МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

Институт промышленной автоматизации и цифровизации
имени А. Буркитбаева

Кафедра «Электроника, телекоммуникации и космические технологии»

Исентаев Адлет Багланович

Средства навигации через космос

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

специальность 5В071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникация

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева

Институт промышленной автоматизации и цифровизации имени А. Буркитбаева

Кафедра «Электроника, телекоммуникации и космические технологии»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой ЭТ и КТ
_____И.Сыргабаев
“____“ _____2020г

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: Средства навигации через космос

по специальности 5В071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникация

Выполнил Исентаев А.Б.

Рецензент
канд.техн.наук, профессор АУЭС
_____Байкенов А.С.
“__27__“ ____05____2020г.

Научный руководитель
маг-р техн. наук
_____Байкенова Г.М.
“__27__” __05_____2020г.

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева

Институт промышленной автоматизации и цифровизации имени А. Буркитбаева

Кафедра «Электроника, телекоммуникации и космические технологии»

5В071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникация

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой ЭТиКТ
_____И.Сыргабаев
“____“ _____2020г

ЗАДАНИЕ
на выполнение дипломной работы

Обучающемуся *Исентаеву Адлету Баглановичу*
Тема *Средства навигации через космос*
Утверждена *приказом Ректора Университета № 762-б от “27”января 2020г.*
Срок сдачи законченной работы *“ 5 ” июня 2020 г.*
Исходные данные к дипломной работе: *Общие понятия о системах спутниковой навигации, принцип передачи радиосигнала от спутника к приемному устройству*
Краткое содержание дипломной работы:
а) Состав систем спутниковой навигации
б) Принципы средств навигации с использованием GPS
в) Анализ погрешностей при распространении радиосигнала
г)Сравнительный анализ систем спутниковых навигаций с помощью мультиприемника
д) Моделирование радиотракта приемника GPS
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): *Конфигурация орбит спутников навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Навигационное сообщение GPS. Принцип и схема работы системы спутниковой навигации GPS. Абсолютный метод спутниковых определений. Дифференциальный метод определения координат. Структурная схема приемника GPS. Информационная последовательность и сигнал в ЛС.*

Рекомендуемая основная литература:

1) GLONASS. The interface control document (ed. 5.1), Moscow, Joint-Stock Company "Institute of Space Device Engineering", 2008. – 74c.

2) Technique of construction and analysis of GLONASS precision fields in a specific zone of airspace, 2015. – 122c.

3) Instruction for the development of survey ground and survey of the situation and the relief with the use of global navigation satellite systems GLONASS and GPS, 2002. - 124c.

4) Joel, McNamara GPS For Dummies / Joel McNamara. - Moscow: Science of GPS, 2017. - 408 c.

ГРАФИК

подготовки дипломной работы (проекта)

Наименования разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю и консультантам	Примечание
Общие понятия о средствах навигации через космос	10.02.2020	Выполнил
Глобальная система позиционирования – GPS	15.03.2020	Выполнил
Анализ погрешностей и методы повышения точности позиционирования	20.04.2020	Выполнил
Сравнительный анализ систем спутниковых навигаций с помощью мультиприемника	12.05.2020	Выполнил

Подписи

консультантов и нормоконтролерана законченную дипломную работу (проект) суказанием относящихся к ним разделов работы (проекта)

Наименования разделов	Консультант, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Нормоконтролер	Доктор PhD Смайлов Н.К.	27.05.2020	

Научный руководитель _____ Байкенова Г.М.

Задание принял к исполнению обучающийся Исентаев А.Б.

Дата "__27__"_____01_____2020г.

АННОТАЦИЯ

Данная дипломная работа посвящена анализу средств навигации через космос, анализу существующих погрешностей и методам повышения точности позиционирования.

Были рассмотрены различные системы спутниковой навигации и сравнение этих систем. Произведено исследование точности позиционирования на двухсистемном приемнике, а также моделирование радиотракта приемника GPS.

АҢДАТПА

Дипломдық жұмыс ғарыш арқылы навигациялық құралдарды талдауға, орын ауыстыру дәлдігін жақсартуға арналған қателер мен әдістерді талдауға арналған.

Әр түрлі спутниктік навигациялық жүйелер және оларды салыстыру қарастырылды. Екі жүйелік қабылдағышта орналасудың дәлдігі, сонымен қатар GPS қабылдағыштың радио жолын модельдеу туралы зерттеу жүргізілді.

ANNOTATION

This thesis is devoted to the analysis of navigation tools through space, the analysis of existing errors and methods to improve positioning accuracy.

Various satellite navigation systems and a comparison of these systems were considered. A study was made of the accuracy of positioning on a two-system receiver, as well as modeling the radio path of the GPS receiver.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение		10
1	Общие понятия о средствах навигации через космос	11
1.1	История космической навигации	11
1.2	Сравнительные характеристики систем спутниковой навигации	12
1.3	Глобальная система позиционирования – GPS	17
1.3.1	Космический сегмент	19
1.3.2	Наземный сегмент	20
1.3.3	Пользовательский сегмент	21
1.5	Постановка задачи	21
2	Принципы средств навигации с использованием GPS	22
2.1	Трехмерная трилатерация	22
2.2	Измерение расстояния от спутника	23
2.3	Принцип формирования последовательности импульсов	24
2.4	Обеспечение совершенной временной привязки	26
2.5	Определение положения спутника в пространстве	27
2.6	Компенсация погрешностей	28
2.7	Сравнительный анализ систем спутниковых навигаций с помощью мультиприемника НАВИА ML8088sE	36
3	Моделирование радиотракта приемника GPS	41
Заключение		45
Перечень принятых сокращений, терминов		46
Список использованной литературы		47

ВВЕДЕНИЕ

В нынешнее время системы спутниковой навигации являются неотъемлемой частью жизни современного человека. Одним из факторов навигации является удобство и экономия времени для человека, находящегося в малознакомом месте. На сегодня система навигации находится у каждого человека под рукой, есть в каждом смартфоне, что позволяет облегчать жизнь человека, совмещая весь жизненный цикл человека в одно устройство. Системы навигации абсолютно бесплатны для каждого человека, могут работать круглый год, днем и ночью, без перерывов и выходных. Для любого человека стало доступным построение его маршрута в телефоне, для похода в магазин или к примеру поездку на отдых на собственном транспорте.

Сегодня уже трудно сказать, насколько бы современному человеку было бы нелегко без систем навигации. Ведь тяжело представить жизнь без автотранспорта, а поездку без навигатора. Важной особенностью в определении местоположения приемного устройства или смартфона является его точность. Без точности трудно было бы сказать, насколько были ли бы отклонения в той или иной мере, но от этого жизнь бы точно не облегчилась.

На сегодня средства навигации через космос обладают большими возможностями для каждого пользователя и при этом являются абсолютно бесплатными. Но существуют и недостатки таких систем, как точность позиционирования. Ведь каждому сигналу от спутника следует пройти огромное расстояние, прежде чем он дойдет до самого приемного устройства. Данные факторы вносят погрешности в определении координат, что делают такие глобальные системы позиционирования недостаточно надежными. Именно использование различных методов по повышению позиционирования позволяют данным системам быть более надежными от жизни обычного гражданина до эксплуатации их в военных целях.

Различные системы спутниковой навигации, имеют свои достоинства и недостатки, причем у каждой системы они свои. Но так как все они используют похожий принцип определения координат приемника, использование нескольких систем навигации будет более рациональным. Работая вместе эти системы могут дополнять друг друга по своим достоинствам. Современные средства навигации через космос, подразумевают использование одной или нескольких систем спутниковых навигаций. Внедряя недорогие чипы в приемные устройства, позволяют антенне приемника видеть большее количество спутников в пространстве, а значит существенно повышает точность позиционирования.

Данная дипломная работа посвящена средствам навигации через космос, в частности рассмотрена система спутниковой навигации GPS, сравнительные характеристики с аналогичной системой спутниковой навигации ГЛОНАСС, анализ существующих погрешностей, а также методы по повышению точности позиционирования.

1 Общие понятия о средствах навигации через космос

1.1 История космической навигации

Первое упоминание о спутниковой навигации появилось в 1950-х годах. Во времена первого запуска спутника Советского Союза, американский ученый Ричард Кешнер со своими коллегами заметили интересную особенность, а именно эффект Допплера, который говорит о том, что частота вблизи к спутнику возрастала, а когда отдалялась уменьшалась. Главной мыслью этого новшества была в том, что, зная абсолютные координаты на поверхности земли можно узнать состояние и величину скорости спутника. Также и наоборот, имея данные о спутнике, можно получить собственные данные местоположении и величину скорости.

1960 год был годом создания атомных сверхточных часов. Теперь это способствовало расчету времени задержки от спутника, и соответственно координаты приемного устройства.

Transit – спутниковая навигационная система, которая положила началу использования баллистических ракет Поларис. Создана в 1964 году. Но только в 1967 году была доступна для коммерческих пользователей. Так как система была сверхпередовой для того времени, люди стали быстро познавать это систему, и вскоре достигло огромного количества пользователей. Но недостатком системы было то, что координаты могли быть известны исключительно для стоячих или не сильно быстро передвигающихся обьектов.

Проверка и разработка алгоритма для получения точных данных местоположения широкополосных сигналов, модулированных кодами псвевдошума PRN, путем использования данной программы, военные ученые США начали в 1964 году. Главной особеностью передачи радиосигнала на одной несущей было использование корреляционного разделения. ВВС и ВМС США в конечном итоге были определены в одну программу, которая носит название Navstar-GPS. Для сущесвтенного повышения определения координат, данные подразделения США наделили свои спутники стандартами частоты – кварцом, рубидием, цезием и водородом. В конечном итоге, определили стандартные высоты и частоты для спутников Navstar.

В 1978 году над нашей планетой пролетел первый спутник, который на сегодняшний день мы можем называть GPS-спутник. К началу 1995 года система начала полноценно работать, так как последний спутник был отправлен на орбиту. В наше время система имеет около 24 спутников в рабочем состоянии, а также 6 резервных, в случае если один из спутников выйдет из строя.

1.2 Сравнительные характеристики систем спутниковой навигации

Система глобального позиционирования(GPS)[3] – это навигационная спутниковая система, в состав которой входят 24 спутника, расположенных на околоземной орбите, высотой около 21.000 километров, которые были запущенны 22 февраля 1978 года Министерством обороны США. Как и любое новшество в нашем мире, GPS был предназначен исключительно в военных целях. Однако, в 1980 году Глобальная система позиционирования была перенаправлена для гражданского пользования. GPS может работать в любую погоду, под любые климатические условия, в любой точке нашего мира, 24 часа в сутки, 7 дней в неделю.

Глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС) [1] – спутниковая навигационная система под управлением Российской Федерации, которая в свою очередь выполняет функции по определению положения и временной поддержки большого количества конечных пользователей наземных, морских, воздушных и космических услуг.

1975 год положил начало разработке российской спутниковой системе. Она является непосредственным продолжением домашней навигационной системы, созданной программой Cyclone в 1965 году. Также, в этом же году был отправлен на орбиту первый в России космический аппарат Космос-191.

В октябре 1982 года был отправлен на орбиту первый искусственный космический аппарат, носивший название “Ураган”. Но в силу того, что аппараты были не готовы к работе, были выпущены всего две модели на орбиту. Вплоть до 1992 года были отправлены на орбиту около 12 космических аппаратов, а в 1993 году российская спутниковая система была полностью готова к функциональной эксплуатации.

Российская спутниковая система использует частоты, всего их 14, закодированных с использованием одного и того же ПСП, что означает что данная система является системой множественного доступа с частотным разделением каналов (FDMA). Эти частоты обеспечивают 24 спутника, так как каналы частоты применяются и для других космических аппаратов, на противоположной стороне земли. По той же логике, что и у GPS, российская спутниковая система применяет две частоты: стандартной точности и высокой точности. Стандартная точность применяется в открытом доступе, а высокой точности для военных действий.

Сигналы данных типов распространяются в диапазонах частот L1 и L2.

L1: – f = 1602 МГц, Df = 562,5 кГц (~ 1597-1606 МГц

L2: – f = 1246 МГц, Df = 437,5 кГц (~ 1238-1254) МГц

Рисунок 1.1 – Системы спутниковой навигации GPS и ГЛОНАСС

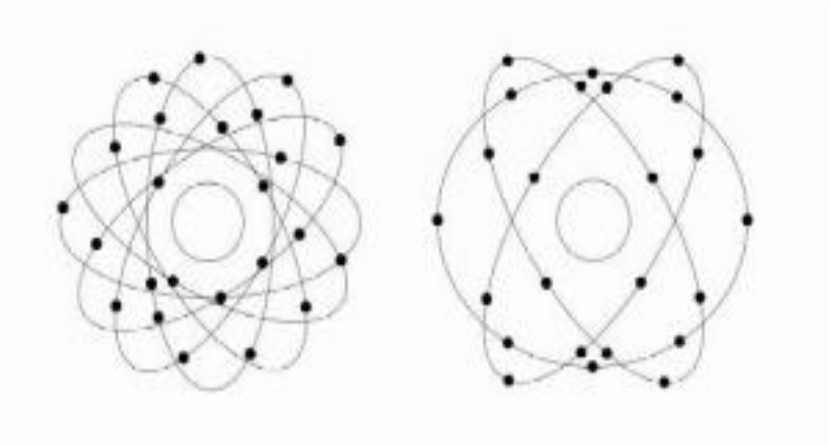

Рисунок 1.2 – Конфигурация орбит спутников навигационных систем ГЛОНАСС и GPS

Лучшей из спутниковой навигационной системы можно выделить GPS. Есть три ключевых различия между GPS и ГЛОНАСС [2]:

-величина группировки космических аппаратов, у Глонасс и GPS их 24, но GPS все-таки отличается тем, что может повысить количество своих спутников вплоть до 48;

-местоположение космических аппаратов, спутники GPS включают 6 спутников на каждой плоскости земли, в каждом из которых имеется 4 космических устройства. Космические аппараты у GPS вращаются синхронно по оси вращения земли, когда как у Глонасс космические аппараты вращаются свободно;

-системы спутниковых навигаций работают на разных частотах, у каждой из них есть свои недостатки, погрешности в определениях координат.

Но в общих чертах системы похожи друг на друга по принципу работы, что приводит к тому, что характеристические данные не сильно отличаются друг от друга.

В современном мире Глонасс все-таки уступает GPS, у Глонасс погрешность в определениях является – 4-7 метров, тогда как у GPS средняя

ошибка высчитывается 2,5-5 метров. Но чем больше приемник видит сигналов космических аппаратов, тем более точные данные он получит на выходе. Исходя из этого, можно предположить, что использование двух, а то и трех и более систем существенно повысит точность определения положения приемных устройств.

Таблица 1.1 - Сравнительные характеристики ГЛОНАСС, GPS

Показатель / Системы	ГЛОНАСС	GPS
Число КА в полной орбитальной группировке	24	24
Число орбитальных плоскостей	3	6
Число КА в каждой плоскости	8	4
Наклон орбиты	64,8°	55°
Высота орбиты, км	19 130	20 180
Период обращения спутника	11 ч 15 мин 44 с	11 ч 58 мин 00 с
Система координат	ПЗ-90	WGS-84
Масса навигационного КА	1 450 кг	1 055 кг
Мощности солнечных батарей	1 250 Вт	450 Вт
Срок активного существования	3 года	7,5 лет
Средства вывода КА на орбиту	«Протон-К/ДМ»	Delta 2
Число КА, выводимых за один запуск	3	1
Космодром	Байконур (Казахстан)	Мыс Канаверал (Cape Canaveral)
Эталонное время	UTC (SU)	UTC (NO)

Galileo – является общей разработкой системы спутниковой навигации под управлением Евросоюза. Данная система пользуется спросом у геодезистов и стандартной работе по определению положения конечного пользователя. Также и растет спрос на данную спутниковую систему, что оказывает непосредственное влияние на производителей, которые все чаще внедряют в свои устройства возможность приема и считывание данных, полученных от его спутников. Этому способствует его соглашение с глобальной навигационной системой, о их совместной работе и взаимном дополнении. Данная разработка будет финансироваться по большей части от продаж лицензий компаниям производств приемных устройств.

Данная спутниковая система будет иметь несколько доступных услуг:

- открытая общедоступная, предназначенная для бесплатного открытого доступа, имеющей точность определения существующих навигационных систем. Принятый радиосигнал предназначен для воздушной авиации и мореплавателей. Диапазон L1 = 1556 ÷ 1593 МГц;
- повышенной надежности, используемой в навигации суден и авиации. Диапазон L1=1556÷1593 МГц и E5=1163÷1213 МГц;

- для коммерческих пользователей, с платной подпиской, но имеющей большую точность (вплоть до нескольких сантиметров). Диапазон E6=1262÷1300 МГц;

- для правительственных органов, для использования специально защищенного радиосигнала, в использовании которого будет спецслужбы и полиция;

- для поисковых операций, что хорошо дополняет существующую службу спасения под названием Коспас Сарсат и обеспечивает лучший и более сильный сигнал.

Beidou – еще одна система спутниковой навигации созданная Китаем. Первые спутники были отправлен на орбиту в 2013 году, в количестве 16 единиц, предназначенной для регионального позиционирования. Данная система может быть на пике своей силы в 2020-2021 годах. Но вопрос с частотами остается открытым, следовательно, китайским ученным следует согласовать используемые частоты с уже существующими аналогами. Однако, данная система использует частоту B1=1558-1593 Мгц.

Но все же, стороны не пришли к общему компромиссу по их общей совместимости, хотя первые переговоры начинались с 2008 годов, и по сей день остаются открытыми, по старому вопросу о внедрении спецсигналов компаса в спецсигналы Galileo.

Возможные частоты для использования в будущем:

-B2: 1165 - 1218 МГц;

-B3: 1250 - 1288 МГц.

Рисунок 1.3 – Системы спутниковой навигации Galileo и Beidou

С другой стороны, вопрос остается неизменным, для чего нужны несколько систем позиционирования вместо одной. Для военных применений. Если одна страна как США или Россия объявит военное положение, все системы гражданского пользования будут моментально отключены. Соответственно другие страны не хотят зависеть от мнения других стран, поэтому создали

собственные, но различия в них принципиальные, другие страны создали свои навигационные системы только для гражданских лиц.

1.3 Глобальная система позиционирования – GPS

Глобальная система позиционирования (GPS - Global Positioning System) – система навигации через космос, созданная ВВС США в 1977 году. Изложенная система включает в себя 3 части: космические аппараты летящие на орбите, контроль и обслуживание их наземными станциями и аппаратура конечного пользователя. Космические аппараты распространяют радиосигналы на поверхность земли, конечная аппаратура в свою очередь принимает и обрабатывает эти сигналы и на выходе дает информацию о долготе и широте. В нынешнее время GPS не является платным, что следовательно указывает на то, что имея смартфон или недорогую пользовательскую аппаратура приема радиосигнала, любой пользователь может найти себя в пространстве. Это открывает огромные возможности для любого человека, который любит путешествовать, ведь имея данную систему под рукой, ему будет не сложно определить себя в пространстве и понять, куда ему направляться дальше.

Данная глобальная система внедряет и использует современнейшие технологии, которые используют в судоходстве и воздушной авиации. Не обходится и без пользы в экстренных ситуациях, такие как бедствие, катастрофы, спасательные службы активно используют данную систему для спасения людей. GPS находит применение в многочисленных сферах современной жизни, к примеру банковские операции или системы мобильной связи, где требуется точнейшее время. Различные профессии, как ученые, геологи, скотоводы работают в разы лучше при применении данной системы.

Возможности применения навигации широки, рассмотрим некоторые из них ниже:

Мониторинг автотранспорта через спутники: многие крупные логистические компании и не только используют мониторинг своих автотранспортов, для сокращения расходов и повышения эффективности работы.

Мобильная связь: возможность нахождения конечного пользователя, находящегося в беде, которые звонил на номер службы спасения 911.

Геодезия: необходимость применения данной системы, для лучшей работы в данной отрасли.

Сейсмотектоника: постоянный мониторинг и контроль за тектоническими плитами.

Картоведение: картография для гражданских и военных лиц.

Путешествия и отдых: большая помощь людям, неравнодушным к путешествиям и любителям отдыха.

Рассмотрим сигнал, идущий от космического аппарата на конечную аппаратуру пользователя. Радиосигнал от космического аппарата содержит в себе 3 составляющие:

- несущая;
- псевдослучайные последовательности;
- навигационное сообщение.

Космическая аппаратура путем модуляции образует специальное сообщение, имеющее название навигационное сообщение. Модулирует оно его с использованием двух широкополосных дальномерных кодов, а именно грубым кодом (с/а), применяемого в основном для конечных пользователей любого региона и специальным зашифрованным кодом, повышенной точности (Р) для военных действий и правительственных организаций. Сигнал грубого кода (с/а), состоит из 1023 бит, которые передаются на скорости около 1,023 Мбит/с и является псевдослучайной последовательностью. Для любого космического аппарата имеется свой единственный уникальный код с/а, что позволяет существенно повысить точность передачи данных, радиосигналы от других космических аппаратов не перемешиваются, используя кодовое разделение каналов (CDMA) и данные доходят правильно.

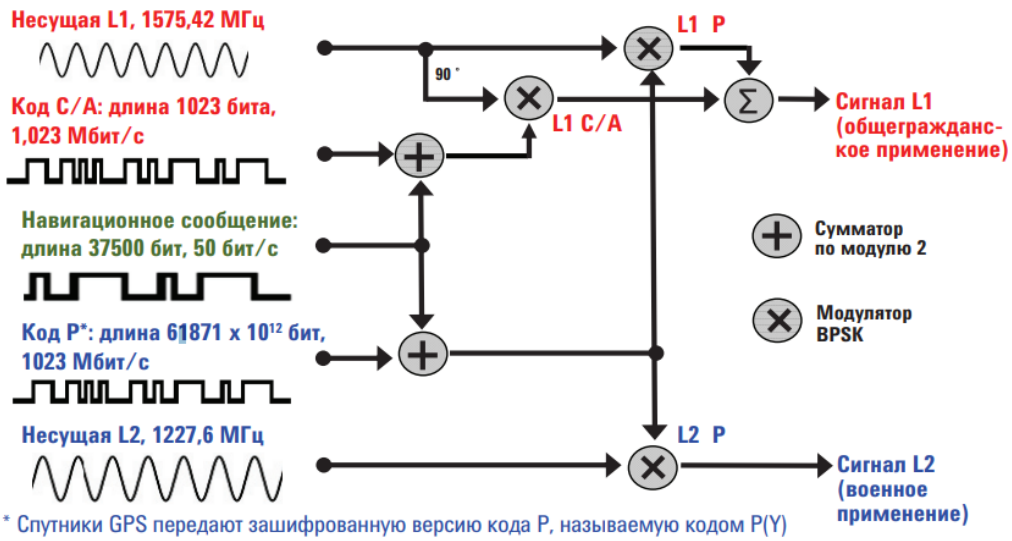

Рисунок 1.4 - Сигнал, передаваемый спутниками GPS, представляет собой комбинацию навигационного сообщения и кодов С/А и Р, модулирующих несущие L1 и L2

Вышеупомянутое навигационное сообщение включает 37 500 бит данных, которые в свою очередь делятся на 25 кадров. При скорости передачи около 50 бит/с данные передаются очень медленно, что непосредственно влияет на время его передачи – 12,4 минут. Точное время, конфигурация, состояние и работоспособность космического аппарата, а также данные его эфемерид и альманаха о его орбите и орбите других спутников содержатся в пяти подкадров, которые в свою очередь содержатся в одном кадре.

Информация эфемерид и альманаха, передаваемые от спутника информируют аппаратуру о положении приемника в пространстве, и время передачи данных и корректировка значений тактового сигнала приемника для вычисления положения приемного устройства. Вся эта информация хранится в первоначальных подкадрах, следовательно приемное устройство имеет возможность принять информацию за 16 секунд, а в неблагоприятных обстоятельствах за 30.

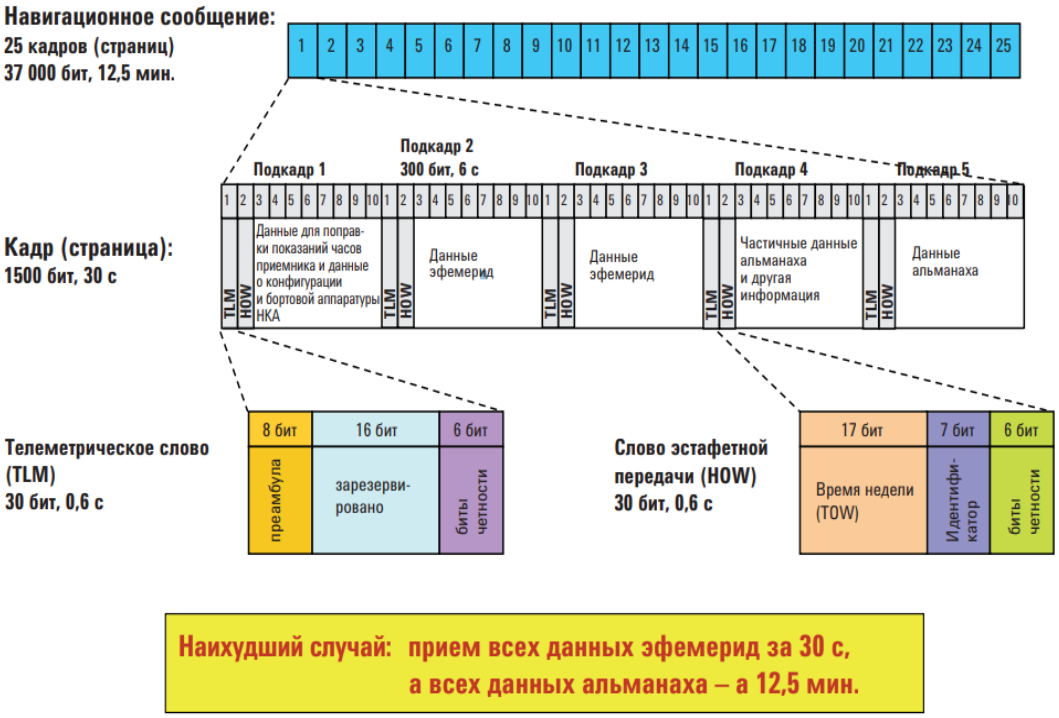

Рисунок 1.5 - Навигационное сообщение GPS

Состав каждой системы спутниковой связи состоит из: космического сегмента, наземного сегмента и пользовательского сегмента.

1.3.1 Космический сегмент

Космический сегмент состоит от 24 до 32 спутников, отправляющие радиосигналы на поверхность земли. Располагаются они на высоте около 20000 километров и распросраняют радиосигналы L1=1575,42 МГц и L2=1227,60 МГц, а также в новых аппаратах L5=1176,45 МГц. Полный цикл их вращения вокруг земли составляет порядка 12 часов с имеющейся скоростью 4 км/с. Любой радиосигнал отправленный с космического аппарата принимается антенной приемника и высчитываются его координаты. Главными функциями космического сегмента являются:

- получение, обработка и сохранность данных от станций наземного сегмента;
- постоянный контроль времени атомных часов;

- распространение радиосигналов с навигационным сообщением аппаратуре пользователя, на определенных частотах.

1.3.2 Наземный сегмент

Данный сегмент состоит в основном из пяти контрольных станций и станции управления. Основной их работой является передача поправок альманаха спутника, для сохранения его на своей орбите, а также прием и поправки в ошибки космического аппарата. Прием и обработка данных вычисляет возможные отклонения от своей орбиты спутника, погрешности атомных часов и возможные ошибки при передаче данных. Полная обработка и передача данных космическому аппарату происходит каждый день, раз в 24 часа, как раз когда спутник пролетает над главной станцией управления.

1.3.3 Пользовательский сегмент

Пользовательское оборудование предполагает приемники для улавливания радиосигнала от спутника в космосе, для расчета местоположения, времени и скорости конечного пользователя. Для разных случаев можно поделить оборудование пользователя на специальное и стандартное. Так как существуют различные сферы применения или особые ситуации их можно поделить условно. К большинству стандартных случаев приемники GPS используются навигаторами в автомобилях, путешествиях и других различных сферах, которые облегчают жизнь. Но существуют и другие ситуации, как примеру спасение жизни человека или профессия требующая огромной точности, как геодезия и т.д.

В нынешнее время смартфоны, телефоны имеют интегрированный чип GPS, позволяющая небольшому устройству отслеживать местоположение конечного пользователя даже в режиме offline. Его особенностью является небольшой стоимость интеграции и работа в стандартном режиме. Но существуют и более дорогие устройства. Они работают на других принципах. Если недорогие чипы GPS работают по кодовому принципу определения, то дорогие работают и с кодовыми, и с фазовыми последовательностями. Применение как раз-таки фазового режима существенно повышает его стоимость, но и имеют отличительную особенность – точность позиционирования вплоть до нескольких сантиметров. Данные приемники могут работать на двух частотах L1 и L2, в фазовых режимах и применяться в геодезии. Но стоимость таких устройств может достигать десятки тысяч долларов.

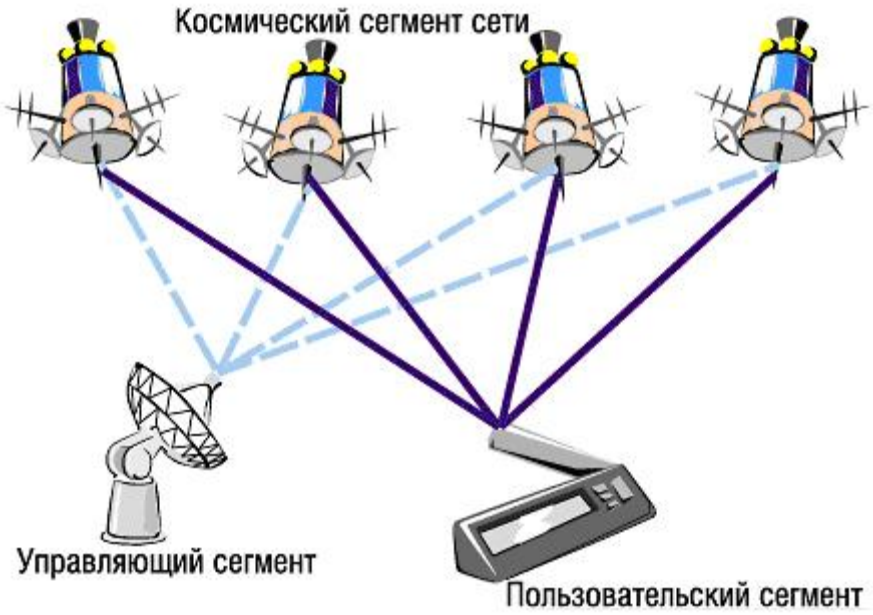

Рисунок 1.4 – Состав системы GPS

1.5 Постановка задачи

Основная задача моей дипломной работы - рассмотрение средств навигации через космос, принципы их работы и практический пример их использования. Для этого необходимо выполнить следующее: дать общие понятия о средствах навигации через космос, определить принцип и способ определения местоположения приемника на земле, проанализировать существующие погрешности при передаче радиосигнала и современные методы их решений.

2 Принципы средств навигации с использованием GPS

Принцип работы GPS состоит из 5 основных этапов:

1. Трехмерная трилатерация.
2. Измерение расстояний до спутников.
3. Принцип формирования последовательности импульсов.
4. Обеспечение точной привязки по времени.
5. Определение положения спутника в пространстве.
6. Компенсация погрешностей.

2.1 Трехмерная трилатерация

К примеру, зная, что мы в 11 000 милях от определенного спутника, сужает все наши возможные местоположения во всей вселенной к поверхности сферы, которая сосредоточена на этом спутнике и имеет радиус 11 000 миль.

Далее, мы измерили наше расстояние до второго спутника и установили, что оно равно 12 000 миль. Это говорит о том, что мы находимся не только на первой сфере, но также на сфере, которая в 12 000 милях от второго спутника. Другими словами, мы где-то на окружности, где пересекаются эти две сферы.

Если мы затем произведем измерение от третьего спутника и определим, что мы от него на расстоянии 13 000 миль, это сузит данные о нашем положении до двух точек, где сфера 13 000 миль определяет положение с помощью пересечения первых двух сфер.

Таким образом, имея измерения от трех спутников, мы сводим наше местоположение к двум точкам в пространстве[4].

Местоположение приемника пользователя характеризуется вектором [x, y, z, CB], где [x, y, z,] – координаты пользователя в геоцентрической системе, Св — коэффициент отклонения пользовательских часов.

Математическое выражение данного принципа представлено ниже:

$$R - C_B = c\Delta t - C_B = \sqrt{(X_S - X_R)^2 + (Y_S - Y_R)^2 + (Z_S - Z_R)^2}\ ,$$

где R – расстояние измеренное и скорректированное с учетом неблагоприятных факторов;

Δt – задержка сигнала;

c – скорость распространения радиоволн;

XS, YS, ZS – координаты спутника в момент передачи сигнала;

XR, YR, ZR - координаты приемника в момент приема сигнала.

Определив расстояние и время до спутников, появляется возможность вычислить местоположение приемника.

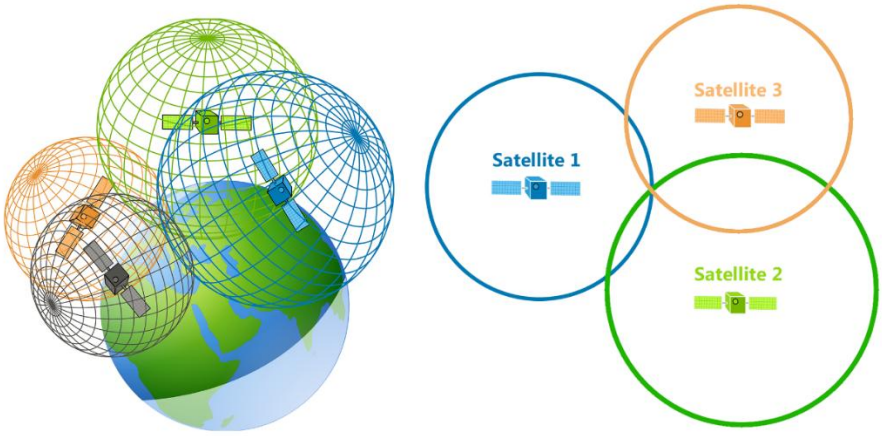

Рисунок 2.1 - Принцип и схема работы системы спутниковой навигации GPS

2.2 Измерение расстояния от спутника

Как мы уже говорили, позиция рассчитывается по расстояниям не менее чем до трех спутников. Но как же мы можем измерить расстояние до чего-либо, парящего в космосе? Определение расстояния до космического аппарата производится измерением времени, прошедшего от космического аппарата до аппаратуры пользователя:

$$|r - a_j| = c(t_j - \tau),$$

где a_j - радиус-вектор j-го спутника;

t_j – момент времени приёма сигнала j-го спутника по часам потребителя;

τ – неизвестный момент времени синхронного излучения сигнала всеми спутниками по часам потребителя;

c – скорость света;

r - неизвестный радиус-вектор потребителя.

В случае с GPS мы измеряем радиосигнал, так что скоростью будет скорость света или, грубо говоря, 186 000 миль в секунду. Задачей является измерение времени прохождения сигнала. В первую очередь, продолжительность времени должна быть короткой. Если спутник был прямо над нами, время будет около 0.06 секунд.

Предположим, у нас есть точные часы, нам нужно измерить время прохождения. Для этого проведем аналогию.

Допустим, мы нашли способ, чтобы и спутник, и приемник одновременно сгенерировали псевдослучайный код ровно в 12.00. Код, идущий от спутника, был бы с небольшой задержкой из-за расстояния в 11 000 миль.

Если бы мы захотели узнать время задержки версии со спутника, нужно было бы произвести задержку версии с приемника, пока они не были бы абсолютно синхронны. Время, на которое мы задерживали версию приемника, равнялось бы времени прохождения версии спутника. Мы умножаем это время на скорость света и получаем наше расстояние до спутника.

Вот, в основном, как работает GPS.

Код - это последовательность нулей и единиц, подобранная таким образом, чтобы набор цифр выглядел совершенно случайным. Естественно он вовсе не случайный, а тщательно продуманный, поэтому называется псевдослучайной последовательностью.

Рисунок 2.2 - Сдвиг псевдослучайных последовательностей

2.3 Принцип формирования последовательности импульсов

Пусть имеется шестизначный двоичный регистр, в ячейках которого находятся нули или единицы (рисунок 2.3). (На самом деле регистр длиннее. Например, в GPS он 10-ти или 12-тизначный.) Допустим, что текущие значения 4-й и 6-й ячеек суммируются по модулю 2 (то есть, 0+0=0, 0+1=1, 1+1=0) и результат подается на вход регистра, то есть занимает первую ячейку регистра.

При этом все содержимое регистра сдвигается: прежнее содержимое первой ячейки переходит во вторую, из второй в третью и т.д. И этот процесс суммирования и сдвига повторяется бесконечно. А вот текущее содержимое, например, 5-й ячейки назначается в качестве «выхода» регистра, то есть оно и формирует псевдослучайную последовательность, в которой единица соответствует наличию «импульса», а ноль – его отсутствию. Поэтому последовательность импульсов выглядит совершенно беспорядочной. Знать код – это значит знать начальное значение регистра и закон, по которому формируются его вход и выход.

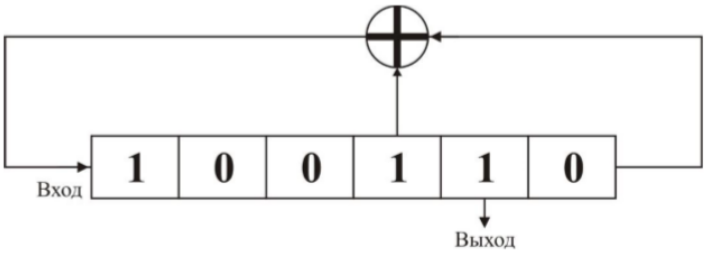

Рисунок 2.3 - Регистр

Последовательность импульсов, излучаемых каждым спутником, является очень длинной, но периодически повторяется. Коды всех спутников системы известны приемнику бортового оборудования ВС. В нем также генерируется код (последовательность импульсов), идентичный принимаемому со спутника. Процесс получения информации выглядит следующим образом. Предположим, приемник совершенно новый и в его памяти нет никакой информации о параметрах орбит спутников. При включении приемника он начинает генерировать код, соответствующий первому по списку спутнику, и оценивает совпадение генерируемых «импульсов» с «импульсами» в принимаемом радиосигнале.

Стоит обратить внимание на то, каким образом определяется совпадение бортовой и спутниковой последовательностей «импульсов». Дело в том, что мощность излучаемого спутником радиосигнала очень мала и сравнима с мощностью обычной электрической лампочки. Да и все спутники излучают на одной или почти на одной частоте. А ведь они находятся на расстоянии около двадцати тысяч километров от Земли. Поэтому мощность принимаемого со спутника сигнала ничтожно мала и составляет по порядку величины 10-14 Вт. Сигналы настолько слабы, что просто теряются на фоне естественного радиоизлучения Земли, атмосферных помех и теплового шума самого приемника.

Все эти шумы являются случайными вариациями электронных пульсаций. А принимаемый псевдослучайный код – это строго определенная последовательность электронных импульсов. Поскольку псевдослучайная кодовая последовательность периодически повторяется, то с помощью быстродействующего компьютера оказывается возможным выполнять многократное сравнение принимаемых сигналов и выделять псевдослучайный код на фоне естественного радиошума Земли. На рисунке. 2.4 схематично изображен принимаемый радиосигнал, в котором, возможно, содержится и кодовая последовательность. Чтобы выделить ее, бортовой приемник непрерывно рассчитывает по сложным математическим алгоритмам степень корреляции (вероятностной взаимосвязи) генерируемой им последовательности и принимаемого сигнала. Когда эта корреляция при очередном сдвиге достигает заданной величины, фиксируется, что сигнал принят.

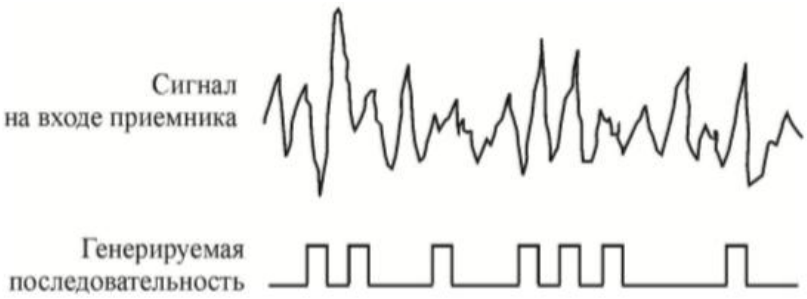

Рисунок 2.4 - Сигнал и шум

В результате приемник СНС может иметь очень маленькую антенну, а в целом аппаратура потребителя сравнительно небольшие габариты, вес и относительно невысокую стоимость. А это, в свою очередь, способствует превращению СНС в систему массового использования.

2.4 Обеспечение совершенной временной привязки

Интересным моментом в работе GPS является вопрос коррекции времени. Ведь точность в вопросах определения геолокации важна, особенно если речь идет о военной технологии, пусть она и стала общественным достоянием. Для корректной работы спутников была учтена теория относительности. Из-за того, что с Земли мы видим спутники в движении, специальная теория относительности утверждает, что часы на них должны идти медленнее на 7 микросекунд из-за меньшей скорости хода времени.

С Земли кажется, что время на спутнике идет медленнее с разницей в 38 миллисекунд в сутки. Ведь даже разность данных на 20 наносекунд привела бы к погрешностям в вычислениях геолокации каждые пару минут, и эта ошибка накапливалась бы. К примеру, за день точность определения местоположения объектов сбилась бы приблизительно на 10 км.

Предположим, что мы находимся в четырех секундах от спутника А, и в шести секундах от спутника В. На плоскости этих двух измерений было бы достаточно для привязки нашего местоположения к какой-либо одной точке фактического местоположения.

Если бы мы использовали приемник с часами, отстающими на секунду, он определил бы, что расстояние до спутника А составляет пять секунд, а до спутника В — семь секунд. В результате появятся две новые окружности, пресекающиеся уже в другой точке.

Давайте добавим еще одно измерение. В двухмерном варианте это означает использование третьего спутника. Предположим, (если у нас совершенные часы) спутник С находится в восьми секундах от нашего истинного положения и все три окружности пересекаются в одной точке, так как они соответствуют истинным дальностям до трех спутников.

Если добавить одну секунду отставания ко всем трем измерениям, то новые окружности, соответствующие уже не истинным дальностям, а так называемым «псевдодальностям», не пересекутся в одной точке, а образуют некоторый треугольник, и вероятное местоположение окажется где-то внутри него. Таким образом, не существует точки, которая может быть одновременно в 5, 7 и 9 секундах соответственно от точек А, В и С. Это физически невозможно.

2.5 Определение положения спутника в пространстве

Орбиты известны заранее, а приемники имеют «альманах», размещаемый в памяти их компьютеров, из которого известно, где будет находиться каждый спутник в любой момент времени. Чтобы сделать систему более совершенной движение спутников GPS находится под постоянным контролем специальных наземных станций слежения.

Обращаясь вокруг планеты один раз за 12 часов, спутники GPS проходят над контрольными станциями дважды в сутки. Это дает возможность точно измерять их высоту, положение и скорость. После того, как станции определили параметры движения спутника, они передают эту информацию обратно на спутник, заменяя ею в памяти бортового компьютера прежнюю.

Далее эти небольшие поправки вместе с дальномерными кодовыми сигналами будут непрерывно передаваться спутником на Землю. Спутники GPS передают не только псевдослучайный дальномерный код, но также и информационные сообщения о своем точном положении на орбите и о состоянии своих бортовых систем.

Все виды приемников GPS используют эту информацию вместе с информацией, заключенной в альманахе, для того, чтобы установить точное положение каждого спутника в космическом пространстве.

2.6 Компенсация погрешностей

Радиосигнал со спутника при передаче подвергается различным искажениям. Выделяют три основных причины искажения сигнала: атмосферные неоднородности (ионосферные и тропосферные основные из них), помехи от стационарных и подвижных объектов, а также переотражение сигнала или многолучевость.

Геометрия спутников. Геометрия спутников описывает положения спутников друг к другу с точки зрения приемника. Если два спутника находятся в наилучшем положении относительно приемника, то угол между приемником и спутниками равен 90 градусов. Время прохождения сигнала не может быть определенно абсолютно точно, о чем говорилось ранее. Поэтому возможные положения отмечены черными кругами.

Точка пересечения А двух кругов достаточна мала и обозначена синим квадратным полем, что означает, что определяемые координаты будут достаточно точными (рисунок 2.5).

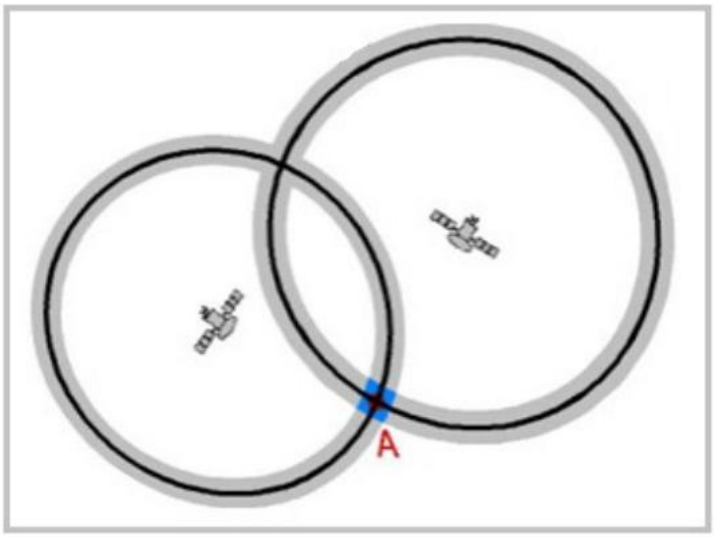

Рисунок 2.5 – Хорошее расположение спутников

Если спутники расположены почти в одну линию относительно приемника, то, как видно, на перекрестии получается более обширная площадь, а значит и меньшая точность (рисунок 2.6).

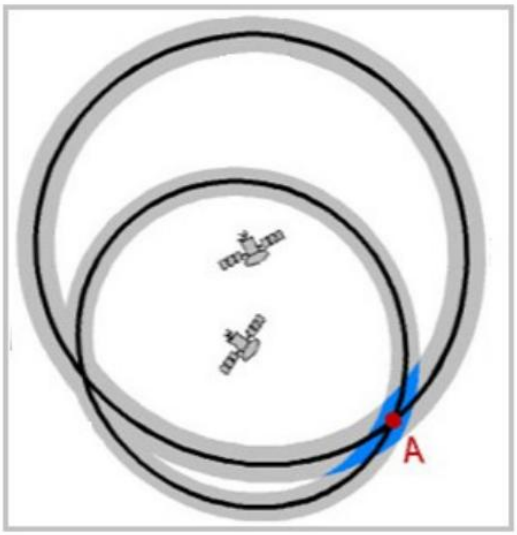

Рисунок 2.6 – Плохое расположение спутников

Если какой-то из сигналов заблокирован, оставшиеся спутники попробуют определить координаты, если это вообще будет возможно. Такое часто может наблюдаться в зданиях, когда близко расположены окна. Если определение местоположением будет возможным, то в большинстве случаев оно будет не точным. Чем большая часть небосвода загорожена каким-либо предметом, тем становится сложнее определить координаты.

Ошибка, которая возникает при определении местоположения из-за геометрии спутников, также зависит от широты, на которой находится приемник. Это показано ниже на диаграммах. Диаграмма 1 (рисунок 2.7) показывает неточность по высоте (вначале кривая изображена со специальной

погрешностью), которая была записана в Вухане в Китае. Вухан расположен на 30.5° северной широты и является наилучшим местом, где совокупность спутников всегда идеальна.

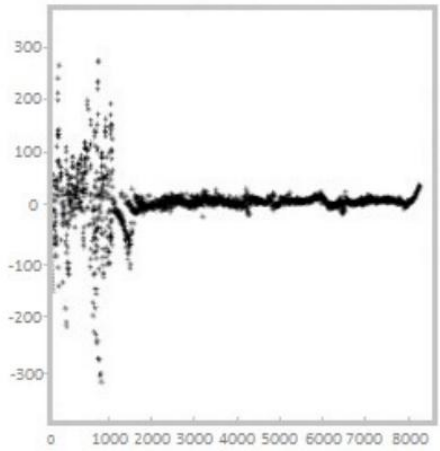

Рисунок 2.7 – Маленькая погрешность

Диаграмма 2 показывает такой же записанный интервал, сделанный на станции Касей в Антарктике (66.3° южной широты) (рисунок 2.8). Из-за не такой идеальной совокупности спутников в этой широте время от времени возникали более грубые ошибки. В дополнение ошибка происходит из-за влияния атмосферы: чем ближе к полюсам, тем больше погрешность.

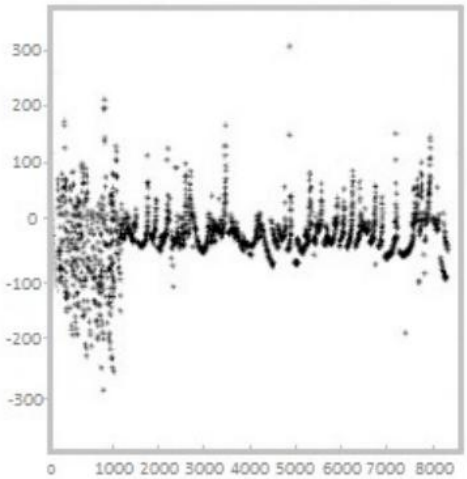

Рисунок 2.8 – Большая погрешность

Эффект многолучевости. Одним из основных условий получения хороших точностных результатов при выполнении спутниковых измерений является свободное прохождение радиосигналов от спутников к приёмнику[5]. Но в городских условиях данное требование очень часто невыполнимо. Это вызвано, прежде всего, наличием разного рода препятствий на пути прохождения радиосигнала: зданий, сооружений, деревьев, линий электропередачи и т.д.

На рисунке 2.9 представлен пример, который может иметь место на практике.

В данном случае сигналы, проходя от спутников к приёмнику, или не доходят до антенны приёмника, или доходят, но с прерываниями и переотражением от зданий, деревьев.

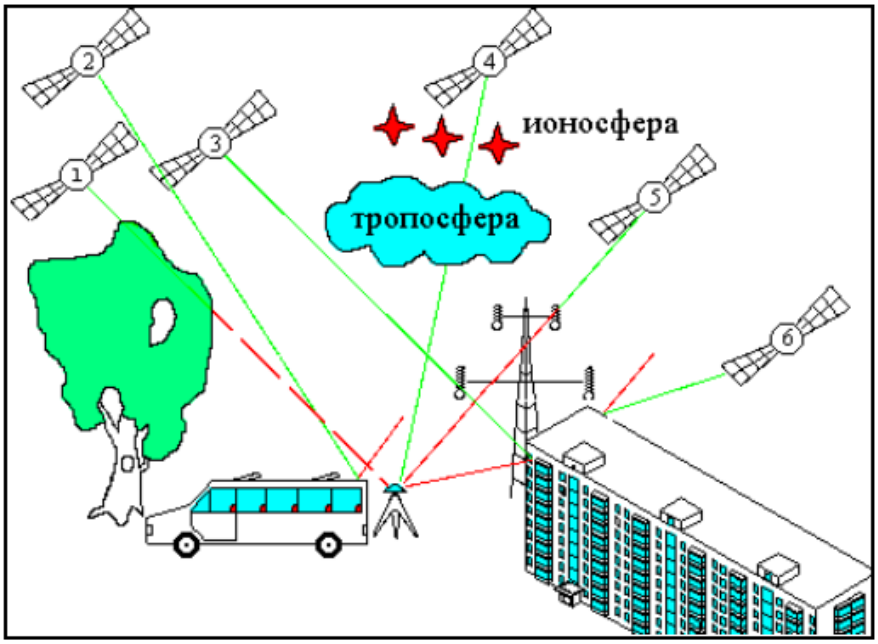

Рисунок 2.9 - Пример некачественного приёма сигналов от спутников в условиях городской территории

Сигнал, исходящий от спутников, встречает следующие препятствия:

- для спутника №1 – сигнал прерывается из-за наличия деревьев и лиственного покрова на них. Даже в период времени, когда деревья не имеют лиственного покрова, наличие стволов деревьев и крупных веток прерывает сигнал на непродолжительный интервал времени;

- для спутника №2 – сигнал экранирует от рядом припаркованного крупного автомобиля;

- для спутника №3 – происходит переотражение сигнала от близлежащего дома, вследствие чего увеличивается значение измеряемой псевдодальности, что вносит свою немалую ошибку. Данный эффект называется многопутностью распространения сигнала. Он появляется в результате вторичных отражений сигнала спутника от крупных препятствий, расположенных в непосредственной близости от приемника. При этом возникает явление интерференции, и измеренное расстояние оказывается больше действительного. Аналитически данную погрешность оценить достаточно трудно, а наилучшим способом борьбы с нею считается рациональное размещение антенны приемника относительно препятствий;

- для спутника №4 – на точность наблюдений оказывают влияние ионосфера и тропосфера. Данные факторы оказывают влияние на распространение сигналов от всех спутников;

- для спутника №5 – сигнал проходит непосредственно через источник сильного электромагнитного излучения (линия электропередачи);

- для спутника №6 – имеет место абсолютное непрохождение сигнала, вызванное наличием крупного препятствия в виде девятиэтажного здания.

Указанные на рисунке причины ухудшения точности измерений комплектом GPS-приёмников (кроме влияния ионосферы и тропосферы) может устранить или хотя бы уменьшить их влияние сам наблюдатель благодаря грамотному планированию измерений. Грамотное планирование заключается в выборе наиболее выгодного места расположения приёмника и выборе лучшего времени для наблюдений (такого при котором можно обеспечить наблюдение достаточного количества спутников с хорошей геометрией их расположения (GDOP)).

При планировании высокоточных измерений обязательным является составление абриса препятствий на точке предполагаемых наблюдений. На рисунке 2.10а представлен пример абриса препятствий без учёта деревьев для одного из пунктов испытательного полигона, на рисунке 2.10б – с учётом деревьев для того же пункта. По внешнему виду данных абрисов можно сделать вывод о том, что в летний период времени наличие лиственного покрова может привести к существенному ухудшению точности GPS-наблюдений.

Абриса - схематически составленный чертеж местности, отображающий объекты, необходимые для составления топографического плана или профиля.

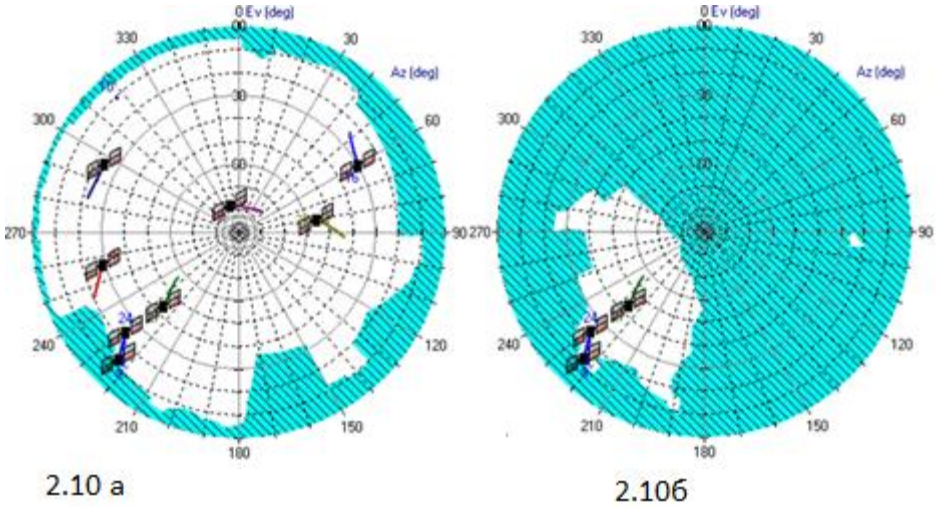

Рисунок 2.10 - Абрисы препятствий на пункте

На рисунке 2.11 представлен результат удачного планирования измерений, при котором минимизировано влияние тех факторов, которые имели место на рисунке 2.9.

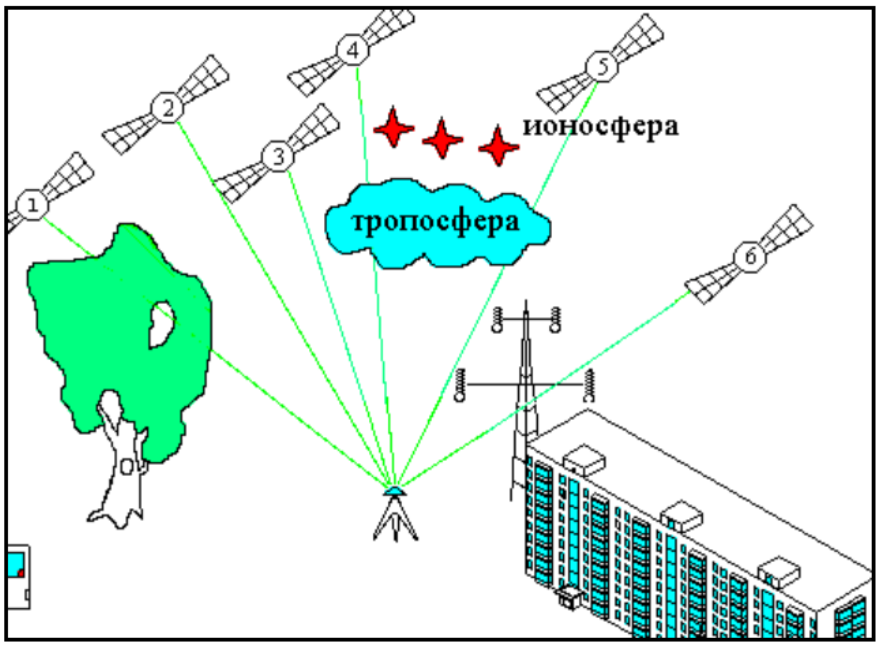

Рисунок 2.11 - Пример качественного приёма сигналов от спутников в условиях городской территории

В данном примере представлены не все факторы, которые могут оказывать влияние на точность GPS-наблюдений, а лишь те, на которые может повлиять наблюдатель.

Как бы совершенна ни была система, существуют два источника погрешностей, которые очень трудно избежать. Наиболее существенные из этих погрешностей возникают при прохождении радиосигналом ионосферы Земли — слоя заряженных частиц на высоте от 120 до 200 км.

Эти частицы существенным образом влияют на скорость распространения света, а, следовательно, и на скорость распространения радиосигналов GPS. А это делает невозможными наши вычисления расстояний до спутников, поскольку они построены на предположении о том, что скорость распространения радиоволн строго постоянна.

Существуют три метода [6], которые можно использовать, чтобы сделать ошибку минимальной. Во-первых, мы можем предсказать, каково будет типичное изменение скорости в обычный день, при средних ионосферных условиях, а затем ввести поправку во все наши измерения. Но, к сожалению, не каждый день является обычным.

Другой способ состоит в сравнении скоростей распространения двух сигналов, имеющих разные частоты несущих колебаний. Таким образом, если мы сравним время распространения двух разночастотных компонент сигнала GPS, то сможем выяснить, какое замедление имело место.

Определение координат по спутниковым наблюдениям может выполняться тремя методами:

-абсолютный;

-дифференциальный;

-относительный.

Абсолютный метод. Сущность абсолютного метода заключается в определении координат при помощи одного приёмника, при этом используется система координат, носителями которой являются как сами группы космических аппаратов, так и спутниковые подсистемы контроля и управления. При этом применяется метод засечки положения приёмника от известных положений групп спутников. Иначе этот метод называется точечным позиционированием.

В абсолютном методе приёмник определяет свои координаты по группировкам спутников (GPS, Глонасс, и т.д.), вне зависимости от других устройств (рис. 2.12):

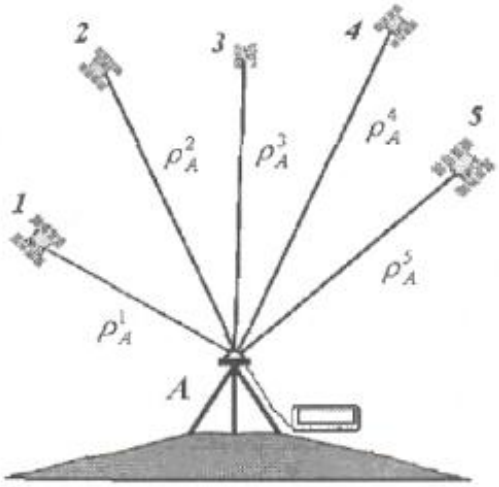

Рисунок 2.12 - Абсолютный метод спутниковых определений

Но данный метод не поддается сравнению с аналогичными методами, так как в других методах позиционирования точность позиционирования гораздо выше.

Дифференциальный метод. Работа наземных и спутниковых функциональных дополнений СНС основана на использовании дифференциального метода [7]. Название метода не имеет никакого отношения к математическому дифференцированию, а происходит от латинского слова differentia – различие. Рассмотрим суть этого метода.

Как уже отмечалось, одним из основных факторов, влияющих на точность СНС, является изменение скорости распространения радиоволн при прохождении их через атмосферу. Эта скорость отличается от той, которая заложена в бортовой приемник для расчета псевдодальности. Вызванные этим погрешности меняются со временем и являются различными в разных местах планеты.

Дифференциальный метод основан на том, что, в пределах ограниченного района и периода времени погрешности из-за распространения радиоволн примерно одинаковы. На земле устанавливается специальная контрольно-корректирующая станция, координаты которой известны с высокой точностью. Приемники, установленные на станции, определяют свои координаты с помощью спутников таким же способом, как и бортовые приемники. Определяют, конечно, не очень точно из-за упомянутых погрешностей

распространения радиоволн. Но поскольку координаты станции заведомо известны, на станции вычисляются поправки в широту, долготу и высоту (разности точных и измеренных значений). Эти поправки автоматически передаются на борт всех ВС, выполняющих полет в районе данной станции. В бортовых приемниках ВС эти поправки вводятся в координаты, полученные со спутников, благодаря чему многократно повышается точность определения координат.

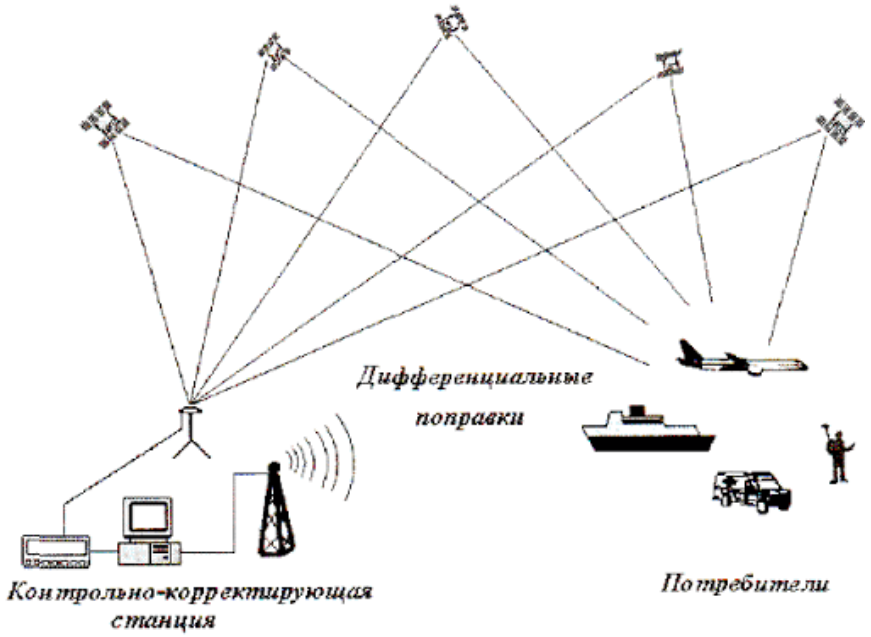

Рисунок 2.13 - Дифференциальный метод определения координат

С помощью такого метода можно практически полностью избавиться от эфемеридных погрешностей и в значительной степени – от погрешностей из-за изменения скорости распространения радиоволн. Разумеется, чем дальше ВС находится от контрольно-корректирующей станции, тем менее точными будут поправки. Погрешность увеличивается в среднем на 1 см на каждый километр удаления от станции.

Разумеется, другие виды погрешностей, например, из-за шумов приемника и многолучевости сигнала, дифференциальный метод устранить не может, поскольку они являются индивидуальными для каждого приемника.

Таблица 2.1 - Значения погрешностей дифференциального метода

Источники и виды погрешностей	При использовании Р-кода, м	При использовании С/А-кода, м
Задержка сигнала в ионосфере	0,10	0,10
Задержка сигнала в тропосфере	-0,10	0,10
Шумы приемника	0,25	1,50
Многолучевость распространения	1,20	1,20
Прочие источники	0,15	0,60
Эквивалентные СКП измерения дальности	2,00	1,20

Разберем дифференциальный метод на практике.

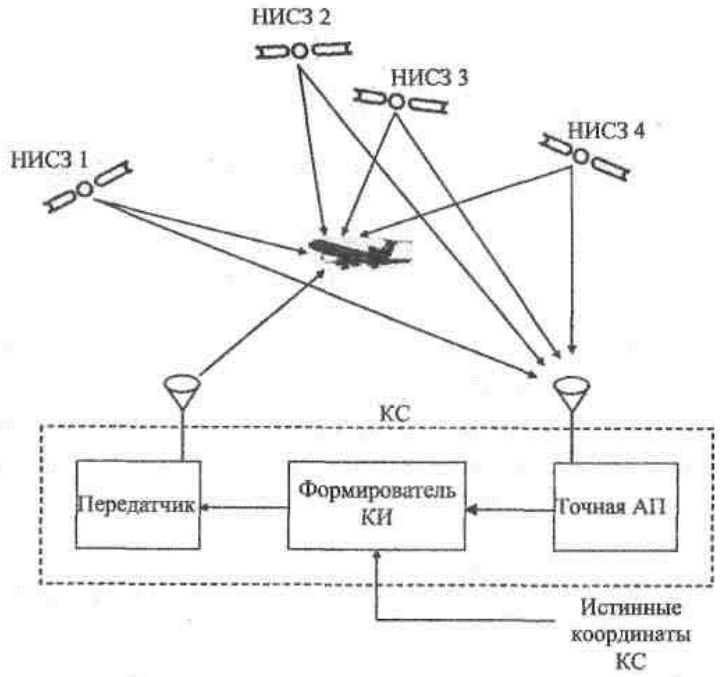

Рисунок 2.14 - Схема реализации дифференциального метода

Сигналы от спутников (НИСЗ 1 - НИСЗ 4) поступают на объект потребителя, например, самолет и на контрольную станцию. На контрольной станции в точной аппаратуре приемника результаты измерений накапливаются, в них отфильтровываются случайные погрешности. Эти данные поступают в формирователь корректирующий информации. Для коррекции информация сравнивается с точными данными контрольной станции, полученными путем геодезической привязки. Сформированные корректирующие поправки через передатчик направляются на объект потребителя.

Этим режимом выявляются систематические части погрешностей эфемерид, уход шкалы времени, влияние ионосферы и тропосферы. Эффект от использования способа зависит от степени пространственной и временной корреляций контрольной станции и объекта потребителя. При сильной корреляции систематическая часть погрешностей будет полностью исключаться.

Дифференциальный режим используется гораздо чаще, чем абсолютный режим, так как при не больших разницах в затрате он дает существенно выше позиционирование(1-2м). Использование дифференциального режима не повышает точность определения координат в хорошую погоду, как и при использовании абсолютного метода. Именно в неблагоприятных условиях, когда имеется задержка сигнала в ионосфере, дифференциальный метод имеет место.

PPP метод. PPP (Precise Point Positioning) подразумевает наблюдения, сделанные одновременно на опорном и определяемом пункте и обрабатываются совместно. Это основное различие между ним и дифференциальным методом, которое приводит к повышению точности решений в PPP методе, но исключает мгновенные решения. В PPP методе определяется вектор, соединяющий

опорный и определяемый пункты, называемый вектором базовой линии. Данный метод может применяться в исключительных случаях, так как коррекция дифстанции сантиметровой точности может работать в радиусе около 1-15 км от нее. К примеру, это могут быть аэропорты для посадки самолетов или геодезические работы.

Важнейшим фактором, влияющим на характеристики PPP, является количество спутников в поле зрения каждой эпохи и качество наблюдений. Например, большее количество спутников улучшает наблюдаемость зенитной и тропосферной задержек. Поэтому одним из возможных способов повышения надёжности этого метода является совместное наблюдение сетей GPS и ГЛОНАСС. Учитывая, что PPP не является дифференциальным методом, он не может разрешать неопределённости несущей фазы, и их необходимо оценивать с помощью определённых измерений. Данный факт делает период конвергенции более длительным, чем в других методах, что требует более длительного периода наблюдения для измерений в режиме статики.

Вывод:

1) абсолютный метод может быть использован в исключительном случае, при хорошей погоде и отсутствия эффекта многолучевости, так как задействование других режимов определения координат покажут похожие результаты координат местонахождения;

2) дифференциальный метод гораздо лучше применяется повседневно, при плохой погоде и в заслоенных районах города (метровая точность), так как дифстанция компенсирует погрешности координат, но минусом считается ограниченная зона действия от базовой станции(<150км);

3) PPP метод, как и абсолютный метод используется в случаях когда требуется сантиметровая точность, но ограничевается дальностью от базовой станции(15 км).

2.7 Сравнительный анализ систем спутниковых навигаций с помощью мультиприемника НАВИА ML8088sE

Однокристальный GNSS приёмник, был испытан в условиях плотной городской застройки с целью демонстрации преимуществ мультисистемной (ГЛОНАСС и GPS) работы в качестве потребительского приёмника.

Испытания однокристального ГЛОНАСС/GPS приёмника[8] в городах Казахстана были проведены для того, чтобы показать, что совместное использование всех видимых спутников ГЛОНАСС в купе с GPS даёт лучшую доступность позиционирования в условиях плотной городской застройки, а в случае плохой доступности позиционирования – лучшую его точность.

При проектировании приёмников, важно было преодолеть проблемы несовместимости аппаратной поддержки ГЛОНАСС и GPS. То есть частотно-модулированный сигнал ГЛОНАСС потребовал более широкой полосы частот, чем сигналы импульсно-кодовой модуляции, используемые GPS, полосовых

фильтров с разными центрами частот и разной скоростью передачи элементов сигнала. И все это – без значительного увеличения стоимости приемника.

При идеальных условиях эксплуатации, спутники из дополнительных группировок будут малоэффективны, так как доступность позиционирования приближается к 100 процентам при использовании только GPS. Присутствие в ионосфере используемых для позиционирования семи, восьми или девяти спутников в режиме фиксации минимизирует суммарную ошибку и дает правильные координаты.

В экстремальных условиях эксплуатации применение только GPS позволяет определить положение, но использование при этом только трёх, четырёх, пяти спутников, сосредоточенных в узкой части небесной полусферы, приводит к плохим значениям DOP (снижение точности или геометрическое снижение точности). Увеличение числа спутников значительно повышает точность, вследствие чего улучшается DOP и усредняется количество многолучевых ошибок. Ограничение числа позиционируемых спутников приводит к наложению многолучевых ошибок на определение координат усиливаемых DOP. Добавление второй или третьей спутниковой группировки предполагает расширение числа видимых спутников, и таким образом, в процессе определения координат участвует большее количество спутников, что приводит к уменьшению ошибок.

Поэтому в экстремальных условиях, где использование только GPS недостаточно, дополнительное применение спутников ГЛОНАСС (и в дальнейшем GALILEO) повышает доступность позиционирования до 100% (за исключением подземных туннелей).

Приемник НАВИА ML8088sE. Глонасс модуль НАВИА ML8088sE предназначен для вычисления текущих координат и скорости объекта в реальном масштабе времени в автономном режиме, формирования секундной метки времени и обмена с внешним оборудованием по последовательным портам RS232.

Рисунок 2.15 - Приемник НАВИА ML8088sE

Принцип действия приемника основан на параллельном приеме и обработке 32-мя измерительными каналами сигналов навигационных КА КНС

ГЛОНАСС в частотном диапазоне L1 (ПТ-код), GPS на частоте L1 (C/A код) и GALILEO на частоте E1.

Глонасс модуль НАВИА ML8088sE, являющийся идеальным решением задач миниатюризации и компактности, выполнен на основе новейшего специализированного набора микросхем (чипсета) STA8088F компании STMicroelectronics.

Глонасс модуль обладает высокой чувствительностью, малым энергопотреблением и малым временем старта.

НАВИА ML8088sE имеет встроенные средства подавления помех, что позволяет ему работать в условиях сложной помеховой обстановки.

Моделирование видимых спутников, усредняемые каждую минуту за полные 24 часа представлены в Таблице 2.2. Среднее число видимых спутников увеличивалось от 4,4 только с GPS, до 7,8 для GPS+ГЛОНАСС, с количеством точек «без фиксации позиции» (No Fix) равным нулю. Причем в режиме «только с GPS» было получено 380 ложных точек что составило около 26% общего времени приёма.

Таблица 2.4 - Точность и доступность GPS и GPS+ГЛОНАСС, в среднем свыше 24 часов

Группа	GPS	GPS+ГЛОНАСС
Видимый спутник	4,4	7,8
Моменты времени с “No Fix”	380 минут	никогда
HDOP	5,3	2,1
Ошибка	x meter	(x 0,4) метров

При применении совмещенного на одном кристалле высокочувствительного приемника появились сигналы от многих других спутников. Имея дополнительные сигналы, приёмник значительно улучшил показатели DOP. Эффект влияния отражений на точность был существенно снижен, вопервых за счёт лучшей геометрии позиционирования, а во-вторых за счёт способности алгоритмов FDE/RAIM поддерживать устойчивость слежения за спутниками. К тому же уменьшилось количество ложных сигналов, способных исказить данные о координатах.

Результаты получены от полностью интегрированного высокочувствительного приемника, каким является приёмник NAVIA ML8088s, выполненного на чипе STA8088s. Он оптимизирован для обнаружения сигналов даже очень низкого уровня и получения результатов, полученных непосредственно от всех спутников, находящихся в поле зрения, вне зависимости от группировки. Это обеспечивает 100-процентную доступность спутников и намного повышает точность в сложных условиях городской застройки.

Как видно на рис.2.16, всего присутствует 7-8 спутников ГЛОНАСС и 8-9 спутников GPS, то есть мульти-GNSS – около 16 спутников. По оси X видим время отслеживания спутников в секундах.

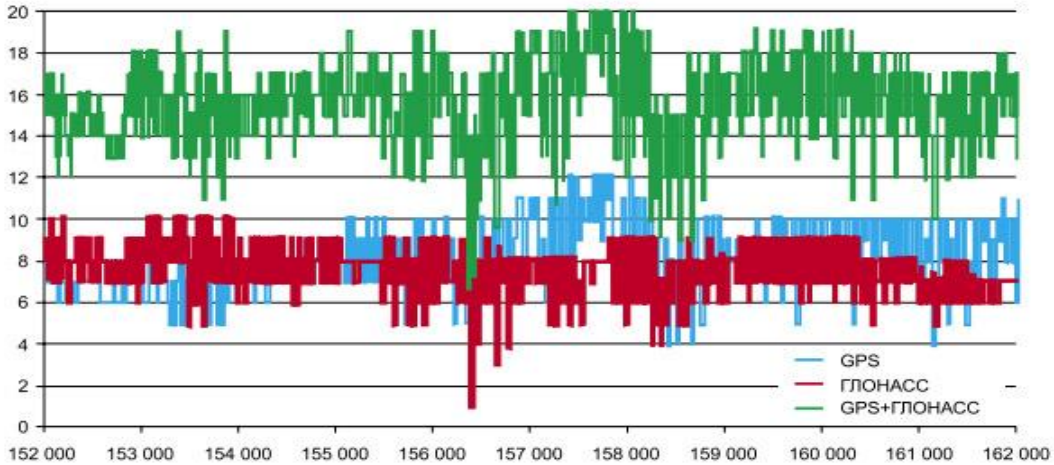

Рисунок 2.16 - GPS (отмечено голубым) против ГЛОНАСС (отмечено красным) и всех отслеживаемых спутников GNSS (отмечено зеленым)

Несмотря на то, что вне туннелей доступность спутников составляет 100%, она может быть ограничена DOP или точностью позиционирования. Как видно на рисунке 2.17, по результатам других испытаний, мульти-GNSS DOP остается ниже 1, как должно быть при 10-16-ти видимых спутников, в то время как DOP только GPS часто выше 4, при этом какие-либо искажения из-за отражений и слабых сигналов значительно увеличивают DOP до 10 в пике.

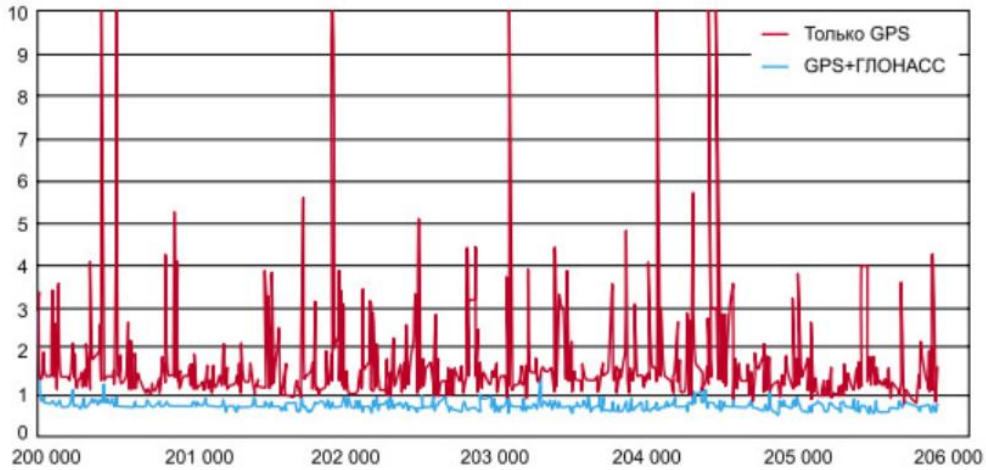

Рисунок 2.17 - Только GPS против совмещённых GPS/ГЛОНАСС показателей снижения точности

Дальнейшие испытания выполнены на более узких городских улицах.

На аэрофотоснимке мы можем увидеть движения транстпорта по дороге. Голубым цветом – только GPS, красным – GPS+ГЛОНАСС, наблюдается значительное улучшение результатов.

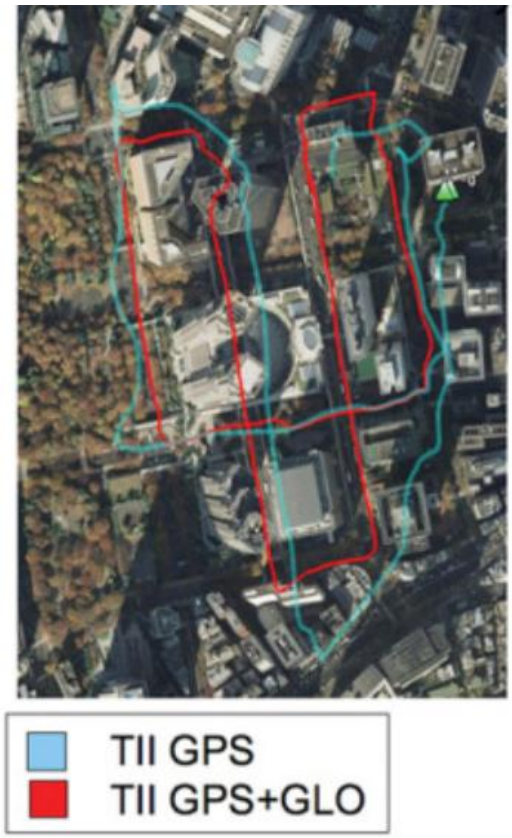

Рисунок 2.18 - Только GPS (голубой) в сравнении с мульти-GNSS (красный)

Испытания в городских условиях будут повторяться по мере развития группировки GALILEO. При наличии 32 каналов можно использовать деление 11/11/10 (GPS/GALILEO/ГЛОНАСС), при наличии полного состава всех трех групп, но в рамках современных требований к навигационным услугам комбинация 14/8/10 является более чем достаточной.

Мультисистемный приемник может включать в себя GPS, ГЛОНАСС и GALILEO при минимально увеличенной стоимости. Имея 32 канала слежения и до 22 видимых спутников, даже в самых суровых городских условиях можно обеспечить 100% доступность и приемлемую точность позиционирования. При проведении тестирования обычно видны 10–16 спутников. Множественность измерений позволяет сделать алгоритмы RAIM и FDE гораздо более эффективными при устранении плохо отражаемых сигналов, а также сводит к минимуму геометрические эффекты оставшегося искажения сигналов.

3 Моделирование радиотракта приемника GPS

Распространение данных в GPS осуществляется тремя диапазонами частот: L1 (1564-1586 МГц), L2 (1218-1238 МГц) и L5 (1163-1187 МГц). Высокочастотные приемные тракты в каждом диапазоне частот не отличаются. Ниже рассмотрен пример приема сигнала на частотах L1.

На рисунке 3.1 можем увидеть структурную схему приемника GPS:

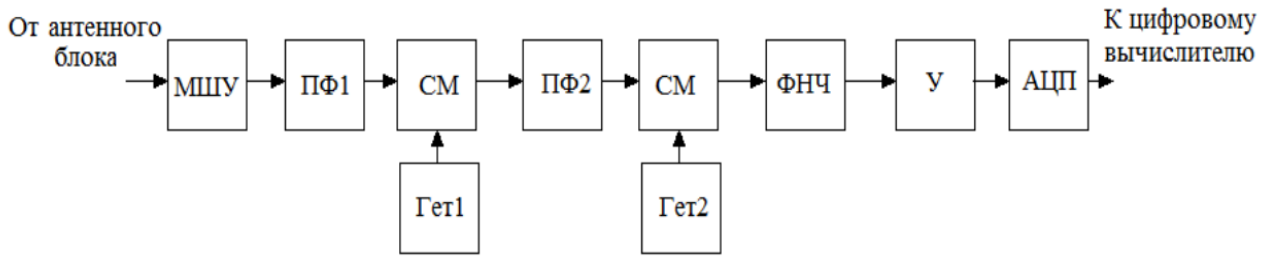

Рисунок 3.1- Структурная схема приемника GPS

Сигнал поступивший от антенного блока идет на малошумящий усилитель (МШУ). На ПФ1(полосовой фильтр) сигнал проходит высокочастотную фильтрацию. В данном сегменте ПФ1 должен принимать сигнал на его средней частоте и должен минимизировать зеркальную помеху. Первая промежуточная частота (ПЧ) составляет 102 МГц, а центральная частота диапазона L1 – 1574 МГц. Следовательно, от ПФ1 требуется достаточное ослабление на частотах 1680 МГц и больше. После ПФ1, сигнал подвергается первому преобразованию частоты, что в итоге спектр сигнала передается с частотой 102 МГц (ПЧ1). После преобразования частоты требуется повторная фильтрация с помощью ПФ2. Главная частота у ПФ2 равна 102 МГц, а полоса пропускания – около 20 МГц. Затем сигнал проходит по второму преобразованию частоты, и дальше он передается на вторую промежуточную частоту 10 МГц. Пройдя через второе преобразование частоты, а затем его фильтрации и усиления, данный сигнал идет на АЦП, и дальше в свою очередь на аппаратуру пользователя(компьютер).

Моделирование приемного высокочастотного тракта было произведено в среде Simulink пакета MatLab. Ниже можно увидеть схему приемо-передатчика (рисунок 3.2).

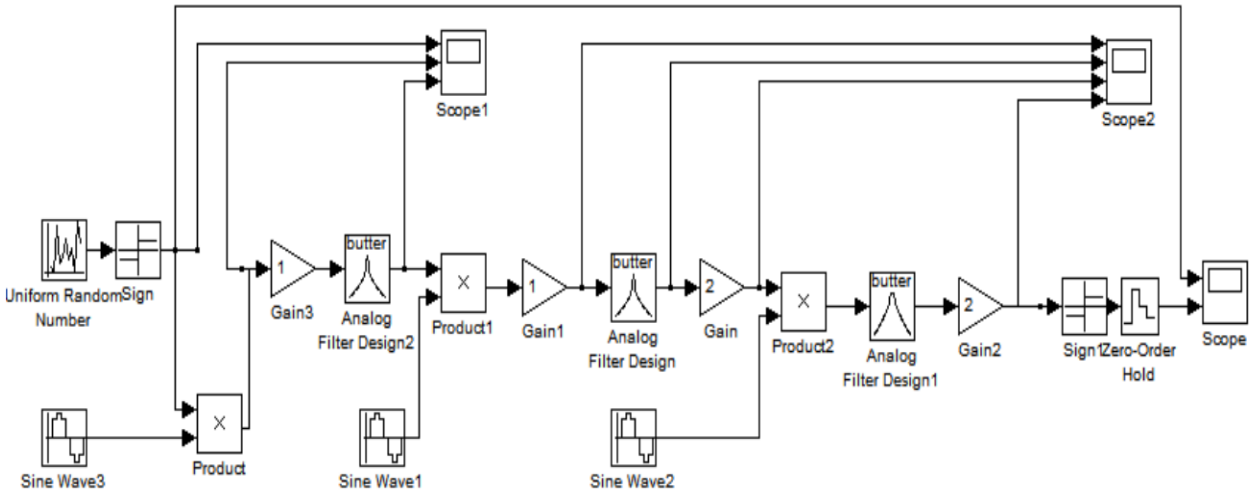

Рисунок 2. Схема приемо-передатчика

Исходя из того, что среда MATLAB может быть требовательна к системному блоку, и высчитать частоты, на которых работает система GPS не простая, то было принято решение номинировать частотные и временные параметры. Следовательно, частоты, используемые в системе, были снижены в 10^{-7} раз:

-принимаемая частота – 157,4;

-частота первого гетеродина – 147,3;

-первая ПЧ – 10,2;

-частота второго гетеродина – 9,2;

-вторая ПЧ – 1.

Блоки Uniform Random Number, Sign, Sine Wave3 и Product выполняют функции передатчика радиосигнала, в состав которого входят генератор информационной последовательности (Uniform Random Number, Sign) и BPSK-модулятор (Sine Wave3, Product). Ниже изображены графики информационной последовательности сигнала, поступающего в ЛС (рисунок 3.3):

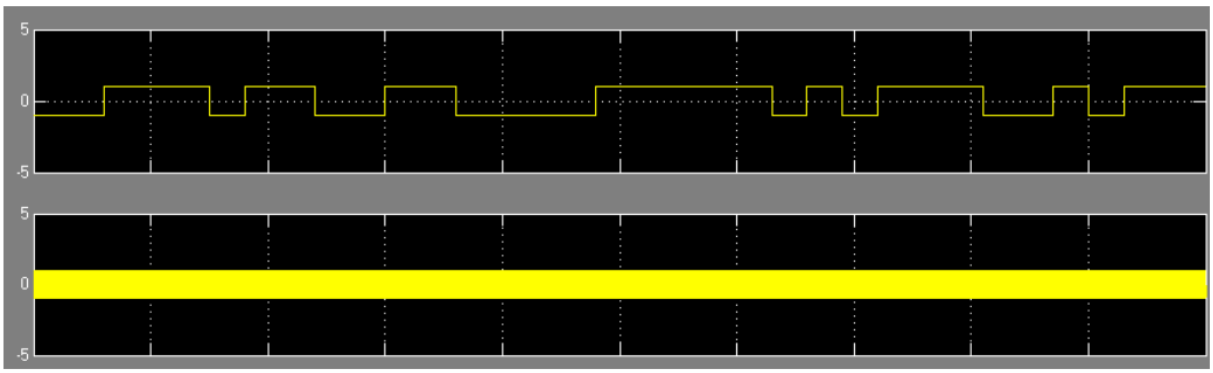

Рисунок 3.3 - Информационная последовательность и сигнал в ЛС

Принятая последовательность идет на МШУ (малошумящий усилитель), дальше на ПФ (полосовой фильтр), который настроен на прием сигналов на

частоте 1574 МГц. Полоса пропускания этого фильтра – 100 МГц (10 – после нормировки). Ниже представлен график сигнала после фильтрации (рисунок 3.4):

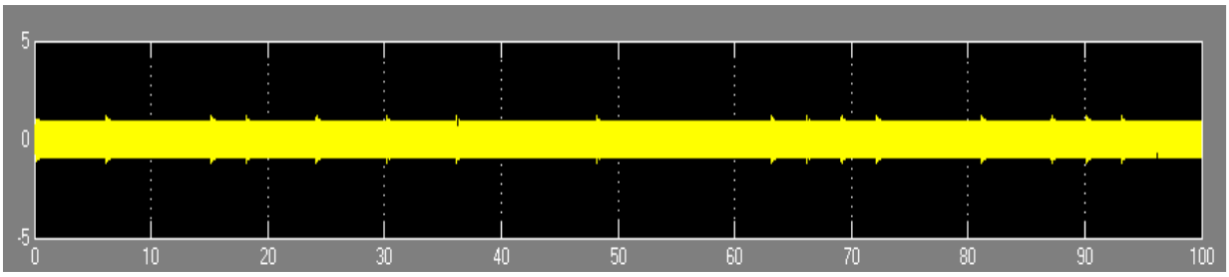

Рисунок 3.4 - Сигнал после первого полосового фильтра

На графике выше можем увидеть, что фильтр есть причина искажений при смене значений битов. Дальше производится два преобразования с понижением частоты сигнала. Первая промежуточная частота составляет 102 МГц. Полоса пропускания Analog Filter Design – 2 МГц (0,2). Графики сигнала после первого ПЧ и после фильтрации (рисунок 3.5):

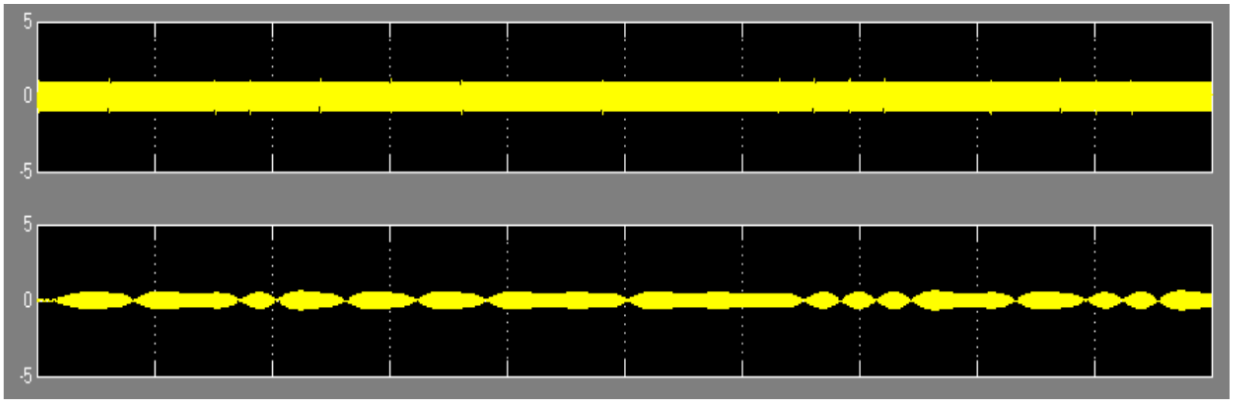

Рисунок 3.5 - Сигнал после первого ПЧ и после второго фильтра

Здесь можно увидеть, что второй ПФ тоже вносит искажения. После фильтрации сигнал снова усиливается и поступает на второй ПЧ, а после него – на третий полосовой фильтр. Значение второй промежуточной частоты – 10,23 МГц (1,023) – скорость передачи данных системы GPS. Полоса пропускания фильтра – 2 МГц (0,2). Ниже представлен график сигнала после ПЧ2 и фильтрации (рисунок 3.6):

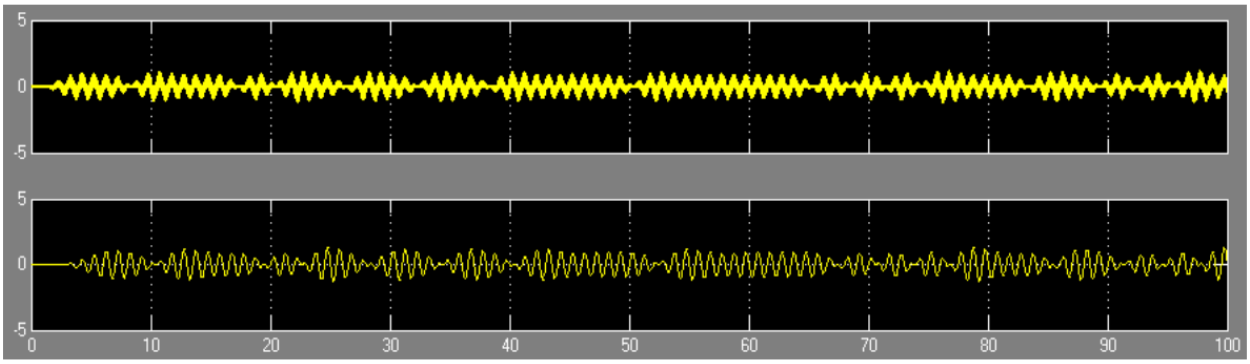

Рисунок 3.6 - Сигнал после второго ПЧ и после третьего фильтра

Восстановленную последовательность можем увидеть на графике ниже (рисунок 3.7). Для того, чтобы убедиться, что в восстановленной последовательности нет ошибок, на рисунке сверху изображена исходная информационная последовательность.

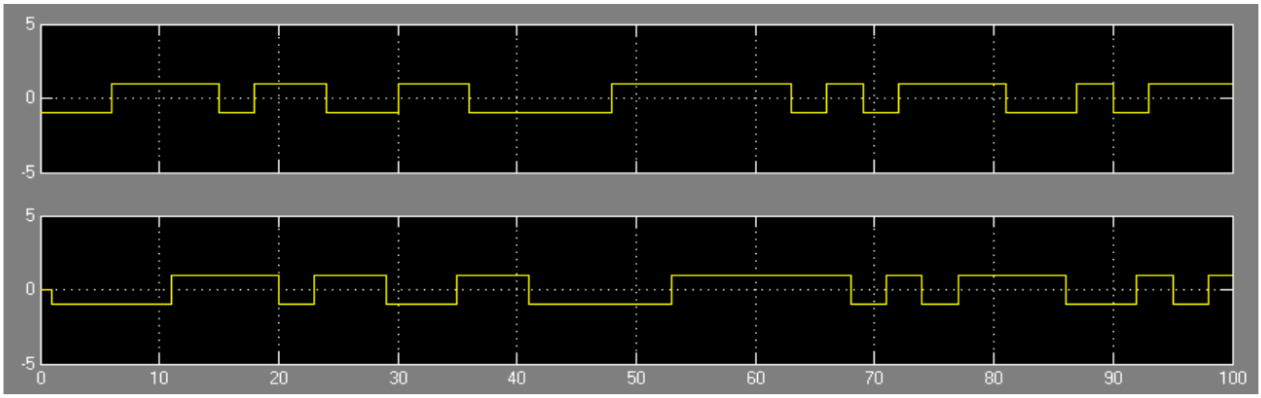

Рисунок 3.7 - Исходная и восстановленная последовательности

В данной работе мы рассмотрели практическую часть моделирования высокочастотного тракта приемника GPS. Применение двойного преобразования частоты не является одним возможным вариантом, хотя и имеет свои достоинства и недостатки. Данные, полученные с графиков позволят в будущем сравнить их с другими вариантами реализации высокочастотного тракта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были рассмотрены различные средства навигации через космос. Был произведен анализ принципа определения координат и анализ существующих погрешностей, а также методы по их уменьшению. Можно сделать вывод, что использование дифференциального режима может существенно снизить погрешность позиционирования даже в неблагоприятных условиях. Относительное позиционирование позволяет добиться очень точных результатов, но это окупается дальностью до ее дифстанции.

Также по результатам исследования, применение двух систем спутниковой навигации является более рациональным решением, чем использование только одной системы.

Совокупность методов повышения точности позиционирования в будущем позволят использовать точность по назначению.

Данные системы на сегодня являются абсолютно бесплатными и доступными для каждого пользователя. Данные системы развиваются с каждым днем, создание приложений и интерфейсов значительно облегчают жизнь человеку. Развитие в данном направлении позволит развиваться стране и с каждым днем двигать ее вперед.

Перечень принятых сокращений, терминов

GPS (Global Positioning System)- система глобального позиционирования
ГЛОНАСС- Глобальная спутниковая навигационная система
СНС – Спутниковая система навигации
RTK (Real Time Kinematic) - кинематика в реальном времени
DOP (dilution of precision) – снижение точности
НИСЗ - навигационный искусственный спутник Земли
ГГС – государственная геодезическая сеть
БС – базовая станция
GNSS - Глобальная навигационная спутниковая система
КА – космический аппарат
НКА - навигационный космический аппарат

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 GLONASS. The interface control document (ed. 5.1), Moscow, Joint-Stock Company "Institute of Space Device Engineering", 2008. – 74с.

2 Technique of construction and analysis of GLONASS precision fields in a specific zone of airspace, 2015. – 122с.

3 Instruction for the development of survey ground and survey of the situation and the relief with the use of global navigation satellite systems GLONASS and GPS, 2002. - 124с.

4 Joel, McNamara GPS For Dummies / Joel McNamara. - Moscow: Science of GPS, 2017. - 408 с.

5 Захаров В.If., Зиенко А.С., Куницын В.Е. Распространение радиосигналов GPS при различной солнечной активности // Научно-технические серии. Выпуск 1. Спутниковые радионавигационные системы. Коллективная монография / Под ред. М.С. Ярлыкова. - М.: Радиотехника, 2013. -186с.

6 Сипаров С.В., Шестаков И.Н. Способы, повышающие эффективность использования спутниковых радионавигационных систем. // Межвузовский тематический сборник научных трудов “Проблемы эксплуатации и совершенствования транспортных систем”, 2006. – 256с.

7 Системы дифференциальной коррекции мониторинга. Интерфейсный контрольный документ. – Редакция 1 М.; РНИИ КП, 2012. – 144с.

8 Research of combined GLONASS/GPS receiver accuracy / O. N. Skrypnik, E. E. Nechaev, R. O. Aref'ev, N. G. Astrahanceva, 2015. – 240с.