



Глобальная система местопределения

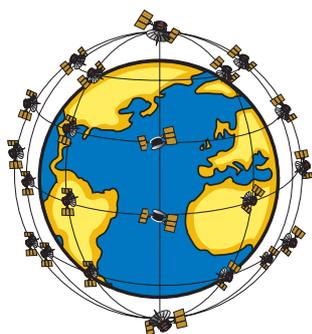
Когда карта не в силах помочь

Ранним утром рыбак рассекал воды великой Волги, плывя на своей деревянной лодке. Он заплыл уже достаточно далеко и решил забросить донки. Попал на хорошую яму: на глубине около двадцати метров брал крупный лещ. Рыбак остался доволен и на следующий день решил вернуться на то же место. Но не тут-то было. Как он ни пытался сориентироваться по находящимся на берегу домам и торчащим трубам заводов, все было безнадежно. Заветной ямы он не нашел. Рыбалка была обречена на провал. Что могло бы спасти рыбака? Нет, компас здесь бессилён, карта тоже не помощник. Вот если бы у него был GPS-приемник, он без труда вернулся бы на прежнее место. Что это за чудо техники? Чем полезно и где применяется?

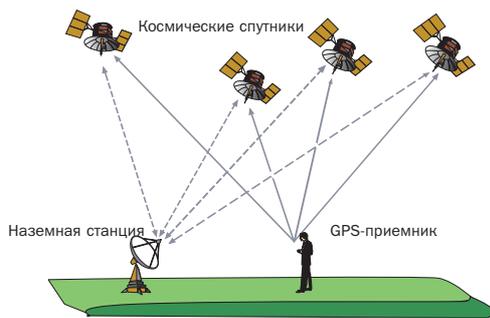
Итак, GPS (Global Positioning System) — глобальная система местопределения (навигации). Не будет преувеличением сказать, что толчок к развитию навигации с использованием космических аппаратов дал

запуск в СССР первого искусственного спутника Земли (ИСЗ). Это событие произошло в 1957 году. Не секрет, что в любом подобном действии американцы видели угрозу для своей страны. Была поставлена задача сле-

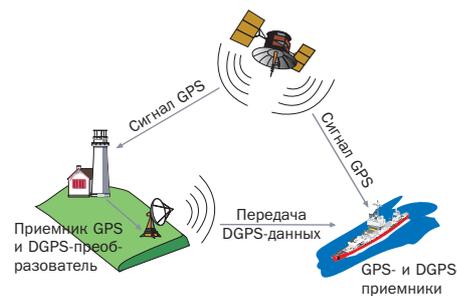
дить за советским ИСЗ. Сигнал со спутника принимали на наземном пункте с известными координатами. Появился интерес к обратной задаче: расчет координат приемника на основе принятых со спутника сигналов. »



▲ Рис. 1. Благодаря этим спутникам функционирует GPS



▲ Рис. 2. Упрощенная схема функционирования GPS



▲ Рис. 3. Метод DGPS увеличивает точность данных

» В 1964 году директор лаборатории прикладной физики университета Джона Гопкинса профессор Кершнер создал спутниковую радионавигационную систему первого поколения Transit. Как правило, изобретения подобного рода создаются для военных целей. Не стала исключением и Transit. Ее целью было обеспечение навигации баллистических ракет Поларис, запускаемых с подводных лодок. Но данная система могла обеспечить точное определение координат лишь для стационарных или медленно движущихся объектов.

Благодаря изобретенным в 60-х годах высокоточным атомным часам появилась возможность использовать для навигации несколько синхронизированных передатчиков, пересылающих закодированные сигналы. Чтобы рассчитать координаты приемника, необходимо было лишь измерить соответствующие временные задержки сигналов. ВМС США успешно продолжали работать над реализацией этого принципа и осуществили запуск нескольких спутников. В то время ВВС США разрабатывали идею использования для целей навигации широкополосных модулированных псевдослучайными шумовыми кодами (PRN — Pseudo Random Number code) сигналов с использованием одной несущей

частоты. А в 1973 году ВМС и ВВС США объединились в общую Навигационную технологическую программу. Как следствие, появилась программа Navstar GPS.

Navstar GPS

Оборонные силы США нуждались в системе, способной определить координаты любой точки земного шара в режиме реального времени. Для этого была создана глобальная спутниковая система навигации под названием Navstar (Navigation system with timing and ranging — Навигационная система с определением времени и дальности). Встречается еще один вариант расшифровки слова Navstar — Navigation satellite timing and ranging, то есть навигационный спутник для определения времени и дальности. Когда Navstar стала использоваться и для гражданских целей, появился термин GPS, о котором было сказано выше. Таким образом возникла аббревиатура Navstar GPS. Несмотря на некоторую кажущуюся путаницу в описанной терминологии, должно быть ясно одно: речь идет о единой глобальной спутниковой навигационной системе. Эта система имеет неоспоримое преимущество перед наземными средствами навигации. Она работает в любую погоду и позволяет оп-

ределить не только координаты объекта, но и вектор скорости.

О спутниках

Первый спутник для работы GPS был запущен в феврале 1978 года. Сегодня система включает в себя 28 спутников. Для покрытия земного шара необходимо только 24 спутника, остальные выступают в качестве запасных. Спутники распределены по шести орбитам на высоте около 20 000 км (по четыре спутника на каждой орбите) и имеют наклон 55° по отношению к экватору. Они движутся со скоростью около 3 км/с (два оборота вокруг Земли менее чем за сутки). Такая конфигурация системы позволяет принимать сигнал сразу от нескольких спутников практически в любом месте Земли (за исключением некоторых приполярных областей). Вес каждого спутника около тонны, а размер с раскрытыми солнечными батареями — около 5 м. Мощность передатчика порядка 50 Вт. Каждый спутник рассчитан на работу в течение десяти лет. Новые спутники запускаются на орбиту по мере необходимости, например в случае выхода из строя или необходимости провести профилактические работы. Функционирование системы запланировано до 2006 года.

В России

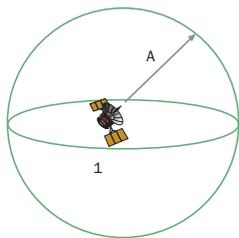
Ложка дегтя...

В то время как американский президент в виде первомайских подарков делает данные GPS открытыми всему человечеству, в России знание своих координат с точностью до 100 м является государственной тайной. Со всеми вытекающими отсюда последствиями. Таким образом,

задача приобретения гражданского GPS-приемника высокой точности осложняется. Купить GPS-приемник можно только у фирм с соответствующими лицензиями. Немало времени займет получение официального разрешения на эксплуатацию в региональном Управлении Госсвязьнадзора

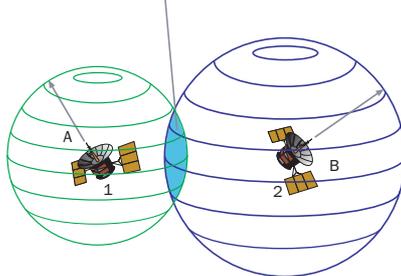
ра. Конечно, можно приобрести заветный приборчик и на рынке, но его эксплуатация может повлечь за собой взыскание административных штрафов или куда более серьезные последствия: вас могут обвинить в сборе сведений, содержащих государственную тайну.

Объект где-то на поверхности сферы



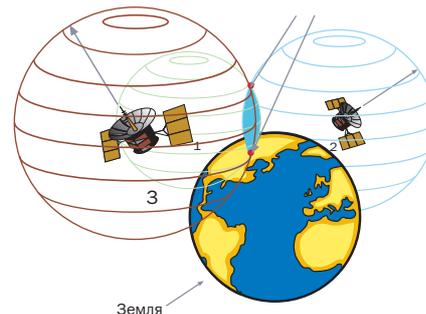
▲ Рис. 4. Прием сигнала от одного спутника

Объект где-то на окружности



▲ Рис. 5. Сигнал от второго спутника позволяет уточнить положение объекта

Объект на одной из двух точек



▲ Рис. 6. Третий спутник ограничивает выбор двумя точками

» Как это работает

Прежде чем мы приступим к описанию принципов работы GPS, придется ознакомиться с некоторыми терминами и даже вспомнить формулы из школьного курса физики.

Задача трилатерации...

Итак, задачей трилатерации (триангуляции) является вычисление координат объекта путем измерения его удаленности от точек с заданными координатами. В нашем случае объектом является GPS-приемник, а точками с заданными координатами — три спутника системы GPS. Впрочем, обо всем по порядку.

Каким образом становятся известны координаты спутников? Министерство Обороны США имеет четыре станции слежения, три станции связи и центр управления для контроля орбит и координат спутников. Станции слежения непрерывно отслеживают спутники и передают данные в центр уп-

равления. В центре управления вычисляются уточненные элементы орбит и коэффициенты поправок спутниковых часов. Эти данные составляют так называемый альманах, который передается по каналам станций связи на спутники.

Перейдем непосредственно к задаче определения координат. Предположим, что расстояние A (рис. 4) до одного спутника известно. Тогда мы можем описать вокруг него сферу заданного радиуса. Но координаты объекта (GPS-приемника) определить невозможно, так как известно лишь то, что он находится где-то на поверхности описанной сферы.

Если известно расстояние B и до второго спутника, то объект находится на окружности, образованной пересечением двух сфер (рис. 5).

Третий спутник позволяет определить две точки на окружности (рис. 6).

Теперь нам остается выбрать правильную точку. Одна точка может быть отбро-

шена, так как находится внутри Земли или высоко над ней. Таким образом, получив данные от трех спутников, можно узнать координаты объекта. Также окончательную точку можно выбрать, сверив с данными от четвертого спутника.

Но не все так просто, как кажется на первый взгляд. Приведенные рассуждения актуальны для случая, когда расстояния до спутников известны с абсолютной точностью. Как же определяются эти расстояния и что является источником вносимой погрешности?

... и не только

Задачей дальнометрии является определение расстояния до объекта по временной задержке распространения радиосигнала от него. Используется всем известная школьная формула $x = V \cdot t$ (расстояние равно скорости, умноженной на время). Каждый спутник передает радиосигналы с заданной частотой. Для гражданских »

История

Четыре поколения GPS-спутников

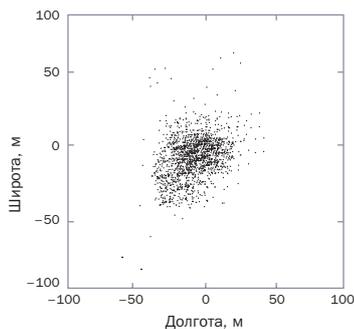
Существуют четыре поколения спутников системы Navstar GPS: Block I, Block II/IIA, Block IIR, Block IIF. Спутники типа Block I использовались на первом этапе программы Navstar для общей оценки работы системы и накопления практического опыта.

Первый спутник, относящийся к поколению Block II, был запущен 14 февраля 1989 года. Спутник SVN 14 под кодовым именем Cupid был запущен с базы ВВС США ракетой носителем Delta II. SVN 14 является самым старым из работающих на орбите спутников. После

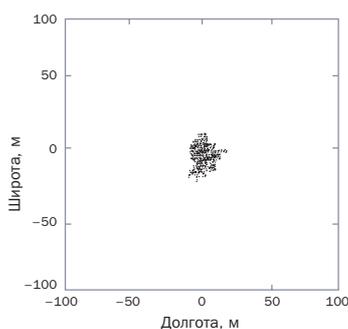
этого было запущено еще 27 космических аппаратов поколений Block II и Block IIA, 25 из которых являются действующими. Спутники этого поколения в настоящее время составляют основу системы.

Космические аппараты типа Block IIR имеют улучшенные характеристики и способны определять свое собственное местоположение в космосе на основе межспутниковой дальнометрии с других Block IIR спутников. Это поколение GPS спутников призвано заместить спутники Block II и Block IIA.

7 октября 1999 года с мыса Канаверал (база ВВС США) с помощью ракеты носителя Delta II был запущен третий GPS спутник поколения Block IIR. Целью миссии стала замена старого 15-го спутника, довольно сильно к этому времени износившегося. Запущенный спутник под номером 46 должен проработать 10 лет. Спутники четвертого поколения Block IIF отличаются большим сроком службы (запланированное время работы — 15 лет) и увеличенным местом для полезной нагрузки. Эти космические аппараты будут основой системы Navstar GPS в будущем.



▲ Рис. 7. Разброс в определении координат при включенном S/A



▲ Рис. 8. Уменьшение разброса координат после отключения S/A



▲ Рис. 9. Примеры блокировки и переотражения сигнала

» целей используется частота $f_1=1575.42$ МГц. Для военных целей — частота $f_2=1227.60$ МГц. Передаваемый сигнал модулируется псевдослучайным кодом (PRN). Существует грубый код — C/A-код (Coarse Acquisition code), используемый в гражданских приемниках, и точный P-код (Precision code), используемый в военных целях и иногда для нужд геодезии и картографии. На спутнике и в приемнике одновременно генерируется одинаковый PRN. Получив сигнал, GPS-приемник определяет временную задержку и, умножая эту цифру на скорость света (скорость распространения радиоволн), вычисляет расстояние до спутника.

Чтобы расстояние было вычислено точно, необходима идеальная синхронизация часов на спутнике и в приемнике, что достигается за счет применения атомных часов, находящихся на борту спутника. Естественно, что устанавливать такие часы в каждый GPS-приемник невозможно. Поэтому для получения точных координат применяют некоторую избыточность в данных. Например, для определения координат используют данные от четырех или более спутников. Получив сигналы от нескольких спутников, приемник ищет точку пересечения соответствующих окружностей и, если такую точку не находит, то компьютер в приемнике начинает корректировать время методом последовательных итераций до тех пор, пока не сведет все измерения к одной точке. Таким образом, чем больше спутников, тем точнее измерение. Стандартные гражданские GPS-приемники могут принимать сигналы от двенадцати спутников одновременно. При этом спутники выведены на орбиту таким образом, чтобы по крайней мере четыре из них приемник «видел».

Кроме навигационных сигналов спутники передают на приемник служебную ин-

формацию. Мы уже упомянули об альманахе, содержащем данные об орбитах и координатах спутника. Существует понятие эфемериса — данные, содержащие важную информацию о рабочем состоянии спутника, текущей дате и времени.

Точность не для всех

В период становления Navstar GPS Министерство Обороны США приняло решение о закрытии доступа к высокоточным навигационным данным гражданским пользователям. В начале 80-х годов Рональд Рейган заявил, что GPS будет доступна каждому, но наибольшая точность будет оставлена для военных. Был создан алгоритм Избирательного доступа (Selective Availability или S/A) и шифрования P-кода (Anti-Spoofing или A/S). Избирательный доступ позволял искусственно вносить погрешность в координаты.

Осуществлялось это двумя способами. Во-первых, искусственные ошибки вносились в навигационные данные, передаваемые со спутника. Во-вторых, намеренно искажали точность спутниковых часов. Все это приводило к ошибке в определении координат порядка 100 метров.

Но постепенно сектор гражданского пользователя GPS возрастал, и погрешность в 100 м не удовлетворяла многих. В примере с рыбаком такая погрешность все равно бы не позволила найти ему заветное рыбное место. Есть куда более ответственные ситуации, в которых такая погрешность оказывается роковой. Возможно, военные также поняли, что нет особого смысла закрывать доступ к высокоточным навигационным данным, так как «высококвалифицированный злоумышленник» способен и так найти этот доступ. Как бы то ни было, 1 мая 2000 года Билл Клинтон сделал подарок всему народу. В своей речи президент США за-

явил следующее: «Сегодня я рад объявить, что начиная с полуночи США прекращает программу преднамеренного ухудшения точности гражданских сигналов системы GPS, так называемый «избирательный доступ»... Гражданские пользователи GPS получат возможность определять свои координаты в десять раз точнее, чем они делали это раньше».

Но военные приберегли еще один метод, о котором говорилось выше, — шифрование P-кода (A/S). Зашифрованный P-код называется Y-кодом. Закрытие доступа к P-коду не позволяет двухчастотному приемнику, работающему с таким кодом, определить ионосферную задержку (задержка сигнала при прохождении через верхние слои атмосферы) в реальном времени, и решение задачи определения координат становится более грубым.

Ненамеренные ошибки

Одним из факторов, влияющим на точность данных, полученных GPS-приемником, является геометрия спутников: их расположение относительно друг друга. Если приемник получает данные от спутников, которые расположены только в каком-либо одном направлении, например западном, то триангуляция будет плохой и погрешность в определении координат высокой — порядка 100 м. Если же спутники расположены в разных направлениях, то геометрия будет хорошей и точность оптимальной.

Другим источником ошибок является блокировка спутникового сигнала различными объектами и его переотражение (рис. 9). Дело в том, что переотраженному сигналу требуется больше времени для достижения приемника. Приемнику «кажется», что спутник находится на большем расстоянии, чем на самом деле. Из-за большой скорости распространения радиоволн, которая равна ско-

Атомные часы

Поразительная Точность

Ошибка в синхронизации часов на спутнике и в приемнике может привести к большой погрешности. Расхождение даже в одну миллионную секунды дает погрешность в 300 м при определении расстояния. Высокая точность достигается за счет применения атомных часов, находящихся на борту спутника. В своей книге *The Navstar Global Positioning System* Том Логсдон объясняет: «В спутниках системы Block II находятся четыре экземпляра атомных часов высочайшей точности: два цезиевых и два рубидиевых. Эти часы настолько точны и стабильны, что их погрешность составляет около одной секунды за 160 000 лет!»

Как дифференциальные коррекции передаются с базовой станции на ваш приемник? Посредством радиосвязи. Например, в США скорректированный сигнал передается береговой охраной через морские радио-буи, работающие на частоте 283,5–325,0 КГц. Пользоваться этим сервисом может каждый, кто имеет специальный DGPS-приемник. Он подключается к вашему GPS-терминалу и принимает скорректированный сигнал. Под Санкт-Петербургом в феврале 1998 года была установлена первая базовая станция DGPS. Она передает дифференциальную поправку на частоте 298,5 КГц. Выходная мощность передатчика 100 Вт. Это позволяет принимать дифференциальные коррекции на расстоянии до 300 км на море или 150 км на суше. Опять же вам необходимо иметь специальный DGPS-терминал, подключаемый к GPS-приемнику.

Русский GPS

В Советском Союзе испытания новой Глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС) начались в 1982 году. Предполагалось использование такого же числа спутников и на такой же высоте орбит, что и в американской Navstar. Была заявлена точность 10 метров по каждой из координат и 0,05 м/с по каждой компоненте скорости. Спутники ГЛОНАСС, весящие по 1400 кг, доставлялись на орбиту 4-ступенчатыми носителями Прогон по три штуки за запуск. К 1990 году было запущено 48 спутников, но 16 из них отказывались передавать навигационные сигналы. Как ни странно, лишь в 1991 году выяснилось, что эти спутники вообще не содержали навигационную аппаратуру, а использовались лишь для отработки вывода на орбиту. К лету 2001 года из рабочих осталось только шесть спутников. Жаль, что столько металла запущено в космос впустую.

GPS на практике и в перспективе

Сфера применения GPS огромна. Кроме перечисленных выше возможностей GPS также используется для навигации судов в туманную погоду, отслеживания транспортировки ценных грузов, точной посадки самолетов, поиска затонувших кораблей и отслеживания опасных айсбергов. Интересна идея использования GPS в качестве

источника точного времени при проведении разного рода научных экспериментов. Нельзя недооценить важность GPS и для спасательных служб.

GPS полезна для управления автомобильными системами навигации. Имея в автомобиле соответствующее оборудование, вы можете путешествовать по незнакомой местности. Введите координаты назначения, и система сама подскажет, где вам необходимо совершить поворот. GPS-оборудование, установленное на инкассаторской машине, позволит следить за ней на всем пути ее следования. Автосигнализация на основе GPS сегодня никого не удивит — она стала доступна многим по относительно невысокой цене. Угнанный автомобиль всегда будет «на прицеле» у диспетчерской службы.

Биологи могут регистрировать ареалы расселения диких животных, маршруты их миграций, численность популяций. Агрономы могут использовать GPS для правильного распределения удобрений и сбора данных о типах почв. В городском хозяйстве GPS может применяться для контроля транспортных потоков, для съемки информации о расположении канализационных или газовых трубопроводов. Такая информация позволит аварийным службам оперативно решить проблемы при аварийной ситуации.

Археологи и историки могут использовать GPS для поиска и регистрации раскопок исторических мест. Например, в 1984 году бизнесмен из Оклахомы Рон Фрейтс применил GPS для поиска древних поселений майя, затерявшихся в зарослях джунглей Гватемалы и Белиза. Он использовал фотографии спутника Ландсат и навигационные данные GPS. Фрейтс сообщил: «За пять дней мы смогли нанести на карту всю территорию поселений майя на полуострове Юкатан. Чтобы обойти эту местность пешком, экспедиции потребовалось бы не менее ста лет».

Как видим, перспективы у GPS огромны. Несомненно, GPS станет стандартным оборудованием многих автомобилей. Внедряют в эксплуатацию эту спутниковую систему и все службы спасения, безопасности и техпомощи. GPS будет прекрасным подспорьем в городском и сельском хозяйстве. Уже сейчас цена неплохого GPS-приемника для многих стала приемлемой.

■ ■ ■ Денис Соколов

» рости света, вносимая ошибка невелика — всего она составляет около 5 м.

Источником погрешности могут служить неблагоприятные атмосферные условия, вызывающие задержку в прохождении сигнала. Проходя через ионосферу и тропосферу, скорость распространения сигнала уменьшается (скорость света константна только в вакууме).

Ошибки в ходе атомных часов могут быть также источниками погрешностей.

Дифференциальная коррекция

Дифференциальная коррекция — это метод, который значительно увеличивает точность собираемых GPS-приемником данных. Используя такой метод, можно определить местоположение буквально до сантиметров. В этом случае один приемник расположен в точке с известными координатами (базовая станция), а второй приемник собирает данные в точке с неизвестными координатами (ваш передвижной приемник). Так как координаты базовой станции известны, то она может вычислить ошибки, содержащиеся в спутниковом сигнале. То есть базовая станция может уточнить координаты спутников и передать скорректированные данные вашему подвижному приемнику. Уточненные данные называются дифференциальными коррекциями и используются для точного определения месторасположения (рис. 3).