ПУТЕВОДНЫЕ ЗВЕЗДЫ

Пентагон – лучший друг путешественника

Тема навигации и определения собственного местоположения на планете давно занимает "Популярную Механику". Мы подробно разобрались с атомными часами (август 2003), морскими хронометрами (ноябрь 2003), с определением курса по звездам (июль 2004) и определением направления на север при помощи часов и солнца (апрель 2004). Пришло время разобраться с современными методами, а именно – с GNSS (глобальной спутниковой навигационной системой). Строго говоря, единой системы еще не существует, но ее прообраз – две основных системы (GPS и ГЛОНАСС) и несколько вспомогательных (EGNOS, WAAS, MSAS, CWAAS, GAGAN, SNAS и LAAS – расшифровка и описание в таблице [illegible] ственникам, морякам [illegible] свой путь [illegible]

Как все начиналось

Идея глобальной спутниковой группировки, по сигналам которой можно было бы определять свое местоположение и скорость, пришла ученым из Applied Physics Laboratory (APL) при университете имени Джонса Хопкинса (Мэриленд) в 1957 году, вскоре после того, как СССР запустил первый искусственный спутник Земли. Проект назывался TNSS (спутниковая навигационная система "Транзит") и был сдан в эксплуатацию

в 1964 году. Сначала "Транзит" использовали только военные моряки, но в 1967 году к нему допустили и гражданских пользователей. Система прожила до 1996 года, и на протяжении трех десятилетий 99,86% времени служила без сбоев. На "Транзите" были отработаны основные элементы современных спутниковых навигационных систем: созданы сверхточные источники времени, расположенные на спутниках, и предложено вещание на двух частотах для преодоления эффекта рассеивания сигнала в атмосфере Земли. Ответом СССР послужила аналогичная, в целом, система "Цикада". Обе системы обладали общими недостатками – сеанс определения длился от 5 до 15 минут, спутников было мало, из-за чего приходилось ждать сеанса от получаса до двух часов, да и точность определения – 70–100 м – оставляла желать лучшего.

Разработка GPS (глобальной спутниковой навигационной системы) началась в APL в 1973 году. Первый спутник будущей системы был запущен в 1978-м, а сама она вошла в строй в 1994 году. Когда началась разработка ГЛОНАСС – это тайна, покрытая мраком, но первый спутник (Космос-1414) был запущен в 1982 году, а систему объявили работоспособной в 1996-м. GPS и ГЛОНАСС довольно похожи, и принципы их работы мы будем обсуждать на примере GPS, поскольку она гораздо более открыта.

Как это работает

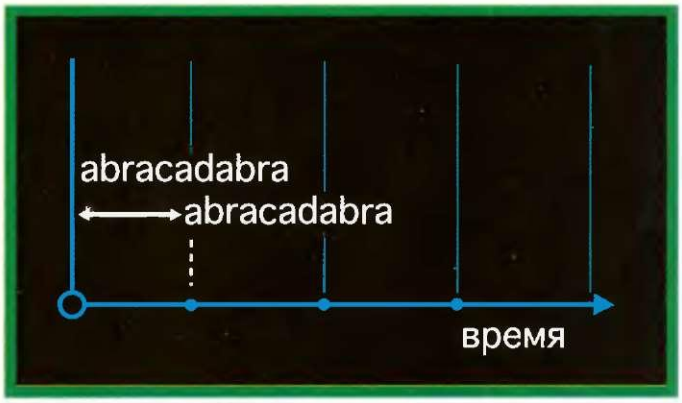
Мы специально опросили коллег и знакомых и пришли к выводу: хотя многие из них думают, что понимают принципы работы GPS, цельной картины нет практически ни у кого. Итак, на высоте примерно 20 200 км над уровнем моря летают 24 основных спутника, которые разбиты на шесть орбитальных плоскостей, а чуть в стороне от них – 3 дополнительных спутника. Плоскости обозначаются буквами от A до F, а спутники в каждой из плоскостей нумеруются от 1 до 4. Все спутники (называются они Navstar) сделаны в лабораториях компании Rockwell. Каждый весит чуть больше 850 кг и совершает полный оборот вокруг земного шара примерно за 11 часов 58 минут. Размер спутника с полностью раскрытыми солнечными батареями – чуть больше 5 м. Наземному наблюдателю одновременно видно от 4 до 12 спутников (поэтому и приемники бывают от "4-канальных" до "12-канальных"). Каждый спутник передает на двух частотах – L1 (1575.42 МГц) и L2 (1227.60 МГц) цифровой сигнал, который представляет собой псевдослучайную последовательность (р-код) – каждый спутник имеет свое "зерно" для генератора псевдослучайных чисел. Кстати, приемник идентифицирует спутник, отправивший сигнал, исходя как раз из содержимого принятой последовательности...

Но хватит фактов. Рассмотрим, как это все применяется в жизни, то есть что происходит внутри GPS-приемника.

Вначале любопытный факт – все слышали, что "систему вещания CDMA придумали американские военные". Но мало кто отдает себе отчет, что ее придумали специально для использования в проекте Navstar-GPS. В CDMA все передатчики вещают на одной и той же частоте, но их сигналы не мешают друг другу (мы подробно расскажем про CDMA в одном из следующих номеров). Таким образом, у гражданского приемника GPS всего один радиомодуль (у военного – два, так как он должен принимать и сигнал на второй частоте). Из этого следует, кстати, что количество "каналов" приемника (их бывает от 4 до 12) зависит исключительно от мощности использованного процессора.

Сначала приемник регистрирует передачу со спутника и фиксирует в памяти от 4 до 12 последовательностей (в зависимости от числа своих "каналов"). Это просто нули и единицы, что с ними делать? Приемник "смотрит" на свои часы. Важно понимать, что часы у приемника неточны по определению, и впоследствии потребуется корректировка времени. Затем приемник вычисляет р-код для всех 24 спутников (назовем эти последовательности эталонными), исходя из своих представлений о текущем времени. Затем

Зная р-код, приемник определяет задержку



каждую принятую последовательность он как бы "двигает" по временной шкале относительно эталонных последовательностей до тех пор, пока они не сойдутся. Когда это происходит, GPS-приемник немедленно получает сразу два факта: во-первых, он определил спутник, пославший сигнал, а во-вторых, исходя из представления о времени приемника, понял, сколько времени заняло путешествие сигнала от спутника. То есть теперь приемник знает, какие спутники он увидел и какова задержка для каждого из них. Например (все цифры выдуманы): A4 (0,066023452 с), C3 (0,065993221 с), C4 (0,065990011 с), F2 (0,066002985 с).

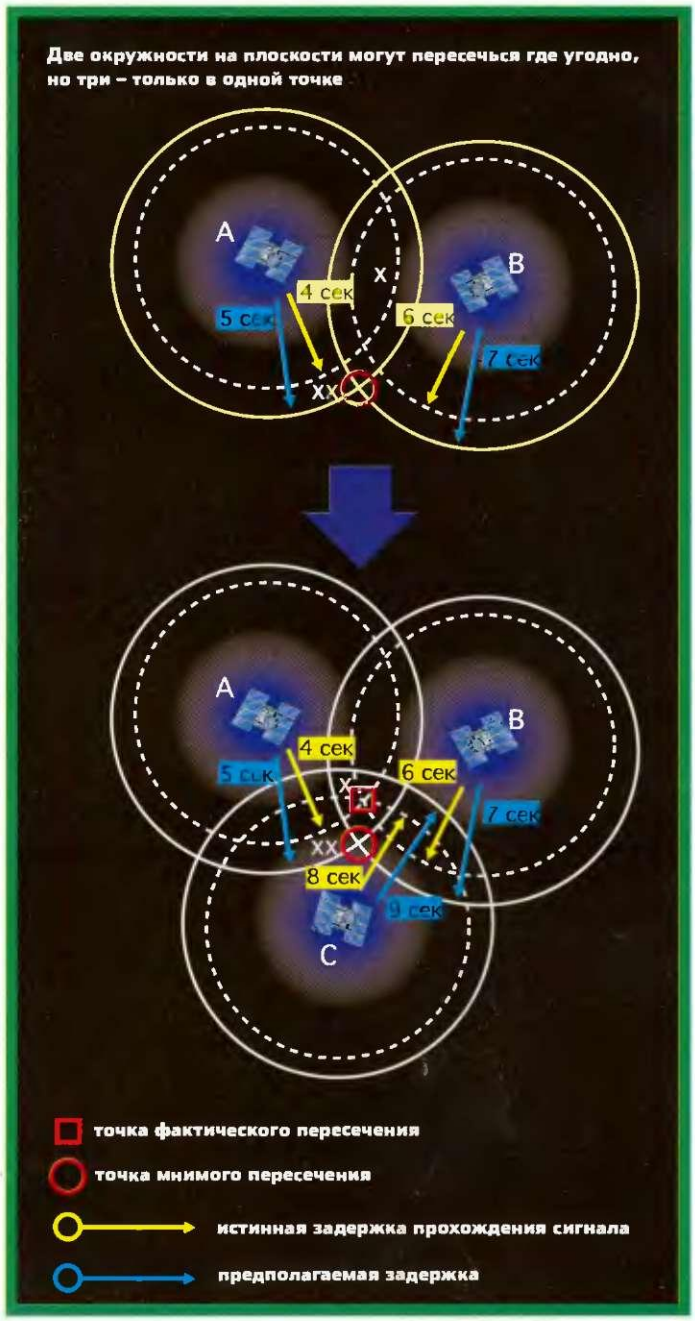
Для определения своего местоположения нам нужно знать не только расстояние до каждого из спутников, но и их точное положение. Но откуда известно, где именно в момент передачи сигнала находился данный спутник? Ответ на этот вопрос очень прост. Астрономия – точная наука, и все орбиты спутников GPS прекрасно известны. Приемник всегда "знает", в какой именно точке находится любой из спутников – эти данные хранятся в его памяти. Но дело, конечно, не только в астрономии. Американские военные ве-

дут за спутниками постоянное наблюдение, и если орбита изменилась, пускай даже на самую малость, со станции управления приходит команда внести временную поправку в излучаемый сигнал, чтобы компенсировать зафиксированные отклонения.

После этого происходит так называемая спутниковая триангуляция. Для этого на плоскости нужны две точки, а в пространстве – три. Радиосигнал распространяется во все стороны, так что представим вокруг каждого из трех спутников сферу, радиус которой определяется временем, прошедшим с момента передачи сигнала. Две сферы пересекаются в пространстве, образуя кольцо, а три сферы пересекаются только в двух точках, причем лишь одна из них может находиться на разумном расстоянии от поверхности Земли. На рисунке показан пример спутниковой триангуляции. Затем в ход идет школьная физика: скорость света умножаем на время, затраченное сигналом на преодоление расстояния от спутника до приемника. Но для точного замера времени необходимо, чтобы часы приемника и передатчика были жестко синхронизированы. Ведь даже если часы приемника спешат (или отстают) всего на 0,001 с, погрешность будет примерно 300 км! Как этого добиться? Когда проектировали GPS, никто и не мечтал о карманных атомных часах (их, кстати, сделали только в конце 2004 года), а традиционные атомные часы стоят от 50 до 100 тысяч долларов и никак не подходят для ношения с собой. Как быть?

И только теперь в игру вступает четвертый спутник (зачем бы еще система обеспечивала видимость по крайней мере четырех спутников в любой момент времени, в любой точке земного шара?!). Но для простоты на время забудем, что мы имеем дело с трехмерным миром, и посмотрим, как дело обстояло бы на плоскости. Допустим, у нас есть две окружности, которые пересекаются в точке (вторая точка нас не интересует, так как она явно "неправильная"). Если мы верно замерили время, то проблем нет. Но что, если мы ошиблись? Тогда окружности пересекутся совсем в другой точке! Чтобы справиться с этой проблемой, введем третью окружность. Что это дает, если мы все равно не знаем, какова погрешность? Дело в том, что, поскольку часы на всех спутниках синхронизированы между собой (еще бы, они атомные!), мы уверены, что ошибка для всех трех окружностей будет одинаковой. Поэтому все три окружности могут пересечься только в одной точке.

Теперь вернемся в трехмерный мир и применим полученные знания. Четвертый спутник служит для коррекции определения времени, что и позволяет очень точно определить расстояние до каждого из Navstar'ов. Кстати, именно поэтому у любого GPS-приемника по крайней мере 4 "канала". Одно следствие: любой исправный GPS-приемник может служить идеальным источником точного времени.



Но в жизни не бывает, чтобы все было просто и замечательно. Между спутником и приемником лежит 250 км воздуха – атмосфера нашей планеты. Из них самые неприятные для радиосигнала – 200 км ионосферы и 50 км тропосферы: в первой полно заряженных частиц, во второй – водяных испарений. Поэтому наши прежние рассуждения, верные для вакуума, требуют корректировки.

Существует два метода коррекции – моделирование, когда мы просто прикидываем, как сегодня должен бы проходить сигнал, и гораздо более сложный процесс, при котором сравнивается прохождение двух сигналов на разных частотах. Проблема с двухчастотным методом заключается в том, что вторая частота доступна только военным. Некоторым компаниям-изготовителям приемников удалось обойти это ограничение, но каким именно образом, держится в строжайшем секрете. Однако решение "для всех" существует, и называется оно D-GPS, или дифференциальный GPS.

Внешняя поправка

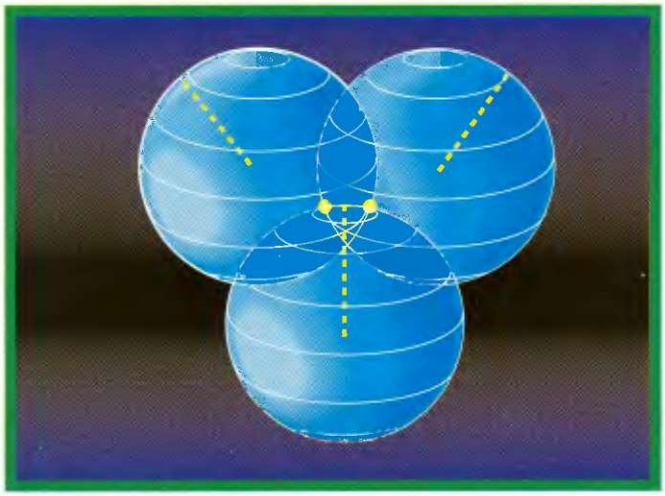
Кто сказал, что система должна быть замкнутой? Большинство GPS-приемников умеют принимать сигнал D-GPS. Идея здесь очень простая. Возьмем, например, местную радиостанцию. Ее географические координаты известны абсолютно достоверно. Если на ней разместить GPS-приемник, он сможет в реальном времени сравнивать вычисленные данные со своими настоящими координатами и вычислять погрешность в данной точке. Если эту погрешность передавать в эфир (делается это на поднесущей какой-нибудь из частот FM-диапазона), приемник, снабженный D-GPS-модулем, сможет учитывать ошибку и определять свои координаты гораздо точнее. Но наземными поправками дело не ограничивается – все-таки бóльшая часть земного шара необитаема (там и суши-то нет). Поэтому для того, чтобы точные координаты могли получать и летчики, и моряки, разные страны повесили на геостационарных орбитах спутники, которые делают ту же работу, что и наземные точки D-GPS. Идея очень простая – несколько центров слежения на земле (в американской системе WAAS таких центров 24) вычисляют каждый свою погрешность и "поднимают" эти данные на геостационарный спутник, который транслирует сигнал вниз. Умный приемник, определив свои координаты, возьмет погрешность ближайшего к нему центра корректировки и будет учитывать ее. Здесь целый букет систем. Каков предел точности для D-GPS? Строго говоря, его нет. Никто не мешает совместить спутниковые системы с новомодными Wi-Fi сетями и определять свое местонахождение с точностью до микрометров, даже внутри помещений. Представляете картину – конструктор спроектировал дорогу,

а полностью автоматический комплекс ее построил! Или хирург, который, закончив операцию, на экране указал, где что зашить, и спокойно отправился пить кофе.

Внутренняя поправка

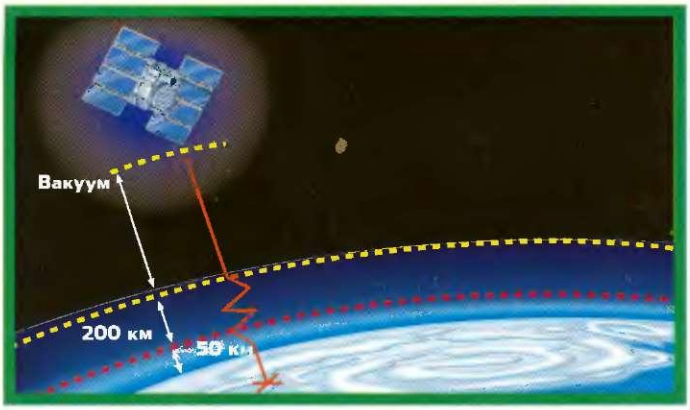
Но даже без всяких дополнительных источников сигнала можно добиться точности 3–4 мм! Вряд ли об этом задумывались создатели GPS, ведь в те времена никто не предвидел, что в кармане у вас может оказаться компьютер, способный выполнять сотни миллионов операций в секунду, но

Три сферы пересекаются только в двух точках пространства



современные технологии позволяют сделать то, о чем раньше нельзя было и мечтать. Дело в том, что концепция GPS основана на анализе модулированного сигнала, р-кода, частотой 1 MHz. Как мы уже выяснили, приемник воссоздает р-код, "выравнивая" его с принятым, и получает время задержки и расстояние до спутника. Но ведь кроме модулированного сигнала есть еще и несущая частота, которая в случае GPS в полторы тысячи раз выше! Но если р-код специально создан для того, чтобы его было легко сравнивать с образцом, то несущая частота для этого не предназначена. Но если вначале засинхронизироваться примерно,

Между спутником и приемником лежит 250 км атмосферы



при помощи р-кода, потом уже не так сложно при помощи огромных вычислительных ресурсов современных процессоров вычислить и поправку, исходя из несущей частоты. Это и даст вожделенные 3–4 мм. Звучит невероятно, но в самое ближайшее время такие приемники ожидаются на рынке.

Дела военные

Ни на минуту не следует забывать, что все небесные GPS-радости нам милостиво предоставляют американские военные. Вся система принадлежит им, они ее придумали, они ею и управляют. Никто не гарантирует, что завтра система не перейдет в закрытый режим, когда только американские военные и смогут ею пользоваться. Как? Они просто прекратят посылать сигнал на "гражданской" частоте, и останется только военный сигнал, m-код. Почему бы не принимать его? А он зашифрован. Алгоритм используется такой же, как при шифровании речи в GSM-телефонах – LFSR (Linear Feedback Shift Register), но длина ключа у военных побольше. Разработана сложная инфраструктура обновления ключей (по слухам, это происходит чуть ли не раз в сутки).

Когда GPS только запустили, "гражданский" сигнал был намеренно сделан неточным (варьировали временной сигнал), а военные приемники могли получать поправку и добиваться неплохой точности. Но случилась первая война в Персидском заливе, и выяснилось, что у военных нет в наличии необходимого количества приемников, так что им пришлось закупить огромную партию гражданских устройств, а помеху на время боевых действий отменили. Через несколько лет от вносимой погрешности вообще отказались, так как теперь при необходимости можно вообще отключить "гражданский" сигнал.

ГЛОНАСС

СССР не мог остаться в стороне и запустил собственную спутниковую группировку, на базе которой предполагалось реализовать свою Глобальную спутниковую радионавигационную систему (ГЛОНАСС). Правда, не обошлось без конфуза. После запуска первой очереди ГЛОНАСС в голос завыли астрофизики: выяснилось, что излучение советских спутников заглушает естественное излучение атомов околосолнечных молекул водорода. Системе вообще очень не везло – начало 1990-х было не самым лучшим временем для научных разработок, да и самого СССР не стало. Часть спутников отслужила свой срок, часть погибла при неудачных стартах. На сегодня на орбите всего 11 из положенных 24 спутников, и систему нельзя назвать полностью работоспособной. Ее фактически используют как вспомогательную к GPS – благо, сделано уже несколько приемников, "понимающих" обе системы. У русских военных не удалось получить никаких комментариев относительно военных аспектов системы. Разговоры о "возрождении ГЛОНАСС" идут постоянно, заниматься этим пытались самые разные организации, включая даже небезызвестный Исполнительный комитет Союзного

МУРАД ИБАТУЛЛИН

государства России и Белоруссии, но воз и ныне там. Так что перспективы системы, параметры которой заявлялись как "в 2,5 раза лучшие, чем у GPS", совершенно неясны.

Galileo

Европейцы, японцы, китайцы, индусы и многие другие нации без восторга относятся к монополии американских военных на систему глобального позиционирования – слишком уж многое в мире завязано на нее. Поэтому в Европе разработали свой проект GNSS – глобальной системы спутниковой навигации. На первом этапе это EGNOS – европейская D-GPS-система. На втором – группировка Galileo, которая полностью подменит американский GPS и при этом будет на целое поколение моложе и лучше (что неудивительно, ведь с момента проектирования GPS прошло больше 30 лет). Без конфузов не обошлось и здесь. Хитрые европейцы решили вещать свой сигнал на частоте, вплотную примыкающей к той, где GPS передает свой m-код для военных. Зачем? Очень просто – в случае конфликта, решили в Европе, американцы отключат свой "гражданский" сигнал, а чужие смогут легко заглушить, благо, доминирование в воздухе им всегда обеспечено. Но если сигнал Galileo будет вплотную примыкать к m-коду, его глушить не будут. Разумеется, Пентагон был, мягко говоря, не в восторге от такой перспективы и вынудил Европу отступить в обмен на обещание полной совместимости GPS серии III с европейским Galileo. Правда, когда эту серию III запустят, никто не знает – сроки все время сдвигают. А европейцам пришлось сменить метод модуляции, так что их теперь все-таки можно будет заглушить.

Глушить?

И, наконец, по поводу "глушения GPS", про которое так много говорили во время недавних балканских конфликтов. Если кратко, то это нереалистичный сценарий. Конечно, можно заглушить приемник, который стоит в вашем автомобиле или лежит у вас в кармане. Но, даже обходя организационные моменты (очень быстро прилетят "Apache", и от излучателя помех не останется и пыли), заглушить военный сигнал (m-код) невероятно сложно. Во-первых, он очень хорошо защищен, так как сильно избыточен. А во-вторых, во время боевых действий американцы могут многократно увеличить мощность отдельных лучей, так что к помехогенератору придется приставить небольшую гидроэлектростанцию. Да и "светиться" он будет как новогодняя елка. К тому же не следует забывать, что на крылатых ракетах приемные антенны GPS – направленные, и направлены они, разумеется, вверх. **ПМ**

Евгений Богорад