

УДК 004.771

## СПУТНИКОВЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ЛОГИСТИКЕ

*Кондратенко А.В., Кривошеев С.В.  
Донецкий национальный технический университет*

В современных условиях оперативная информация о расположении и передвижении движущихся объектов является важной составляющей обеспечения безопасности персонально для каждого человека. Стремительное развитие технических средств передачи данных, спутниковые системы связи и позиционирования сделали возможным построение эффективной системы слежения и контроля за мобильными объектами в режиме реального времени. С технической точки зрения созданные системы радиоместоопределения являются уникальным научно-техническим комплексом, обеспечивающим в настоящее время наибольшую точность глобальной временной и координатной привязки абонентов. Применяемые в настоящее время в этих системах радиосигналы обеспечивают необходимый уровень предельной точности проведения измерений координат.



Рисунок 1 – Спутниковые навигационные системы в логистике

Логистика – это система управления транспортными потоками. Ее главной задачей является обеспечение оптимальных путей доставки грузовых и иных материальных составляющих этих потоков. При создании и осуществлении логистических операций становится понятно, что обеспечить качественную и своевременную грузоперевозку, используя только один единственный вид логистики, невозможно. Разные виды логистических схем взаимно пересекаются, дополняя друг друга с единственной целью — оптимизации грузооборота и транспортного потока в целом. Логистическая информационная система – это определенным образом организованная совокупность взаимосвязанных средств вычислительной техники, различных справочников и необходимых средств программирования, которая обеспечивает решение тех или иных функциональных задач управления

материальными потоками. Так же само как любая другая система, информационная система должна складываться из последовательно взаимосвязанных элементов и иметь некоторую совокупность интеграционных качеств. Декомпозицию информационных систем на составляющие элементы можно осуществлять по-разному. Чаще всего информационные системы делятся на две подсистемы: функциональную и обеспечивающую. Функциональная подсистема состоит из совокупности решаемых задач сгруппированных по признаку совместной цели.

Обеспечивающая подсистема в свою очередь, включает такие элементы:

- техническое обеспечение, т.е. совокупность технических средств, которые обеспечивают обработку и передачу информационных потоков;
- информационное обеспечение, которое содержит в себе различные справочники, классификаторы, кодификаторы, средства формализованного описания данных;
- математическое обеспечение, т.е. совокупность методов решения функциональных задач. Логистические информационные системы, как правило, являются автоматизированными системами управления логистическими процессами.

**Спутниковая система навигации** — комплексная электронно-техническая система, состоящая из совокупности наземного и космического оборудования, предназначенная для определения местоположения (географических координат и высоты), а также параметров движения (скорости и направления движения и т. д.) для наземных, водных и воздушных объектов.

Основные элементы спутниковой системы навигации:

- Орбитальная группировка, состоящая из нескольких (от 2 до 30) спутников, излучающих специальные радиосигналы;
- Наземная система управления и контроля, включающая блоки измерения текущего положения спутников и передачи на них полученной информации для корректировки информации об орбитах;
- Приёмное клиентское оборудование («спутниковых навигаторов»), используемое для определения координат;
- Опционально: информационная радиосистема для передачи пользователям поправок, позволяющих значительно повысить точность определения координат.

Принцип работы спутниковых систем навигации основан на измерении расстояния от антенны на объекте (координаты которого необходимо получить) до спутников, положение которых известно с большой точностью. Таблица положений всех спутников называется альманахом, которым должен располагать любой спутниковый приёмник до начала измерений. Обычно приёмник сохраняет альманах в памяти со времени последнего выключения и если он не устарел — мгновенно использует его. Каждый спутник передаёт в своём сигнале весь альманах. Таким образом, зная расстояния до нескольких спутников системы, с помощью обычных геометрических построений, на основе альманаха, можно вычислить положение объекта в пространстве.

Метод измерения расстояния от спутника до антенны приёмника основан на определённости скорости распространения радиоволн. Для осуществления возможности измерения времени распространения радиосигнала каждый спутник навигационной системы излучает сигналы точного времени в составе своего сигнала используя точно синхронизированные с системным временем атомные часы. При работе спутникового приёмника его часы синхронизируются с системным временем, и при дальнейшем приёме сигналов вычисляется задержка между временем излучения,

содержащимся в самом сигнале, и временем приёма сигнала. Располагая этой информацией, навигационный приёмник вычисляет координаты антенны. Дополнительно накапливая и обрабатывая эти данные за определённый промежуток времени, становится возможным вычислить такие параметры движения, как скорость (текущую, максимальную, среднюю), пройденный путь и т. д.

В настоящее время работают или готовятся к развёртыванию следующие системы спутниковой навигации:

- **NAVSTAR (GPS)**. Принадлежит министерству обороны США, что считается другими государствами её главным недостатком. Более известна под названием **GPS**. Единственная полностью работающая спутниковая навигационная система.
- **ГЛОНАСС**. Принадлежит министерству обороны России. Является попыткой восстановить функционировавшую с 1982 года советскую систему. Находится на этапе повторного развёртывания спутниковой группировки (оптимальное состояние орбитальной группировки спутников, запущенных в СССР, было в 1993—1995 гг.). Современная система, по заявлениям разработчиков наземного оборудования, будет обладать некоторыми техническими преимуществами по сравнению с NAVSTAR. Однако в настоящее время эти утверждения проверить невозможно ввиду недостаточности спутниковой группировки и отсутствия доступного клиентского оборудования.
- Бэйдо. Развёртываемая в настоящее время Китаем подсистема GNSS предназначена для использования только в этой стране. Особенность — небольшое количество спутников, находящихся на геостационарной орбите.
- **Galileo**. Европейская система, находящаяся на этапе создания спутниковой группировки.
- **IRNSS**. Индийская навигационная спутниковая система, в состоянии разработки. Предполагается для использования только в этой стране.

### Точность

При обычном использовании системы слежения ни абонент, ни оператор не видят координат наблюдаемого объекта в числовом представлении. Все, что доступно человеку, сидящему в диспетчерском центре — это положение значка относительно объектов электронной карты. Плюс — некоторые данные о попадании мобильного терминала в определенные зоны. Как следствие — недостаточно сказать, что точность системы составляет, скажем, 50 метров. Это не даст никакой полезной информации пользователю, но будет благодатной почвой для спекуляций при сравнении систем. Численно — и то, довольно условно — может быть выражена только точность работы компонента. Надо четко понимать, что эта величина — вероятностная. То есть, если мы возьмем круг радиусом 100 метров, приемник и встанем в центр круга, то одно из тысячи измерений, сделанных приемником, даст координаты вне этого круга. Большинство их попадет в сорока метровый круг. Шанс получить координаты, которые не впишутся в зону с диаметром 300 метров в нормальных условиях, пренебрежимо мал. В математике для выражения вероятностных величин существуют определенные понятия. К сожалению, в рекламе и в законодательстве используются не они, а гораздо более туманные формулировки. То есть, заявляемая точность в 30 метров не даст вам никакого представления о том, сколько из 1000 измерений уложатся в тридцати метровый круг.

В реальной ситуации «поле зрения» приемника ограничивают деревья, здания, крыша автомобиля — выберите нужное по ситуации. И из 8-12 остаются видимыми в лучшем случае 3-6 спутников. Соответственно, уровень принимаемых сигналов не лучший,

геометрия созвездия тоже и точность падает. Иногда — незначительно, иногда — в разы. Правда, технический прогресс здесь налицо: некоторые экземпляры современных приемников уже способны работать в помещениях, что еще три года назад казалось просто невозможным. Второй компонентой аккуратности отображения положения мобильного объекта является электронная карта. Для применения в системе слежения можно считать достаточной карту, координаты объектов которой отклоняются от реальных не более 5-10 метров. В противном случае очень высок шанс увидеть, как автомобиль едет по крышам домов. Все это следует учитывать, определяя параметры контролируемой зоны. Если проверка попадания в заданную область производится на контроллере и исходные данные вводятся в числовом виде, то минимальный радиус должен составлять 20 метров, а рекомендуемый — 50. Если же зона указывается на изображении карты, то радиус уже должен равняться 50-100 метрам и более.

### **Источники ошибок**

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

1. **Неточное определение времени.** При всей точности временных эталонов ИСЗ существует некоторая погрешность шкалы времени аппаратуры спутника. Она приводит к возникновению систематической ошибки определения координат около 0.6 м.
2. **Ошибки вычисления орбит.** Появляются вследствие неточностей прогноза и расчета эфемерид спутников, выполняемых в аппаратуре приемника. Эта погрешность также носит систематический характер и приводит к ошибке измерения координат около 0.6 м.
3. **Инструментальная ошибка приемника.** Обусловлена, прежде всего, наличием шумов в электронном тракте приемника. Отношение сигнал/шум приемника определяет точность процедуры сравнения принятого от ИСЗ и опорного сигналов, т.е. погрешность вычисления псевдодалности. Наличие данной погрешности приводит к возникновению координатной ошибки порядка 1.2 м.
4. **Отражение в распространении сигнала.** Появляется в результате вторичных отражений сигнала спутника от крупных препятствий, расположенных в непосредственной близости от приемника. При этом возникает явление интерференции, и измеренное расстояние оказывается больше действительного. Аналитически данную погрешность оценить достаточно трудно, а наилучшим способом борьбы с ней считается рациональное размещение антенны приемника относительно препятствий. В результате воздействия этого фактора ошибка определения псевдодалности может увеличиться на 2.0 м.
5. **Ионосферные задержки сигнала.** Ионосфера — это ионизированный атмосферный слой в диапазоне высот 50 — 500 км, который содержит свободные электроны. Наличие этих электронов вызывает задержку распространения сигнала спутника, которая прямо пропорциональна концентрации электронов и обратно пропорциональна квадрату частоты радиосигнала. Для компенсации возникающей при этом ошибки определения псевдодалности используется метод двухчастотных измерений на частотах L1 и L2 (в двухчастотных приемниках). Линейные комбинации двухчастотных измерений не содержат ионосферных погрешностей первого порядка. Кроме того, для частичной компенсации этой погрешности может быть использована модель коррекции, которая аналитически рассчитывается

с использованием информации, содержащейся в навигационном сообщении. При этом величина остаточной немоделируемой ионосферной задержки может вызывать погрешность определения псевдодальности около 10 м.

6. **Тропосферные задержки сигнала.** Тропосфера – самый нижний от земной поверхности слой атмосферы (до высоты 8 – 13 км). Она также обуславливает задержку распространения радиосигнала от спутника. Величина задержки зависит от метеопараметров (давления, температуры, влажности), а также от высоты спутника над горизонтом. Компенсация тропосферных задержек производится путем расчета математической модели этого слоя атмосферы. Необходимые для этого коэффициенты содержатся в навигационном сообщении. Тропосферные задержки вызывают ошибки измерения псевдодальностей в 1 м.
7. **Геометрическое расположение спутников.** При вычислении суммарной ошибки необходимо еще учесть взаимное положение потребителя и спутников рабочего созвездия. Для этого вводится специальный коэффициент геометрического ухудшения точности PDOP (Position Dilution Of Precision), на который необходимо умножить все перечисленные выше ошибки, чтобы получить результирующую ошибку. Величина коэффициента PDOP зависит от взаимного расположения спутников и приемника. Она обратно пропорциональна объему фигуры, которая будет образована, если провести единичные векторы от приемника к спутникам. Большое значение PDOP говорит о неудачном расположении ИСЗ и большой величине ошибки. На приведены примеры удачного (а) и неудачного (б) геометрического положения спутников. Типичное среднее значение PDOP колеблется от 4 до 6.

Одним из способов улучшения точности является использование фильтра Калмана.

Сочетание спутниковой и инерциальной навигационных систем совместно с фильтром Калмана позволяет повысить точность навигационных определений. Измерения, полученные инерциальной системой, с одной стороны, характеризуются низким уровнем случайных ошибок, при этом имеет место медленный дрейф нуля системы; с другой стороны, результаты спутниковых определений не подвержены подобным сдвигам системы координат, однако в большей степени отягощены случайными погрешностями. В этом кроется преимущество гибридной системы: располагая характеристиками инструментальных ошибок обеих систем, фильтр Калмана сводит к минимуму их влияние на выходные навигационные данные. Алгоритм фильтра предполагает наличие линейных моделей, связывающих переменные состояния системы с измерениями и друг с другом. Поскольку большинство реальных систем и процессов нелинейны, возникает задача линеаризации их моделей. Истинные значения навигационных данных, вырабатываемые каждой из систем, поступают на вход фильтра Калмана с обратными знаками, компенсируя друг друга, таким образом, в данном случае моделированию подлежат только инструментальные погрешности. В большинстве случаев можно считать, что траектория, выдаваемая инерциальной системой, принимаемая в качестве опорной, достаточно близка к истинной, и, несмотря на то, что система в целом нелинейна, фильтр Калмана работает в линейной области совместных погрешностей обоих навигационных методов. Степень подробности модели последних, реализуемой в фильтре Калмана в виде уравнений связи, определяется требованиями к точности получаемых навигационных данных и классом применяемого оборудования. К ошибкам спутниковой аппаратуры относятся: нестабильность частоты генератора

приемника и спутникового стандарта частоты, селективный доступ, задержки сигнала, вызванные влиянием тропо- и ионосферы, эффект многолучевости и неточности в эфемеридном обеспечении. Погрешности инерциальной системы включают: ошибки начальных условий, уход гироскопов, а также ошибки, вносимые акселерометрами и приближенными значениями ускорения силы тяжести.

### **Системы координат спутниковых навигационных систем**

Для определения местоположения спутника и абонента используется геоцентрическая система декартовых координат. Так как земная поверхность имеет ярко выраженную неравномерность, ее трудно использовать для привязки к координатам в навигационных приложениях. Для решения этой задачи используются аппроксимирующие математические поверхности, которые сглаживают неравномерность земной поверхности или в терминах геодезии аппроксимируют глобальный уровень моря геоидом. Одной из таких поверхностей является сфера, которая широко применяется в навигационных приложениях низкой точности. Для высокоточных приложений и в спутниковой навигации для аппроксимации Земли используется биаксиальный эллипсоид, применение которого, в то же время, незначительно усложняет математические операции привязки координат. Биаксиальный эллипсоид может быть задан с помощью большой и малой осей.

### **Виды карт**

Существует два вида карт: растровые и векторные.

#### **1. Растровые карты**

Растровая карта местности представляет собой набор множества отдельных разноцветных точек (пикселей), расположенных в определенном порядке.

Основным достоинством растровой карты местности является то, что карта в электронный вид может быть переведена обычным сканированием с бумажного оригинала любого масштаба. При помощи компьютерной программы растровые карты местности можно масштабировать, детально осматривать карты большого размера, вручную корректировать объекты на карте, добавлять графическую и текстовую информацию.

Однако компьютер не распознает отдельные объекты в растровом изображении: реки, леса, дороги, строения воспринимаются программой как единый упорядоченный набор цветных точек и при увеличении масштаба четкость изображения ухудшается. Пожалуй, это самый главный недостаток растровых карт местности.

#### **2. Векторные карты**

Карта местности в векторном виде, представляет собой хранилище изображений (базу данных) объектов (дороги, строения, лес, водоемы и др.) с описанием этих объектов в виде математических формул и алгоритмов, определяющих геометрическую форму, размер, цвет, местоположение объекта. Таким образом, компьютерная программа различает и опознает каждый объект индивидуально. Основное отличие векторной карты местности от растровой состоит в том, что в программе хранится не само изображение объекта, а информация, на основе которой объект создается непосредственно в процессе визуализации на экране компьютера.

В навигации чаще всего используются именно векторные карты, поскольку они обладают несколькими существенными преимуществами по сравнению с растровыми:

- автоматическая прокладка маршрутов;
- автоматический поиск объектов по адресу, типу, расстоянию от определенного пользователем места;

- возможность автоматически сигнализировать о приближении к определенным объектам или опасным местам;
- функция изменения ориентации карты исходя из текущих пожеланий пользователя;
- автоматическое измерение расстояний;
- легкость в редактировании картографического материала;
- переменный масштаб.

### **Заключение**

В данной статье описаны основные понятия, принципы, структуры и способы применения спутниковых навигационных систем в логистики. Были приведены разновидности данных систем, а так же рассмотрены ошибки, наличие которых значительно уменьшают точность определения координат.

### **Литература**

- [1] Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. М.: Эко-Трендз, 2000
- [2] Липкин И.А. Спутниковые навигационные системы. М.: Вузовская книга, 2001
- [3] Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / Под ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина. М.: ИПРЖР, 1998.
- [4] Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. М.: КНИЦ ВКС, 1995.
- [5] Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика / Гофманн-Велленгоф Б., Ліхтенеггер Г., Коллінз Д. / Пер. з англ. під ред. Яцківа Я.С.- Київ: Наук. думка, 1995.