

## **GPS**

### *Глобальная Система Позиционирования*

#### *Что такое GPS?*

#### *Решение одной древней проблемы*

Вероятно, с того самого момента, как человек поднялся на ноги и начал странствовать по Земле, он искал некий простой способ представить себе, где находится и куда идет.

Это настолько понятная задача, что можно было бы думать, что средства, которые вполне решают ее, давно уже созданы.

На самом же деле, вплоть до настоящего времени при использовании любой технической системы возникают свои трудности и ограничения.

Первобытные путешественники, похоже, просто помечали свои пути, раскладывая камни. Но это удобно только в непосредственной близости от собственного лагеря. А что делать при снегопаде, или, если дождь смывает такие метки?

Когда человек начал осваивать океаны, проблема осложнилась: негде было размещать камни. И не было никаких наземных ориентиров. Единственным, на что можно было рассчитывать, были звезды.

К сожалению, звезды далеки и выглядят, хотя и очень симпатично, но абсолютно одинаково, независимо от того, где Вы находитесь. Единственный способ использовать их - это проведение очень тщательных угловых измерений. И, конечно, эти измерения могут быть выполнены только в ночное время и только ясными ночами. Но даже при самых лучших астрономических приборах звездная навигация может в действительности лишь приблизительно указать Вам, где находитесь, с ошибкой до одной мили.

Иногда этого недостаточно, например, если необходимо найти вход в гавань штормовой ночью.

Современный человек со всеми своими электронными устройствами испробовал не одну хитроумную систему. Но и с ними не все просто. Вы могли, например, слышать о системе LORAN. Эта радиосистема, в состав которой входит цепочка береговых станций, достаточно хороша для прибрежных вод. Но она не перекрывает большую часть земной поверхности, и ее точность зависит от условий распространения радиоволн.

Другой системой, которая так же, как и GPS, использует спутники, является радиосистема TRANSIT. К сожалению, ее спутники располагаются на очень низких орбитах и их немного. По этой причине непрерывное определение координат местоположения оказывается невозможным. К тому же, эта система основана на доплеровских измерениях, и даже незначительное перемещение антенны приемника во время работы может

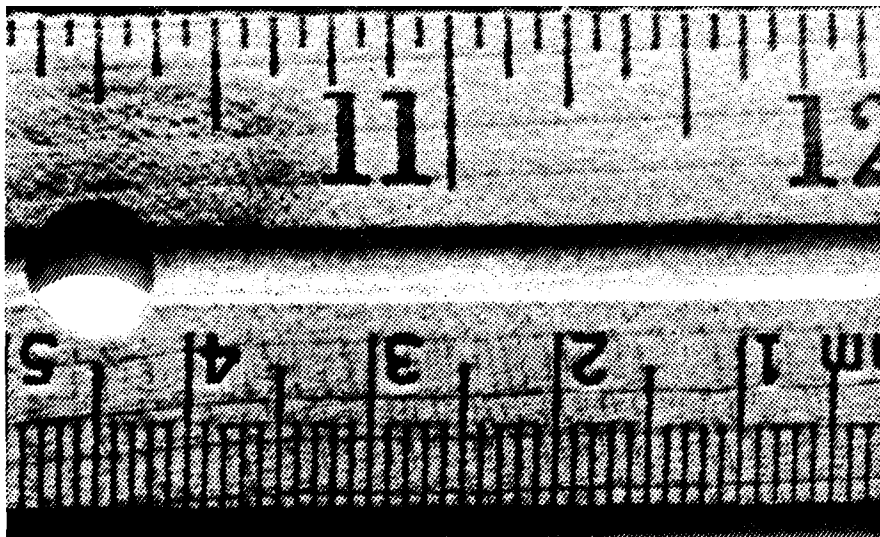
вызвать существенные погрешности местоопределения.

### *GPS - общедоступная глобальная навигационная система*

В конце концов у кого-то лопнуло терпение, и было сказано: "Довольно! Мы должны иметь систему, которая решает задачу". Этим "кто-то" было Министерство Обороны (МО) США, которому действительно надо было знать, где находятся цели (чтобы в случае необходимости атаковать их), и которому были выделены все необходимые средства, чтобы создать такую систему. В результате было получено нечто, названное Global Positioning System (GPS), или Глобальная Система Местоопределения (позиционирования).

Это было грандиозное предприятие. Действительно, Правительство США затратило свыше 12 миллиардов долларов на создание системы и продолжает тратить средства на ее развитие и поддержание в рабочем состоянии. Но это хорошо потраченные деньги, так как система действительно работает!

GPS основывается на созвездии из 24 спутников, находящихся на околоземных орбитах на очень большой высоте. До известной степени их можно представить себе как "рукотворные" звезды, созданные для замены настоящих, которые традиционно используются для навигации.



Спутники GPS располагаются настолько высоко, что возможное противодействие со стороны наземных систем малоэффективно. Построены они с применением совершенных технологий, обеспечивающих точное местоопределение в любом месте Земли непрерывно 24 часа в сутки. Погрешность местоопределения может быть не больше, чем ширина обычной улицы. А в так называемом "дифференциальном" режиме (более подробно об этом ниже) геодезисты и топографы используют GPS для измерения расстояний и координат с погрешностями до сантиметра и меньше.

Поскольку система создавалась прежде всего как военная, она исключительно устойчива, надежна и невосприимчива к естественным и

искусственным помехам.

Но наиболее захватывающими являются потенциальные свойства системы. При современной технологии интегральных схем приемники GPS настолько малы по размерам и дешевы, что их может иметь при себе практически каждый, получая тем самым возможность в любое время знать свое точное местоположение. Это новое потребительское свойство GPS в настоящее время столь же вседоступно, удобно, а в ближайшем будущем и необходимо, как телефон, телевизор, транзисторный приемник, калькулятор и многие другие блага цивилизации. Можно с полным основанием сказать, что GPS - это "новое достояние цивилизации", созданное техническим прогрессом.

Области применения GPS почти неограничены. Некоторые из них очевидны:

транспортные средства любого вида могут теперь точно определять свои координаты и место назначения, машины скорой медицинской и технической помощи быть более точно нацелены, а автомобили - оборудованы электронными картами, которые мгновенно укажут кратчайший путь к любому месту.

Поскольку система определяет три координаты местоположения, она подходит и для авиации. GPS рассматривается специалистами как самый лучший (и самый дешевый) способ управления воздушным движением. В настоящее время ведется успешная работа и по созданию точных спутниковых систем посадки самолетов и вертолетов. Можно назвать и многие другие области применения.

Но это всего лишь начало.

***Каждая точка на земле будет иметь свой уникальный адрес***

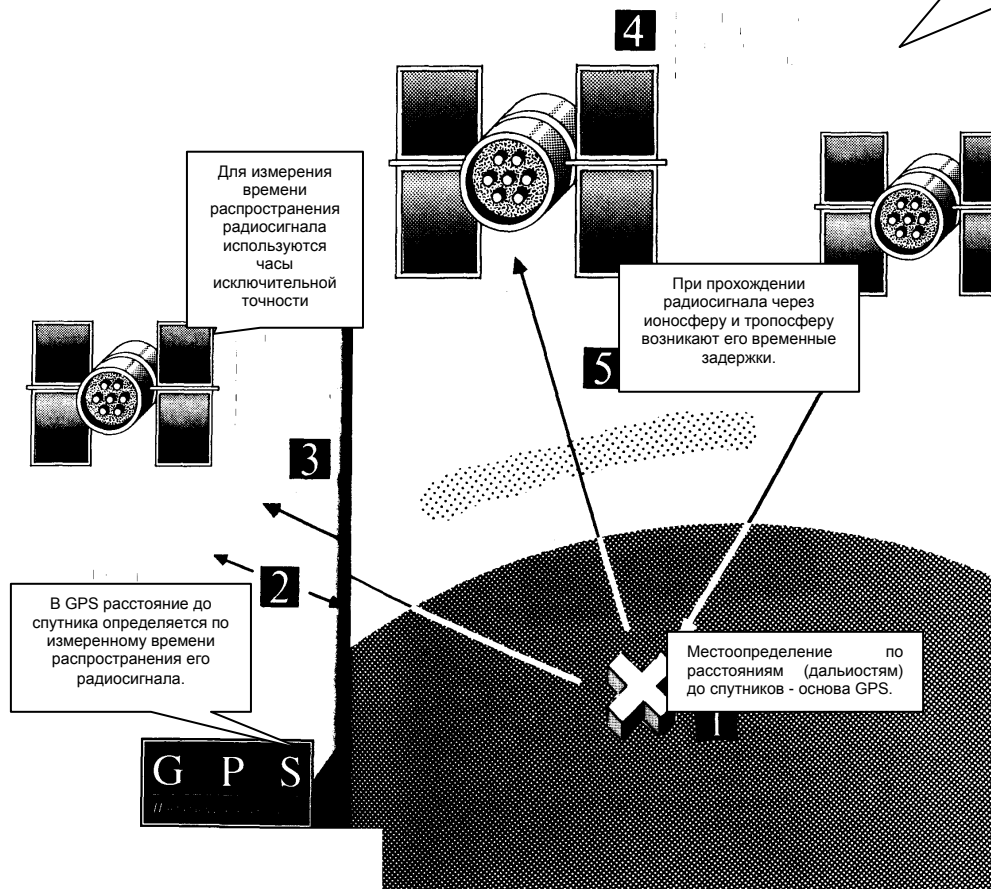
GPS действительно дает возможность каждому квадратному метру земной поверхности приписать уникальный адрес. Это означает, что возможны совершенно новые способы организации нашей деятельности. Представьте себе будущее, когда телефонный справочник - это уже не бумажная книга, а база данных в памяти компьютера. И кроме списка телефонных номеров и почтовых адресов такой электронный справочник хранит так же и точные координаты всех Ваших корреспондентов, определенные с помощью GPS. Предположим, например, что Вы ищете автозаправочную станцию. Автомобильная ЭВМ из базы данных извлечет координаты ближайшей и укажет самый короткий путь к ней. Никакого бесцельного поиска. Никакой бесполезной езды.

Это "новое достояние цивилизации" даст миру и новые стандарты определения координат и расстояний и позволит управлять ресурсами общества гораздо более эффективно, чем когда-либо прежде.

### ТАКИМ ОБРАЗОМ:

- Навигация традиционно являлась наукой для посвященных.
- GPS создана МО США для решения задач точной навигации.
- Для определения координат любой точки на земле в GPS используются спутники, компьютеры и различные вычислительные методы.
- Знание координат местоположения настолько существенно для современной жизни, что GPS следует рассматривать как "новое достояние цивилизации".

Кроме расстояния до спутника, необходимо еще знать его местоположение в космосе.



### О том, как работает GPS

#### Пять начальных ступенек

Основные принципы, заложенные в GPS, действительно просты, хотя в самой системе используется оборудование, построенное на современных "высоких технологиях".

Для того, чтобы разобраться в этом, давайте сначала выделим пять существенно важных идей и рассмотрим их по отдельности. Мы начнем с крупных, опустив детали.

Позже мы коснемся и некоторых подробностей.

*Основная идея -местопределение по расстояниям до спутников*

GPS основана на местопределении по расстояниям до спутников. Это означает, что координаты некоторого объекта на Земле вычисляются на основе измерения расстояний до группы спутников в космосе. Спутники при этом выполняют роль точно координированных точек отсчета.

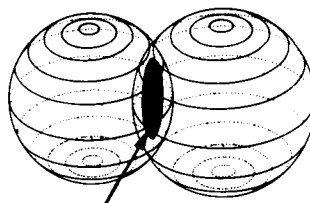
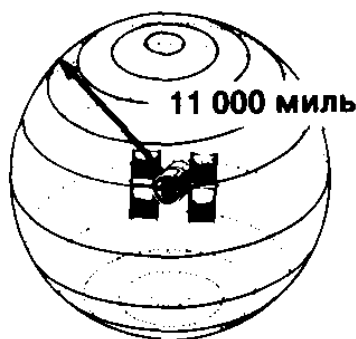
Можно было бы спросить: "Как измерить точно, насколько мы удалены от спутника и как определить, где находится спутник, движущийся в космическом пространстве?" Эти детали пока опустим. Просто примем, что есть техническая возможность определить, где в космосе находится каждый из спутников и как далеко он от нас.

Тогда основополагающая идея GPS проста. Допустим, что мы не знаем своих координат и пытаемся определиться. Если известно, что мы находимся на определенном расстоянии, скажем 21000 километров (примерно 11000 миль), от спутника **A**, то это существенно сократит область пространства, в которой нас следует искать: мы должны быть где-то на воображаемой сфере с центром в спутнике **A** и радиусом в 21000 километров.

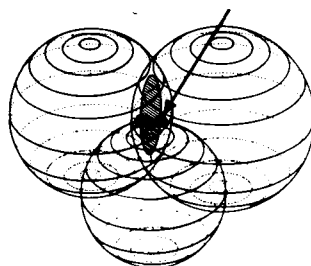
Если к тому же определено, что расстояние до другого спутника **B** составляет 22000 километров, то это еще больше сократит область поиска. Ведь единственная область пространства, где мы будем на расстоянии 21000 километров от спутника **A** и 22000 километров от спутника **B**, это линия пересечения двух сфер, т.е. окружность.

Если мы измерим тем или иным способом расстояние еще и до третьего спутника, то сведем возможное местоположение к двум точкам. Действительно, если известно, что в одно и то же время мы находимся на расстоянии 23000 километров еще и от спутника **C**, то существуют только две точки в пространстве, где это возможно. Эти две точки находятся там, где сфера радиусом в 23000 километров пересекается с окружностью, полученной от пересечения сфер с радиусами в 21000 и в 22000 километров.

Определяясь по трем спутникам, мы можем свести возможное местоположение в пространстве до двух точек. Несколько позже мы увидим, что существует техническая причина, по которой мы должны выполнить еще одно измерение, но *теоретически* пока достаточно и трех.



*Измерение двух расстояний дает линию возможного местоположения в виде окружности*



*Измерение трех расстояний дает две возможные точки местоположения.*

Как решить, какая из этих двух точек - истинное местоположение? Для этого можно произвести измерение расстояния (дальности) до четвертого спутника, или учесть некоторые дополнительные условия. Обычно, одна из двух точек - это неправдоподобное решение. Она либо располагается слишком далеко от поверхности Земли, либо имеет неправдоподобно большую скорость движения. Вычислители приемников GPS снабжены различными средствами, автоматически выделяющими истинное местоположение из двух возможных.

Вместе с тем, если точно известна высота (например корабли всегда находятся на уровне моря), то можно исключить одно из измерений. Одна из сфер на рисунках может быть заменена на сферу с центром в центре Земли и радиусом, равным ее радиусу плюс высота. Некоторые приемники могут быть переключены в режим определения двух горизонтальных координат.

Так или иначе, но для того, чтобы однозначно определить свое местоположение, необходимо знать расстояния (дальности) до четырех спутников. Можно обойтись и тремя, если логически исключить

неправдоподобное решение.

Из сказанного следует, что основной принцип GPS - это использование спутников в качестве точек отсчета для вычисления координат на Земле на основе тригонометрических соотношений. Все остальное, что относится к системе, всего лишь технические решения, предназначенные для облегчения этого процесса, для того, чтобы выполнить его более точно и просто. Рассмотрим теперь некоторые из этих решений.

*ТАКИМ ОБРАЗОМ:*

- Координаты местоположения вычисляются в GPS на основе измеренных расстояний до группы спутников.
- Для определения местоположения необходимо провести четыре измерения.
- Трех измерений достаточно, если тем или иным методом исключить неправдоподобное решение.
- Еще одно измерение требуется по техническим причинам, которые будут рассмотрены ниже.

*Измерение расстояния до спутника*

Поскольку GPS основана на использовании расстояний до спутников, находящихся в космосе, необходим метод для определения этих расстояний.

Удивительно, но основная идея, которая здесь используется, есть всего навсего старое школьное равенство: "пройденное расстояние равно скорости, умноженной на время движения". Например: "Если машина движется со скоростью 60 километров в час в течение 2-х часов, ее скорость (60 километров в час), умноженная на время движения (2 часа) даст расстояние (120 километров)".

GPS измеряет время, за которое радиосигнал спутника доходит до приемника на Земле, а затем по этому времени вычисляет расстояние.

Радиоволны распространяются со скоростью света - около 300000 километров в секунду. Таким образом, если мы сможем точно определить момент времени, в который спутник начал передачу, и момент, когда мы получили его сообщение, мы будем знать, как долго оно шло до

нас. Мы умножим это время в секундах на скорость распространения сигнала 300000 километров в секунду и получим искомое расстояние.

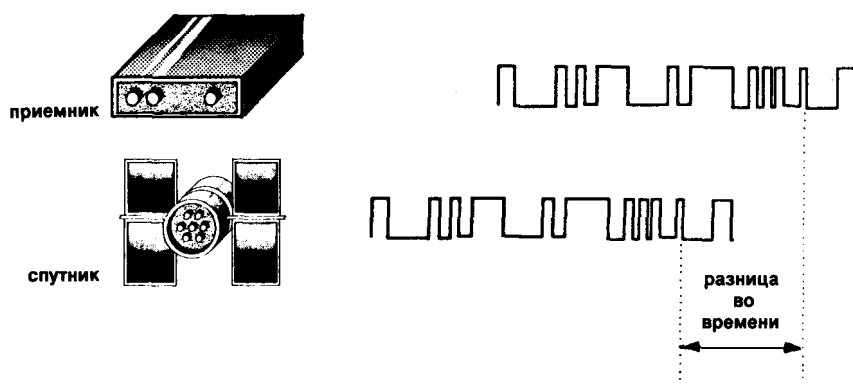
Естественно, что при таком подходе часы в системе должны быть весьма точны и совершенны, особенно при измерении малых отрезков времени, так как и свет, и радиосигналы распространяются непостижимо быстро. Например, если бы спутник находился в зените, т.е. прямо над головой, потребовалось бы около 0,06 секунды для распространения его радиосигнала.

$$\text{СКОРОСТЬ СВЕТА} \times \text{ВРЕМЯ} = \text{РАССТОЯНИЕ}$$

Хорошо известны наручные кварцевые часы, которые показывают очень точное время. GPS строится с применением сходных, но существенно более совершенных методов и средств измерения времени. В некотором смысле GPS - дитя электронной революции, которое измеряет время с наносекундной точностью. А это - 0,000000001 секунды. Равные по точности хода электронные часы в наше время чрезвычайно дороги. Теперь несколько подробнее обо всем этом.

### *Как определяется момент времени, в который сигнал покинул спутник*

Главной трудностью при измерении времени распространения радиосигнала является точное выделение момента времени, в который сигнал передан со спутника. Для этого разработчики GPS обратились к разумной идее: синхронизировать спутники и приемники так, чтобы они генерировали один и тот же бинарный (двоичный) код точно в одно и то же время. А далее, все, что останется сделать, так это принять код от спутника и посмотреть, как давно приемник воспроизвел тот же код. Выявленный таким образом сдвиг одного кода по отношению к другому будет соответствовать времени прохождения сигналом расстояния от спутника до приемника.



### *Простейшая аналогия*

Для того, чтобы представить как это происходит, вообразите себя и своего товарища стоящими на противоположных краях футбольного поля. Теперь, предположим, существует способ убедиться в том, что вы оба, точно в один и тот же момент времени, начали считать до десяти. Вы громко произносите числа во время счета. Первыми Вы услышите свои собственные слова:

"Один, два, три,..."", а затем, чуть позже, и голос друга, говорящего: "Один, два, ..." и так далее. Вы были бы готовы сказать "три" к тому моменту, когда услышали, как он говорит "один". Это происходит потому, что требуется время для прохождения звуком его голоса всего пути через стадион.

Так как оба начали считать одновременно, то можно измерить время между тем моментом, когда Вы сказали "один", и тем моментом, когда Вы услышали, как друг произнес "один". Это время и будет временем



прохождения звуком расстояния над футбольным полем. Примерно то же происходит и в GPS.

Преимуществом использования кодовых посылок (кодовых последовательностей) или, в случае нашего простейшего примера, - ряда чисел, является то, что можно выполнить измерение запаздывания в любой момент времени. Иначе говоря, совсем необязательно измерять промежуток между моментами времени, когда Вы сказали "один" и когда услышали, как Ваш друг сказал "один". Можно сделать то же самое измерение между любой парой чисел, например, между "восьмерками". Можно включиться в любой момент на протяжении всей "передачи".

### ***Псевдослучайные коды***

GPS, конечно, использует не числа. Как спутники, так и приемники в действительности генерируют очень сложные двоичные кодовые последовательности. Коды усложняются специально, чтобы их можно было надежно и однозначно сравнивать, а также по некоторым другим причинам, о которых будет сказано позже. Так или иначе, коды настолько сложны, что они выглядят как длинный ряд случайных импульсов, как некоторая "шумовая дорожка".



Псевдослучайный код

В действительности они не случайные. Они являются тщательно отобранными, "почти" случайными последовательностями логических нулей и логических единиц, последовательностями, которые повторяются каждую миллисекунду. Поэтому их и называют "*псевдослучайными* кодами".

### ***ТАКИМОБРАЗОМ:***

- Расстояние до спутника определяется путем измерения промежутка времени, который требуется радиосигналу, чтобы дойти от спутника до приемника.
- Как спутник, так и приемник генерируют один и тот же псевдослучайный код строго одновременно в общей шкале времени.
- Определение времени распространения сигнала осуществляется путем сравнения запаздывания его псевдослучайного кода по отношению к такому же коду приемника.

### ***Обеспечение идеальной привязки по времени***

Мы знаем, что свет распространяется со скоростью около 300000 км/с. Если спутник и приемник имеют расхождение шкал времени (выходят из синхронизации) даже на 0,01 с, измерение расстояния будет произведено с ошибкой в 3000 километров! Как установить, что и приемник и спутник начинают генерировать коды точно в один и тот же момент времени?

По крайней мере, одна часть проблемы синхронизации часов спутника и

приемника решается легко: на спутниках устанавливаются "атомные" часы. Они исключительно точные и очень дорогие. Они стоят около 100000 долларов, и на каждом спутнике их установлено по 4 штуки, чтобы гарантировать, что хотя бы одни то уж обязательно работают.

Атомные часы получили свое название из-за того, что в качестве "метронома" в них используются колебания атомов специально подобранного вещества. Это наиболее стабильное и точное устройство отсчета времени, которое когда-либо создавал человек. И можно биться об заклад, что когда они показывают 12 часов дня, так это действительно 12 часов дня!

Такие часы вполне приемлемы для спутников. Но что говорить о простых смертных? Если нужно было бы иметь атомные часы в сто тысяч долларов в каждом приемнике GPS, то только яхты мультимиллиардеров имели бы такое оборудование!

### *Тригонометрия - путь к решению*

К счастью, существует способ обойтись часами умеренной точности. Секрет в том, чтобы произвести измерение дальности до еще одного спутника. Дополнительное измерение поможет исключить ошибку часов приемника. (Теперь понятно, почему ранее говорилось, что трех измерений достаточно только теоретически).

Можно показать, что если три точных измерения времени распространения сигналов спутников определяют положение точки в трехмерном пространстве, то четыре неточных позволят исключить относительное смещение шкалы времени приемника, вызвавшее эту неточность. Это может звучать как техническое шаманство, но идея действительно проста. И настолько фундаментальна для GPS, что на нее стоит потратить немного времени.

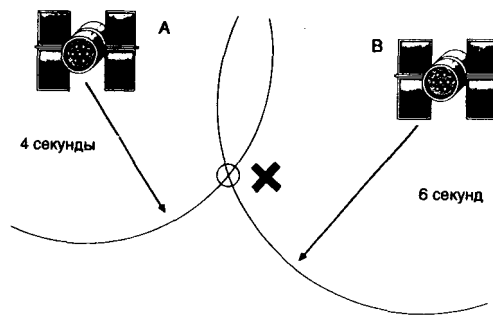
Объяснение будет значительно проще для понимания, если использовать поясняющие рисунки-схемы. А эти схемы значительно легче построить, если ограничиться двумерным пространством, т.е. решать задачу местоопределения на плоскости. Конечно, GPS - трехмерная система, но принцип, который мы обсуждаем, работает точно также и в двух измерениях. Мы всего лишь временно исключаем одно измерение.

*Каким образом дополнительное измерение исключает уход часов.*

Вот как это происходит. Предположим, часы приемника не так совершенны, как атомные. Их ход соответствует кварцевым часам, но они не вполне сверены с единым временем системы. Скажем, они немного отстают, например так, что, когда они показывают 12 часов дня, то в действительности это 12 часов 00 минут 01 секунда. Посмотрим, как это скажется на вычислении нашего местоположения.

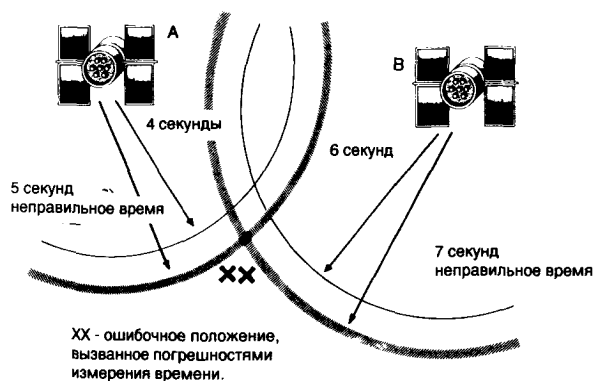
Обычно "дальность" до спутника измеряется в километрах. Но поскольку она вычисляется на основе измерения времени, проще измерять ее в единицах времени, т.е. в секундах. При этом будет проще и оценить, как ошибки часов скажутся на определении местоположения.

Давайте представим, что мы находимся в четырех секундах от спутника **A** и в шести секундах от спутника **B**. Этих двух измерений было бы достаточно для привязки нашего местоположения на плоскости к какой-либо одной точке. Назовем ее **X**.

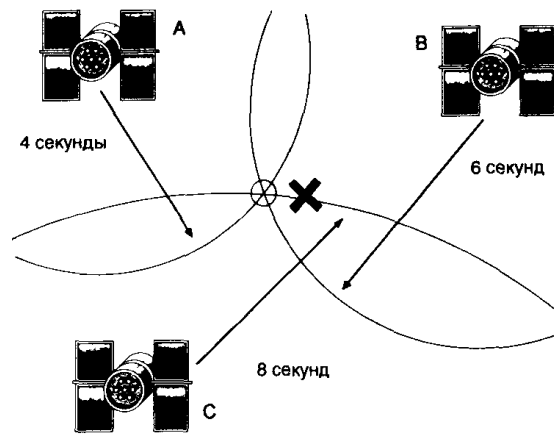


Итак, **X** - это точка, в которой мы фактически находимся, т.е. наше местоположение в том случае, если часы приемника совершенны. Но теперь подумаем, что если бы мы использовали приемник с часами, отстающими на секунду. Он определил бы, что расстояние до спутника **A** составляет пять секунд, а до спутника **B** - семь секунд. В результате появятся две новые окружности, пересекающиеся в другой точке **XX**.

Внешне это выглядело бы абсолютно правильным результатом, поскольку мы не имели бы возможности установить, что часы приемника немного отстают. Вычисления, производимые им, не сказали бы об этом ничего. Мы заметили бы, что что-то неладно только тогда, когда начали бы наткаться на скалы.

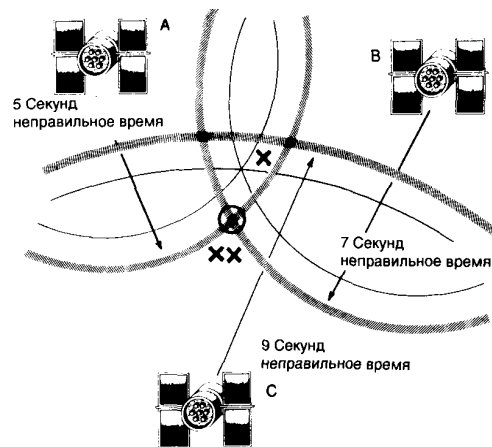


Вот где нам поможет тригонометрия. Давайте добавим еще одно измерение к нашим построениям. В двухмерном варианте это означает использование третьего спутника.



Предположим (если у нас совершенные часы), спутник С находится в восьми секундах от нашего истинного положения. Ситуация выглядела бы как показано на рисунке слева, на котором изображено истинное местоположение. Все три окружности при этом пересекаются в точке **X**, так как они соответствуют истинным дальностям до трех спутников.

Теперь давайте добавим одну секунду отставания и посмотрим, что происходит. Штрихованные окружности на рисунке соответствуют не истинным дальностям, а так называемым "псевдодальностям", т.е. дальностям, измеренным по неточным часам приемника. Термин "псевдодальность" используется специалистами в области GPS для обозначения дальностей, измеренных с ошибками.



Заметьте, что если окружности, соответствующие псевдодальностям до спутников **A** и **B** пересекаются в точке **XX**, то соответствующая окружность от спутника **C** располагается на некотором расстоянии от нее. Таким образом, не существует точки, которая может быть одновременно в 5, 7 и 9 секундах соответственно от точек **A**, **B** и **C**. Это физически невозможно.

Компьютеры приемников GPS запрограммированы таким образом, что когда в них поступают измерения, не дающие пересечения в одной точке, они определяют, что часы приемника сбились и идут с некоторым опережением или отставанием по отношению к системному времени. Компьютер приемника начинает вычитание (или прибавление) некоторого (одного и того же для всех измерений) интервала времени, к измеренным

псевдодальностям. Он продолжает корректировать время во всех измерениях до тех пор, пока не найдет решение, которое "проводит" все окружности через одну точку. В нашем примере он попросту обнаружит, что это достигается вычитанием секунды из всех трех измерений. Отсюда будет сделан вывод, что часы приемника отстают на одну секунду.

В действительности вычислитель приемника не бесцельно ищет ответ. Он решает четыре уравнения с четырьмя неизвестными и быстро находит результат. Идея прежняя: добавлением еще одного измерения исключается любая, находящаяся в разумных пределах, ошибка часов приемника.

*Для трехмерного местоопределения требуются четыре спутника*

Это означает, что при одновременном определении трех координат - долготы, широты и высоты точки над принятым в расчетах земным эллипсоидом для того, чтобы исключить погрешность временной привязки часов приемника к единому системному времени, необходимо выполнить четыре измерения. И не следует забывать это число, так как оно означает, что невозможно получить истинное и точное местоположение до тех пор, пока над горизонтом в пределах прямой видимости не окажутся по крайней мере четыре спутника.

*Необходимость выполнения четырех измерений определяет устройство приёмника*

Необходимость выполнения не менее 4-х измерений самым существенным образом сказывается на проектировании GPS-приемников. Подробнее об этом будет сказано в отдельной главе. Но одно очень важное обстоятельство упомянем сейчас. Оно состоит в том, что для непрерывного местоопределения в реальном масштабе времени необходим приемник, снабженный, по крайней мере, четырьмя каналами измерений. То есть такой, у которого с каждым из четырех спутников постоянно работает отдельный канал.

В настоящее время многие применения не требуют такой согласованной одновременности в измерениях. В этих случаях может оказаться пригодным более экономичный и дешевый одноканальный приемник.

Одноканальному приемнику, прежде чем он сможет вычислить результат, понадобится выполнить четыре отдельных измерения последовательно по сигналам четырех различных спутников. Вся операция может занять от 2 до 30 сек, что для многих применений вполне приемлемо.

К сожалению, этот тип приемника не решает столь же успешно задачу измерения скорости движения основания, на котором он установлен. Сама же возможность решения такой задачи является уникальной особенностью GPS.

Кроме того, любое движение приемника во время цикла четырех последовательных измерений может повлиять на их точность. Еще один

недостаток одноканальных приемников проявляется в моменты времени, в которые спутники передают свои информационные сообщения. Прием и расшифровка каждой из таких посылок занимает 30 секунд, и процесс местоопределения прерывается каждый раз, когда обрабатываются сигналы очередного спутника.

Известным компромиссом является двухканальный приемник, один канал которого производит обработку временных измерений, в то время, как другой устанавливает радиоконтакт с очередным спутником для проведения измерений. После того, как первый канал закончит частичный цикл обработки данных, он сможет мгновенно подключиться к следующему спутнику без потери времени на его "захват" или "прослушивание". Тем временем второй канал, часто называемый "административным", обращается к следующему спутнику и проводит процедуры отстройки и вхождения в синхронизм с его сигналами. Если оказывается, что второй канал больше не нужен для "административных" дел, он, как и первый, может быть использован для выполнения и обработки временных измерений.

Все это значительно ускоряет работу приемников с последовательно переключаемыми каналами. При этом достигается непрерывное обновление координат местоположения, выдаваемых системой. Дополнительным преимуществом является то, что двухканальное устройство можно запрограммировать для слежения за более, чем четырьмя спутниками. И если за одним из рабочих спутников будет потерян контроль, мгновенно вместо него будет использован другой без какого-либо перерыва в процессе вычисления координат.

*ТАКИМ ОБРАЗОМ:*

- Идеальная синхронизация часов спутников и приемников - ключ к точному измерению расстояний до спутников.
- Часы спутников точны потому, что в качестве метрономов в них используются атомные эталонные генераторы частоты.
- Часы приемника могут и не быть столь же совершенными, поскольку их уход можно исключить, производя измерения дальностей до четырех спутников.
- Необходимость в проведении четырех измерений определяет устройство приемника.

*Определение положения спутника в космическом пространстве*

До сих пор во всех наших рассуждениях мы исходили из того, что знаем точно, где в космическом пространстве находятся спутники, и на основе этого можем вычислить свое местоположение по их координатам и

дальностям до них. Но как узнать, где именно в космическом пространстве располагается нечто, удаленное на расстояние в 20000 километров?

Кому на месте не сидится, тот добра не наживет.

Так звучит старая английская поговорка. Но для высоколетящего спутника высота в 20000 километров является настоящим приобретением. Все на такой высоте находится полностью вне земной атмосферы. А это значит, что полет по орбите вокруг Земли будет описываться простыми математическими соотношениями.

Подобно Луне, которая вращается вокруг нашей старой планеты миллионы лет без каких-либо заметных изменений орбиты и периода обращения, спутники GPS совершают такое же, в достаточной степени предсказуемое, орбитальное движение вокруг Земли.

Спутники выводятся очень точно на свои орбиты в соответствии с генеральным планом развертывания системы и, поскольку на высоте 20000 километров атмосферное торможение отсутствует, остаются на них в течение длительного времени. Орбиты известны заранее, а каждый приемник содержит в памяти своего компьютера "альманах", т.е. своеобразный, постоянно обновляемый справочник, из которого видно, где будет находиться каждый спутник в любой момент времени.

Все спутники находятся под постоянным контролем.

Далее. Исходная математическая

модель для орбит была бы достаточно хороша сама по себе, но чтобы сделать ее совершенной, движение спутников GPS поставлено под постоянный контроль специалистов МО США.

По той же причине спутники GPS не располагаются на геостационарных орбитах, подобно телевизионным спутникам. Обращаясь вокруг планеты один раз за 12 часов, спутники GPS проходят над контрольными станциями дважды в сутки. Это дает возможность точно измерять их положение, высоту и скорость. Отклонения от теоретических орбит, которые обнаруживают контрольные станции, называются "ошибками эфемерид". Они обычно очень незначительны и вызваны такими явлениями, как гравитационные притяжения Луны и Солнца и солнечное световое давление на спутник. После того, как одна из станций слежения определила положение спутника и вычислила поправки к его орбите, эта обновленная информация передается обратно на спутник, заменяя собой в памяти его бортового компьютера прежнюю информацию. Все последующее время эти поправки вместе с дальномерными кодовыми сигналами будут непрерывно передаваться каждым спутником на Землю.

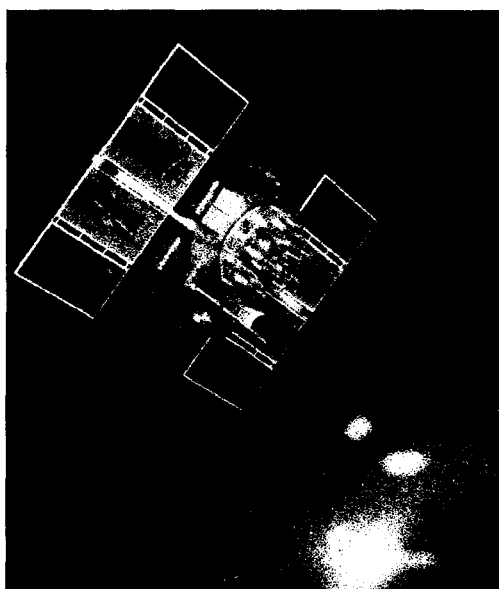
Таким образом, каждый спутник GPS в непрерывном режиме передает не только свои индивидуальные дальномерные коды (общедоступный гражданский C/A-код и защищенный P-код военного назначения, см. далее),

но также и сообщения о своем точно предвычисленном положении на орбите, о движении остальных спутников GPS (альманах), о состоянии своих бортовых систем и многочисленную другую служебную информацию.

Эти сообщения используются всеми видами приемников GPS.

**ТАКИМ ОБРАЗОМ:**

- Для вычисления координат места на Земле необходимо знать как расстояния до спутников, так и местонахождение каждого из них в космическом пространстве.
- Спутники GPS движутся настолько высоко, что их орбиты можно прогнозировать с большой точностью.
- Станции слежения МО США регулярно определяют даже самые незначительные изменения в орбитах, и данные об этих изменениях передаются спутниками.



**Спутники GPS**

**Наименование:** NAVSTAR

**Разработчик:** Rockwell International

**Высота:** 20000 километров

**Масса:** 860 килограмм

**Габариты :** 5,2 метра с вынесенными  
солнечными панелями

**Период обращения :** 12 часов

**Наклонение орбиты :** 55 градусов

**Ресурс на орбите :** 7,5 лет

**Полный состав созвездия :** 24 спутника

***Ионосферные и тропосферные задержки.***

Много изобретательности было проявлено ради того, чтобы любой элемент или сегмент GPS функционировал настолько точно, насколько это возможно. На спутниках размещены атомные часы. Проводятся дополнительные измерения для устранения любой ошибки, которую могли бы иметь часы приемника. Спутники почти ежеминутно передают поправки к своему орбитальному положению. Но как бы совершенна ни была система, существуют два источника погрешностей, влияния которых очень трудно избежать.



Наиболее существенные погрешности возникают при прохождении радиосигналом ионосферы Земли - слоя заряженных частиц на высотах от 50 до 1000 километров. Эти частицы заметным образом влияют на скорость распространения света и радиоволн.

Скорость света определяется как константа только для вакуума, который существует в глубоком космосе. Но когда свет или радиосигнал проходят через более плотную среду, например через слой заряженных частиц, скорость их распространения немного уменьшается. Это делает невозможными вычисления расстояний до спутников, если они построены на предположении о ее строгом постоянстве.

Помните школьную задачу о том, как далеко уедет автомобиль, если он движется со скоростью 60 километров в час в течение 2 часов? Представьте теперь, что где-то по дороге, не предупредив нас, парень, управляющий машиной, вышел бы из нее, чтобы купить себе содовой. Примерно то же проделывают свет и радиосигнал. Они замедляют или ускоряют свое распространение в зависимости от свойств среды, через которую проходят.

Существует пара методов, которые можно использовать, чтобы сделать минимальными возникающие при этом ошибки.

Во-первых, можно предсказать, каково будет типичное изменение скорости в обычный день, при средних ионосферных условиях, а затем ввести поправку во все наши измерения. Это - решение. Но, к сожалению, не каждый день является обычным.

Другой способ состоит в сравнении скоростей распространения двух разночастотных радиосигналов. Дело в том, что когда радиоволна проходит через ионосферу, возникает запаздывание в ее распространении, т.е. задержка сигнала, обратно пропорциональная квадрату частоты излучения. Чем ниже несущая частота сигнала, тем больше он замедляется.

Если сравнить в приемнике времена распространения двух разночастотных компонент сигнала GPS, то для каждой из них можно вычислить временную задержку в ионосфере. Этот метод корректировки достаточно сложен и используется только в наиболее совершенных, так называемых "двухчастотных" приемниках GPS. В них большая часть погрешности от ионосферной задержки может быть устранена.

После того, как радиосигналы спутников GPS покинули расположенную очень высоко ионосферу, они попадают в тропосферу, в которой происходят все погодные явления. Влага в той или иной ее форме, практически постоянно находящаяся в тропосфере, также вызывает задержки в распространении радиоволн, которые, однако, гораздо труднее выявить. К счастью, их суммарный вклад в погрешность вычисления местоположения невелик.

### *Другие виды ошибок*

Ионосферные и тропосферные задержки - только один тип ошибок, которые могут вкратиться в измерения. И уж если мы обсуждаем их источники, давайте перечислим все, что может повлиять на конечную точность GPS.

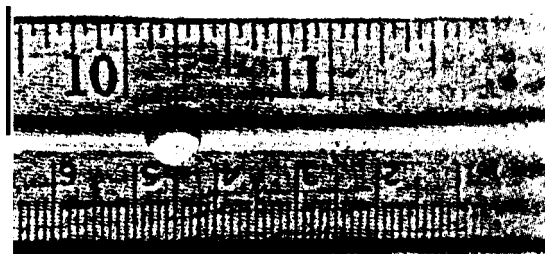
Как бы точны ни были атомные часы на спутниках, все же и у них имеются небольшие погрешности. МО следит за этими часами и может "подвести", т.е. сверить их, если выявиться хотя бы незначительный уход. Но даже при этом, возникающие иногда небольшие неточности заметно увеличивают результирующие погрешности местоопределения.

Аналогично атомным часам на спутниках, приемники на Земле тоже иногда ошибаются. Компьютер приемника может допустить ошибку, выполняя математическую операцию. Электрические помехи могут привести к ошибочной обработке псевдослучайных кодов. Обычно погрешности этого рода бывают или очень маленьким, или очень большими. Большие легко определяются, поскольку они очевидны. Труднее обнаружить малые отклонения в процессе вычислений. Но и они могут привести несколько долей метра неопределенности в координаты местоположения.

Другой тип погрешностей, в которых нельзя обвинить ни спутник, ни приемник - это "ошибки многолучевости". Они возникают, когда сигналы, передаваемые со спутника, многократно переотражаются от окружающих предметов и поверхностей до того, как попадут на антенну приемника. В результате сигнал спутника не проходит к приемнику по прямой, как тому следует быть, а вместо этого совершает "окольный путь". Это тот же самый эффект, который вызывает сдвоенное изображение в телевизорах. В современных приемниках применяются усовершенствованная техника обработки сигналов и специальные антенны для сведения к минимуму этой проблемы. Однако, в измерениях все же может возникнуть некоторая неопределенность по этой причине.

### *Погрешности измерений - это неопределенность координат*

Все источники погрешностей, которые до сих пор обсуждались, суммируются и придают каждому измерению в GPS некоторую неопределенность.



Поэтому вместо того, чтобы сказать, что что-то находится в десяти метрах от нас, мы говорим: "в десяти метрах плюс или минус один сантиметр".

Можно представить это и по другому, считая, например, что некоторая

линейка не имеет отчетливых краев, т.е. точно отмеченных начального и конечного делений.

К счастью, взятые вместе все эти неточности не слишком много добавляют в суммарную погрешность местоопределения. На практике приемник GPS может указать местоположение с погрешностью в пределах сотни метров и даже точнее, если это хороший приемник.

### *Геометрия, или почему некоторые углы лучше других*

Для достижения наибольшей точности в хорошем приемнике GPS определяется некоторый "геометрический фактор", названный "Geometric Dilution of Precision - GDOP" (геометрический фактор понижения точности).

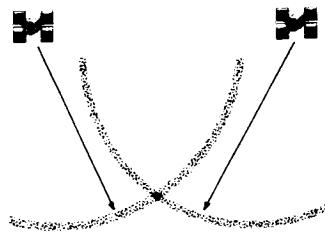
Это может выглядеть как попытка дипломатичным образом признать, что наши определения оставляют желать лучшего. Суть же дела в том, что точность местоопределения в GPS при прочих одинаковых условиях зависит от того, какие именно спутники из числа находящихся в прямой видимости используются в качестве "рабочего созвездия". Не потому, что один спутник лучше другого. А потому, что в зависимости от взаимного их расположения на небосводе геометрические соотношения, которыми характеризуется это расположение, могут многократно увеличивать или уменьшать все неопределенности, т.е. погрешности местоопределения, о которых говорилось ранее.

Это немного похоже на игрока в бильярд, выбирающего траекторию движения шара при ударе. Он знает, что при некоторых углах взаимного расположения шаров он может допустить и небрежность, и все же попасть в лузу. При других - увеличивается любой незначительный промах и получаются удары с низким процентом попаданий.

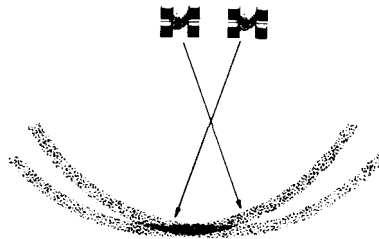
Чтобы понять это, давайте вернемся к рисункам. На них местоположение определялось в виде окружностей, центры которых совмещены со спутниками. Теперь, когда известно, что каждое измерение содержит в себе и небольшую неопределенность, ранее четкие окружности следует изобразить размытыми.

Как и в случае с линейкой можно утверждать только то, что измеренное расстояние "где-то 20000 километров плюс или минус 10 метров". И рисунки теперь будут выглядеть следующим образом.

Полоски размытости есть ни что иное, как "области неопределенности". То, что ранее было точкой местоположения **X**, теперь превращается в небольшой четырехугольник. И можно утверждать лишь то, что мы должны находиться где-то внутри этого четырехугольника.



Мы находимся где-то  
в этой области.



При сближении спутников  
область становится  
обширнее.

Вот что такое "геометрический фактор понижения точности". В зависимости от угла между направлениями на спутники область пересечения размытых окружностей (область неопределенности местоположения) может

быть или аккуратным небольшим квадратиком, или большим вытянутым четырехугольником. Проще говоря, чем больше угол между направлениями на спутники, тем лучше измерения.

Исходя из этого, хорошие приемники снабжают вычислительными процедурами, которые анализируют относительные положения всех доступных для наблюдения спутников и выбирают из них четырех кандидатов, т.е. наилучшим образом расположенные четыре спутника, для которых протяженность "прямоугольника неопределенности" в текущий отрезок времени минимальна. Еще более сложные приемники вычисляют местоположение на основе измерений расстояний (дальностей) до всех спутников, находящихся в поле зрения. При этом влияние геометрии созвездия становится наименьшим.

## **Точность GPS**

*Результирующая погрешность GPS определяется совместным влиянием погрешностей от различных источников. Вклад каждого из них варьируется в зависимости от атмосферных условий и качества оборудования. Кроме этого, точность может быть целенаправленно снижена Министерством Обороны США в результате установки на спутниках GPS так называемого режима SIA ("Selective Availability"-ограниченный доступ). Этот режим разработан для того, чтобы не дать возможному противнику тактического преимущества в определении местоположения с помощью GPS. Когда и если этот режим установлен, он создает наибольшую компоненту суммарной погрешности GPS.*

## **Сводка погрешностей**

*(по наблюдениям за спутниками ранних серий **Block -I**)*

<i>Источники ошибок</i>	<i>(типичные) погрешности в метрах</i>
<i>Погрешности часов спутника</i>	<i>0,6</i>
<i>Эфемеридные погрешности,</i>	<i>6</i>
<i>Погрешности приемника</i>	<i>1,2</i>
<i>Ионосферные и тропосферные задержки</i>	<i>3,7</i>
<i>Наибольшие погрешности от S/A</i> <i>(если режим установлен)</i>	<i>7,6</i>
<i>Суммарная погрешность (среднеквадратичная,</i> <i>в зависимости от установки S/A-режима)</i>	<i>от 4,6 до 9,1</i>

*Для вычисления действительной погрешности следует умножить приведенную выше суммарную погрешность на геометрический фактор GDOP*

*Величина GDOP при хороших условиях находится в диапазоне от 4 до 6*

*Таким образом, реальная погрешность, которую можно ожидать, могла бы быть:*

- Типичная, при хорошем приемнике* *от 18 до 30*
- Наихудший случай* *60*
- При установленном S/A-режиме* *105*

**ТАКИМ ОБРАЗОМ:**

- Ионосфера и тропосфера Земли вызывают задержки спутниковых сигналов, которые можно пересчитать в ошибки местоопределения.*
- Часть этих ошибок может быть устранена путем расчета или физического моделирования.*
- Другие источники ошибок - это часы спутников, вычислительные шумы бортовых компьютеров, электрические шумы приемников и многолучевость.*
- Не наилучшее взаимное расположение спутников на небосводе приводит к одновременному и одинаковому увеличению всех компонент суммарной погрешности местоопределения.*

*Еще несколько деталей...*

*для лучшего понимания и для тех, кто хочет знать больше, или "Болты да гайки", высоко парящие концепции и земные заботы*

*Псевдослучайный код - что это такое.*

Может возникнуть вопрос:

"К чему все эти затеи с псевдослучайными кодами? Почему просто не послать обычный радиосигнал, например такой, как от телевизионного спутника?". Действительно, концепция псевдослучайного кода далеко не очевидна. Но это остроумное средство, которое помогает сделать GPS практичной и относительно недорогой в применении. В некотором смысле, именно оно делает GPS "новым достоянием цивилизации".

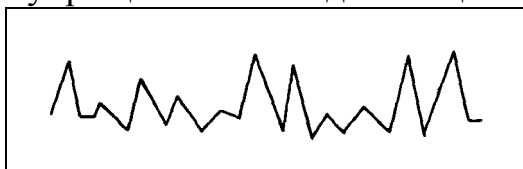
Мы уже видели, каким образом псевдослучайный код позволяет определить запаздывание сигнала, пришедшего со спутника. Но это только часть того, что он вообще позволяет сделать. Еще одна причина его применения - это энергетическая экономичность.

Рассмотрим вкратце, что происходит в спутниковом телевидении. Телевизионные спутники передают очень мощные сигналы. И все же, чтобы принять их на Земле, необходимы большие параболические антенны, концентрирующие энергию радиоволн на приемнике излучения. Вообразите, какой громоздкой была бы система GPS, если каждый ее приемник нуждался бы в таком же "большом блюде".

И еще. Телевизионные спутники находятся на геостационарных орбитах. Это означает, что на небосводе они всегда располагаются в одних и тех же точках. В нашем же случае не только понадобилось бы такое "блюдо" для каждого приемника, но оно еще должно было бы иметь возможность быстро поворачиваться, чтобы следить за подвижными "целями", т.е. спутниками в космосе.

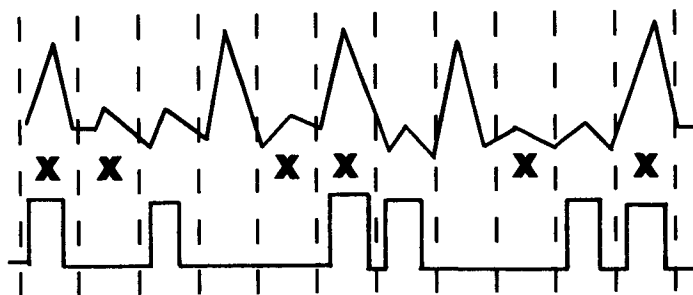
***Псевдослучайный код позволяет работать на малой мощности излучения.***

Псевдослучайный код позволяет избавиться от всего этого на основе достижений теории информации. Благодаря им, дальномерные сигналы спутников GPS могут иметь очень низкую мощность и все же будут приняты антенной размерами в несколько сантиметров. В действительности они настолько слабы, что не превышают уровня постоянного фоновых радиозума в околоземном пространстве. Здесь используются достаточно сложные принципы, но упрощенный взгляд на вещи состоит в следующем.



Фоновый радиозум - это всего лишь последовательность случайных импульсов, как показано на рисунке. Псевдослучайный код в некотором смысле очень похож на этот шумовой фон, но при одном существенном отличии: порядок следования импульсов в кодовой последовательности постоянен и точно известен, а сама кодовая последовательность непрерывно повторяется в радиосигналах спутников.

А что, если сравнить некоторый отрезок псевдослучайного кода с таким же по длительности отрезком фонового шума и поискать области, где они изменяются сходным образом? Шум и сигнал можно разбить короткими временными метками на одинаковые тактовые интервалы (такое разделение называется "дискретизацией" сигнала) и затем пометить крестиками все такты, на которых и сигнал, и шум одновременно или максимальны, или равны нулю.

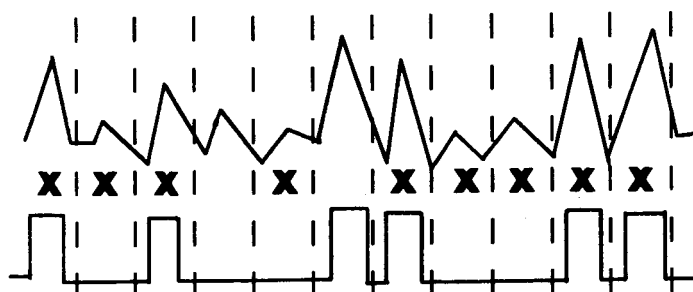


(шумовой сигнал может быть только "близок" к нулю).

Поскольку оба сигнала в своей основе - это "шумовые дорожки", имеющие случайную структуру, теория вероятности предсказывает, что примерно в половине тактов максимумы (и соответственно нули) сигнала и шума совпадут, а в другой половине такого совпадения не будет.

Если теперь установить некоторое контрольное устройство, считающее такты, в которых есть совпадение, и вычитающее из этой суммы те, где совпадения нет, то обнаружится, что после достаточно длительного времени результат счета окажется нулевым, поскольку в среднем каждое прибавление к сумме будет скомпенсировано вычитанием.

Пусть спутник GPS начинает передавать импульсы в той же последовательности, что и псевдослучайная последовательность, создаваемая в приемнике. Эти сигналы, даже если они и очень слабые, создадут некоторую "окраску" фоновому радишуму. И если теперь осуществлять потактовый временной сдвиг псевдослучайного кода в приемнике относительно общей для спутника и приемника шкалы времени, то в определенный момент, на некотором шаге такого сдвига, когда код, принятый со спутника и смешавшийся с фоновым радишумом, и код приемника совпадут, вдруг появится очень большое и растущее количество совпадений, и вместо нуля счетчик совпадений покажет резкое возрастание их количества.



Чем на большем числе периодов кодовой последовательности будет проводиться такое сопоставление, тем показания счетчика будут все больше и больше. Чем длительнее сравнение, тем больше число учтенных периодов. Это своего рода "усиление" показаний счетчика числа совпадений.

Можно выбрать время обработки принятого сигнала, которое дало бы нам тысячу совпадений. И поскольку сопоставление шумового фона с кодом приемника дало бы нам показания счетчика близкие к нулю, выбранный таким образом интервал по существу усилил бы сигнал спутника в тысячу раз. Естественно, что такое пояснение очень упрощено, но сама концепция - многозначительна.

Псевдослучайное кодирование дает нам способ очень точного распознавания очень слабого сигнала. Это означает, что нет необходимости снабжать спутники GPS мощными источниками энергии (при этом они и стоят меньше), и что приемники на Земле могут довольствоваться весьма скромными по габаритам антеннами.

Почему этот подход не применяется в телевизионных спутниках, вследствие чего мы вынуждены иметь те самые "гигантские блюда"? Дело в том, что сигналы GPS заключают в себе чрезвычайно мало информации: всего лишь временную метку. Телевизионные же сигналы перегружены информацией. Или, как принято говорить, они очень широкополосные. Принцип, заложенный в основу применения псевдослучайного кода, основан на осреднении по большому числу периодов кодовой последовательности. Такая обработка оказывается слишком медленной и громоздкой для телевизионного сигнала, и поэтому она не применима в телевидении.

Существуют еще две причины, по которым GPS построена с применением псевдослучайного кодирования.

С одной стороны, это дает возможность МО США управлять доступом к спутниковой системе: в военное время можно изменить код, чтобы исключить использование системы противником. Даже в мирное время МО США сохраняет некоторую "закрытость" системы.

С другой, - применение псевдослучайного кода допускает передачу дальномерных кодов и информационных сообщений всем спутникам GPS одновременно и на одних и тех же двух несущих частотах без взаимных помех.

Каждый спутник имеет определенные, свои собственные, два псевдослучайных кода, и таким образом, различение дальномерных кодов и информационных сообщений разных спутников в приемнике сводится к выбору соответствующих кодов в процессе приема и обработки сигналов. Поскольку мощность излучения спутников мала, ни один из них не "забивает" своими сигналами остальные.

Существуют два различных типа псевдослучайных кодов: "С/А коды" и "Р-коды". С/А-коды (Clear Acquisition - легкая распознаваемость), - это коды,



которые используются для приемников как гражданского, так и военного назначения. Их тактовая частота в десять раз ниже, чем у Р-кодов. И, как принято считать, они обеспечивают менее точные измерения времени распространения радиосигналов\*<sup>1</sup>.

Выше упоминалось, что МО США может уменьшить точность в режиме С/А-кодов, включая по командам с Земли на всех спутниках GPS так называемый S/A-режим, или "режим селективного доступа" (Selective Availability -избирательная доступность), преднамеренно создавая значительный и непредсказуемый уход спутниковых часов. Если режим S/A установлен, то он оказывается причиной самых больших погрешностей местоопределения.

Р-коды (Protected - защищенный) могут быть дополнительно зашифрованы, и только военным пользователям всегда открыт доступ к ним. Вдобавок к этому, Р-коды почти невозможно заглушить помехами.

Есть еще целый ряд причин, обусловивших использование в GPS псевдослучайного кода. И одной из них является то, что он обеспечивает Министерству Обороны США возможность контроля доступа к этой спутниковой системе. Даже в мирное время оно сохраняет за собой определенную "исключительность" прав на GPS.

*ТАКИМ ОБРАЗОМ:*

- Псевдослучайный код - это средство установления момента абсолютного совпадения сигналов спутника и опорных сигналов приемника в процессе измерения расстояния (дальности) до спутника.
- Такое кодирование позволяет работать с сигналами очень низкой мощности и с антеннами малых размеров.
- А так же допускает применение на всех спутниках GPS одних и тех же двух несущих частот.
- Псевдослучайные коды дают возможность МО США управлять доступом к системе.

*1 Дифференциальная GPS - непревзойденная точность,*

GPS, бесспорно, наиболее точная глобальная система местоопределения. Но даже ее невероятная точность может быть повышена путем использования техники, получившей название "Дифференциальная GPS - DGPS". С ее использованием погрешности местоопределения уменьшаются

---

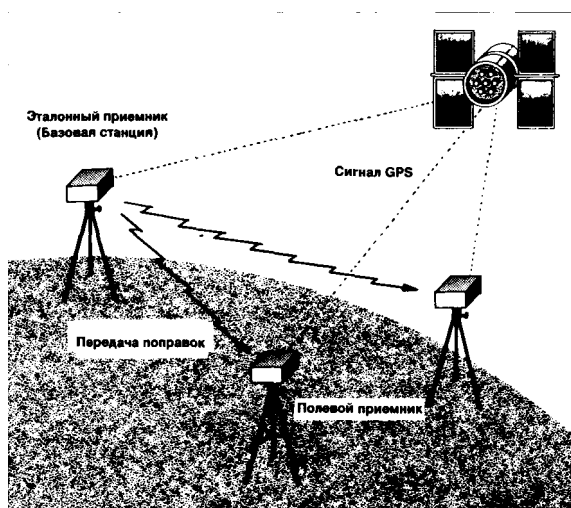
<sup>1</sup>\* Традиционно полагали, что Р-коды, которые имеют тактовую частоту, в десять раз более высокую, чем тактовая частота С/А-кодов, являются значительно более предпочтительными по точности. Но новые исследования доказывают, что по многим сложным причинам разницы практически нет.

до метров и ниже. Благодаря этому система вторгается в совершенно неожиданные области применения.

Геодезисты уже давно используют GPS для определения координат точки на земной поверхности с точностью до сантиметра! Новые методы и техника, которые они используют, строятся на основе DGPS. Эти сверхточные измерения обычно основываются по крайней мере на 15-минутном сборе данных от спутников при неподвижном приемнике и на очень точном знании координат некоторой "опорной", фиксированной на земной поверхности, точки, а также на использовании сложных вычислительных программ для камеральной обработки на ЭВМ накопленных данных.

Используя приемник GPS "геодезического класса", один оператор может выполнить работу целой группы в несколько человек всего лишь за малую часть того времени, которое им потребуется при обычных технике и методах. Ведь главное занятие бригады "традиционных" геодезистов состоит в том, чтобы, "путешествуя по горам и долам", добраться до места, с которого оказывается возможным при помощи оптических средств построить линию прямого визирования на один из известных ориентиров.

Созданные к настоящему времени новые приемники GPS геодезического класса для так называемой "кинематической" съемки еще более автоматизированы. Геодезисту остается просто подойти к очередной точке на местности, в которой он работает, и нажать кнопку. Точные координаты будут мгновенно зарегистрированы.



Секрет получения высокой точности состоит в том, что с помощью приемника, помещенного на местности в точке с заранее точно определенными координатами, можно вычислить погрешности, возникающие в дальномерных спутниковых сигналах. Получается как бы новая точка отсчета, из которой можно передавать по радио сигналы коррекции на любые другие приемники GPS, находящиеся вместе с опорным в некоторой ограниченной области, для которой погрешности одинаковы.

Благодаря простой организации спутниковых сообщений, этот

единственный корректирующий сигнал устраняет все возможные ошибки системы, независимо от того, возникают ли они из-за ухода часов, погрешностей в определении текущего положения спутника, или от ионосферных и тропосферных задержек.

Работа такой опорной станции может быть организована двумя способами.

В первом варианте "ведомым" приемникам по телеметрическим каналам посылаются сообщения об ошибках, а затем их компьютеры обрабатывают его совместно с собственными данными о местоположении для уточнения координат.

Другой способ как бы превращает опорную станцию в "псевдоспутник". Станция передает сигналы такой же структуры, как и спутники, т.е. содержащие псевдослучайные коды и информационные сообщения.

"Ведомые" приемники обрабатывают сигналы опорной станции в одном из своих неиспользованных каналов, т.е. получают данные коррекции тем же путем, что и данные об эфемеридах от реальных спутников. Этот вариант имеет тот недостаток, что при некоторых условиях "станция-псевдоспутник" ("pseudolite"), может быть источником помех в системе.

*ТАКИМ ОБРАЗОМ:*

- Дифференциальные измерения в GPS могут быть гораздо более точными, чем обычные.
- Опорная станция с известными координатами вычисляет поправки и передает в эфир комбинированные сообщения для коррекции спутниковых измерений.
- Этими сообщениями может воспользоваться любое количество ведомых GPS приемников, для устранения практически всех ошибок в своих измерениях.

*Выбор приемника GPS*

GPS - это система с широкими возможностями и многочисленными областями применения. Приобретение наиболее подходящего приемника GPS требует тщательного анализа того, как будет использоваться приемник, какого вида информация необходима и что позволяют средства, выделенные на его покупку.

Вот вопросы, на которые необходимо ответить прежде, чем принять решение:

- Что действительно необходимо: эпизодические по времени местоопределения, или управление непрерывным движением автомобиля, корабля, самолета?

- Необходимо ли точно измерять скорость, например, при таких операциях, как настройка гоночной яхты или оценка характеристик автомобильного двигателя?

- Что является более важным: экономия средств или точность?

- Является ли энергопотребление приобретаемого приемника важным фактором?

- Будет ли приемник применяться при повышенных скоростях и ускорениях?

При большом разнообразии приемников на современном рынке имеет смысл обрисовать основные их типы, а также принципы построения, преимущества и недостатки, им присущие.

Можно выделить две обширные группы.

В первой окажутся приемники, работающие по принципу последовательного, т.е. поочередного слежения за спутниками рабочего созвездия.

Во второй - те, которые отслеживают 4 или более спутников одновременно, т.е. как бы параллельно.

Внутри каждой из этих групп существует большое разнообразие приемников разного назначения.

Для вычисления точного положения все приемники должны получать информацию по крайней мере от 4-х спутников. При последовательном слежении для этого используется единственный канал, автоматически переключаемый на прием и обработку сигналов поочередно каждого из спутников созвездия. Такие приемники обычно содержат меньше электронных устройств и потому дешевле и потребляют меньше энергии. К сожалению, непрерывная коммутация единственного канала может оказаться серьезной помехой процессу вычисления координат и тем самым ухудшить точность их определения. К этой группе относятся одноканальные приемники с малым энергопотреблением, обычные одноканальные приемники, быстродействующие мультиплексные одноканальные приемники более поздней разработки и двухканальные приемники.

Эти устройства проектируются как весьма портативные и поэтому обычно работают на батарейках. Для ограничения потребления они производят определение координат один раз в минуту и затем самостоятельно выключаются до следующего определения.

Для индивидуального использования пешими туристами или при плавании на небольших судах такие приемники являются наилучшим компромиссом. Их точность в большинстве случаев выше, чем точность системы LORAN, и работают они в любой точке земного шара.

Их основные недостатки - это меньшая по сравнению с другими

приемниками точность, ограниченные интерфейсные возможности и грубое измерение скорости движения. Поскольку система отключается между измерениями, она не может обеспечить непрерывность, требуемую для точного вычисления скорости. Кроме того, такие приемники обычно снабжаются малопотребляющими устройствами отсчета времени (которые должны работать непрерывно) поэтому их часы недостаточно точны.

Эти устройства также используют один канал для измерения дальностей до всех спутников рабочего созвездия, но они не ограничены по энергопотреблению. Обычный одноканальный приемник может оставаться включенным постоянно и, следовательно, быть несколько более точным, а также измерять скорость с хорошей точностью по крайней мере до тех пор, пока нет значительных ускорений или резких изменений курса. Поскольку единственный канал используется и для приема сигналов нескольких спутников, и для вычислений дальностей, такие приемники не могут применяться для непрерывного местоопределения.

Кроме того, по техническим причинам нестабильность часов приемника прямо влияет на точность измерений скорости. Например, если в целях уменьшения стоимости приемника в нем используется недорогой опорный генератор, то они выдают величины скоростей, которым не следует полностью доверять.

Этот вариант очень похож на обычные одноканальные приемники, но в них переключение от спутника к спутнику происходит гораздо быстрее. Настолько, что оказывается возможным практически одновременно и выполнять измерения дальностей, и следить за сигналами спутников, т.е. работать как бы в непрерывном режиме. Приемники, построенные по этому варианту, менее чувствительны к неточности хода часов.

К сожалению, такой подход требует более сложных схемных решений и доводит стоимость почти до стоимости двухканального последовательного приемника, значительно более гибкого и точного.

Добавление второго канала значительно расширяет возможности GPS-приемника. Во-первых, вдвое улучшается отношение сигнал/шум системы. В свою очередь это означает, что появляется возможность улавливать спутниковые сигналы при более неблагоприятных условиях и отслеживать спутники, находящиеся ближе к горизонту. Поскольку один канал может быть использован только для обработки информации о координатах местоположения, а второй только для поиска и захвата сигналов очередного спутника, двухканальный приемник не прерывает измерений и вычислений.

Сами определения координат и скорости могут быть гораздо более точными, поскольку, в хорошем двухканальном приемнике используются вычислительные алгоритмы, исключаящие влияние неточности хода его часов.

Недостатком двухканального варианта является то, что его реализация

может быть более дорогой, и что приемник будет потреблять большую мощность.

Интересно, что в некоторых современных приемниках так широко используются большие интегральные схемы, что увеличение их стоимости от добавки второго канала оказывается незначительным по сравнению со стоимостью хороших часов.

Несмотря на это, двухканальные приемники обычно стоят больше, чем их одноканальные двойники. Это объясняется тем, что пользователи, которые хотят иметь точность и непрерывное функционирование двухканального приемника, обычно хотят иметь и более устойчивое к внешним воздействиям конструктивное оформление приемника, и более совершенные органы управления и отображения информации.

Приемники, которые отслеживают 4 или более спутников одновременно, могут выдавать мгновенные положение и скорость. Это очень ценно для применения на высоко динамичных объектах и при высокоточных измерениях. Эти устройства часто используются в геодезии и для научных целей. Они могут иметь от 4-х до 10... 12 и даже до 24-х каналов слежения.

Кроме очевидного преимущества - непрерывного измерения координат местоположения и скорости, эти многоканальные приемники могут также упростить проблему с GDOP. Вместо того, чтобы строить вычисления на основе сигналов четырех наилучшим образом расположенных спутников, некоторые из этих систем обрабатывают совместно сигналы всех видимых в настоящий момент спутников. Применение к этой избыточной информации соответствующих алгоритмов обработки позволяет получить абсолютный минимум коэффициента увеличения ошибок местопределения GDOP.

Для 4-х канального приемника отношение сигнал/шум в два раза выше, чем для двухканального, и в четыре раза выше, чем для одноканального. Кроме того, проводя взаимную относительную синхронизацию каналов, можно устранить любые межканальные временные сдвиги, которые могли бы повлиять на точность местопределения.

Недостатком этого типа систем, является увеличение их размеров, стоимости и потребляемой мощности.

Помимо преимуществ и недостатков тех или иных архитектур GPS-приемников существует ряд дополнительных соображений, которые необходимо принять во внимание.

Некоторые новейшие системы обеспечивают получение беспрецедентных точностей, отслеживая и псевдослучайный код, и несущую частоту. Такая методика, названная "слежение с помощью несущего" ("carrier-aided tracking"), дает возможность с большой точностью определять момент появления заднего фронта псевдослучайного кода. А это обеспечивает более точные измерения временных интервалов, что в свою очередь трансформируется в более точные местопределения.

Все ещё существуют приемники, в которые предварительно, т.е. до того, как они начнут вычисления, необходимо вводить приблизительные значения текущего времени и координат. Хорошие современные приемники начинают работать и без этого, т.е. определяют свое положение в любом месте на земном шаре из "холодного состояния". Эту способность называют "anywhere fix" (доел. -автономный старт в произвольном месте).

При покупке приемника следует обратить внимание и на его пользовательский интерфейс. Есть устройства, обращение с которыми для неспециалиста оказывается слишком сложным.

Другие, кроме широты и долготы, не выдают никакой дополнительной информации и не могут быть подсоединены к компьютерам и другим системам.

Современные, более совершенные, приемники, обрабатывая основные спутниковые данные сложными методами, выдают значительно большее количество информации и представляют ее более наглядным образом на экранах с высокой разрешающей способностью, например, накладывая на электронные цифровые карты.

Таким образом, хотя все приемники и воспринимают одни и те же данные GPS, используют они их по-разному.

И, конечно, надежность является еще одним существенным критерием при оценке любого прибора, с которым предстоит отправиться в море или дальнейшее путешествие.

Потребление мощности и сопровождающий его нагрев приемника, являются так же важными, подлежащими постоянному контролю параметрами. Статистика показывает, что количество отказов возрастает в два раза при каждых семи градусах увеличения температуры.

### **Совет при покупке приемника**

*Быстро оценить точность приемника можно, наблюдая за его показаниями координат и скорости в неподвижном состоянии.*

*У хорошего приемника показания будут изменяться относительно истинных координат и нуля скорости весьма незначительно или останутся стабильными.*

*Показания плохой системы будут иметь вид больших и неупорядоченных флуктуации.*

### **Будьте внимательны:**

*Некоторые фирмы скрывают недостатки своих изделий, программируя их таким образом, чтобы приемники показывали нулевую скорость при всех значениях реальной скорости движения ниже одного узла (примерно двух километров в час).*

Для тех, кто хочет знать еще больше

## *Англо-русский толковый словарь терминов GPS*

**Anywhere fix** (автономный старт в произвольном месте, автономная привязка) - способность GPS-приемника начать прием спутниковых сигналов и вычисление местоположения без предварительного ввода в него ориентировочных значений координат и времени.

**Bandwidth** (ширина полосы частот) - ширина частотного спектра сигнала или полосы пропускания того или иного устройства.

**C/A (Clear/Acquisition) code** (легко распознаваемый код и в этом смысле - код свободного доступа) - принятый в GPS код, представляющий собой псевдослучайную последовательность из 1023 бистабильных манипуляций фазы несущей частоты сигнала спутника с частотой следования, равной 1,023 МГц. Иногда называется "**civilian code**" (гражданский код).

**Carrier** (носитель, несущий сигнал) - излучаемый спутником GPS высокочастотный сигнал гармонической формы, на который в результате его модуляции (фазовой манипуляции) накладываются дальномерные псевдослучайные коды и информационные сообщения, поступающие со спутника.

**Carrier-aided tracking** (слежение с использованием несущего) - метод захвата и точного отслеживания псевдослучайного кода, основанный на использовании свойств несущего сигнала. Более точный, чем обычный.

**Carrier frequency** (несущая частота) - частота немодулированного сигнала радиопередатчика.

**Channel** (канал) - часть приемно-информационного тракта GPS-приемника, содержащая электронные устройства слежения за сигналами одного спутника.

**Chip** (доел. - кусочек, осколок) - в жаргонном понимании - длительность передачи одного бита псевдослучайной последовательности (кода). Также - интегральная схема.

**Clock bias** (ошибка часов) - погрешность в показаниях часов по отношению к единому системному времени GPS.

**Control segment** (сегмент управления) - мировая сеть наземных станций слежения и управления, которые обеспечивают определение текущих координат спутников GPS и точность хода их часов.

**Cycle slip** (потеря цикла) - нарушение непрерывности слежения за фазой несущей частоты в результате временного сбоя в контуре слежения GPS-приемника.

**Data message** (информационное сообщение) - данные о местоположении спутника, техническом состоянии его бортовых систем и ходе часов, а так же



грубые координаты остальных спутников созвездия (альманах созвездия), содержащиеся в его сигналах.

**Differential positioning** (дифференциальное местоопределение) - точное определение относительных координат взаимного расположения двух приемников, отслеживающих сигналы одних и тех же спутников GPS.

**Dilution of Precision** (дословно - потеря точности) - коэффициент, отражающий увеличение погрешностей местоопределения по мере отклонения рабочего созвездия спутников от его наилучшей конфигурации на небесной сфере. В технической литературе обозначается как **DOP** или **GDOP** (геометрический фактор снижения точности).

**Doppler-aiding** (досл. - доплеровская поддержка) -использование доплеровского сдвига несущей частоты для обеспечения непрерывности и устойчивости отслеживания приемником спутниковых сигналов. При этом достигается более точное измерение координат и скорости.

**Doppler shift** (доплеровский сдвиг) - разница между частотами принятого и излученного сигналов пропорциональная скорости взаимного сближения (удаления) приемника и передатчика.

**Ephemeris** (эфемериды) - предвычисленные и скорректированные параметры движения спутника по орбите, которые передаются пользователю в информационном сообщении.

**Fast-switching channel** (быстро переключаемый канал) - канал GPS-приемника (см. "Channel"), предназначенный для быстрой выборки спутниковых данных. "Fast" означает, что период обновления данных достаточно мал (от 2 до 5 мс).

**Frequency band** (полоса частот) - частотный диапазон в спектре сигнала или характеристиках устройства.

**Frequency spectrum** (частотный спектр) -распределение амплитуд гармонических компонент сигнала в функции частоты.

**Geometric Dilution of Precision** (доел. - потеря точности из-за геометрии) -геометрический фактор снижения точности - **GDOP** (см. так же **Dilution of Precision**).

**Handover word** (доел. - слово передачи) - кодовое слово в информационном сообщении спутника, которое управляет переходом от режима слежения за C/A-кодом к режиму слежения за P-кодом.

**Ionosphere** (ионосфера) - слой электрически заряженных частиц на высотах от 50 до 1000 километров над поверхностью Земли.

**Ionospheric refraction** (ионосферная рефракция) -изменение скорости распространения радиосигнала при прохождении его через ионосферу.

**L-band** (L-полоса частот радиосигналов) - в общепринятых обозначениях полоса радиочастот в диапазоне от 390 до 1550 МГц, содержащая и несущие частоты спутников GPS : L1 = 1575,42 МГц и L2 = 1227.6 МГц.

**Multipath error** (ошибка многолучевости) - погрешность местоопределения, вызванная наложением на основной сигнал еще и сигналов, отраженных от земной поверхности, предметов и объектов, окружающих антенну приемника.

**Multi-channel receiver** (многоканальный приемник) - приемник GPS, который может одновременно отслеживать сигналы более, чем одного спутника.

**Multiplexing channel** (мультиплексный канал) - канал приемника GPS (см. "**Channel**"), который может быть запрограммирован на прием сигналов разных спутников.

**P-code** (P- код) - защищенный (**Protected** или **Precision** - точный) код. Очень длинная базовая в GPS последовательность псевдослучайных бистабильных манипуляций фазы несущей частоты с частотой следования, равной 10,23 МГц и периодом повторения в 267 суток. Любой недельный сегмент этого кода является уникальным для одного из спутников GPS и непрерывно генерируется им в течение каждой недели, начиная с ночи с субботы на воскресенье.

**PPS (Precise Positioning Service** - услуги точного местоопределения) - предлагаемые GPS средства и возможности наиболее точного динамического местоопределения, основанного на применении P-кода и двухчастотной передачи дальномерных кодов и информационных сообщений.

**Pseudolite** ("псевдоспутник") - размещенное в фиксированной точке на Земле устройство DGPS, которое излучает сигналы аналогично действующим спутникам и может быть использовано для местоопределения.

**Pseudo-random code** (псевдослучайный код) - шумоподобный непрерывный сигнал, состоящий из периодических, определенным образом составленных, кодовых последовательностей логических нулей и единиц, имеющий статистические характеристики, сходные с характеристиками случайных шумов.

**Pseudorange** (псевдодальность) - расстояние до спутника, полученное в приемнике на основе корреляции принятого и бортового кодов без коррекции ошибок синхронизации часов.

**Satellite constellation** (спутниковое созвездие) - конфигурация группы спутников GPS в космическом пространстве.

**Slow switching channel** (медленно переключаемый канал) - канал одно- или двухканального GPS-приемника, который из-за медленного (т.е. с малой частотой) переключения с работы с одним спутником на работу с другим не

позволяет получить непрерывное обновление их сообщений.

**Space segment** (космический сегмент) - часть всей GPS, находящаяся в космическом пространстве, т.е. спутники.

**Spread spectrum** (расширенный спектр) - радиотехнически прием, в соответствии с которым сигнал передается в диапазоне частот значительно более широком, чем минимально необходимо для передачи собственно информации. Применительно к GPS это осуществляется фазовой манипуляцией несущей частоты псевдослучайными кодами.

**SPS (Standard positioning service** - услуги обычного местоопределения) - предлагаемые GPS средства и возможности местоопределения, основанного на применении гражданского C/A-кода и одночастотной передачи дальномерных и информационных сообщений.

**Static positioning** (статическое местоопределение) - определение координат местоположения, когда во время измерений антенна приемника неподвижна по отношению к земле. В этих случаях, используя различные методы статистической обработки результатов, точность определения координат можно повысить в 1000 и более раз.

**User interface** (пользовательский интерфейс) - способ и средства, с помощью которых пользователь считывает информацию и осуществляет настройку и управление приемником.

**User segment** (пользовательский сегмент) - совокупность пользовательских приемников любого назначения и принадлежности (как часть всей системы GPS).