

GPS: ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

Александр МАХАНЬКОВ
plusik@rambler.ru

Начиная с 60-х годов XX века вооруженные, военно-морские и военно-воздушные силы США независимо друг от друга проводили работы над созданием радионавигационных систем, позволяющих независимо от погодных условий круглосуточно точно определять координаты объектов на Земле.

В 1973 году данные программы объединили в одну, и военно-воздушные силы США назначили руководящими в разработке системы NAVSTAR (Navigation Satellite Timing and Ranging) — глобальной системы местопределения (Global Positioning System). С 1983 года, после того, как к ее информации получили доступ гражданские лица, а в 1991 году были сняты ограничения на продажу GPS-оборудования

в страны бывшего СССР, распространение получила широко известная аббревиатура GPS.

Изначально планировалось, что система будет служить для высокоточного наведения боевых ракет, а навигационные функции системы были отодвинуты на второй план.

Первый спутник системы был запущен в 1978 году, а основная часть спутников системы были запущены на орбиты в середине 80-х годов. В 1994-м на орбиту был помещен спутник, позволивший завершить построение системы из 24 спутников.

Период нахождения спутника на орбите примерно равен 10 годам. Отработавшие свой срок спутники планомерно выводятся из системы и утилизируются.

В России действует аналогичная система спутниковой навигации ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система), принцип работы которой во многом подобен GPS, точность определения координат которой, однако, заметно меньше.

Спутниковые радионавигационные системы — это всепогодные системы космического базирования. Они позволяют определять текущие местоположения подвижных объектов и их скорость, а также осуществлять точную координату времени.

В состав системы входят:

- созвездие ИСЗ (космический сегмент);
- сеть наземных станций слежения и управления (сегмент управления);
- GPS-приемники (аппаратура потребителей).

Космический сегмент (орбитальная группировка) системы GPS на данный момент содержит 24 спутника. У каждого спутника имеется порядковый номер (PRN), всего номеров зарезервировано 32. По состоянию на 27 декабря 2005 года, на орбите находилось 29 рабочих спутников, 5 из которых либо уже отработали свой срок, либо готовились к вводу в систему для замены отработавших. Период обращения одного спутника составляет 11 часов 56,9 минут. Вес каждого спутника около 835 кг, линейный размер более 5 м (с развернутыми солнечными батареями). На борту каждого спутника установлены атомные часы, обеспечивающие точность 10^9 (0,000000001) с, вычислительно-кодирующее устройство и передатчик мощностью 50 Вт. Спутники размещены на 6 орбитальных плоскостях. Высота орбит примерно равна 20 200 км, угол наклона орбит составляет 55 градусов (рис. 1).

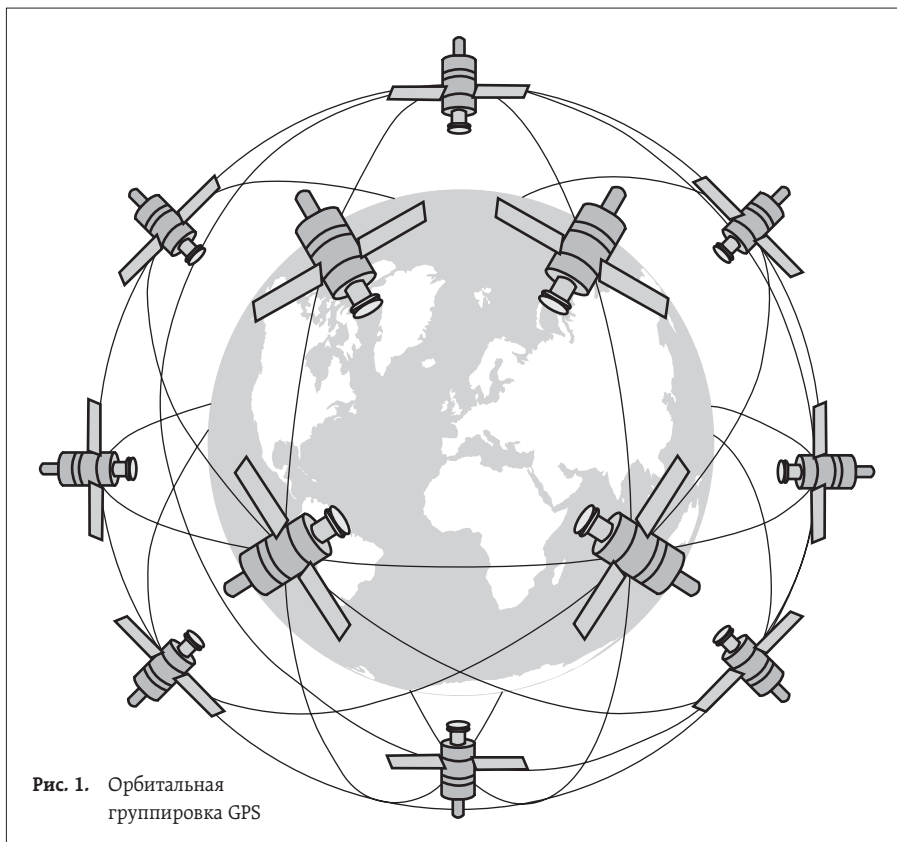


Рис. 1. Орбитальная группировка GPS

Передающая аппаратура излучает синусоидальные сигналы на двух частотах: L1 = 1575,42 МГц и L2 = 1227,60 МГц. Перед этим сигналы модулируются псевдослучайными цифровыми последовательностями (эта процедура называется фазовой манипуляцией). Причем частота L1 модулируется двумя видами кодов: C/A-кодом (код свободного доступа) и P-кодом (код санкционированного доступа), а частота L2 — только P-кодом. Кроме того, обе несущие частоты дополнительно кодируются навигационным сообщением, в котором содержатся данные об орбитах ИСЗ, информация о параметрах атмосферы, поправки системного времени. Частота L1 предназначена для широкого круга гражданских потребителей, а доступ к сигналам частоты L2 в основном получают военные и федеральные службы США. Точность автономного определения расстояния по P-коду примерно на порядок выше, чем по C/A-коду.

Данные параметры расположения группировки космических аппаратов выбраны не случайно. В любой момент времени в любой точке земного шара можно получить сигналы как минимум от 3-х спутников, что является необходимым условием определения координат. Для более точного определения местоположения необходим сигнал от четвертого спутника.

Наземный сегмент системы представляют контролирующие-измерительные станции для мониторинга спутников. Они расположены на Кваджалейне, на острове Вознесения, на Гавайях, Диего-Гарсия и Колорадо-Спрингс. Также в системе работают три наземные антенны (остров Вознесения, Диего-Гарсия и Кваджалейн). Управление осуществляется на центральной станции, расположенной на авиабазе в Шривере, Колорадо (Schriever Air Force Base, Colorado).

Приемные устройства — GPS-навигаторы — работают в комплексе со спутниками. GPS-навигатор получает со спутников следующую информацию: «псевдослучайный код» (PRN — pseudo-random code), «эфемериды» (ephemeris) и «альманах» (almanach). По наличию этих данных в GPS-навигаторах определяют вид старта или, по-другому, инициализации (под

Т а б л и ц а 1. Информация, передаваемая со спутника.

Содержание кадра	Содержание подкадра		
	Слово TLM	Слово HOW	Содержание подкадра
Подкадр 1	Слово TLM	Слово HOW	Номер недели GPS, точность, состояние и параметры коррекции времени спутника
Подкадр 2	Слово TLM	Слово HOW	Информация об эфемеридах спутника
Подкадр 3	Слово TLM	Слово HOW	Информация об эфемеридах спутника
Подкадр 4 (25 страниц)	Слово TLM	Слово HOW	Альманах и состояние спутников с номерами 25-32, конфигурация спутников, признаки, данные ионосферы и всемирной шкалы времени (UTC), специальные сообщения, резервные разряды
Подкадр 5 (25 страниц)	Слово TLM	Слово HOW	Альманах и состояние спутников с номерами 1-24, опорное время, номер недели альманаха, резервные разряды

Т а б л и ц а 2. Данные альманаха спутника 01.

***** Week 335 almanac for PRN-01 *****	Расшифровка обозначений	
ID:	01	Порядковый номер спутника
Health:	000	Состояние спутника: старший разряд «0» — вся навигационная информация в норме;
Eccentricity:	0,6335258484E-002	Эксцентриситет (пониженная точность)
Time of Applicability(s):	14 7456,0000	Опорное время привязки альманаха, с
Orbital Inclination(rad):	0,9863340671	Отклонение от номинального угла наклона орбиты спутника, рад
Rate of Right Ascen(r/s):	-0,7691748964E-008	Скорость изменения прямого восхождения (пониженная точность), рад/с
SQRT(A) (m 1/2):	5153,637695	Корень квадратный из большой полуоси орбиты спутника (пониженная точность), м ^{1/2}
Right Ascen at Week(rad):	-0,1589676350E+001	Долгота восходящего узла орбитальной плоскости на недельную эпоху (пониженная точность), рад
Argument of Perigee(rad):	-1,713295128	Аргумент перигея (пониженная точность), рад
Mean Anom(rad):	0,2555473800E+001	Средняя аномалия на время привязки (пониженная точность), рад
Af0(s):	0,3337860107E-004	Коэффициент (постоянной составляющей) аппроксимации временных параметров альманаха, с
Af1(s/s):	0,3637978807E-011	Коэффициент (первого порядка составляющей) аппроксимации временных параметров альманаха, с/с
week:	335	Полный номер недели, к которой относится опорное время привязки альманаха (toa)

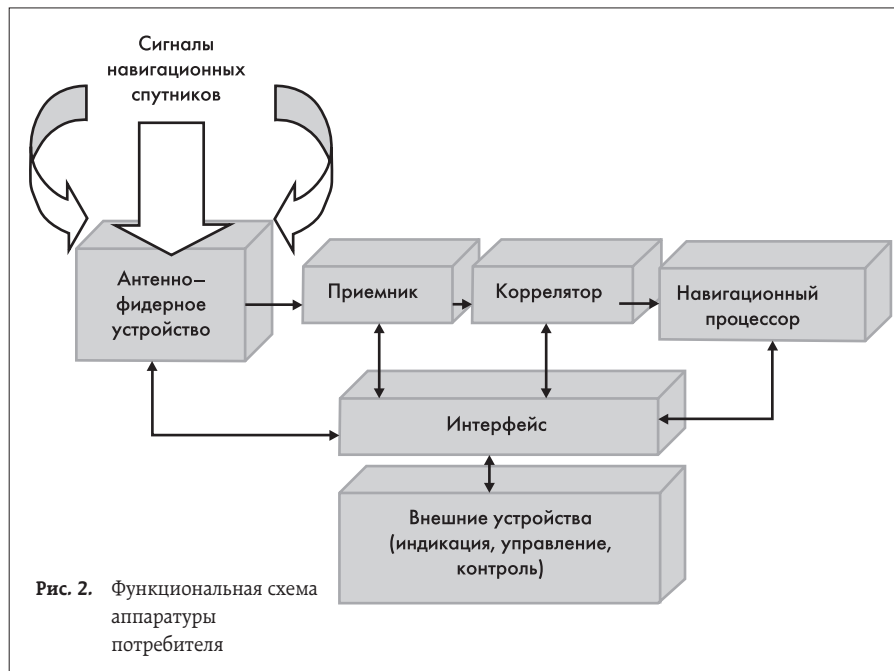


Рис. 2. Функциональная схема аппаратуры потребителя

стартом подразумевается начало процесса получения данных хотя бы с 3 спутников, что достаточно для 2D-навигации). Каждый спутник передает только собственную эфемериду, в то время как альманах передается каждым спутником обо всех спутниках сразу. Стартовать приемник может в разных режимах. «Холодный старт» происходит в том случае, когда информация об альманахе и эфемеридах сильно устарела. Данные могут утеряться в случае переноса GPS-приемника на большое расстояние, или же если часы приемника сбились. Как правило, «холодный старт» занимает от нескольких до 45 минут. «Теплый старт» — альманах сохранился, но эфемериды уже потеряны и часы приемника еще «знают» точное время. Такой старт занимает меньше времени, от 30 секунд до 10–15 минут, в зависимости от условий приема. В этом случае GPS-приемнику необходимо получить данные только эфемерид. И, наконец, самый быстрый старт — «горячий». Занимает от нескольких секунд до 5 минут. «Горячий старт» может быть осуществлен, когда в навигаторе имеется и альманах, и эфемериды.

Таким образом, большей частью время между включением и началом выдачи координат зависит от того, как давно было выключено устройство, а также от чувствительности прибора; модель приемника влияет на скорость захвата спутников в меньшей степени.

Функционирование аппаратуры потребителя можно понять из обобщенной схемы (рис. 2).

Основное сообщение, передаваемое с каждого навигационного спутника GPS, формируется в виде кадра. Поток навигационных данных передается со скоростью 50 бит/с. Длительность информационного символа «0» или «1» равна 20 мс. Кадр состоит из пяти под-кадров, причем четвертый и пятый подкадры разделены на 25 страниц каждый. Подкадры с первого по третий, а также каждая страница четвертого и пятого подкадров содержат по 300 символов, которые разделены на 10 слов по 30 символов в слове.

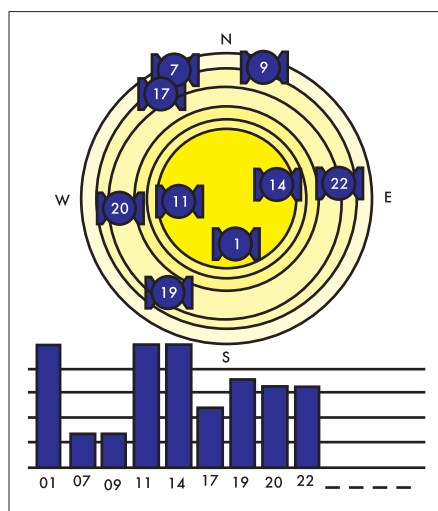


Рис. 3. Расположение спутников на информационном экране навигатора

В таблице 1 показана информация, передаваемая с навигационного спутника.

Альманах, содержащий информацию о параметрах орбит каждого из спутников системы, приведен в таблице 2.

Нулевой отсчет времени GPS определен в полночь с 5 на 6 января 1980 года. Неделя является самой большой единицей измерения времени в системе GPS. Неделя определена как 604 800 с.

Эфемериды представляют собой уточненные параметры движения спутников. Основываясь на данных альманаха, GPS-приемник «сканирует» небо и при получении данных от спутника уточняет его эфемериды.

Чтобы понять, как GPS-навигатор определяет координаты, необходимо иметь представление о системе координат, в которой происходит движение спутников и определение координат конечных потребителей.

Наблюдатель на Земле может представить небесную сферу, спроецированную на плоскость так, чтобы центр совпадал с местоположением наблюдателя.

Именно в этой проекции пользователю GPS-навигатором показывается примерное расположение спутников (рис. 3).

Как видно из рисунка (снимок с экрана GPS-навигатора), спутников в пределах видимости

находится девять (снимок производился при включенном режиме симуляции, то есть когда навигатор не ловит сигналы со спутников, а моделирует возможные ситуации). В реальности спутников на проекции сферы видно не более восьми, а сигналы принимаются максимум с четырех-шести. Закрашенный столбик над номером спутника показывает на устойчивый прием сигналов, а высота столбца позволяет оценить качество приема. В момент, когда GPS-навигатор начинает получать информацию со спутника, над его номером появляется незакрашенный прямоугольник. Закрашивается он при уточнении параметров орбиты спутника и начале получения данных, на основе которых идет непосредственный расчет координат пользователя.

Данные спутниковых систем и параметры орбит спутников рассчитываются относительно центра масс Земли. В бытовых GPS-навигаторах используется единая система координат, наиболее популярная в системах гражданской авиации, WGS-84.

Глобальная система координат WGS-84 определена следующим образом.

Начало координат 0 расположено в центре массы Земли:

- ось OX — пересечение плоскости исходного меридиана WGS-84 и плоскости экватора;
- ось OZ — направлена на Северный полюс Земли;
- ось OY — дополняет систему до правой системы координат.

Исходный меридиан WGS-84 совпадает с нулевым меридианом, определенным Международным бюро времени (BIN).

При наличии сигнала от одного спутника (№1), известной скорости распространения электромагнитного сигнала в пространстве (300 000 км/с) и времени, за которое сигнал дошел от спутника до GPS-приемника, стало возможным рассчитать геометрическое место точек нахождения приемника сигнала (им будет являться сфера с радиусом, равным расстоянию от спутника до приемника, в центре которой находится спутник).

Если GPS-навигатор начал принимать сигналы от второго спутника, то аналогично первому случаю, строится сфера вокруг спутника № 2. Так как GPS-приемник должен находиться на обеих сферах сразу, то теперь строим пересечение двух сфер. Каждая точка получившейся окружности может являться местом нахождения приемника в пространстве.

Наконец, когда приемник поймает сигнал от спутника № 3, строится еще одна сфера, при пересечении с окружностью она дает нам две точки. Одна из этих точек, как правило, имеет довольно неправдоподобное расположение, и в процессе вычисления по алгоритму она отбрасывается. Таким образом, мы получаем результат: широту и долготу.

Но если учитывать огромную скорость распространения электромагнитной волны, ошибка в расчетах на тысячные доли секунды может привести к довольно серьезным погрешностям в вычислении расстояния до спутника, а затем и в построении сфер и определении координат. Таким образом, мы подобрались к одному важному нюансу — для корректного определения координат необходим четвертый спутник.

После построения трех сфер приемник начинает манипулировать с временной задержкой. При каждом новом сдвиге времени приемника строятся новые сферы, точка пересечения их «расплывается» в треугольник. То есть сферы перестают пересекаться, а местоположение GPS-приемника может с определенной вероятностью быть в любой из точек треугольной области. Затем временные сдвиги продолжаются до тех пор, пока все три сферы снова не пересекутся в одной точке. Получаем довольно точные координаты. И чем больше спутников «видит» навигатор, тем точнее мы можем скорректировать время с вытекающим из этого увеличением точности позиционирования. При наличии четвертого спутника начинает работать так называемая 3D-навигация, и мы имеем возможность определить высоту над уровнем моря, скорость передвижения по поверхности и скорость вертикального перемещения.

Немного о точности. При создании системы в нее специально внесли так называемый режим S/A (Selective Availability — ограниченный доступ). Этот режим разработан для того, чтобы не дать возможному противнику тактического преимущества в определении местоположения с помощью GPS. Принцип действия данного режима заключается в искусственном рассогласовании часов спутника и приемника. Поэтому даже при хорошем приеме сигналов нескольких спутников точность не превышала 100 метров. Однако в 2000 году данный режим был отменен, и официально система GPS стала давать возможность определять координаты более точно. Как правило, указывают точность в 20...30 метров. Если использовать специальные алгоритмы пост-обработки, точность можно повысить вплоть до нескольких миллиметров, но это умеют делать геодезические системы. Для работы с такими системами нужен сертификат и разрешение, а их стоимость превышает стоимость бытовых навигаторов в десятки раз.

На точность определения координат существенное влияние оказывают ошибки, возникающие при выполнении процедуры измерений. Природа этих ошибок различна.

1. Неточное определение времени. Вносит погрешность порядка 1 метра.
2. Погрешности вычисления орбит спутников (уточнения эфемерид). Вносят погрешность порядка 1 метра.
3. Ионосферные задержки сигнала. Вносят погрешность до 10 метров.
4. Многолучевое отражение от высоких зданий, других объектов. Вносит погрешность до 2 метров.
5. Геометрическое расположение спутников.
6. Тропосферные задержки сигнала. **Б**