

# *История развития радионавигации. Спутниковые радионавигационные системы.*

*В данной работе рассмотрена история создания развития СРНС*

Работу выполнил студент группы ГФ 2-4

*Глейзер Б.Д.*

по лекциям «спутниковые навигационные системы»

преподавателя [Красноперова Р.И.](#)

## **История развития радионавигации. Спутниковые радионавигационные системы.**

- 1) Вводная часть. Предмет и задачи навигации. Традиционные методы навигации.
- 2) История развития радионавигации
  - a) наземная радионавигация;
  - b) появление космической радионавигации;
  - c) спутниковые радионавигационные системы первого поколения;
  - d) радиодальномерный принцип определения координат.
- 3) Спутниковые радионавигационные системы второго поколения
  - a) история создания;
  - b) принципы работы;
  - c) текущее состояние и перспективы развития.
- 4) Заключение

Известно, что исторически для ориентирования человек использовал небесные светила. Обычно мореплаватели ориентировались по звездам. Луне. Солнцу. По ним определяли направление движения: зная среднюю скорость и время в пути, можно было сориентироваться в пространстве и определить расстояние до конечного пункта назначения. Однако при плохих погодных условиях можно было легко сбиться с курса.

С появлением компаса задача значительно упростилась, так как уменьшилась зависимость от погоды. Позднее для определения местоположения в океане, т.е. в навигации, использовались угловые наблюдения небесных тел. Вначале сам термин «навигация» относился к управлению морскими судами (navis, означающее «корабль», и agere — управлять, передвигать), затем этот термин стал применяться к любому виду транспортных средств. Вот как этот термин трактовался в книге «American

Practical Navigator». изданной в 19 веке: «Навигация — это процесс управления движением транспортного средства, быстрый и безопасный, из одной точки в другую». Советский энциклопедический словарь дает следующее определение термина: *навигация* — наука о способах выбора пути и методах вождения судов, летательных аппаратов (воздушная навигация или аэронавигация) и космических аппаратов (космическая навигация). Задачи навигации: нахождение оптимального маршрута (траектории), определение местоположения, направления и значения скорости и других параметров движения объекта. В навигации используют астрономические, радиотехнические и другие методы.

Необходимо знать местоположение и направление движения в текущий момент времени. Важной информацией также является скорость перемещения объекта. Но даже при самых точных угловых наблюдениях небесных тел, точность определения местоположения этим методом составляла не более 1 морской мили.

Вместе с тем надо отметить, что требуемая точность существенным образом зависит от вида работ, типа транспортного средства и условий передвижения. Например, для безопасного управления судами в открытом океане, необходимая точность местоопределения составляет несколько километров, в то время как в прибрежных водах — 2—5 м.

Аналогичные требования к точности и для воздушных судов. Во время полета над океаном требуемая точность определения высоты самолета составляет около 100 м, а при посадке на этапе глиссады для пассажирского самолета — 0,3 м.

После изобретения радио и разработки конструкций направленных антенн, были предприняты вполне очевидные попытки применить для целей навигации радиомаяки, работающие за пределами оптической видимости. Кроме морской навигации, радиомаяки стали широко применяться (и применяются до сих пор) в авиации для прокладки и коррекции курса

летательных аппаратов. Радиомаяки позволяют скорректировать показания бортового магнитного компаса и частично заменить или продублировать его. Точность работы бортового радиокompаса позволяет пилотам гарантированно выйти на такое расстояние к аэродрому, при котором возможна дальнейшая визуальная ориентация в пространстве, например, по местности (малая авиация) или огням взлетно-посадочной полосы.

Анализируя работу радионавигационных систем, основанных на радиомаяках, можно обнаружить, что традиционные радиокompасы, решая с приемлемой точностью задачу коррекции курса, не позволяют решить задачу точного определения местоположения на местности, т.е. определения долготы и широты объекта.



Рис. 1 Определение местоположения по двум радиомаякам. В качестве примера рассмотрим простейшую схему, изображенную на рис. 1. Пусть у нас имеются два береговых передатчика, А и В, и расположенный на корабле приемник О. Передатчики излучают сигнал равномерно во все стороны. Антенна корабельного приемника имеет направленное действие, т.е. когда она определенным образом повернута в сторону передатчика, амплитуда принимаемого сигнала многократно возрастает. Теоретически, если мы идеально точно определили направления на передатчики, имеющие заранее известные координаты, то мы соответственно точно определили свое местоположение на единственно возможном пересечении азимутов в точке О.

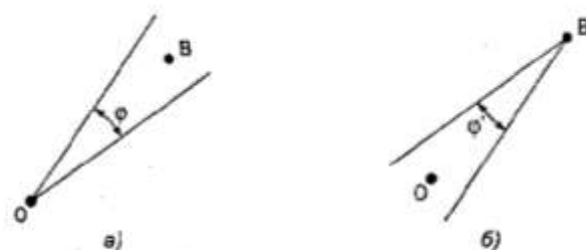
Расстояние до передатчиков многократно превышает длину волны, поэтому мы рассматриваем передатчики как точечные излучатели.

Введем понятие *диаграммы направленности антенны*:

- 1) для передающей антенны — графическое изображение в полярных координатах зависимости напряжённости электрического поля излученной волны от направления излучения (при измерении напряжённости на большом и одинаковом расстоянии от антенны):
- 2) для приёмной антенны — графическое изображение в полярных координатах зависимости ЭДС. наводимой в антенне, от направления прихода волны (при напряжённости поля в месте расположения антенны, одинаковой для всех волн, приходящих с любого направления). Проблема в том, что не существует антенн с идеальной диаграммой

направленности, и чем острее направленность антенны, тем сложнее ее конструкция. Кроме того, если мы хотим, чтобы система определения местоположения действовала за пределами оптической видимости, мы должны использовать достаточно длинные радиоволны, способные огибать горизонт. Но чем больше длина волны, тем большие физические размеры должна иметь идеальная направленная антенна. Поэтому точность действия направленной антенны ограничена ее разумными конструктивными размерами.

Погрешность определения азимута на радиомаяк, представленную в виде некоего угла  $\varphi$  (рис. 2,а), путем простейших геометрических преобразований можно условно спроецировать во встречный угол  $q$  с вершиной в позиции радиомаяка (рис. 2.б).



**Рис. 2** Погрешность определения направления на радиомаяк (а) и обратный угол погрешности определения направления (б)

Очевидно, что с учетом погрешности определения азимутов, вместо точных координат мы получаем некую область вероятного местонахождения, как показано на рис. 3.

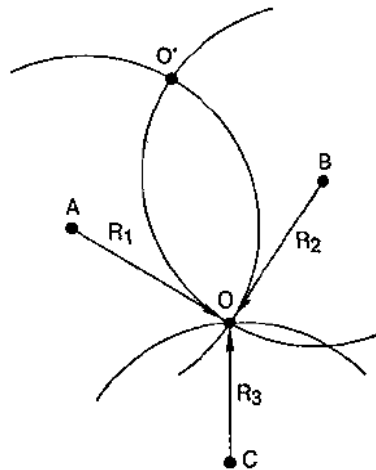


**Рис. 3 Влияние угловых погрешностей ориентации антенны**

На расстояниях до радиомаяков, исчисляемых сотнями километров, погрешности измерения азимута в доли градуса проецируются в погрешности измерения местоположения, исчисляемые сотнями метров. На протяженных воздушных трассах погрешность определения положения летательного аппарата достигает нескольких километров по величине бокового отклонения от трассы.

В случае с двумя передатчиками A и B, если они расположены на одной линии с приемной антенной, возникает абсолютная невозможность определения местоположения. Наличие третьего радиопередатчика устраняет проблему неоднозначности, но лишь незначительно повышает точность определения местоположения.

Следовательно, для успешного решения задачи определения местоположения необходимо измерять дальности, т.е. расстояния между приемником и передатчиками. Зная лишь дальности до трех передатчиков, расположенных в одной плоскости с приемником, можно однозначно решить задачу определения местоположения, как это схематически показано на рис. 4.



**Рис. 4 Определение координат объекта по трем дальностям**

Координаты объекта (точка  $O$ ) являются координатами точки пересечения воображаемых окружностей с радиусами  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ , равными дальностям. Третий передатчик необходим для устранения возможной неоднозначности, возникающей при пересечении двух окружностей (точки  $O$  и  $O'$ ). Очевидно, что в случае с измерением дальностей направленность действия приемной антенны не влияет на точность позиционирования. Но решающее значение приобретает точность синхронизации шкал времени передатчиков и приемника и величина погрешности, возникающей при измерении времени распространения сигнала.

Появление в 1960-х годах чрезвычайно точных атомных часов позволило существенно снизить погрешности дальномерного метода, до уровня, достаточного для широкого применения его на практике.

Практическим воплощением дальномерного метода в США является морская навигационная система LORAN (Long Range Aid to Navigation — Навигационное оборудование дальнего радиуса действия), имеющая чрезвычайно большое значение в истории развития Глобальных навигационных спутниковых систем, поскольку в ней впервые было использовано определение времени прохождения сигнала от передатчика до приемника, получившее дальнейшее развитие в системах спутниковой навигации.

Значение скорости распространения Радиосигнала давно известно науке, поэтому\*, измерив с достаточной точностью время распространения радиосигнала, можно легко вычислить точное расстояние до передатчика. Передатчик излучает сигнал непрерывно, а время распространения сигнала вычисляется по набегу фазы за время прохождения радиоволнами расстояния до приемника. Поскольку относительный набег фазы прямо пропорционален времени прохождения сигнала, по разности фаз между внутренним опорным сигналом приемника и принимаемым сигналом вычисляется расстояние до передатчика.

Запуск в СССР первого искусственного спутника Земли (ИСЗ) 4 октября 1957 г. произвел переворот в различных областях науки и техники. В геодезии были разработаны новые методы решения научных задач с помощью ИСЗ. Значительно повысилась точность навигации и определения положения точек и объектов на поверхности Земли.

С созданием мощных радиолокационных станций стало возможным измерять параметры движения и относительное местоположение спутника по отраженному от его поверхности лучу радиолокатора. Появилась возможность измерения параметров движения спутника по излучаемому сигналу. В 1957 году в СССР группа ученых под руководством академика Владимира Александровича Котельникова экспериментально подтвердила возможность определения параметров движения ИСЗ по результатам измерений доплеровского сдвига частоты сигнала, излучаемого этим спутником.

*Эффект Доплера (доплеровский сдвиг частоты)* — изменение частоты колебаний или длины волн, воспринимаемых наблюдателем (приемником колебаний), вследствие движения источника волн и наблюдателя относительно друг друга. Эффект Доплера имеет место при любом волновом процессе распространения энергии. Основная причина данного явления — изменение числа волн, укладываемых на пути распространения между источником и приемником. При сохранении длины волн, испускаемых источником, это



приводит к изменению числа волн, достигающих приемника в каждую секунду, т.е. к изменению частоты принимаемых колебаний.

Группой Котельникова была установлена возможность решения обратной задачи — нахождения координат приемника по измеренному доплеровскому сдвигу сигнала, излучаемого с ИСЗ, если параметры движения и координаты этого спутника известны. При движении спутник излучает сигнал определенной частоты, который несет информацию о его положении на орбите. Если измерить частоту принятого сигнала и сравнить ее с эталонной, то можно вычислить доплеровский сдвиг частоты, обусловленный движением спутника.

При непрерывном измерении можно составить своего рода функцию изменения частоты Доплера. Частота Доплера непрерывно изменяется и в какой-то момент становится равной нулю, затем изменяет знак. В момент равенства нулю частоты Доплера приемник находится на линии, которая является нормалью к вектору движения спутника. Измерив момент времени, когда частота Доплера равна нулю, и используя зависимость крутизны кривой доплеровской частоты от расстояния между приемником и ИСЗ, можно вычислить координаты приемника. При этом спутник становится радионавигационной опорной станцией, координаты которой изменяются во времени вследствие движения спутника по орбите, но заранее могут быть вычислены для любого момента времени благодаря эфемеридной информации, заложенной в навигационном сигнале, спутника.

В 1963 году начались работы по построению первой отечественной низкоорбитальной навигационной спутниковой системы «Цикада». В 1967 году на орбиту был выведен первый отечественный навигационный спутник «Космос-192». Для радионавигационных спутниковых систем первого поколения характерным является применение низкоорбитальных ИСЗ и использование для измерения навигационных параметров объекта сигнала одного, видимого в данный момент спутника.

Ошибка в определении координат для подвижного объекта составляла 500 м. Для неподвижного объекта эта величина уменьшается до 50 м.

Идеи использования космических аппаратов для навигации подвижных объектов в США также начали развиваться после запуска СССР в 1957 году первого искусственного спутника Земли. В это время была поставлена задача слежения за советским ИСЗ посредством приема его сигнала на наземном пункте с известными координатами, выделения доплеровского сдвига несущей частоты передатчика ИСЗ и дальнейшего расчета параметров движения спутника. Одновременно решалась и обратная задача расчета координат приемника на основе обработки принятого сигнала и координат ИСЗ.

На этой основе в интересах навигационного обеспечения в 1964 году была создана доплеровская спутниковая радионавигационная система первого поколения «Transit», предназначенная для навигационного обеспечения пуска с подводных лодок баллистических ракет «Поларис». После того, как в 1967 г. эта система была предоставлена для коммерческого использования, число гражданских потребителей быстро превысило число военных. Координаты потребителя рассчитывались на основе приема и выделения доплеровского сдвига частоты передатчика одного из 6—7 навигационных космических аппаратов, который мог находиться в поле видимости в течение примерно 40 минут.

Так же, как и в системе «Цикада», в системе «Transit» координаты источника вычисляются по доплеровскому сдвигу частоты сигнала одного из 7 видимых спутников, которые имеют круговые полярные орбиты с высотой над поверхностью Земли -100 км. Период обращения спутников «Transit» равен 107 минутам.

Спутниковые низкоорбитальные доплеровские радионавигационные системы имеют ряд существенных недостатков:

- 1) недостаточная точность определения координат объектов;
- 2) отсутствие непрерывности в измерениях, так как спутники имеют низкие орбиты, и поэтому время, в течение которого спутник находится в поле видимости потребителя, не превышает одного часа;
- 3) время между прохождением различными спутниками зоны видимости зависит от географической широты, на которой находится наблюдатель, и может составить величину от 35 до 90 минут. Сокращение этого времени за счет наращивания числа спутников невозможно, потому что все спутники излучают сигналы на одной и той же частоте.

Для преодоления указанных недостатков были предложены другие способы применения спутников. Например, при определении взаимного расположения спутников их можно синхронно наблюдать с нескольких наземных станций. Сам спутник при этом может играть пассивную роль (например, отражая луч лазера, посланный с наземной станции, обратно на ту же станцию) или активную роль (непрерывно осуществляя передачу радиосигнала).

На начальных этапах развития космической геодезии сигналы подавались в виде вспышек света, которые фотографировались на фоне звезд одновременно с нескольких наземных пунктов, находящихся вне прямой видимости. Положение спутника на фотографии относительно опорных звезд давало возможность определить точное направление на него сданной станции наблюдения.

В настоящее время для определения местоположения на земной поверхности обычно измеряют расстояние между наземным пунктом и спутником, а также скорость изменения этого расстояния при прохождении спутника. Расстояния рассчитывают, исходя из времени, которое затрачивает электромагнитный сигнал (лазерная вспышка или радиоимпульс) на прохождение пути от спутника до принимающей станции при условии, что скорость распространения сигнала известна.

Скорость изменения расстояния между спутником и принимающей станцией определяется по величине наблюдаемого доплеровского сдвига частоты.

Основной принцип спутниковой геодезии — измерение расстояния до спутников, являющихся точками отсчета для вычисления координат на Земле. Все остальное, что относится к системе, — всего лишь технические решения, предназначенные для облегчения этого процесса, для того, чтобы выполнить его точнее и проще.

Начало работ по созданию спутниковых радионавигационных систем как в СССР, так и в США положило появление атомных часов в 1960 году, что позволило создать для целей навигации сеть точно синхронизированных передатчиков, передающих кодированные сигналы. Координаты приемника определялись по временным задержкам сигнала.

В спутниковых методах определения местоположения измерение расстояний до спутников осуществляется по измерениям времени прохождения радиосигнала от космического аппарата до приемника. При этом передающее устройство размещено на спутнике, а приемник — на определяемой точке. Радиосигнал проходит измеряемое расстояние  $S$  от спутника (передатчика) до приемника за время  $\tau$ . Время излучения и время приема данного сигнала точно определяют синхронизированными часами, которые расположены на спутнике и на определяемой точке. При этом измеряемое расстояние определяют по формуле:

$$S = v \cdot \tau$$

Так как скорость  $v$  распространения радиоволн составляет около 300 000 км/с. то для обеспечения геодезической точности измерений необходимо измерять время с точностью  $10''$  —  $10''$  "с. Главной трудностью при измерении времени распространения радиосигнала является точное выделение момента времени, в который сигнал передан со спутника.

Для обеспечения высокой точности измерений синхронизируют опорные генераторы передатчика (спутника) и приемника. В светодальномерных и радиодальномерных измерениях используются импульсные и фазовые методы измерения расстояний, а также их сочетания. Эти же методы используются в спутниковых дальномерных измерениях. При этом широкое распространение получили кодированные сигналы.

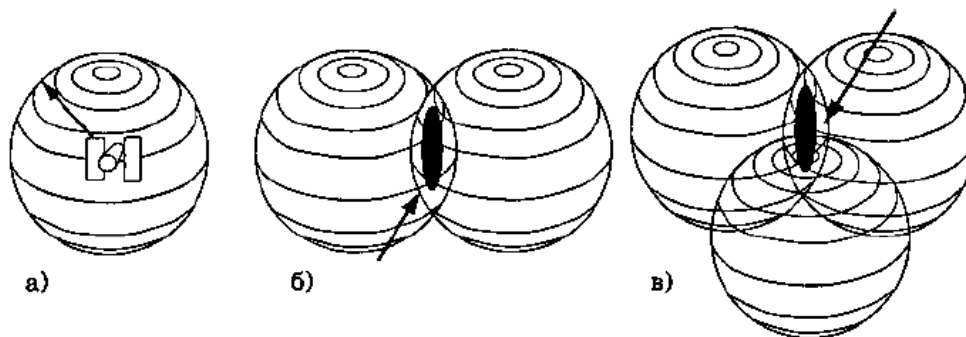
Наиболее перспективными космическими системами, построенными на указанных принципах измерений, которые служат для решения геодезических задач, являются спутниковые радионавигационные системы второго поколения ГЛОНАСС (СССР—РФ) и NAVSTAR-GPS (США). Эти системы являются исключительно точным инструментом для решения прикладных задач геодезии, геофизики и землепользования. Они предназначены для высокоточного определения трех координат места, составляющих вектора скорости и времени различных подвижных объектов.

Наиболее используемой в настоящее время является американская спутниковая система NAVSTAR (NAVigation Satellite providing Time And Range), все чаще именуемая GPS (Global Positioning System). Разработка этой системы началась в 1973 г. Эксплуатационная готовность объявлена в 1995 г.

Система разработана по заказу и находится под управлением МО (ВВС) США. В интересах мирового сообщества она используется в соответствии с особыми положениями. США предоставляют систему в стандартном режиме для гражданского, коммерческого и научного использования. За использование системы гражданскими потребителями ответственность несет Министерство транспорта США.

Отечественная спутниковая система называется ГЛОНАСС (Глобальная Навигационная Спутниковая Система). Разработки данной системы начались в середине 1970-х годов, первые спутники были запущены в 1983. а в 1995 г. Правительство РФ специальным постановлением открыло систему для гражданского применения.

Как уже было сказано выше, в настоящее время для определения местоположения на земной поверхности обычно измеряют расстояние между наземным пунктом и спутником и скорость изменения этого расстояния при его прохождении. Рассмотрим следующие ситуации (см. Рис. 5):



**Рис. 5** Определение координат точки, (а) по одному спутнику с известными координатами; (б) по двум спутникам; (в) по трем спутникам.

В том случае, когда измеряется расстояние до одного спутника с известными координатами, местоположение определяемой точки должно быть на воображаемой сфере с центром, находящимся на этом спутнике, и радиусом, равным измеряемому расстоянию  $S_i$  (рис. 5-а).

Когда одновременно измеряется расстояние  $S_2$  до второго спутника, то область поиска сократится, так как место положение определяемой точки будет находиться на линии пересечения двух сфер с радиусами  $S_1$  и  $S_2$ , т.е. на окружности (рис. 5-б).

В случае измерения расстояния  $S_3$  до третьего спутника, то возможное местоположение определяется двумя точками пересечения окружности со сферой радиуса  $S_3$  (рис. 5-в).

Одну из этих двух точек можно не принимать во внимание, так как одна из точек располагается слишком далеко от поверхности Земли либо имеет неправдоподобно большую скорость движения. Например, когда точно известна высота определяемой точки (корабли всегда находятся на уровне моря), то можно исключить одно из измерений.

Для того чтобы определить истинное местоположение из этих двух точек (рис. 5-в), можно измерить расстояние  $S_4$  до четвертого спутника. Можно обойтись и тремя спутниками, если логически исключить неправдоподобное решение.

Применение Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в различных областях деятельности объясняется высокой точностью и быстротой наблюдений. Обычная точность измерений коротких базовых линий (примерно до 30—50 км) двухчастотными ГНСС-приемниками характеризуется среднеквадратическими погрешностями определения планового положения: в статическом режиме  $2\text{—}3 \text{ мм} + 0,5D \times 10^{-6}$  (для линии в 10 км погрешность равна 7—8 мм), в кинематическом режиме (т.е. при движении наблюдателя)  $10 \text{ мм} + 2D \times 10^{-6}$ , где  $D$  — расстояние в километрах. Точность по высоте в 2—5 раз хуже. При использовании точных эфемерид возможно достижение точностей  $10^{-7}$ — $10^{-9}$  на расстояниях в тысячи километров.

В таблице 1 показано, как возрастала точность спутниковых технологий, и по каким причинам это происходило. Из таблицы видно, насколько важным является качество эфемерид спутников (включая параметры бортовых часов), точность опорной сети и моделирование различных источников ошибок.

Таблица 1

Год	Относительная ошибка $b$	Источники повышения качества измерений	Основные источники ошибок
1983	$10^{-6}$	геодезические приемники (измерение фазы несущей волны)	атмосферная рефракция, ошибки орбит
1986	$10^{-7}$	двухчастотные измерения фазы	тропосферная рефракция, ошибки орбит
1989	$10^{-8}$	глобальная сеть слежения (CIGNET)	тропосферная рефракция, ошибки орбит
1992	$5 \times 10^{-9}$	улучшение глобального слежения за спутниками (IGS)	ошибки от тропосферы, орбит, фазовых центров
1997	$10^{-9}$	повышение точности орбит, моделирование тропосферы и фазовых центров антенн	ошибки глобальной системы отсчета, специфические ошибки пунктов, атмосферные градиенты
<p>Среднеквадратическая ошибка в плане</p> $M_D(\text{мм}) = \left[ (0,1 \div 1,0 \text{ мм})^2 + (2 \cdot b \cdot D)^2 \right]^{1/2},$ <p>где <math>D</math> — расстояние между пунктами</p>			



Спутниковые методы определения координат различной точности нашли применение во многих приложениях. К ним, например, относятся:

- геодинамика (от локальной до глобальной, включая движение тектонических плит, определение параметров ориентации Земли и т. п.);
- гляциология (движение ледников в Гренландии и Антарктиде);
- гидрология (съемки шельфа, акваторий портов, дна рек и т. д.);
- городской и земельный кадастр;
- службы времени и частоты;
- контроль строительства различных сооружений (автодороги, железные дороги, электростанции, морские платформы и т. п.);
- контроль и управление машинами и механизмами;
- археология;
- сельское хозяйство (контроль сельхозугодий, управление машинами);
- геоинформационные системы (ГИС) различного назначения;
- системы обеспечения безопасности (например, на рудниках, в грузовых терминалах, аэропортах, районах оползневых явлений и т. п.).

В последние годы значительно возрос интерес к применению спутниковых технологий к мониторингу механизмов, машин, грузов и других объектов, включая людей. Появились службы, основанные на определении местоположения (Location based service, LBS).

Надо отметить, что спутниковые технологии развиваются быстрыми темпами по нескольким направлениям:

- совершенствование работы самих систем и спутников;
- разработка теории методов GPS/ГЛОНАСС (общая теория методов относительных определений, теория кинематических съемок с инициализацией на Земле и в движении и т. п.);

- совершенствование методов преобразований координат и высот;
- создание более совершенной аппаратуры;
- универсализация методов обработки — разработка форматов обмена данными, улучшение моделей геофизических явлений, повышение точности систем координат;
- разработка методов применения ГЛОНАСС/GPS в различных областях деятельности;
- появление специализированных служб (International GNSS Service — IGS. активные сети).

Дальнейшее развитие спутниковых технологий в геодезии связывают, главным образом, с появлением новых видов общедоступных сигналов, восстановлением системы ГЛОНАСС и появлением системы Галилео. Это даст возможность добиваться высокой точности за более короткое время наблюдений.

## **Заключение**

В данной работе были рассмотрена история и основные этапы развития радионавигации. Были кратко описаны основные принципы определения положения объектов радионавигационными с помощью наземной инфраструктуры и искусственных спутников Земли. В данной лекции основное внимание уделено этапам развития спутниковых радионавигационных систем первого и второго поколения, историей их создания, основным принципам работы, текущему состоянию и перспективам развития.