для геодезического обеспечения орбитальных полетов НКА ГНСС ГЛОНАСС (РФ) и GPS (США) и решения навигационных задач используются две основные геоцентрические прямоугольные системы координат: **российская ПЗ–90.11** – составная и усовершенствованная часть Системы геодезических параметров Земли 1990 г. – и **американская WGS–84**. Первая была введена с 1 января 2014 г., вторая с 20 января 2002 г.

Начало системы координат ПЗ–90.11 расположено в центре масс Земли; ось **Z** направлена на Условный полюс Земли; ось **X** направлена в точку пересечения плоскости экватора и начального (нулевого) меридиана, установленного Международным бюро времени; ось **Y** дополняет систему координат до правой.

Положение координатных осей **X, Y, Z** системы WGS–84 определяется также как и в системе ПЗ–90.11.

Передаваемые каждым НКА системы ГЛОНАСС бортовые эфемериды (пространственные координаты НКА как функции времени) описывают положение фазового центра передающей антенны данного НКА в системе координат ПЗ–90.11.

Для достижения заданных требований по точности необходимо, чтобы НКА оптимальным образом были расположены относительно потребителя. Данные для вхождения в связь и выбора потребителем оптимального «созвездия» НКА передаются в составе альманаха.

Альманах – это информация, передаваемая с НКА в составе навигационного сообщения и включающая сведения: о сдвиге шкалы времени ГНСС относительно национальной координированной шкалы времени России UTC(SU); о сдвиге шкалы времени каждого НКА относительно шкалы времени ГНСС; о параметрах орбит всех НКА; о техническом состоянии всех НКА. Перечисленные сведения позволяют навигационной аппаратуре потребителя прогнозировать положения НКА с относительно невысокой точностью, но на длительных интервалах времени.

Условием высокоточного определения навигационных параметров потребителя систем ГЛОНАСС и GPS является необходимость взаимной синхронизации шкал времени всех НКА с точностью до нескольких единиц наносекунд (нс). Это обусловлено тем, что временная синхронизация определяет заданную орбитальную конфигурацию НКА системы, обеспечивает заданную последовательность излучения радиосигналов всех НКА, открывает возможность реализации псевдодалномерных методов измерений.

Указанное условие потребовало установки, например, на российских НКА ГЛОНАСС-М высокостабильных цезиевых стандартов частоты (высокостабильных по частоте источников электромагнитных сигналов радиодиапазона) с суточной нестабильностью 1×10^{-13} и точностью взаимной синхронизации бортовых шкал времени не хуже 8 нс.

В качестве шкалы системного времени ГЛОНАСС принята условная непрерывная шкала времени, формируемая на основе шкалы времени Центрального синхронизатора системы (ЦСС). ЦСС оснащен водородными стандартами частоты, суточная нестабильность которых составляет 2×10^{-15} .

Опорной шкалой времени для системы ГЛОНАСС является национальная координированная шкала времени России UTC(SU). Расхождение между шкалой системного времени ГЛОНАСС и UTC(SU) не должно превышать 1 мс. Поправки к шкале системного времени ГЛОНАСС относительно UTC(SU) рассчитываются и 1-2 раза в сутки закладываются на борт каждого НКА. Погрешность привязки шкалы системного времени ГЛОНАСС к шкале UTC(SU) не должна превышать 1 мкс.

Несовпадение шкал времени в 10 нс вызывает дополнительную погрешность в определении местоположения потребителя 10-15 м.

НКА системы GPS имеет на борту четыре генератора (два цезиевых и два рубидиевых), каждый из которых подчиняется командам с Главной станции управления GPS. Долговременная нестабильность бортовых генераторов частоты составляет несколько единиц 10^{-13} и даже 10^{-14} в течение суток.

Опорной шкалой времени для системы GPS является шкала GPS Time (GPST). В 0^h 6 января 1980 г.