

**Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»**

Факультет «Радиотехники, электроники и связи»
Специальность 6М071900 «Радиотехники, электроники и телекоммуникации»
Кафедра «Телекоммуникационных систем»

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Сембаевой Д. Б.
(фамилия, имя, отчество)

Тема диссертации «Исследование влияния геометрического фактора на точность спутниковой навигации»

утверждена Ученым советом университета №108 от «16» ноября 2012 г.

Срок сдачи законченной диссертации «25» декабря 2013 г.

Цель исследования состоит в оценке влияния геометрического фактора на точность спутниковых измерений.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов или краткое содержание магистерской диссертации:

1. Анализ работы GPS-систем, изучение источников ошибок спутниковой навигации
2. Разработка методики количественной оценки влияния геометрии спутников на точность позиционирования
3. Экспериментальное подтверждение пригодности данной методики

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Определение координат в спутниковой навигационной системе
2. Расположение спутников при «сильной» геометрии
3. Расположение спутников при «слабой» геометрии
4. Взаиморасположение зафиксированных GPS-приемником спутников

Рекомендуемая основная литература

1. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. — М: Горячая линия-Телеком, 2005. — 251 с.

2. Серапинас Б. Б. Глобальные системы позиционирования. — М: ИКФ «Каталог», 2002. — 106 с.

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки предоставления научному руководителю	Примечание
1. Изучение принципов работы спутниковых систем связи, исследование источников ошибок спутниковых измерений	15.10.2012	
2. Разработка методики количественной оценки влияния геометрии спутников на точность позиционирования	10.03.2013	
3. Проведение экспериментальной части	05.09.2013	
4. Расчет погрешности полученных расчетных и экспериментальных данных	15.10.2013	
5. Обобщение и анализ полученных результатов в экспериментальной части	9.11.2013	

Дата выдачи задания _____ сентябрь 2012 г. _____

Заведующий кафедрой _____ (_____ Коньшин С. В. _____)
(подпись) (Ф.И.О.)

Руководитель диссертации _____ (_____ Федулina И. Н. _____)
(подпись) (Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению магистрант _____ (_____ Сембаева Д. Б. _____)
(подпись) (Ф.И.О.)

Аңдатпа

Жерсеріктерінің навигациясын анықтаудың негізгі шешімдерінің бірі осы жұмыста көрсетілген. Магистрлік диссертацияда геометриялық факторлардың жерсерігі навигациясының дәлдігіне әсері: GPS жүйесінің жұмысы қарастырылады, дәлдікті жоғалту тұжырымы, есептелген көрсеткіштер негізінде жасалынған қорытындылар жерсеріктері мен қабылдағыштың орналасу нүктесін және уақытты дәл анықтауды көрсетеді.

Аннотация

Проблема повышения точности позиционирования, безусловно важна, и исследование фактора, влияющего на достоверность измерений спутниковой навигации, является одним из рычагов в решении данного вопроса. В настоящей магистерской диссертации приведено исследование влияния геометрического фактора на точность спутниковой навигации: рассмотрены принцип работы GPS-систем, представлена концепция потери точности, рассчитаны показатели, на основе которых можно сделать вывод о влиянии расположения спутников и приемника на точность определения времени и местоположения в GPS.

Abstract

The question of increasing the accuracy of positioning is undoubtedly important, and researching one of the factors which affects the reliability of satellite measurements will surely solve this problem. This master's paper presents researching of the influence of satellites' mutual arrangements and examines concept of loss of accuracy. According the performed calculations, the precision dependence of satellites geometry was also determined in this paper.

Содержание

Введение	6
Основная часть	7
1 Основные направления развития систем спутниковой навигации	7
1.1. Система глобального позиционирования GPS	7
1.1.1 Дифференциальный режим DGPS	8
1.1.2 Псевдослучайные коды	15
1.1.3 Определение координат в системе GPS	18
1.2 Система спутниковой навигации ГЛОНАСС	20
1.2.1 Основные принципы работы системы ГЛОНАСС	20
1.2.2 Радионавигационное поле	21
1.2.3 Структура сигнала ГЛОНАСС	22
1.3 Глобальная спутниковая система Galileo	24
1.4 Источники ошибок спутниковых измерений	27
1.4.1 Геометрический фактор снижения точности GDoP	29
2 Исследование влияния геометрического фактора на точность спутниковой навигации	33
2.1 Проведение экспериментального исследования	34
2.2 Выбор спутников для исследования	35
2.2.1 Расчет азимута спутников	36
2.2.2 Расчет углов возвышения спутников	38
2.3 Расчет расстояний от выбранных спутников до приемника	40
3 Рекомендации по повышению точности спутниковых измерений	45
Заключение	46
Сокращения	47
Список литературы	48
Приложение А Перевод декартовых координат в географические	50
Приложение Б Расчет угла возвышения спутника	51

Введение

Наряду с развитием современных технологий возросли требования к достоверности информации, поэтому к повышению точности спутниковых измерений уделяется особое внимание.

Спутниковые измерения, очень точны и свободны от ошибок, однако существует ряд источников ошибок, которые снижают точность координат местоопределения от нескольких десятков до ста метров. Источниками таких ошибок могут быть ионосферные и атмосферные задержки, ошибки часов спутника и приемника, переотражение, избирательный доступ и геометрическое снижение точности [1].

Геометрические соотношения, характеризующиеся положением спутниковых относительно друг друга, могут влиять на наличие погрешности спутниковых измерений. Геометрическое снижение точности (GDoP) – индикатор точности спутниковой навигации, применяющийся в области систем глобального позиционирования для показательного описания геометрического взаимного расположения спутников [1].

Актуальность выбранной темы подтверждается тем, что в настоящей магистерской диссертации представлено исследование такого значимого вопроса, как достоверность информации, что в наши дни является жизненно важным аспектом.

Однако для того, чтобы судить о влиянии геометрического фактора на точность позиционирования, теоретических данных и исследований, проведенных ранее по данному вопросу, недостаточно [2].

Целью магистерской диссертации является определение влияния геометрии спутников на точность спутниковой навигации на основе экспериментального исследования.

Для реализации данной цели были выполнены следующие задачи:

- изучение принципов работы GPS-систем;
- проведение анализа источников ошибок спутниковых измерений;
- постановка эксперимента, выполнение необходимых расчетов на основе экспериментальных данных;
- анализ проведенных расчетов, определение зависимости точности спутниковой навигации от геометрии спутников;
- разработка рекомендаций по решению проблемы, исследованной в магистерской диссертации.

Представленные в магистерской работе результаты проведенных расчетов помогут количественно оценить влияние геометрического фактора на точность позиционирования, а предложенные рекомендации по решению исследуемой проблемы помогут повысить точность спутниковых измерений.

1 Основные направления развития систем спутниковой навигации

1.1 Система Глобального Позиционирования GPS

Система Глобального Позиционирования GPS (Global Positioning System) является спутниковой и находится в распоряжении Министерства Обороны США. Система является глобальной, работает в любых погодных условиях и дает возможность получать точные координаты и время 24 часа в сутки. Полную структуру GPS составляют следующие сегменты:

- космический сегмент – спутники, облетающие по орбите Землю;
- сегмент управления – станции, расположенные вблизи от экватора, необходимые для управления спутниками;
- сегмент пользователя – любой, кто принимает и использует сигнал GPS [1].

В состав космического сегмента входят 28 автономных спутников, равномерно расположенных на орбитах с высотой 20350 км (для полноценной работы системы достаточно 24 спутников). Каждый спутник передает на 2 частотах специальный навигационный сигнал, в котором зашифровано 2 вида кода. Один из них не доступен гражданским потребителям, среди его пользователей военные и федеральные службы США. Кроме этих 2 сигналов, спутник передает и третий, содержащий информацию о его дополнительных параметрах (состоянии спутника, его работоспособности и т.д.). Параметры спутниковых орбит постоянно контролируются сетью наземных станций слежения (всего 5 станций, находящихся в тропических широтах), с помощью которых (не реже 1-2 раз в сутки) вычисляются баллистические характеристики, фиксируются отклонения спутников от расчетных траекторий движения, определяется собственное время бортовых часов спутников, осуществляется мониторинг исправности навигационной аппаратуры и др. При этом обнаружение отказов спутникового оборудования с помощью наземных станций обычно занимает несколько часов. Космический сегмент организован таким образом, что в любое время в распоряжении пользователя будет минимум 4 спутника, находящихся в области видимости выше 15° над линией горизонта в любой точке поверхности земли. Четыре спутника - минимум, который необходим для реализации основных прикладных задач. Обычно в области видимости находятся, по крайней мере, 5 спутников, видимых большую часть суток, но чаще всего в распоряжении потребителя будет 6 или 7 видимых спутников. Каждый спутник GPS имеет несколько очень точных бортовых атомных часов (эталонов частот). Часы используют для работы основную частоту 10,23 МГц. Данная частота применяется для генерирования сигналов, которые излучаются спутником. Спутник постоянно передает две несущие волны. Эти несущие волны находятся в L-полосе (используемой для радиопередач), и перемещаются к земле со скоростью света. Эти несущие образуются из основной частоты, генерируемой очень точными атомными часами:

- несущая L1 передаётся в диапазоне 1575,42 МГц (10.23 X 154);
- несущая L2 передаётся в диапазоне 1227,60 МГц (10.23 X 120) [1].

Затем несущая L1 модулируется двумя кодами. С/А кодом или кодом грубого захвата с частотой 1,023 МГц (10.23/10) и P-кодом или точным кодом с частотой в 10,23 МГц. Несущая L2 модулируется только одним кодом – P-кодом с частотой 10,23 МГц [1].

Каждый спутник имеет собственный индивидуальный код, по которому он идентифицируется приёмником. По кодам могут быть вычислены координаты, так как их можно использовать в качестве основы для измерения псевдодальностей.

Сегмент управления включает в себя одну главную станцию управления, 5 контрольных станций и 4 наземных антенн, равномерно распределенных вблизи экватора. Сегмент управления фиксирует спутники GPS, обновляя их орбитальное положение и выполняя калибровку и синхронизацию их часов. Другая значимая функция – это определение орбиты каждого спутника и прогнозирование траектории его движения за следующие сутки. Данная информация программируется в каждый спутник и входит в излучаемый сигнал. Это дает GPS-приёмнику возможность обладать информацией о местонахождении каждого спутника, что пригодится для его быстрого обнаружения на небесной сфере. Спутниковые сигналы принимаются на станциях в Асценционе, Диего Гарсия и Кваджалейне. Затем измерения отсылаются главной станции управления в Колорадо Спрингс, где они обрабатываются с целью обнаружения ошибок в сигнале каждого спутника. Затем информация отсылается назад четырём контрольным станциям, оборудованным наземными антеннами, и загружается в спутники.

Третий сегмент GPS-системы - это GPS-приемники, выпускаемые как в виде самостоятельных устройств (мобильные или стационарные), так и как платы для подключения к персональным, бортовым компьютерам и другим аппаратам. Сегмент пользователя включает любого, использующего GPS приёмник для приёма сигналов GPS и определения своего местоположения и/или времени [3]. Обычные области использования в пределах пользовательского сегмента – это навигация транспортных средств, туризм, геодезические измерения, судовождение, воздушное передвижение, управление строительной техникой и т. д.

1.1.2 Дифференциальный режим DGPS

Учитывая точность, приемлемую для потребителя, и характеристики использующегося приёмного устройства GPS, можно выделить несколько методов для получения координат при помощи GPS. Данными методами являются:

- автономная навигация;
- дифференциальные фазовые измерения;
- дифференциальное координирование.

При автономной навигации применяется только один (автономный) приёмник. Данный метод используется туристами, штурманами для навигации судов, находящихся вдали от берега и военными. Точность определения координат около 100 м для гражданских потребителей и приблизительно 20 м для военных потребителей.

Дифференциальные фазовые измерения помогают достичь точности 0,5-20 мм. Этот метод получения координат применяется для геодезических измерений, управления строительной техникой и т. д.

При использовании дифференциального координирования DGPS, погрешность спутниковых измерений составляет 0,5-5 м. DGPS – весьма простая для использования GPS приёмником методика, при которой координаты места и/или точного времени могут быть получены мгновенно. Получаемая точность может быть выше 100 м (ранее - 30-50 м) для гражданских пользователей и 5-15 м для военных [4].

Дифференциальная навигация основана на относительном постоянстве значительной части погрешностей навигации во времени и в пространстве.

При использовании дифференциального режима спутниковой системе необходимо два навигационных приемника (контрольно-корректирующая станция и потребитель), располагающихся в двух точках пространства. При этом дифференциальная контрольно-корректирующая станция (базовая станция) геодезически точно подвязана к принятой системе координат. Разности между измеренными и рассчитанными в ней значениями псевдодальностей спутников в области видимости, а также разности между измеренными и рассчитанными псевдоскоростями по линии передачи данных передаются потребителю. Эти разности называют дифференциальными поправками [5]. Потребитель же вычитает полученные поправки из измеренных псевдодальностей и псевдоскоростей. В случае, когда неточности определения псевдодальностей почти не меняются во времени и пространстве, погрешности значительно компенсируются поправками, переданными по линии передачи данных. Основными слабо меняющимися погрешностями определения псевдодальности являются ошибки синхронизации, погрешности за счет ошибок эфемеридного обеспечения, некомпенсированные ионосферные погрешности. С использованием дифференциальной DGPS неточности определения места снижаются до метров и ниже. Дифференциальный режим осуществляется с помощью контрольно-корректирующего навигационного приемного устройства, называемого базовой станцией. Базовую станцию устанавливают в точке с известными геодезическими координатами. При сравнении имеющихся координат (полученных в результате прецизионной геодезической съемки) с измеренными координатами базовым навигационным приемником формируются поправки, передающиеся потребителям по каналам связи. Приемник потребителя учитывает принятые от базовой станции поправки при решении навигационной задачи. Это дает возможность определить его координаты с точностью до одного метра. Результаты, полученные при

помощи дифференциального метода, в большей степени зависят от расстояния между потребителем и базовой станцией. Использование данного метода наиболее результативно, когда преобладающими являются систематические ошибки, вызванные внешними (по отношению к приемнику) факторами. Данные ошибки в значительной мере компенсируются при близком расположении базовой станции к приемному устройству потребителя. Поэтому зона обслуживания базовой станции не превышает 500 км. Дифференциальные поправки могут передаваться от базовой станции к потребителю с помощью телефонной или радиосвязи, по системам спутниковой связи (например, INMARSAT), а также с применением технологии передачи цифровых данных RDS (Radio Data System) на рабочих частотах FM-радиостанций. На сегодняшний день в некоторых странах уже функционирует развитая сеть базовых (дифференциальных) станций, постоянно передающих поправки на определенную территорию [5].

Современные дифференциальные системы спутниковой навигации состоят из систем дифференциальной навигации по кодовым и псевдофазовым измерениям. Системы дифференциальной навигации по кодовым измерениям основаны на измерении и обработки псевдодальностей, в общем, обладают неограниченной областью действия и определяются неточностями определения места от долей до нескольких метров. Системы дифференциальной навигации по псевдофазовым измерениям характеризованы весьма высокой точностью позиционирования (до долей сантиметра). Но все же область их действия ограничивается дальностью 10-12 км в одночастотном режиме и 100 км в двухчастотном режиме. Специфической особенностью дифференциальных систем по псевдофазовым измерениям можно назвать неоднозначность данных измерений, которая затрудняет их использование. Системы дифференциальной навигации по псевдофазовым измерениям иногда называют системами относительных определений [6].

Системы дифференциальной навигации по кодовым измерениям могут быть локальными, широкодиапазонными и глобальными. Ниже приведено уточнение для классификации систем дифференциальной навигации на основе кодовых измерений.

Множество современных систем дифференциальной навигации являются локальными. Локальные дифференциальные системы применяют единственную наземную станцию измерений и формирования дифференциальных поправок (далее - дифстанция). Дифстанция обычно размещается в центральной части локальной зоны, габариты которой составляют не более 200 км. В центре зоны достигается точность измерений приблизительно 0,5-1 м. На граничной части зоны точность снижается и постепенно приближается к точности абсолютных местоопределений. Дифференциальные поправки в локальных системах дифференциальной навигации могут быть сформированы на основании метода коррекции координат и метода коррекции навигационных параметров. Больше

практическое распространение получил второй метод, в котором дифстанция создает поправки к измерениям псевдодальностей для каждого из видимых ею спутников. Пользователь поправляет свои измерения псевдодальностей по тем же спутникам на значения, полученные от дифстанции. Для передачи поправок, сформированных в соответствии с методом коррекции навигационного параметра, был разработан специальный стандарт RTCM SC-104, который учитывает особенности современной системы позиционирования GPS [7].

В широкодиапазонных системах дифференциальной навигации (WADGPS) применяется сеть станций сбора информации (ССИ) и совершенно отличный от других метод получения дифференциальных поправок. Этот метод был назван the state-space approach (метод коррекции параметров пространства состояния или, подробнее, метод коррекции параметров моделей движения КА, свойств модели ионосферных задержек и смещений шкал времени навигационных спутников). В широкодиапазонных системах измерения двухчастотных навигационных приемников, размещенных на станциях сбора информации (ССИ), собираются в единый центр, где проходит их совместная обработка для оперативного уточнения параметров моделей движения КА, смещения шкал времени спутников и формирования карт вертикальных ионосферных задержек. Все перечисленные данные далее оперативно передаются тем или иным способом потребителю, который применяет их для уточнения данных, извлекаемых им из сигналов навигационных спутников. Широкодиапазонные системы дифференциальной навигации помогают получить точность местоопределения со среднеквадратической ошибкой 0,5 м в области, охватываемой сетью ССИ, и соседних с ней областях. Между ошибками оценки смещений шкал времени и ошибками оценки вертикальных координат приемника осуществляют сильную корреляцию. Такая корреляция может возникнуть из-за абсолютной схожести соответствующих частных производных, особенно для спутников с большими углами возвышения. Стабилизация опорных частот приемников ССИ и приемника пользователя при помощи рубидиевых генераторов помогает лучше разделять ошибки оценки смещения шкал времени и вертикальных координат приемника. Результаты соответствующих экспериментов демонстрируют среднеквадратические ошибки вертикальных координат меньше 0,4 м [8].

Неосновным, но весьма значимым параметром широкодиапазонных систем считается возможность резкого повышения целостности, по сравнению с целостностью, характерной базовым спутниковым системам.

На сегодняшний день в мире известны только две широкодиапазонные системы дифференциальной навигации. Первая система WADGPS принадлежит фирме Satloc. Вторая система WAAS (Wide Area Augmentation System) находится в управлении правительства США. Данные системы развернуты и эксплуатируются на территории США. В системе WADGPS

фирмы Satloc пользователю выдается карта вертикальных ионосферных задержек с шагом 2° . В системе WAAS, зависимо от класса точности, потребитель имеет возможность применять карты вертикальных ионосферных задержек различной точности. Наиболее подробные карты содержат до 929 точек прокола ионосферы [1].

Параметры системы WADGPS фирмы Satloc по сравнению с параметрами системы WAAS имеют некоторые различия. Задержка формирования корректирующих поправок в системе фирмы Satloc составляет 4 с, а в системе WAAS - 6 с. Satloc использует только 15 ССИ, размещенных только на континентальной территории США. WAAS использует избыточное число из 24-х ССИ, расположенных как на континентальной территории США, так и на Аляске и Гавайских островах. Для того, чтобы удовлетворить строгим требованиям доступности, обеспечивающих высокую степень целостности, система WAAS требует два или более геостационарных спутника, излучающих дополнительные дальномерные коды. Скорость передачи корректирующей информации в системе фирмы Satloc равна 750 бит/с, а в системе WAAS приблизительно 250 бит/с. Корректирующая информация в системе фирмы Satloc квантуется с дискретом $1/16$ м, а в системе WAAS - с дискретом $1/8$ м [8].

Работа широкодиапазонных систем дифференциальной навигации базируется на применении трех основных категорий программного обеспечения. К первой категории относится программное обеспечение уточнения параметров орбит и смещения временных шкал спутников. Второй тип программного обеспечения - составление содержательных карт вертикальных ионосферных задержек. К третьему виду относится программное обеспечение, обеспечивающее постоянную работу наземной сети дифференциальной системы в режиме реального времени.

Выделяют статический, кинематический и динамический методы уточнения параметров орбит и смещения временных шкал спутников. В статическом методе содержится решение так называемой вывернутой навигационной задачи. С помощью обработки измерений двухчастотных навигационных приемников, проводимых в одно и то же время из нескольких наземных точек с известными координатами, мгновенно определяется местонахождение и смещение временных шкал спутников, расположенных в области видимости наземных станций. В этом случае не берется в учет динамическая информация, заключающаяся в жесткой коррелированности пространственного положения спутников в смежные моменты времени. В кинематическом методе дополнительно оцениваются составляющие мгновенного вектора скорости также без учета динамической информации. В наиболее точном и совершенном динамическом методе проводится оценка определенного набора параметров орбиты, смещения временных шкал спутников и наземных станций, а также некоторых дополнительных параметров, порождающих модельные значения измерений наилучшим

образом, согласующиеся с результатами реальных измерений на длительных интервалах времени. Значимым преимуществом динамического метода можно назвать его способность эффективно делить оценки эфемерид и смещения временных шкал, что повышает целостность системы. В случае, когда информация о движении спутника останется незамеченной, проводить отдельную оценку эфемерид и смещения временных шкал будет затруднительно, и точная оценка возможна только для суммы обоих компонентов.

В программном обеспечении уточнения параметров орбит и смещения шкал времени спутников в системе WAAS и дифференциальной системе фирмы Satloc используются алгоритмы из хорошо протестированного и обеспечивающего высокой точностью пакета прикладных программ GIPSY/OASIS II (GOA II). Данный пакет применяет динамический метод, обладает богатой историей развития и широко используется для высокоточного определения орбит различных КА (в том числе, спутников GPS), а также в целях высокоточной спутниковой геодезии. Разработчиком и владельцем пакета GOA II является Лаборатория реактивного движения Калифорнийского технического института. Исходный пакет GOA II состоит по большей части из фортранных программ и UNIX-сценариев, что сильно затрудняет его использование в масштабе реального времени и среде, отличной от UNIX. Для преодоления этих ограничений JPL на основе пакета GOA II разработало новый пакет Real-Time Gipsy (RTG). Этот пакет предназначен для использования в системах широкодиапазонной дифференциальной навигации и прочих системах реального времени, например, в проектах NASA по определению орбит на борту КА и определению координат радиолокатора с синтезированной апертурой на самолете в реальном масштабе времени. WAAS и дифференциальная система фирмы Satloc используют для уточнения параметров орбит и смещения шкал времени спутников пакет RTG, лицензированный JPL [9].

В пакете прикладных программ GIPSY/OASIS II (GOA II) оцениваются координаты и составляющие вектора скорости спутников на некоторый узловой момент, смещение шкал времени спутников и наземных пунктов, тропосферные искажения и коэффициент солнечного давления. Указанные параметры оцениваются по измерениям на 30-часовых интервалах [9]. В результате точность определения траектории возрастает более чем в три раза, по сравнению с точностью орбит, параметры которых передаются в навигационных сообщениях спутников. Среднеквадратические ошибки по радиусу, поперек и вдоль орбиты для указанного выше случая составляют соответственно 0,65, 1,37 и 1,96 м.

Обработка измерений осуществляется путем фильтрации относительно опорной траектории. Для фильтрации используется Square Root Information Filter (SRIF), обладающий повышенной численной устойчивостью, по сравнению с non-square root implementations. В предположении отсутствия

проблем вычислительной устойчивости SRIF эквивалентен Калмановскому фильтру.

В основе метода, называемого nonlinear static estimation (NSE), лежит вычисление оценок параметров простой модели вертикальных ионосферных задержек Клобучара, обеспечивающих наилучшее в квадратическом смысле согласование модельных данных с результатами измерений. Измерения извлекаются из двухчастотных измерений навигационных приемников, установленных на станциях сбора информации. Второй метод использует модифицированную версию пакета программ Global Ionosphere Map (GIM), разработанного JPL. Пакет программ GIM содержит программы на Фортране и UNIX-сценарии. Для увеличения мобильности и удобства работы в реальном масштабе времени JPL разработала на основе GIM новый пакет программ - Real Time Ionosphere (RTI), предлагаемый ею для лицензионного использования. В GIM и RTI ионосфера представляется как оболочка над Землей в системе координат, фиксированной относительно Солнца. Ионосфера в такой системе не зависит от вращения Земли и, следовательно, не зависит от местного времени. Оболочка дискретизируется на треугольные элементы. Значение интегральной электронной концентрации (TEC) в вершине каждого треугольника трактуется как случайный параметр и оценивается с помощью Калмановского фильтра. Начальные ограничения задаются моделью Бенга. Широкодиапазонная система дифференциальной навигации фирмы Satloc для вычисления карт вертикальных ионосферных задержек использует пакет RTI, лицензированный JPL.

По своей структуре глобальные системы дифференциальной навигации (GDGPS) очень схожи с широкодиапазонными системами (WADGPS). Они тоже применяют наземную сеть станций сбора информации и тот же метод создания дифференциальных поправок. Главное различие состоит в том, что исключение ионосферных ошибок в глобальных системах дифференциальной навигации происходит при использовании двухчастотных измерений. Перспективы введения гражданских кодов в диапазоне L2 в GPS сделают двухчастотные измерения общедоступными.

Исключение необходимости вычислять подробные карты вертикальных ионосферных задержек позволяет сильно снизить плотность станций наземной сети. Для этих целей достаточно иметь 12 хорошо расположенных по всему миру станций сбора информации. Для реальных экспериментов использовалось 18 из порядка 60 станций всемирной глобальной сети GPS (Global GPS Network, GGN) принадлежащей NASA, которые оборудованы двухчастотными навигационными приемниками. Необходимо ввести избыточных станций и довести их количества до 25-30. Введение избыточных станций позволяет увеличить точность и надежность дифференциальной системы. В настоящее время можно указать на существование пока что единственной в мире глобальной системы дифференциальной навигации, использующей в качестве основы станции глобальной GPS сети (GGN) NASA. Для оперативного уточнения орбит навигационных спутников в этой системе

используется тот же пакет прикладных программ RTG (Real Time Gipsy), который используется для уточнения орбит в широкодиапазонных дифференциальных системах фирмы Satloc и WAAS [10]. Для передачи измерений в центр обработки используется глобальная сеть Internet. Результаты статических испытаний, демонстрируют среднеквадратические ошибки определения горизонтальных координат менее 0,1 м и менее 0,2 м для вертикальных координат. В глобальных системах дифференциальной навигации ответственность за устранение ионосферных ошибок возлагается на потребителя. Для этого требуется, чтобы пользователи такой системы были снабжены двухдиапазонными навигационными приемниками, что естественно повысит стоимость аппаратуры потребителя. Однако можно полагать, что при массовом производстве такой аппаратуры стоимость каждого ее комплекта, по сравнению со стоимостью комплекта однодиапазонной аппаратуры, возрастет незначительно. С учетом введения в ближайшем будущем гражданских модулирующих кодов в GPS, распространение и применение двухчастотной аппаратуры потребителя станет повсеместным.

1.1.3 Псевдослучайные коды

И спутники, и приемники действительно генерируют весьма сложные цифровые кодовые последовательности. Коды усложняются намеренно для того, чтобы их можно было надежно и однозначно сравнивать, а также по некоторым другим причинам, которые будут указаны далее. Как бы там ни было, коды являются настолько сложными, что выглядят как бесконечный ряд случайных импульсов, как некая "шумовая дорожка". На самом деле они не случайные. Импульсы основательно отобраны, «почти» случайными последовательностями логических нулей и логических единиц, последовательностями, которые повторяются каждую миллисекунду. Поэтому их часто называют «псевдослучайными» кодами.

Понятие псевдослучайного кода является далеко не очевидной. Но это остроумное средство, которое помогает сделать GPS практичной и относительно недорогой в применении. Можно сказать, что именно оно делает GPS "новым достоянием цивилизации". Использование псевдослучайного кода помогает фиксировать запаздывание сигналов, пришедших со спутника. Но это только часть его возможностей. Еще одна причина его использования - это энергетическая экономичность.

Телевизионные спутники передают очень мощные сигналы. И все же, чтобы принять их на Земле, необходимы большие параболические антенны, концентрирующие энергию радиоволн на приемнике излучения. Трудно представить, какой громоздкой была бы система GPS, если каждый ее приемник нуждался бы в таких габаритных антеннах. Телевизионные спутники находятся на геостационарных орбитах. Это значит, что на небе они всегда расположены в одних и тех же точках. В нашем же случае не только понадобилась бы такая крупногабаритная антенна для каждого приемника, к

тому же она еще должна была бы иметь возможность быстро поворачиваться, чтобы следить за подвижными объектами, т.е. спутниками в космосе [11].

Псевдослучайный код позволяет работать на малой мощности излучения. Псевдослучайный код помогает избавиться от всего этого на основе достижений теории информации. Благодаря ему, дальномерные сигналы спутников GPS могут иметь очень низкую мощность и все же будут приняты антенной размерами в несколько сантиметров. На самом деле они являются настолько слабыми, что не превышают уровня постоянного фонового радишума в околоземном пространстве. В этом случае применяются весьма сложные принципы, но упрощенный взгляд на ситуацию заключается в следующем. Фоновый радишум - это всего лишь последовательность случайных импульсов. Псевдослучайный код, в некотором смысле, очень схож с этим шумовым фоном, но при одном существенном отличии: порядок импульсов в кодовой последовательности является постоянным и точно известным, а сама кодовая последовательность непрерывно повторяется в спутниковых радиосигналах.

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 же 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 [12].

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 проводится 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 заключает 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, различие 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 забывает 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. 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 [13].

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.

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

1.1.4 Определение координат в системе GPS

Поскольку GPS основана на использовании расстояний до спутников, находящихся в космосе, необходим метод для определения этих расстояний. Основная идея, которая здесь используется, есть старое школьное равенство: "пройденное расстояние равно скорости, умноженной на время движения". GPS работает, измеряя время, за которое радиосигнал спутника доходит до приемника на Земле, а затем по этому времени вычисляет расстояние. Радиоволны распространяются со скоростью света - около 300000 км/с. 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. Произведение этого времени в секундах и скорость распространения сигнала 300000 км/с даст 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.

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 - 0,000000001 с.

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 [12].

Преимуществом использования кодовых посылок (кодовых последовательностей) или, в случае этого 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".

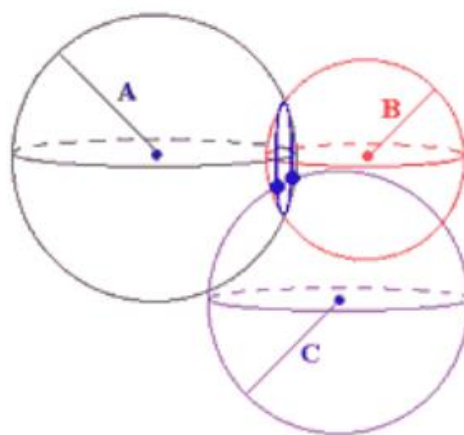


Рисунок 1.1 - Определение координат в спутниковой навигационной системе

В основе определения координат GPS-приемника лежит вычисление расстояния от него до нескольких спутников, расположение которых считается известным (эти данные находятся в принятом с GPS-спутника «альманахе»). Получив сигнал от 4 (или более) спутников, GPS-приемник ищет точку пересечения соответствующих сфер. Если такой точки нет, процессор GPS-приемника начинает методом последовательных приближений корректировать свои часы до тех пор, пока не добьется пересечения всех сфер в одной точке.

Координаты подвижного абонента определяются с помощью стандартного навигационного GPS-приемника, встроенного в терминал пользователя. Навигационный приемник сигналов для системы GPS состоит из приемного модуля и малогабаритной антенны с малошумным усилителем.

Приемный модуль выпускается как в виде автономного устройства со встроенными источниками питания, так и в виде отдельной платы, встраиваемой в абонентский терминал. Устройство, как правило, использует собственную миниатюрную антенну и автономно вычисляет географические координаты и всемирное время (UTC) по навигационным сигналам. GPS-приемники чаще всего применяются, если необходимо получить высокую точность координат (погрешность — не более 100 м). Захватив сигнал,

навигационный приемник автоматически вычисляет координаты объекта, скорость сигнала и всемирное время, и формирует отчет. Сведения о местонахождении объекта передаются по спутниковым каналам связи в диспетчерский пункт. Навигационные устройства могут различаться по количеству каналов приема, скорости обновления данных, времени вычислений, точности и надежности определения координат. Современные GPS-устройства обычно оснащены 6-8 приемниками, что позволяет отслеживать, практически, все навигационные спутники, находящиеся в зоне радиовидимости объекта. Если каналов меньше, чем «наблюдаемых» спутников, автоматически выбирается наиболее оптимальное сочетание спутников. Скорость обновления навигационных данных — 1 с. Время обнаружения зависит от числа одновременно наблюдаемых спутников и режима определения местоположения. Определение навигационных параметров может производиться в двух режимах — 2D (двумерном) и 3D (пространственном). В режиме 2D устанавливаются широта и долгота (высота считается известной). При этом достаточно присутствия в зоне радиовидимости 3 спутников. Время определения координат в режиме 2D обычно не превышает 2 мин. Для определения пространственных координат абонента (режим 3D) требуется, чтобы в соответствующей зоне находились не менее 4 спутников. Гарантируются время обнаружения не более 3-4 мин и погрешность вычисления координат — не более 100 м.

1.2 Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС

1.2.1 Основные принципы работы системы ГЛОНАСС

Спутники системы ГЛОНАСС непрерывно излучают навигационные сигналы двух типов: навигационный сигнал стандартной точности (СТ) в диапазоне L1 (1,6 ГГц) и навигационный сигнал высокой точности (ВТ) в диапазонах L1 и L2 (1,2 ГГц). Информация, предоставляемая навигационным сигналом СТ, доступна всем потребителям на постоянной и глобальной основе и обеспечивает, при использовании приемников ГЛОНАСС возможность определения:

- горизонтальных координат с точностью 50-70 м (вероятность 99,7%);
- вертикальных координат с точностью 70 м (вероятность 99,7%);
- составляющих вектора скорости с точностью 15 см/с (вероятность 99,7%);
- точного времени с точностью 0,7 мкс (вероятность 99,7 %) [13].

Эти точности можно значительно улучшить, если использовать дифференциальный метод навигации и/или дополнительные специальные методы измерений. Сигнал ВТ предназначен, в основном, для потребителей МО РФ, и его несанкционированное использование не рекомендуется. Вопрос о предоставлении сигнала ВТ гражданским потребителям находится в стадии рассмотрения.

Для определения пространственных координат и точного времени требуется принять и обработать навигационные сигналы не менее чем от 4-х спутников ГЛОНАСС. При приеме навигационных радиосигналов ГЛОНАСС приемник, используя известные радиотехнические методы, измеряет дальности до видимых спутников и измеряет скорости их движения. Одновременно с проведением измерений в приемнике выполняется автоматическая обработка содержащихся в каждом навигационном радиосигнале меток времени и цифровой информации. Цифровая информация описывает положение данного спутника в пространстве и времени (эфемериды) относительно единой для системы шкалы времени и в геоцентрической связанной декартовой системе координат. Кроме того, цифровая информация описывает положение других спутников системы (альманах) в виде кеплеровских элементов их орбит и содержит некоторые другие параметры. Результаты измерений и принятая цифровая информация являются исходными данными для решения навигационной задачи по определению координат и параметров движения. Навигационная задача решается автоматически в вычислительном устройстве приемника, при этом используется известный метод наименьших квадратов. В результате решения определяются три координаты местоположения потребителя, скорость его движения и осуществляется привязка шкалы времени потребителя к высокоточной шкале Координированного всемирного времени (UTC) [14].

1.2.2 Радионавигационное поле

Навигационные радиосигналы, излучаемые штатными НКА, образуют радионавигационное поле в околоземном пространстве.

В СРНС ГЛОНАСС каждый штатный НКА излучает навигационные радиосигналы 1600 МГц и 1250 МГц в сторону Земли с помощью передающих антенн, рабочая часть диаграммы направленности (ДН) которых имеет ширину $2\varphi_0 = 38^\circ$ и «освещает» диск Земли с избытком до высоты h_0 над поверхностью.

Рабочую часть ДН можно представить в виде конусного радиолуча с углом $2\varphi_0$ при вершине. Очевидно, что

$$\sin\varphi_0 = (h_0 + r) / (H + r), \quad (1.1)$$

где $r = 6400$ км - радиус Земли, $H = 19100$ км - высота орбиты НКА.

Подставив $\varphi_0 = 19^\circ$, получим $h_0 = 2000$ км.

При полной ОГ (24 штатных НКА) радионавигационное поле на высотах $h \leq h_0 = 2000$ км непрерывно в пространстве, т.е. потребитель в любой точке этого пространства «освещается» радиолучами не менее чем от четырех НКА, образующих по отношению к нему удовлетворительное по геометрическому фактору созвездие для оперативного автономного определения координат и вектора скорости.

На высотах $h \leq h_0$ радионавигационное поле становится дискретным в пространстве. Космические объекты на высотах $h_0 < h < H$ “освещены” радиолучами от необходимого для оперативной навигации созвездия (не менее четырех НКА, включая НКА ниже местного горизонта) не везде, а только при нахождении в определенных областях пространства.

Космические объекты на высотах $h > H$ (например, на геостационарной орбите) будут “освещены” на некоторых участках своей орбиты радиолучом от одного или двух НКА (при полной ОГ), и НАП может не оперативно определить орбиту космического объекта на основе обработки результатов приема навигационных радиосигналов на «освещенных» участках орбиты.

Рассмотрим непрерывное радионавигационное поле ($h \leq h_0$). Основной характеристикой радионавигационного поля для наземного потребителя являются мощности навигационного радиосигнала от околозенитного и пригоризонтного НКА на выходе «стандартной» приемной антенны (без учета отражений от поверхности Земли):

$$P_0 = P_{\pi} G(\varphi) * G_0(\beta) * \lambda^2 / (4\pi R)^2, \quad (1.2)$$

где P_{π} - мощность излучения передатчика, $G(\varphi)$ - коэффициент направленности передающей антенны (с учетом потерь в АФУ) в направлении φ на приемную антенну, $G_0(\beta)$ - коэффициент направленности «стандартной» приемной антенны в направлении β на передающую антенну, λ — длина волны несущего колебания радиосигнала, R — дальность от приемной антенны до передающей антенны.

В системе ГЛОНАСС передающие антенны для навигационных радиосигналов на НКА имеют круговую правую поляризацию излучения.

Коэффициент направленности $G(\varphi)$ передающих антенн в рабочем секторе направлений $\varphi \leq 19^\circ$ относительно оси антенны указан в таблице 1.1 [14].

Т а б л и ц а 1 . 1 - Коэффициент направленности передающих антенн

φ , угл.град.	0°	15°	19°
$G(\varphi)$, дБ (1600 МГц)	10	12	8
$G(\varphi)$, дБ (1250 МГц)	9	11	9

В качестве «стандартной» приемной антенны удобно рассматривать изотропную приемную антенну с круговой поляризацией, $G_0(\beta) = 1$.

Дальность R от приемной антенны, размещенной на поверхности Земли, до околозенитного ($\beta = 90^\circ$) НКА составит $R = H = 19100$ км, до пригоризонтного ($\beta = 5^\circ$) НКА составит $R = 24000$ км.

1.2.3 Структура сигнала ГЛОНАСС

В системе Глонасс используется частотное разделение сигналов (FDMA), излучаемых каждым спутником - двух фазоманипулированных сигналов. Частота первого сигнала лежит в диапазоне L1 ~ 1600 МГц, а частота второго - в диапазоне L2 ~ 1250 МГц. Номинальные значения рабочих частот радиосигналов, передаваемых в диапазонах L1 и L2, определяются выражением:

$$f_{k1} = f_1 + k\Delta f_1 \quad (1.3)$$

$$f_{k2} = f_2 + k\Delta f_2 \quad (1.4)$$

где $k = 0, 1, \dots, 24$ - номера литеров (каналов) рабочих частот спутников;
 $f_1 = 1602$ МГц; $\Delta f_1 = 9/16 = 0,5625$ МГц;
 $f_2 = 1246$ МГц; $\Delta f_2 = 7/16 = 0,4375$ МГц.

Для каждого спутника рабочие частоты сигналов в диапазоне L1 и L2 когерентны и формируются от одного эталона частоты. Отношение рабочих частот несущей каждого спутника:

$$\Delta f_{k1} / \Delta f_{k2} = 7/9.$$

Сигнал в диапазоне L1 (аналогичен C/A-коду в GPS) доступен для всех потребителей в зоне видимости КА. Сигнал в диапазоне L2 предназначен для военных нужд, и его структура не раскрывается.

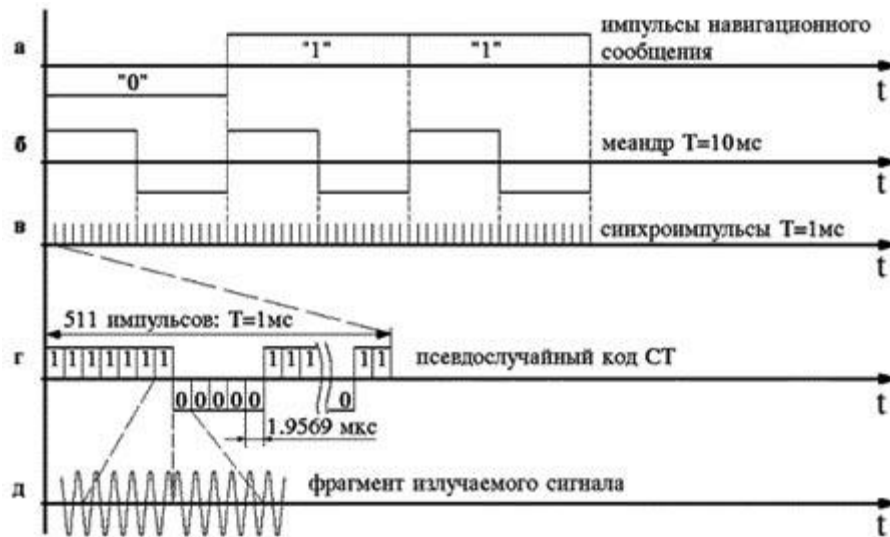


Рисунок 1.2 – Сигнал ГЛОНАСС

Модулирующий сигнал получают сложением по модулю 2 трех двоичных сигналов (рисунок 1.2):

- грубого дальномерного кода, передаваемого со скоростью 511 Кбит/с (рисунок б в);

- последовательности навигационных данных, передаваемых со скоростью 50 бит/с (рисунок 1.2 а);

- меандрового колебания, передаваемого со скоростью 100 бит/с (рисунок 1.2 б).

Для навигационных радиосигналов ЦИ формируется на борту НКА на основе данных, передаваемых от НКУ системы на борт НКА с помощью радиотехнических средств. Передаваемая в навигационных радиосигналах ЦИ структурирована в виде строк, кадров и суперкадров.

В узкополосном навигационном радиосигнале 1600 МГц строка ЦИ имеет длительность 2 с (вместе с МВ) и содержит 85 двоичных символов длительностью по 20 мс, передаваемых в относительном коде. Первый символ каждой строки является начальным («холостым») для относительного кода. Последние восемь символов в каждой строке являются проверочными символами кода Хемминга, позволяющие исправлять одиночный ошибочный символ и обнаруживать два ошибочных символа в строке. Кадр содержит 15 строк (30 с), суперкадр 5 кадров (2,5 мин).

В составе каждого кадра передается полный объем оперативной ЦИ и часть альманаха системы. Полный альманах передается в пределах суперкадра.

Оперативная ЦИ в кадре относится к НКА, излучающему навигационный радиосигнал, и содержит:

- признаки достоверности ЦИ в кадре;
- время начала кадра t_k ;
- эфемеридную информацию - координаты и производные координат НКА в прямоугольной геоцентрической системе координат на момент времени t_0 ;

- частотно-временные поправки (ЧВП) на момент времени t_0 в виде относительной поправки к несущей частоте навигационного радиосигнала и поправки к БШВ НКА;

- время t_0 .

Время t_0 , к которому «привязаны» ЭИ и ЧВП, кратны 30 мин от начала суток.

Альманах системы содержит:

- время, к которому относится альманах;
- параметры орбиты, номер пары несущих частот и поправку к БШВ для каждого штатного НКА в ОГ (24 НКА);

- поправку к ШВ системы относительно ШВ страны, погрешность поправки не более 1 мкс.

Альманах системы необходим в НАП для планирования сеанса навигации (выбор оптимального созвездия НКА) и для приема навигационных радиосигналов в системе (прогноз доплеровского сдвига несущей частоты). Оперативная ЦИ необходима в НАП в сеансе навигации, так как ЧВП

вносятся в результаты измерений, а ЭИ используется при определении координат и вектора скорости потребителя.

В системе NAVSTAR ЦИ в узкополосных навигационных радиосигналах структурирована следующим образом: строка имеет длительность 6 с, кадр содержит 5 строк (30 с), суперкадр - 25 кадров (12,5 мин).

Узкополосные навигационные радиосигналы в системе ГЛОНАСС обеспечивают более оперативный прием (обновление) альманаха за счет более короткой длительности суперкадров (2,5 мин) по сравнению с системой NAVSTAR (12,5 мин) [15].

1.3 Глобальная система позиционирования Galileo

В течение ближайших лет Европейский Союз (EU) и Европейское космическое агентство (ESA) планируют ввести в эксплуатацию новую европейскую глобальную спутниковую навигационную систему Galileo («Галилео»). Существование второй полностью рабочей спутниковой системы GNSS обещает значительную выгоду для гражданских потребителей по всему миру. Успешный запуск проекта Galileo позволит увеличить более чем в два раза количество рабочих навигационных спутников, доступных пользователям. Подобное увеличение количества спутников принесёт пользу не только при работе в автономном режиме, но и улучшит качество определения координат и способность GPS-аппаратуры разрешать неоднозначность по фазе несущей для отслеживаемого спутникового сигнала. В таблице 1.2 показана сравнительная характеристика систем GPS и Galileo.

Т а б л и ц а 1.2 - Сравнительные характеристики систем GPS и Galileo

Характеристики	GPS	Galileo
Количество спутников	27	30
Количество орбитальных плоскостей	6	3
Разделение спутников по орбитальным плоскостям	Неравномерное	Равномерное
Наклон орбитальных плоскостей	53-56°	54°
Радиус орбиты	26561,75 км	29378,137 км
Используемая частота	L1 (1575,42 МГц)	E1 (1575,42 МГц)

В итоге, после четырех лет переговоров, 24 июня 2004 года между ЕС и США был заключен договор (GPS – Galileo Agreement), согласно которому Galileo принимается мировым стандартом сигнала открытого доступа в сфере навигационных услуг, т.е. становится доступным всем пользователям GPS. При этом Galileo выводится как на профессиональный рынок, так и на

массовый, по всему миру, как коммерческая служба. Пользователи услуг спутниковой навигации смогут (в зависимости от типа приемника) вместе с GPS, или по отдельности, использовать сервис Galileo. Программу Galileo планировалось осуществить в несколько этапов:

- наземные испытания (Galileo System Test bed v1);
- запуск тестовых спутников и проверка основных компонентов и узлов системы (Galileo System Test bed v2);
- так называемая стадия «закрепления» на орбите первой партии из четырех спутников (In-Orbit-Validation), с доработкой и исправлениями по итогам первых двух этапов;
- окончательная комплектация системы и введение в строй орбитальной группировки (Full Operational Capability).

Решение о распределении заказов на разработку и производство системы планировалось принять к концу 2004 года. К 2010 г. рассчитывали полностью укомплектовать созвездие спутников на орбите. В 2012 г. развертывание системы предполагалось завершить. Контроль над распределением финансирования был поручен созданной Евросоветом наблюдательной комиссии — GNSS Supervisory Authority. Но этим оптимистическим планам не суждено было осуществиться.

В случае успешной реализации GNSS Galileo будет состоять из 30 спутников, расположенных на трех средних орбитах МЕО (Middle-Earth Orbit) с наклоном 56° к плоскости экватора и высотой 23 616 км. Отмеченный угол наклона выбран для лучшей наблюдаемости в средних широтах северного полушария. Выбор конфигурации орбитальной группировки основан на максимальном времени работы и быстрой замене вышедших из строя аппаратов без серьезных нарушений в работе системы. На каждой орбите разместится группа из 9 работающих и одного резервного спутника.

Каждый спутник будет оснащен парой водородных атомных часов (Space Passive Hydrogen Maser, S-PHM), а также рубидиевым стандартом частоты (Rubidium Atomic Frequency Standard, RAFS). Водородные атомные часы дают ошибку примерно в 1 нс за сутки (что в три раза точнее, чем аналогичная система GPS NAVSTAR). У рубидиевого же стандарта частоты точность на порядок ниже, чем у атомных часов.

Наземные станции контроля также предполагается оснастить атомными часами на базе водородного мазера, которые обеспечат корректировку показаний времени спутников и приемников сигнала. Система спутниковой навигации Galileo будет иметь в своем распоряжении несколько служб:

- открытую общую службу, которая призвана предоставлять бесплатный сигнал, по точности сопоставимый с уже существующими службами повышенной надежности. Полученный сигнал будет применяться в авиации и судоходстве (диапазон $L1=1559\div 1591$ МГц);

- службу повышенной надежности, предназначенную для использования в навигации судоходства и авиации (диапазоны L1=1559÷1591 МГц и E5=1164÷1215 МГц);
- коммерческую службу, которая будет предоставлять платный сигнал, позволяющий определять местоположение с точностью до 10 см (диапазон E6=1260÷1300 МГц);
- правительственную (с защищенным сигналом), предназначенную для использования спецслужбами и полицией;
- поисково-спасательную службу, которая станет дополнением к уже существующей службе спасения Cospas-Sarsat, и будет отличаться более качественным и мощным сигналом.

Кроме основной группы спутников на МЕО, дополняют Galileo спутники системы SBAS(Space Based Augmentation System), размещенные на геостационарной орбите. Они являются продолжением системы EGNOS SBAS предназначена для мониторинга состояния навигационной системы и ретрансляции сигналов о ее состоянии на наземные станции.

Таким образом, Galileo может стать наиболее технологически совершенной системой навигации в мире. Проект отличается сравнительно невысокой стоимостью, простой и оптимальной структурой, более высокой, чем у американской GPS NAVSTAR, точностью, а также широким спектром услуг. Предполагается, что для открытой общей службы точность определения координат на плоскости будет достигать 4 м, а по высоте — 8 м. Точность привязки по времени составит около 50 нс.

В пользу европейского проекта говорит также и отсутствие (на сегодня) контроля со стороны военных. Рядовые пользователи, получая данные как от GPS, так и от Galileo (а в будущем, возможно, и от ГЛОНАСС), смогут определять свое местоположение с более высокой точностью.

1.4 Источники ошибок измерений спутниковой навигации

При отработке методов высокоточных спутниковых измерений возникает необходимость тщательного исследования влияний всех возможных источников ошибок выполняемых измерений, особенностей их проявления и обоснования методов их учета. В зависимости от характера воздействия отмеченных источников возникающие при этом ошибки подразделяются на две основные группы: систематические погрешности, которые применительно к спутниковым измерениям получили название смещений, и погрешности случайного характера, которые часто отождествляют с понятием «шум».

Природа ошибок измерений спутниковой навигации различна. Ионосферные и атмосферные задержки вызваны тем, что поскольку спутниковый сигнал проходит через ионосферу, его прохождение может быть замедлено, эффект, подобный преломлению луча света проходящего через

стекло. Эти атмосферные задержки могут привести к ошибке в вычислении дальности, поскольку воздействуют на скорость сигнала. (Свет имеет постоянную скорость только в вакууме). Ионосфера не вызывает постоянной задержки сигнала. Есть несколько факторов, которые оказывают влияние на величину задержки, вызванной ионосферой.

Ошибки часов спутников и приёмника возникают даже притом, что они очень точны (ошибка приблизительно 3 наносекунды), они иногда слегка уходят вперёд или назад, что вызывает небольшие ошибки, воздействующие на точность определения координат. Министерство обороны США контролирует часы спутников с помощью сегмента управления и может исправить любой обнаруженный ход часов.

Также неточности спутниковых измерений возникают из-за переотражения. Переотражение происходит, когда антенна приёмника установлена рядом с большой отражающей поверхностью типа озера или здания. Спутниковый сигнал не достигает антенны по прямой, а сначала попадает на близлежащий объект. В результате на антенну попадает отражённый сигнал, что образует ложное измерение. Переотражение может быть уменьшено с помощью специальных GPS антенн с встроенным защитным экраном (круглый, металлический диск приблизительно 50 см (2 фута) в диаметре), который предотвращают приём низко распространяющихся сигналов.

Шифрование кодовых данных, подобно S/A, является намеренным с целью препятствовать доступу к P-кодовой части сигнала GPS гражданским лицам и неприятелю и следовательно вынудить их использовать C/A код, к которому применён S/A. A-S шифрует P-код в результате чего получается сигнал, называемый Y-кодом. Только пользователи, имеющие армейские GPS приёмники (США и их союзники) могут расшифровывать Y-код. Армейские приёмники более точны, потому что они не используют C/A код для вычисления времени прохождения сигнала от спутника до приёмника, для этого они используют P-код. Несущая модулируется P-кодом с частотой 10.23 Гц и C/A кодом с частотой 1.023 Гц. Следовательно с помощью P-кода дальности могут быть вычислены значительно точнее (в 10 раз), поскольку этот код генерируется 10 раз в секунду, а C/A код один раз в секунду. P-код часто подвергается шифрованию (A-S). Это означает, что только военные, снабжённые специальными GPS приёмниками, могут считывать этот зашифрованный P-код (также называемый Y-кодом). По этим причинам, пользователи военных GPS приёмников обычно получают координаты с точностью около 5 м, а гражданские пользователи сопоставимых GPS приёмников получают координаты с точностью лишь 15 -100 м.

Избирательный доступ – это процесс воздействия на GPS сигнал Министерством обороны США. Предназначен он для того, чтобы частные лица и недружелюбные иностранцы не пользовались полной точностью GPS. Воплощается воздействием на спутниковые часы техникой известной как «добавление псевдослучайного сигнала», который слегка изменяет время. К

тому же передаваемые эфемериды (или траектория движения спутника) слегка отличаться от той, что в действительности. Конечный результат состоит в снижении точности определения координат. Стоит отметить, что S/A воздействует на гражданских потребителей, использующих один GPS приёмник, для получения автономного положения. На потребителей использующих дифференциальные измерения S/A существенно не воздействуют. В августе 2000 правительство США отключило S/A.

Неоптимальное взаимное расположение наблюдаемых спутников или геометрическое снижение точности (GDoP) – мера строгости спутниковой геометрии, используемая в области систем глобального позиционирования для параметрического описания геометрического взаиморасположения спутников относительно антенны приёмника. В зависимости от взаимного расположения спутников на небосводе геометрические соотношения, которыми характеризуется это расположение, могут многократно увеличивать или уменьшать все неопределенности.

1.4.1 Геометрический фактор снижения точности GDoP

Как правило, при вычислении координат учитываются следующие стандартные факторы снижения точности:

- горизонтальный фактор снижения точности (HDOP) показывает степень влияния точности определения горизонтали на погрешность вычисления координат;
- фактор снижения точности определения положения (PDOP) - это безразмерный показатель, который описывает, как влияет на точность определения координат погрешность псевдодальности;
- относительный фактор снижения точности (RDOP) по сути равен фактору снижения точности, нормализованному на период, составляющий 60 с;
- временной фактор снижения точности (TDOP) описывает степень влияния погрешности показаний часов на точность определения координат;
- вертикальный фактор снижения точности (VDOP) показывает степень влияния погрешности в вертикальной плоскости на точность определения координат;
- геометрический фактор снижения точности (GDOP) говорит о степени влияния погрешностей псевдодальности (последняя характеризует меру удаленности потребителя от GPS-спутника). Зависит от положения спутника относительно GPS-приемника и от смещения показания GPS-часов. Различие значений псевдодальности и фактической дальности связано со смещением показаний часов GPS-спутника и потребителя, а также с задержками распространения и другими ошибками.

Точностные характеристики навигационных спутниковых систем определяются уровнем основных ошибок измерений и геометрическим расположением используемых спутников и потребителя. Геометрический фактор представляет собой коэффициент пересчета единичной погрешности

измерения радионавигационного параметра в погрешность определения соответствующего параметра. В понятие геометрического фактора можно вкладывать разный смысл. Так, например, если оценивается точность пространственного (трехмерного) местоопределения, то речь идет о геометрическом факторе модуля вектора в пространстве, обозначаемым Γ_{Π} . При оценке точности двумерного (горизонтального) местоопределения речь идет о геометрическом факторе модуля вектора в горизонтальной плоскости Γ_{Γ} , а при оценке точности только высоты о геометрическом факторе высоты $\Gamma_{\text{В}}$. Для оценки точности временного параметра говорят о геометрическом факторе времени $\Gamma_{\text{Т}}$. При оценке точности четырехмерного пространственно временного вектора используют геометрический фактор $\Gamma_{\text{Ч}}$. Часто вместо термина "геометрический фактор" применяется обозначение. Это связано с тем, что по определению геометрический фактор означает, во сколько раз происходит уменьшение точности измерений при оценке того или иного параметра.

Для четырехмерного геометрического фактора $\Gamma_{\text{Ч}}$ используется обозначение GDOP (Geometrical DOP - означает учет всех составляющих четырехмерного вектора).

- геометрическому фактору Γ_{Π} соответствует PDOP (Position DOP означает учет составляющих вектора положения в пространстве);

- геометрическому фактору Γ_{Γ} соответствует HDOP (Horizontal DOP означает учет составляющих вектора положения в горизонтальной плоскости);

- геометрическому фактору высоты $\Gamma_{\text{В}}$ соответствует VDOP (Vertical DOP);

- геометрическому фактору времени $\Gamma_{\text{Т}}$ соответствует TDOP (Time DOP).

GDOP (геометрическое снижение точности - термин, использующийся в системах спутниковой навигации для описания силы геометрического взаиморасположения спутников друг относительно друга. Когда спутники в области видимости находятся слишком близко друг к другу говорят о «слабой» геометрии расположения (высоком значении GDOP), и, наоборот, при достаточной удаленности геометрию считают «сильной» (низкое значение GDOP). Термин может применяться не только в спутниковом позиционировании, но и в других системах локации, включающим другие, географически разнесенные станции.

Геометрическое снижение точности (GDOP) - мера строгости спутниковой геометрии и связано с расположением спутников на небесной сфере. DOP может усилить воздействие ошибок определения координат спутника.

Принцип может быть лучше проиллюстрирован схемами на рисунках 1.3 и 1.4.

В случае, когда спутники расположены на небесной сфере достаточно широко (сильная геометрия), искомое положение может находиться в

пределах заштрихованной области (рисунок 1.3), и границы возможной ошибки малы. Иными словами, чем больше угол между направлениями на спутники, тем точнее местоопределение.

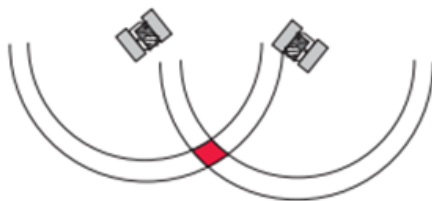


Рисунок 1.3 – Низкая неопределенность положения при «сильной» геометрии»



Рисунок 1.4 – Высокая неопределенность положения при «слабой» геометрии

Когда спутники в области видимости находятся слишком близко друг к другу («слабая» геометрия), размер заштрихованной увеличивается, что увеличивает неопределенность положения (рисунок 1.4).

На рисунке 1.3 передатчики расположены на большом расстоянии друг от друга, давая относительно небольшую определяемую область, в которой с некоторой вероятностью может находиться приёмник. На рисунке 1.4 передатчики расположены ближе друг к другу, что в результате даёт значительно большую область неопределенности.

Суть в том, что в зависимости от взаимного расположения спутников на небосводе геометрические соотношения, которыми характеризуется это расположение, могут многократно увеличивать или уменьшать все неопределенности, о которых мы только что говорили. Геометрический фактор снижения точности является индикатором надежности представления точности GPS позиционирования. Мы представляли наше местоположение относительно спутников в виде окружностей, центры которых совмещены со спутниками. А когда мы знаем, что каждое измерение содержит в себе и небольшую неопределенность, нам следует эти четкие окружности вообразить размытыми.

Наличие областей неопределенности означает, что мы не можем больше считать, что находимся в четко определенной точке. Можно сказать лишь, что мы где-то внутри этой суммарной области неопределенности.

В таблице 1.2 представлено описание значений GDoP – индикатора точности спутниковой навигации [16].

Т а б л и ц а 1.2 - Описание значений GDoP

Значение GDoP	Точность	Описание
<1	Идеальная	Рекомендуется к использованию в системах, требующих максимально возможную точность во всё время их работы
2-3	Отличная	Достаточная точность для использования результатов измерений в достаточно чувствительной аппаратуре и программах
4-6	Хорошая	Рекомендуемый минимум для принятия решений по полученным результатам. Результаты могут быть использованы для достаточно точных навигационных указаний.
7-8	Средняя	Результаты можно использовать в вычислениях, однако рекомендуется озаботиться повышением точности, например, выйти на более открытое место
9-20	Ниже среднего	Результаты могут использоваться только для грубого приближения местоположения
21-50	Плохая	Выходная точность ниже половины футбольного поля. Обычно такие результаты должны быть отброшены.

Геометрия спутников становится особенно важной при использовании GPS-приемника в автомобиле, среди высоких зданий, в горах или в глубоких ущельях. Если сигналы от некоторых спутников оказываются экранированы, то точность определения местоположения будет зависеть от оставшихся "видимыми" спутников (а от их количества - возможность провести расчеты вообще). Чем большая часть неба заслонена искусственными или естественными предметами, тем более сложно определить положение. Хорошие модели GPS-приемников показывают не только сколько спутников находятся в зоне видимости, но и где они расположены на небе (направление и высоту над горизонтом) для того, чтобы Вы могли определить, не экранируется ли сигнал от данного спутника.

В зависимости от угла между направлениями на спутники область пересечения размытых окружностей (область неопределенности местоположения) может быть либо аккуратным небольшим квадратиком, либо

сильно растянутым и неправильным четырехугольником. Проще говоря, чем больше угол между направлениями на спутники, тем точнее местоопределение.

Целью магистерской диссертации является определение влияния геометрии спутников на точность спутниковой навигации на основе экспериментального исследования.

Для реализации данной цели поставлены следующие задачи:

- изучение принципов работы GPS-систем;
- проведение анализа источников ошибок спутниковых измерений;
- постановка эксперимента, выполнение необходимых расчетов на основе экспериментальных данных;
- анализ проведенных расчетов, определение зависимости точности спутниковой навигации от геометрии спутников;
- разработка рекомендаций по решению проблемы, исследованной в магистерской диссертации.

2 Исследование влияния геометрического фактора на точность спутниковой навигации

2.1 Проведение экспериментального исследования

В зависимости от взаимного расположения спутников на небосводе геометрические соотношения, которыми характеризуется это расположение, могут многократно увеличивать или уменьшать все неопределенности. Если все расстояния, измеренные до спутников, будут лежать в одном глобальном направлении, область вероятного положения будет занимать значительное пространство и точно указать координаты невозможно. В этом случае, даже если приемник выдает некоторые значения координат, их точность не будет достаточно хороша. Если же спутники будут находиться в разных направлениях, то точность значительно возрастет.

Спутники, расположенные на небесной сфере достаточно широко, назовем «сильной» геометрией. При таком созвездии спутников границы возможной ошибки измерений малы. Иными словами, чем больше угол между направлениями на спутники, тем точнее местоопределение. Соответственно, «слабой» назовем геометрию спутников, находящихся в области видимости слишком близко друг к другу.

Для того, чтобы оценить влияние геометрического фактора на точность позиционирования, был проведен эксперимент с использованием GPS-приемника Trimble R6 (рисунок 2.1), принадлежащим лаборатории спутниковых навигационных технологий Института космической техники и технологий, точностные характеристики которого указаны в таблице 2.1. GPS-приемник Trimble R6 способен принять 72 каналов GPS и ГЛОНАСС систем.

Измерения были сняты г. Алматы днем в ясную погоду для того, чтобы приемник смог зафиксировать как можно больше спутников. Снятие GPS-показаний было проведено дважды с интервалом в 1,5 ч.



Рисунок 2.1 – GPS-приемник Trimble R6

Т а б л и ц а 2 . 1 – Характеристики GPS-приемника Trimble R6

Характеристика	Значение
Дифференциальная кодовая GPS-съёмка	
В плане	0,25 м + 1 мм/км СКО
По высоте	0,50 м + 1 мм/км СКО
Точность дифференциального позиционирования WAAS	не более 5 м (3 СКО)
Статическая и быстростатическая GPS-съёмка	
В плане	±5 мм + 0,5 мм/км СКО
По высоте	±5 мм + 1 мм/км СКО
Кинематическая съёмка	
В плане	±10 мм + 1 мм/км СКО
По высоте	±20 мм + 1 мм/км СКО
Время инициализации	< 25–30 секунд
Надежность инициализации	>99,9%

В таблице 2.2 представлены экспериментальные данные о спутниках в эпохе №1, полученные с помощью GPS-приемника Trimble R6.

Т а б л и ц а 2.2 – Данные спутникового позиционирования в эпохе №1, полученные при помощи GPS-приемника Trimble R6

№ спутника	Псевдодальность, м	Координаты спутника*, м		
		X	Y	Z
3	23054242,0582667	-10435547,624882	24080981,7923917	2257411,59803217
6	23320813,8029918	-14551552,4822693	21287467,4770629	6588644,53175424
7	22948323,0824387	21305953,2785427	8031025,34471163	13716438,3698202
13	21201278,5264271	10923949,5770329	9786711,76698646	22023536,0183403
16	25119214,9123715	-6487911,14769836	23996692,8726152	-8985513,66323107
19	23904814,9452734	11953039,4135544	23228665,8172577	-5013208,70025612
20	20323212,5768564	3743838,47183201	19487730,1650073	17458334,375603
23	21882711,038448	15300494,0472927	10827055,355202	19104257,4611513
25	23856359,6199641	23044955,0191372	572464,78343003	12705029,3694808
27	25547387,7527972	-23063866,4745314	8765067,84428199	10181729,5680625
31	24876316,1060723	5103485,22221128	23787370,6251607	10435839,4005146
Примечание				
*Координаты приёмника в ECEF: X – 1057100,8207, Y – 4536550,4081, Z – 4343719,7784				

В таблице 2.3 приведены показания GPS-приемника Trimble R6, снятые повторно через 1,5 ч, когда спутники находились в эпохе №2.

Т а б л и ц а 2.3 – Данные спутникового позиционирования в эпохе №2, полученные при помощи GPS-приемника Trimble R6

№ спутника	Псевдодальность, м	Координаты спутник, м		
		X	Y	Z
3	23053654,3022833	-10435835,6530522	24080535,4096844	2260513,51230069
6	23320387,4847203	-14551544,9394042	21286582,2104275	6591606,49776667
7	22947787,5944127	21304229,6096478	8031359,09853861	13718905,89637
13	21200836,5604677	10922579,9855737	9789172,49994436	22023124,7090088
16	21876482,5533808	-9190907,18262062	12907538,0395688	21347692,6951304
19	25118520,3574745	-6488734,74240898	23997556,3500072	-8982619,12096332
20	23905417,1798378	11952423,5331477	23228337,5654636	-5016263,8131764
23	20323171,7970046	3742705,71107798	19489666,3356948	17456397,4039781
25	21882367,1447947	15298192,7186327	10827579,079468	19105850,4917683
27	23855874,4244377	23043491,594023	5721840,76724088	12707642,8751424
31	25547865,9545606	-23065237,7198293	8764948,34460876	10178907,1137997
32	25547865,9545606	5102613,87793873	23786274,2442258	-10438630,9971606

2.2 Выбор спутников для исследования

Известно, что при высокой неопределенности положения спутников погрешность определения искомого местоположения составляет 50-100 м.

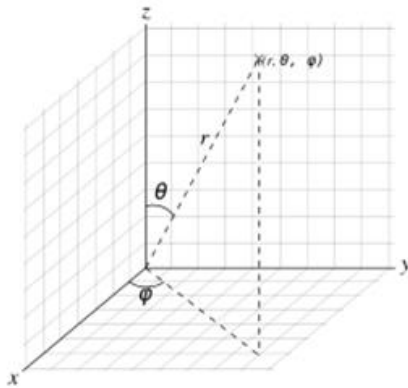


Рисунок 2.2 – Точка в сферической системе координат

Для достижения более точных GPS измерений нужны, по крайней мере, 4 спутника с углами возвышения 15° и выше.

Для выбора спутников и определения их в «сильную» и «слабую» группы необходимо рассчитать углы возвышения спутников, первоначально переведя координаты спутников из десятичной системы в сферическую.

Сферическая система координат подобна географической системе координат для определения места на поверхности Земли, где начало координат совпадает с центром Земли, широта δ является дополнением угловой координаты θ и равна $\delta = 90^\circ - \theta$, а долгота l вычисляется по формуле $l = \varphi - 180^\circ$.

Тройку сферических координат можно перевести в декартову систему следующими преобразованиями:

$$\begin{cases} x = r \sin \theta \cos \varphi; \\ y = r \sin \theta \sin \varphi; \\ z = r \cos \theta. \end{cases}$$

Подставим в вышеуказанную систему уравнений экспериментальные данные из таблицы 2.2, получим географические координаты спутников (Приложение А), результаты сведем в таблицу 2.4.

Т а б л и ц а 2.4 – Географические координаты зафиксированных спутников

Спутник	Долгота	Широта
3	72,1 °в.д	75,1 °ю.ш
6	76,02 °в.д	89,98 °ю.ш
7	79,12 °в.д	59,36 °с.ш
13	26,03 °в.д	99,98 °ю.ш
16	53,5 °в.д	99,98 °с.ш
19	59,76 °в.д	49,36 °ю.ш

20	38,9 °В.Д	99,98 °С.Ш
23	49,95 °В.Д	97,8 °С.Ш
25	50,1 °В.Д	59,36 °Ю.Ш
27	53 °В.Д	9,98 °С.Ш
31	49,76 °В.Д	49,36 °Ю.Ш
32	49,98 °В.Д	29,18 °Ю.Ш
Примечание		
*Координаты Алматы - 43°15' с.ш. (43,25 с.ш.), 76°57' в.д (76,95 в.д.)		

2.2.1 Расчет азимута спутников

Для определения местонахождения спутников необходимо знать два параметра, один из них – азимут. Азимут – это направление на спутник в горизонтальной плоскости. Азимут определяется по формуле 2.1.

$$A = 180^\circ + \tan^{-1} \frac{\tan(g_2 - g_1)}{\sin v}, \quad (2.1)$$

где где g_1 - долгота спутника, g_2 - долгота места приема, v - широта места приема.

По формуле 2.1 рассчитаем азимуты для всех зафиксированных спутников.

Азимут для спутника №3:

$$A = 180^\circ + \tan^{-1} \frac{\tan(76,95 - 72,1)}{\sin 43,25} = 181,5^\circ$$

Азимут для спутника №6:

$$A = 180^\circ + \tan^{-1} \frac{\tan(76,95 - 76,02)}{\sin 43,25} = 179^\circ$$

Азимут для спутника №7:

$$A = 180^\circ + \tan^{-1} \frac{\tan(76,95 - 79,12)}{\sin 43,25} = 178,9^\circ$$

Азимут для спутника №13:

$$A = 180^\circ + \tan^{-1} \frac{\tan(76,95 - 26,03)}{\sin 43,25} = 179,1^\circ$$

Азимут для спутника №16:

$$A = 180^\circ + \tan^{-1} \frac{\tan(76,95 - 53,5)}{\sin 43,25} = 178,5^\circ$$

Азимут для спутника №19:

$$A = 180^\circ + \tan^{-1} \frac{\tan(76,95 - 59,76)}{\sin 43,25} = 178,49^\circ$$

Азимут для спутника №20:

$$A = 180^\circ + \tan^{-1} \frac{\tan(76,95 - 38,9)}{\sin 43,25} = 179,5^\circ$$

Азимут для спутника №23:

$$A = 180^\circ + \tan^{-1} \frac{\tan(76,95 - 49,95)}{\sin 43,25} = 181,37^\circ$$

Азимут для спутника №25:

$$A = 180^\circ + \tan^{-1} \frac{\tan(76,95 - 50,1)}{\sin 43,25} = 181,47^\circ$$

Азимут для спутника №27:

$$A = 180^\circ + \tan^{-1} \frac{\tan(76,95 - 53)}{\sin 43,25} = 181,3^\circ$$

Азимут для спутника №31:

$$A = 180^\circ + \tan^{-1} \frac{\tan(76,95 - 49,76)}{\sin 43,25} = 181,375^\circ$$

Азимут для спутника №32:

$$A = 180^\circ + \tan^{-1} \frac{\tan(76,95 - 49,98)}{\sin 43,25} = 181,456^\circ$$

2.2.1 Расчет углов возвышения спутников

Угол места, или угол возвышения – это угол между линией горизонта и направлением на спутник в вертикальной плоскости.

Определим для каждого спутника найдем угол места по формуле 2.2.

$$F = \tan^{-1} \frac{\cos(g_2 - g_1) \cdot \cos v - 0.151}{\sqrt{(1 - \cos 2(g_2 - g_1)) \cdot \cos^2 v}} \quad (2.2)$$

где g_1 - долгота спутника, g_2 - долгота места приема, v - широта места приема.

Подставив координаты спутников из таблицы 2.4 в данную формулу, получим угол места для каждого спутника (Приложение Б).

По формуле 2.2 рассчитаем углы места для всех спутников.

Угол места для спутника №3:

$$F = \tan^{-1} \frac{\cos(76,95 - 72,1) \cdot \cos 43,25 - 0.151}{\sqrt{(1 - \cos 2(76,95 - 72,1)) \cdot \cos^2 43,25}} = 24,5^\circ$$

Угол места для спутника №6:

$$F = \tan^{-1} \frac{\cos(76,95 - 76,02) \cdot \cos 43,25 - 0.151}{\sqrt{(1 - \cos 2(76,95 - 76,02)) \cdot \cos^2 43,25}} = 11,0^\circ$$

Угол места для спутника №7:

$$F = \tan^{-1} \frac{\cos(76,95 - 79,12) \cdot \cos 43,25 - 0.151}{\sqrt{(1 - \cos 2(76,95 - 79,12)) \cdot \cos^2 43,25}} = 17,0^\circ$$

Угол места для спутника №13:

$$F = \tan^{-1} \frac{\cos(76,95 - 26,03) \cdot \cos 43,25 - 0.151}{\sqrt{(1 - \cos 2(76,95 - 26,03)) \cdot \cos^2 43,25}} = 8,64^\circ$$

Угол места для спутника №16:

$$F = \tan^{-1} \frac{\cos(76,95 - 53,5) \cdot \cos 43,25 - 0.151}{\sqrt{(1 - \cos 2(76,95 - 53,5)) \cdot \cos^2 43,25}} = 24,926^\circ$$

Угол места для спутника №19:

$$F = \tan^{-1} \frac{\cos(76,95 - 59,76) \cdot \cos 43,25 - 0.151}{\sqrt{(1 - \cos 2(76,95 - 59,76)) \cdot \cos^2 43,25}} = 21,302^\circ$$

Угол места для спутника №20:

$$F = \tan^{-1} \frac{\cos(76,95 - 38,9) \cdot \cos 43,25 - 0.151}{\sqrt{(1 - \cos 2(76,95 - 38,9)) \cdot \cos^2 43,25}} = 8,508^\circ$$

Угол места для спутника №23:

$$F = \tan^{-1} \frac{\cos(76,95 - 49,95) \cdot \cos 43,25 - 0.151}{\sqrt{(1 - \cos 2(76,95 - 49,95)) \cdot \cos^2 43,25}} = 9,26^\circ$$

Угол места для спутника №25:

$$F = \tan^{-1} \frac{\cos(76,95 - 50,1) \cdot \cos 43,25 - 0.151}{\sqrt{(1 - \cos 2(76,95 - 50,1)) \cdot \cos^2 43,25}} = 14,8^\circ$$

Угол места для спутника №27:

$$F = \tan^{-1} \frac{\cos(76,95 - 53) \cdot \cos 43,25 - 0.151}{\sqrt{(1 - \cos 2(76,95 - 53)) \cdot \cos^2 43,25}} = 12,2^\circ$$

Угол места для спутника №31:

$$F = \tan^{-1} \frac{\cos(76,95 - 49,76) \cdot \cos 43,25 - 0.151}{\sqrt{(1 - \cos 2(76,95 - 49,76)) \cdot \cos^2 43,25}} = 14^\circ$$

Угол места для спутника №32:

$$F = \tan^{-1} \frac{\cos(76,95 - 49,98) \cdot \cos 43,25 - 0.151}{\sqrt{(1 - \cos 2(76,95 - 49,98)) \cdot \cos^2 43,25}} = 13,87^\circ$$

Результаты вычислений занесем в таблицу 2.5.

Т а б л и ц а 2.5 – Углы возвышения спутников

Спутник	Угол места, °
3	24,5
6	11,0
7	17,0
13	8,64
16	24,926
19	21,302
20	8,508
23	9,26
25	14,8

27	12,2
31	14
32	13,87

Из таблицы 2.5 видно, что спутники №3, 6, 20, 23 с углами возвышения ниже 15° обладают неудачным взаимным расположением, что может повлиять на точность спутниковой навигации.

На рисунке 2.3 представлены группы спутников, образующие так называемые «сильную» и «слабую» геометрии.

На рисунке 2.3 группы спутников с «сильной» геометрией обведены линиями, группы спутников со «слабой» геометрией обозначены овалами.

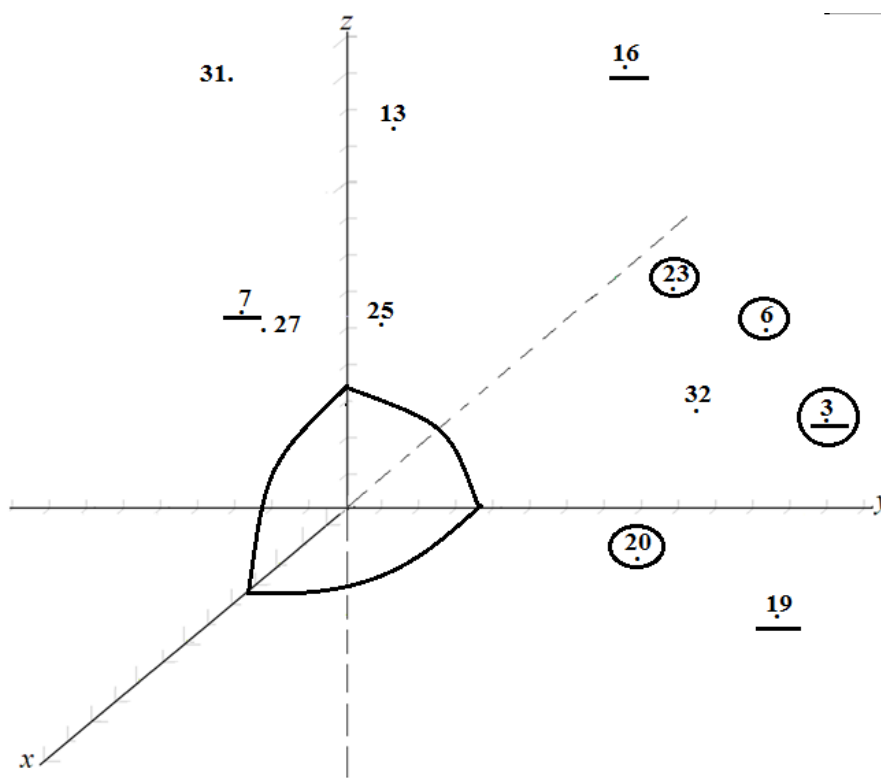


Рисунок 2.3 – Взаимное расположение спутников

Из рисунка 2.3 видно, что «сильную» геометрию образуют спутники №3, 7, 16, 19, а, соответственно, «слабую» - №3, 6, 20, 23.

2.3 Расчет расстояний от выбранных спутников до приемника

Расстояние от ИСЗ до приемника определяется по формуле:

$$D_i^2 = (X_i - X_n)^2 + (Y_i - Y_n)^2 + (Z_i - Z_n)^2 \quad (2.3)$$

где X_i, Y_i, Z_i - координаты i -го спутника, X_n, Y_n, Z_n - координаты приемника. Получим систему уравнений.

$$\begin{cases} D_1^2 = (X_1 - X_n)^2 + (Y_1 - Y_n)^2 + (Z_1 - Z_n)^2 \\ D_2^2 = (X_2 - X_n)^2 + (Y_2 - Y_n)^2 + (Z_2 - Z_n)^2 \\ D_3^2 = (X_3 - X_n)^2 + (Y_3 - Y_n)^2 + (Z_3 - Z_n)^2 \\ D_4^2 = (X_4 - X_n)^2 + (Y_4 - Y_n)^2 + (Z_4 - Z_n)^2 \end{cases} \quad (2.4)$$

Подставив имеющиеся значения псевдодальностей и координат каждой группы спутников в формулу 2.4, для группы спутников в эпохе №1, образующих «сильную» геометрию, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} 23053654,3^2 = (-10435835,6 - X_n)^2 + (24080535,4 - Y_n)^2 + (2260513,5 - Z_n)^2 \\ 23320387,5^2 = (-14551544,9 - X_n)^2 + (21286582,2 - Y_n)^2 + (6591606,5 - Z_n)^2 \\ 23905417,2^2 = (11952423,5 - X_n)^2 + (23228337,6 - Y_n)^2 + (-501626385 - Z_n)^2 \\ 105223564,2^2 = (3742705,7 - X_n)^2 + (19489666,3 - Y_n)^2 + (17456397,4 - Z_n)^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 8231993,2 \cdot X_n + 5588799,6 \cdot Y_n - 8668389 \cdot Z_n = -162227715242672130,9 \\ 16419435,7 \cdot X_n - 7477324,46 \cdot Y_n - 24880268,4 \cdot Z_n = -69858064018500,2 \end{cases}$$

Получим координаты приемника: $X_{п} = 1057102,3451$ м, $Y_{п} = 4536551,5187$ м, $Z = 4343719,8279$ м.

Рассчитаем ошибку измерений:

$$\Delta X = X_n - X = 1057102,3451 - 1057100,8207 = 1,5244 \text{ м.}$$

$$\Delta Y = Y_n - Y = 4536551,5187 - 4536550,4081 = 1,1106 \text{ м.}$$

$$\Delta Z = Z_n - Z = 4343719,8279 - 4343719,7784 = 1,0495 \text{ м.}$$

Аналогично для группы спутников со «слабой» геометрией получим:

$$\begin{cases} 23053654,3^2 = (-10435835,65 - X_n)^2 + (24080535,4 - Y_n)^2 + (2260513,51 - Z_n)^2 \\ 23320387,48^2 = (-14551544,93 - X_n)^2 + (21286582,21 - Y_n)^2 + (6591606,5 - Z_n)^2 \\ 23905417,18^2 = (11952423,53 - X_n)^2 + (23228337,56 - Y_n)^2 + (-5016263,81 - Z_n)^2 \\ 105223564,24^2 = (3742705,71 - X_n)^2 + (19489666,33 - Y_n)^2 + (17456397,4 - Z_n)^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 8231993,21 \cdot X_n + 5588799,56 \cdot Y_n - 8668389 \cdot Z_n = -162227715242672130,92 \\ 16419435,68 \cdot X_n - 7477324,46 \cdot Y_n - 24880268,4 \cdot Z_n = -69858064018500,25 \end{cases}$$

$X_{п} = 1057147,0850$ м, $Y_{п} = 4536582,6454$ м, $Z = 4343795,4412$ м.

Рассчитаем ошибку измерений для этого случая:

$$\Delta X = X_n - X = 1057147,0850 - 1057100,8207 = 46,2643 \text{ м.}$$

$$\Delta Y = Y_n - Y = 4536582,6454 - 4536550,4081 = 32,2373 \text{ м.}$$

$$\Delta Z = Z_n - Z = 4343795,4412 - 4343719,7784 = 75,6628 \text{ м.}$$

Аналогичные вычисления получим для спутников в эпохе №2.

Для «сильной» группы спутников:

$$\begin{cases} 23054242,05^2 = (-10435547,62 - X_n)^2 + (24080981,79 - Y_n)^2 + (2257411,6 - Z_n)^2 \\ 22948323,08^2 = (21305953,28 - X_n)^2 + (8031025,34 - Y_n)^2 + (13716438,37 - Z_n)^2 \\ 25119214,91^2 = (-6487911,15 - X_n)^2 + (23996692,87 - Y_n)^2 + (-8985513,66 - Z_n)^2 \\ 23904814,94^2 = (11953039,41 - X_n)^2 + (23228665,82 - Y_n)^2 + (-5013208,7 - Z_n)^2 \end{cases}$$

Получим координаты приемника: $X_{п} - 1057102,2494 \text{ м, } Y_{п} - 4536551,5155 \text{ м, } Z - 434372,8878 \text{ м.}$

Рассчитаем ошибку измерений:

$$\Delta X = X_n - X = 1057102,3451 - 1057100,8207 = 1,5244 \text{ м.}$$

$$\Delta Y = Y_n - Y = 4536551,5187 - 4536550,4081 = 1,1106 \text{ м.}$$

$$\Delta Z = Z_n - Z = 4343719,8279 - 4343719,7784 = 1,0495 \text{ м.}$$

Для спутников, образующих «слабую» геометрию:

$$\begin{cases} 23054242,06^2 = (-10435547,62 - X_n)^2 + (24080981,79 - Y_n)^2 + (2257411,6 - Z_n)^2 \\ 23320813,8^2 = (-14551552,48 - X_n)^2 + (21287467,48 - Y_n)^2 + (6588644,53 - Z_n)^2 \\ 2033212,58^2 = (15300494,05 - X_n)^2 + (19487730,16 - Y_n)^2 + (17458334,38 - Z_n)^2 \\ 21882711,04^2 = (15300494,04 - X_n)^2 + (10827055,36 - Y_n)^2 + (19104257,46 - Z_n)^2 \end{cases}$$

Координаты приемника: $X_{п} - 1057147,1071 \text{ м, } Y_{п} - 4536587,8663 \text{ м, } Z - 4343791,6956 \text{ м.}$

Рассчитаем ошибку измерений для этого случая:

$$\Delta X = X_n - X = 1057147,1071 - 1057102,8207 = 44,2864 \text{ м.}$$

$$\Delta Y = Y_n - Y = 4536587,8663 - 4536550,4081 = 37,4582 \text{ м.}$$

$$\Delta Z = Z_n - Z = 4343791,6956 - 4343719,7784 = 71,9172 \text{ м.}$$

Анализируя проведенные расчеты, можно сделать вывод о том, что в случае, когда спутники расположены слишком близко друг другу, погрешность измерений выше, чем в случае, когда они более отдалены.

Среднеквадратические отклонения измерений представлены в таблице 2.6.

Т а б л и ц а 2 . 6 – Результаты обработки экспериментальных данных

Критерии	При «сильной» геометрии			При «слабой» геометрии		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Потеря точности, м	1,5244	1,1106	1,0495	46,2643	32,2373	75,6628
	1,4287	1,3571	1,1094	44,2864	37,4582	71,9172
Средне-квадратическое отклонение	0,119855	0,112784	0,095813	0,803984	0,667236	0,801629

Ошибка измерений, проведенных относительно спутников, образующих «слабую» геометрию, составила 46,2643 м, 32,2373 м, 75,6628 м для трех координат соответственно, что в несколько десятков раз больше погрешности измерений, выполненных относительно спутников с «сильной» геометрией.

Из таблицы 2.6 видно, что среднеквадратическое отклонение координат приемника, полученных относительно спутников со «слабой» геометрией, значительно больше, чем координаты приемника, рассчитанные с учетом координат спутников, образующих «сильную» геометрию.

3 Рекомендации по повышению точности спутниковых измерений

Погрешности в спутниковых измерениях могут возникнуть в случае, когда приемник в области видимости находит малое количество спутников. Как было сказано ранее, для того, чтобы GPS-приемник мог определить трехмерные координаты и время, ему необходимо «видеть» как минимум 4 спутника. «Видимость» приемником спутников может быть осложнена рельефом местности, крупногабаритными городскими строениями, атмосферными осадками, антенна GPS приемника не может принимать сигнал со всех сторон из-за препятствий.

Единственное решение в повышении точности спутниковых измерений на данный момент – это наблюдение большего количества спутников. Возможность слежения за большим количеством спутников может помочь в такой ситуации и применение совмещенных приемников GPS/GLONASS может позволить достичь требуемой точности. Если мы получаем сигнал только из ограниченной области небесного пространства, значение GDoP будет большим, точность определения времени и координат объекта уменьшится. Новые технологии, используемые при создании приемников, позволяющие работать со слабыми сигналами GPS даже внутри зданий также позволят добиться хороших результатов.

Одной из таких технологий является применение дифференциального режима DGPS.

Дифференциальный режим DGPS используется для повышения точности GPS путем исключения атмосферных искажений сигнала на приёмниках. Сигналы DGPS коррекции посылаются пользователям по радио. DGPS-приемник работает на средних частотах 283,5-325 кГц [17]. Передаваясь, сигналы на этих частотах отражаются от поверхности земли. Поэтому холмистая и горная местность обычно не влияет на приём сигнала. Однако в глубоких каньонах далеко от радиомаяка, где радиосигналы традиционно слабы, сигналы коррекции могут быть не приняты.

Точность определения местоположения с помощью GPS обычно составляет от 5 до 30 метров, чего явно недостаточно при проведении работ, требующих высокой точности определения координат. Система DGPS предназначена для повышения точности определения координат, обеспечивая получение GPS-приемником дополнительных дифференциальных поправок. Дифференциальный режим позволяет уменьшить неопределенности измерений до 0,25 м.

Заключение

В настоящей магистерской диссертации представлено исследование влияния геометрического фактора на точность спутниковой навигации. При созвездии спутников с «сильной» геометрией, расположенных на небесной сфере достаточно широко, границы возможной ошибки измерений малы. Иными словами, чем больше угол между направлениями на спутники, тем точнее местоопределение. Соответственно, в случае, когда спутники образуют «слабую» геометрию при нахождении в области видимости слишком близко друг к другу, погрешность измерений возрастет.

В данной работе на основе экспериментальных данных были проведены расчеты, подтверждающие утверждение, что при «слабой» геометрии спутников погрешность определения искомого местоположения составляет 50-100 м. Были сравнены расчеты, выполненные с результатами дважды проведенного эксперимента, было подсчитано среднеквадратическое отклонение. Одним словом, на основе экспериментальных данных можно определить влияние геометрического фактора на точность позиционирования.

Сокращения

DGPS – Differential Global Positioning System

GPS – Global Positioning System

GDoP – Geometric dilution of precision

HDoP – Horizontal Dilution of Precision

RDS – Radio Data System

PDoP – Position Dilution of Precision

TDoP – Time Dilution of Precision

VDoP – Vertical Dilution of Precision

WADGPS – Wide-Area Differential Global Positioning System

WAAS – Wide Area Augmentation System

ССИ – система сбора информации

Список литературы

1. Леонтьев Б. К. GPS: Все, что Вы хотели знать, но боялись спросить [Текст] // «Бук-Пресс и К», 2006. - 352 с.
2. Сембаева Д. Б. Влияние геометрического фактора на точность спутниковой навигации // Энергетика, радиотехника, электроника и связь. Часть 3. Радиотехника, электроника и связь. Сборник научных трудов Алматинского университета энергетики и связи. – Алматы: АУЭС, 2013. С. 52 – 56.
3. ГБУ «Центр информационных технологий РБ». Введение в GPS (Глобальная Навигационная Система) [Текст] // 2001. – 102 с.
4. Шебшаевич В.С., Григорьев М.Н., Кокина Э.Г., Мищенко И.Н., Шишман Ю.Д. Дифференциальный режим сетевой спутниковой радионавигационной системы [Текст] // 1989. – 254 с.
5. Muellerschoen R.J., Bertiger W.I., Lough M., Stovers D. and Dong D. An Internet-Based Global differential GPS System, Initial Results. ION National Technical Meeting. Anaheim. CA. Jan. 2000.
6. Muellerschoen R.J., Bar-Sever Y.E., Bertiger W.I., Stovers D.A. Decimeter Accuracy. NASA's Global DGPS for High-precision Users. GPS World. January 2001.
7. RTCM recommended standards for differential GNSS (global navigation satellite systems) service. Version 2.2. Developed by RTCM special committee no. 104. January 15, 1998. Radio technical commission for Marine Services. 1800 Diagonal Road. Suite 600. Alexandria. Virginia 22314-2840 U.S.A.
8. Muellerschoen R.J., Bertiger W.I., Whitehead M.L. Flight Tests Demonstrate Sub 50 cms RMS Vertical WADGPS Positioning. Proceedings of ION GPS-99. Nashville. Tenn. September 1999.
9. Whitehead M.L., Penno G., Feller W.J., Messinger I., Bertiger W.I., Muellerschoen R.J., Ijima B.A., Piesinger G. A Close Look at Satlocs Real-Time WADGPS System. GPS Solutions. 1998. Vol. 2.
10. Ceva J., Parkinson B., Bertiger W., Muellerschoen R., Yunck T. Incorporation of Orbital Dynamics to Improve Wide-Area Differential GPS. Proceedings of ION GPS-95. P. 647-659.
11. “Study on the improvement of measurement accuracy in GPS”, [SICE-ICASE, 2006. International Joint Conference](#), 18-21 Oct. 2006, p.1372 – 1375.
12. Яценков В. С. Основы спутниковой навигации [Текст] // М. Горячая линия, 2005 г. – 251 с.
13. Серапинас Б. Б. Глобальные системы позиционирования [Текст] // М. ИКФ «Каталог», 2002. – 106 с.
14. Global Positioning System: Theory and Applications. Edited by B.W. Parkinson and J.J. Spilker Jr. Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. 1996.
15. Манин А.П., Романов Л. М. Методы и средства относительных определений в системе NAVSTAR [Текст] // 1989. – 151 с.

16. <http://ru.wikipedia.org/wiki/DOP>
17. <http://ru.wikipedia.org/wiki/DGPS>