

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
«МЭИ»

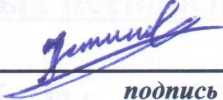
УДК: 621.396.98.001.57.001.5(043.3)

Институт ИРЭ
Кафедра радиотехнических систем
Направление 210400 - Радиотехника

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Программа: Радиотехнические системы связи и навигации

Тема: Исследование навигационного приемника, работающего по сигналам наземных псевдоспутников

Студент ЭР-20-07  Устинов А.Ю.
группа подпись фамилия, и., о.,

Научный зав. кафедрой. профессор  Перов А. И.
руководитель должность звание подпись фамилия, и., о.,

Консультант должность звание подпись фамилия, и., о.,

Консультант должность звание подпись фамилия, и., о.,

Магистерская диссертация допущена к защите

Зав.кафедрой профессор  Перов А. И.
звание подпись фамилия, и., о.,

Дата 11.06.2013

МОСКВА

2013 г.

Отзыв

руководителя па магистерскую работу студента Устинова А.Ю.
«Исследование навигационного приемника, работающего по сигналам наземных псевдоспутников»

Устинов А.Ю. обучается на кафедре радиотехнических систем с 2011 г. сначала как бакалавр, а потом как магистр.

Магистерская диссертация Устинова А.Ю. посвящена исследованию навигационного приемника, работающего по сигналам псевдоспутников, расположенных на Земле. Особенностью построения таких навигационных приемников является, во-первых, существенно ухудшение геометрического фактора, что снижает точность навигационных определений, а во-вторых, большой динамический диапазон мощности навигационного сигнала на входе приемника при его движении относительно псевдоспутников.

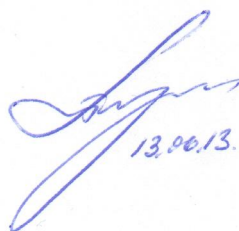
В работе проведен анализ значений горизонтального и вертикального геометрического фактора при использовании наземных псевдоспутников и движении объекта (потребителя) на заданной траектории. Рассчитана энергетика радиолинии и определен диапазон изменения мощности навигационного сигнала на входе приемника. В магистерской работе рассмотрен навигационный приемник, работающий по перспективным сигналам ГЛОНАСС с кодовым разделением. Проведен синтез алгоритма слежения за пилотной компонентой сигнала с модуляцией на поднесущих частотах ВОС(1,1). Разработана имитационная модель следящей системы за задержкой сигнала и проведено имитационное моделирование.

По материалам проведенных исследования сделаны два доклада на Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (2012 и 2013 гг.).

За время работы над магистерской диссертацией Устинова А.Ю. изучил и освоил ряд новых разделов теории спутниковой навигации, принципов построения аппаратуры потребителей СРНС и усовершенствовал опыт имитационного моделирования сложных радиотехнических систем.

Резюме. Студент Устинов А.Ю. заслуживает присвоения квалификации магистра по направлению «Радиотехника».

Руководитель
д.т.н., профессор



13.06.13.

Перов А.И.

РЕЦЕНЗИЯ

на магистерскую диссертацию

студента группы ЭР-20-07 Устинова А.Ю. на тему «Исследование навигационного приемника, работающего по сигналам наземных псевдоспутников»

Работа посвящена разработке и исследованию следящей системы за задержкой сигнала навигационного приемника, работающего по сигналам наземных псевдоспутников. Для решения данной задачи, в работе синтезируется следящая система за задержкой пилотной компоненты перспективного сигнала ГЛОНАСС с кодовым разделением.

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений.

Во введении дается постановка задачи, общая характеристика погрешностей определения координат при использовании спутниковых навигационных систем и их особенности при использовании наземных псевдоспутников.

В первой главе описывается постановка задачи определения координат потребителя, движущегося по заданной траектории, с использованием сигналов наземных псевдоспутников.

Во второй главе анализируется геометрический фактор при работе навигационного приемника по сигналам псевдоспутников, размещенных на Земле. Проводится оптимизация размещения псевдоспутников в заданной области пространства с целью снижения его значения.

В третьей главе приводится расчет энергетических соотношений при приеме навигационных сигналов от псевдоспутников и движении потребителя по заданной траектории.

В четвертой главе описываются особенности и характеристики новых сигналов ГЛОНАСС с кодовым разделением, которые также планируется использовать и для наземных псевдоспутников. Описываются характеристики сигналов с модуляцией на поднесущих частотах вида ВОС(1,1).

В пятой главе проводится синтез следящей системы за задержкой сигнала с модуляцией ВОС(1,1). Получены структурные схемы временного дискриминатора, рассчитаны его дискриминационные характеристики, синтезирован фильтр следящей системы за задержкой сигнала. В этой же главе составлена цифровая модель разработанной следящей системы и приведены результаты моделирования.

В заключении перечислены основные результаты работы, в приложении представлен исходный код программы имитационного моделирования.

Диссертационная работа выполнена на высоком уровне. Устинов А.Ю. продемонстрировал глубокие знания специальных и общетехнических дисциплин и умение вести самостоятельные научные исследования.

В работе имеется ряд недостатков:

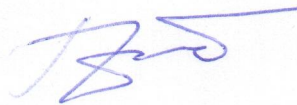
1) Из расчета энергетических характеристик принимаемых навигационных сигналов в гл. 3 следует, что отношение P_c/N_0 меняется при движении потребителя по заданной

траектории от 64,5 дБГц до 114 дБГц. Однако моделирование проведено лишь для фиксированного значения 64,5 дБГц на всем интервале приема и обработки.

2) В Заключении отмечено, что ухудшение геометрического фактора при работе по сигналам наземных псевдоспутников компенсируется повышением точности измерения дальности синтезированной следящей системе за задержкой сигнала. Однако это утверждение не подтверждается исследованиями и расчетами в гл. 1-5.

Отмеченные недостатки не снижают высокого уровня оценки работы. Диссертация Устинова А.Ю. соответствует требованиям, предъявляемым к выпускным работам, и заслуживает высокой оценки. Устинов А.Ю. заслуживает присуждения ученой степени магистра по направлению «Радиотехника».

Рецензент
зав. кафедрой РПУ МЭИ(ТУ)
д.т.н., профессор



Ю.А.Гребенко

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

«МЭИ»

Институт ИРЭ Кафедра радиотехнических систем

Направление 210400 - Радиотехника

ЗАДАНИЕ НА МАГИСТЕРСКУЮ
ДИССЕРТАЦИЮ

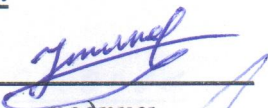
по программе подготовки магистров Радиотехнические системы
связи и навигации

Тема Исследование навигационного приемника, работающего
по сигналам наземных псевдоспутников

Время выполнения работы с 01.09.2011 г. по 01.07.2013 г.

Студент Устинов А.Ю.
Фамилия, и., о.

ЭР-20-07
группа


подпись

Научный руководитель зав. кафедрой, профессор Перов А.И.
должность, звание, фамилия, и., о.

Консультант _____
должность, звание, фамилия, и., о.

Консультант _____
должность, звание, фамилия, и., о.

Зав. кафедрой профессор Перов А.И.
звание, фамилия, и., о., *подпись*, дата утверждения задания

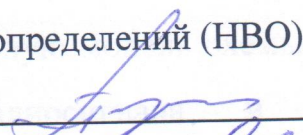
Место выполнения научной работы кафедра РТС

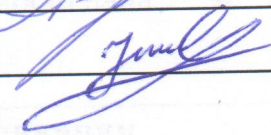
Москва

« 15 » сентября 2011 г.

1. Обоснование выбора темы диссертационной работы

Спутниковая радионавигационная система (СРНС) ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система) в настоящее время имеет широкий спектр применения, который неуклонно расширяется. Однако СРНС имеет уязвимость для средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ), в том числе и для высокоточных сигналов с санкционированным доступом. Одним из способов решения данной проблемы может быть предложена система псевдоспутников наземного дополнения к СРНС ГЛОНАСС. В перспективе наземная система псевдоспутников повышает устойчивость к средствам РЭБ за счет более высокого значения сигнал/шум, по сравнению с сигналами с орбитальных спутников, и увеличивает точность позиционирования, за счет отсутствия ионосферных и эфемеридных погрешностей, т.к. псевдоспутники расположены на земле, в заранее известных координатах. Необходимо исследование соответствующего навигационного приемника, работающего по сигналам наземных псевдоспутников. Также следует определиться с взаимным расположением псевдоспутников относительно потребителя, т.к. оно является одним из главных факторов определяющих точность навигационно-временных определений (НВО).

Научный руководитель  дата 15.09.2011

Студент  дата 15.09.2011

2. Консультации по разделу

Подпись консультанта _____ дата _____

3. Консультации по разделу

Подпись консультанта _____ дата _____

4. План работы над магистерской диссертацией

№ п/п	Содержание разделов	Срок выполнения	Трудоёмкость в %
I.	<p align="center">Теоретическая часть</p> <p>Изучить понятие и метод расчета геометрического фактора в СРНС, а также его влияние на НВО;</p> <p>Определить наилучшее взаимное расположение псевдоспутников относительно потребителя;</p> <p>Изучить перспективные радиосигналы СРНС;</p> <p>Провести расчет энергетических характеристик навигационной радиолинии;</p> <p>Изучить и синтезировать схему слежения за задержкой радиосигнала.</p>	<p>03.2012</p> <p>10.2012</p> <p>12.2012</p> <p>01.2013</p> <p>04.2013</p>	45%
II.	<p align="center">Экспериментальная часть</p> <p>Составить компьютерную модель определения геометрического фактора в СРНС и провести моделирование на ЭВМ;</p> <p>Составить компьютерную модель схемы слежения за задержкой радиосигнала и провести моделирование на ЭВМ.</p>	<p>11.2012</p> <p>05.2013</p>	35%
III.	<p align="center">Публикации</p> <p>Тезисы 1 доклада на НТК студентов и аспирантов МЭИ;</p> <p>Тезисы 1 доклада на НТК студентов и аспирантов МЭИ.</p>	<p>02.2012</p> <p>02.2013</p>	5%
IV.	<p align="center">Оформление диссертации</p> <p>Написание текста диссертации;</p> <p>Оформление записки и иллюстративного материала.</p>	<p>01.05.13</p> <p>05.06.13</p>	15%

5. Рекомендуемая литература

1. Бакитько Р.В., Болденков Е.Н. и др. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010.
2. Перов А.И. Основы построения спутниковых радионавигационных систем. Учеб. пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2012.
3. Перов А.И. Методы и алгоритмы оптимального приема сигналов в аппаратуре потребителей спутниковых радионавигационных систем. Учеб. пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2012.
4. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. Учеб. пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2003.
5. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005.

6. Краткие сведения о студенте:

Домашний адрес Моск. обл., г. Электросталь, д. 13, корп. 5, кв. 124.

Телефон служебный _____ домашний _____

СОДЕРЖАНИЕ

Аннотация.....	3
Введение.....	4
1. Постановка задачи. Исследуемая модель.....	9
2. Критерий определения наилучшего взаимного расположения псевдоспутников, относительно потребителя.....	11
2.1. Алгоритм определения горизонтального коэффициента геометрии. Расчетная модель в среде имитационного моделирования MATLAB.....	16
3. Расчет энергетических характеристик навигационной радиолинии.....	27
4. Перспективные радиосигналы в спутниковой радионавигационной системе и системе псевдоспутников.....	31
5. Синтез системы слежения за задержкой радиосигнала. Модель системы в среде имитационного моделирования MATLAB.....	40
Заключение.....	60
Использованная литература.....	62
Приложение.....	63

АННОТАЦИЯ

Тема магистерской диссертации: «Исследование навигационного приемника, работающего по сигналам наземных псевдоспутников», автор Устинов А.Ю. индекс УДК 621.396.98.001.57.001.5(043.3), количество страниц 62 (без приложений), 23 иллюстрации.

Спутниковая радионавигационная система (СРНС) ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система) в настоящее время имеет широкий спектр применения, который неуклонно расширяется и в настоящее время охватывают авиацию, мореплавание, железнодорожный и автомобильный транспорт, геодезию и картографию, геодинамику и сейсмологию, военное дело, космонавтику, сельское хозяйство, системы связи и телекоммуникаций и т.д. Однако СРНС имеет уязвимость для средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ), в том числе и для высокоточных сигналов с санкционированным доступом. В случае недоступности решения СРНС или решения с неприемлемой погрешностью, в данной работе предложена дополнительная система псевдоспутников.

Данная система состоит из пяти псевдоспутников (ПС), расположенных на земле. Псевдоспутники являются наземным дополнением к орбитальной группировке спутников СРНС ГЛОНАСС, которые непрерывно излучают сигнал с кодовым разделением, схожий по параметрам с сигналом, принятым для СРНС ГЛОНАСС. Наземная система псевдоспутников повышает устойчивость к средствам РЭБ за счет более высокого значения сигнал/шум, по сравнению с сигналами с орбитальных спутников, и увеличивает точность позиционирования, за счет отсутствия ионосферных и эфемеридных погрешностей, т.к. псевдоспутники расположены на земле, в заранее известных координатах.

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей СРНС является пространственное определение координат потребителя, составляющих его скорости и текущего времени. Навигационные определения в аппаратуре потребителей системы ГЛОНАСС осуществляются на основе беззапросных измерений псевдодальностей и радиальных псевдоскоростей до четырех и более спутников (или трех спутников при использовании дополнительной информации) с учетом информации, содержащейся в навигационных сообщениях, передаваемых в радиосигналах этих спутников. Для решения навигационной задачи из навигационного сообщения извлекаются данные о параметрах движения навигационных спутников на соответствующие моменты времени. В результате обработки этих данных в навигационной аппаратуре потребителя (НАП) обычно определяются три координаты потребителя, величина и направление вектора его скорости, текущее время (местное или в шкале Госэталона Координированного Всемирного Времени UTC(SU), или по другому, UTC (ГЭВЧ) (ГЭВЧ — Государственный эталон времени и частоты).

Таким образом, в инерциальной геоцентрической системе координат $Ox_0y_0z_0$, должен быть определен расширенный вектор состояния потребителя $\Pi = \begin{bmatrix} x & y & z & t & V_x & V_y & V_z \end{bmatrix}^T$, где x, y, z — координаты потребителя; V_x, V_y, V_z — составляющие вектора скорости потребителя; t — текущее время (в той или иной временной шкале) [1].

Элементы вектора Π недоступны непосредственному измерению с помощью радиосредств. У принятого радиосигнала могут измеряться те или иные его параметры, например задержка или доплеровское смещение частоты.

Измеряемый в интересах навигации параметр радиосигнала называют радионавигационным параметром (РНП), а соответствующий ему геометрический параметр – навигационным (НП) [2]. Поэтому задержка сигнала τ и доплеровское смещение частоты f_D являются радионавигационными параметрами, а соответствующие им дальность до объекта R и радиальная скорость сближения объектов $V_p = \dot{R}$ служат навигационными параметрами, связь между которыми задается соотношениями:

$$R = c\tau, V_p = f_D\lambda,$$

где c - скорость света, λ - длина волны излучаемого навигационным спутником (НС) сигнала.

Для решения навигационной задачи, т.е. для нахождения вектора потребителя П, используют функциональную связь между навигационными параметрами и компонентами вектора потребителя. Соответствующие функциональные зависимости принято называть навигационными функциями. Конкретный вид навигационных функций обусловлен многими факторами: типом НП, характером движения НС и потребителя, выбранной системой координат и т.д.

Зависимость между дальностью объекта до спутника и пространственными координатами потребителя имеет вид

$$\tilde{R}_i = R_{ucm,i} + R' + \delta R = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} + R' + \delta R,$$

где $\tilde{R}_i = c\tilde{\tau}_i$ - псевдодальность от i -го НС до потребителя, R' - одно из слагаемых погрешности, вызванное разностью бортовой шкалы времени НС и шкалы времени потребителя, δR - прочие слагаемые погрешности определения псевдодальности (ионосферная, эфемеридная и т.д.), x_i, y_i, z_i - координаты i -го НС, x, y, z - координаты потребителя, c - скорость света в вакууме.

Точность определения координат потребителя существенно зависит от условий распространения сигнала в атмосфере, маневренности потребителя, алгоритмов обработки сигналов в НАП и ряда других факторов.

Итоговая точность навигационно-временных определений (НВО) определяется двумя типами погрешностей: погрешностями, возникающими на этапе первичной обработки, и погрешностями, соответствующими этапу вторичной обработки. Так как при первичной обработке формируется оценка псевдодальностей и псевдоскоростей, погрешности данного этапа – это погрешности определения псевдодальности и псевдоскорости. На этапе вторичной обработки оценки псевдодальностей и псевдоскорости пересчитываются в оценки координат потребителя, поэтому погрешности этого этапа определяются как погрешностями, вносимыми на этапе первичной обработки, так и факторами, влияющими на эффективность такого пересчета, т.е. вносимыми на этапе вторичной обработки [2].

Кроме разделения погрешностей по этапам обработки сигнала, погрешности делятся на медленно меняющиеся и быстро меняющиеся, относительно времени обработки сигнала. К медленно меняющимся погрешностям относятся ионосферная погрешность и эфемеридная погрешность.

Эфемеридная погрешность (погрешности определения координат спутника). Эти ошибки возникают в результате расхождения между фактическим положением спутника и его расчетным положением, которое определяется по данным эфемерид, передаваемых с борта спутника. Как правило, значение этой погрешности не превышает 6-7 м.

Ионосферные погрешности (изменение задержки прохождения сигнала через ионосферу). При распространении радиосигнала в свободном пространстве его скорость равна скорости света. В реальности при распространении сигнала от спутника к приемнику он проходит через ионосферу Земли - слой заряженных

частиц на высоте примерно 100–1000 км. При этом скорость распространения сигнала изменяется, что приводит к изменению времени распространения сигнала от спутника до приемника, т.е. возникает дополнительная задержка, которая снижает точность определения расстояния до спутников, а, следовательно, не позволяют точно вычислить координаты. Эти задержки могут давать ошибки определения местоположения порядка 20–30 м днем и 3–6 м ночью.

Соответственно, ионосферная и эфемеридная погрешности вносят наибольший вклад в общий бюджет погрешностей измерений, проводимых по орбитальным спутникам СРНС ГЛОНАСС.

В работе представлена вспомогательная система псевдоспутников, расположенных на земле. Данная система представляет собой наземное дополнение к орбитальной группировке спутников ГЛОНАСС. Важным преимуществом для работы по псевдоспутникам является отсутствие влияния ионосферной погрешности, т.к. работа системы псевдоспутников предполагается в нижнем слое атмосферы до 50 км, где степень ионизации является не существенной, а так как система располагается на земле по заранее известным координатам, то нет необходимости в эфемеридном обеспечении, что исключает влияние погрешности эфемерид.

Также одной из причин недоступности нахождения координат потребителя или нахождения координат потребителя с неприемлемой точностью, является РЭБ. Составными частями РЭБ являются радиоэлектронное подавление и радиоэлектронная защита. Объектами воздействия в ходе РЭБ являются электромагнитные поля (волны), радиоэлектронные средства и системы. Для создания радиопомех используются активные и пассивные средства. К активным относятся средства, которые для формирования излучений используют принцип генерирования (например, передатчики, станции помех). Пассивные средства - используют принцип отражения (переизлучения) (например, дипольные и уголкового отражатели и др.). Предлагаемая система псевдоспутников может быть

использована в преодолении активных средств РЭБ или уменьшения их влияния за счет выигрыша в отношении сигнал/шум.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ИССЛЕДУЕМАЯ МОДЕЛЬ

В данной работе поставлена задача исследования системы псевдоспутников, для этого рассмотрим следующую модель, представленную на рис. 1.

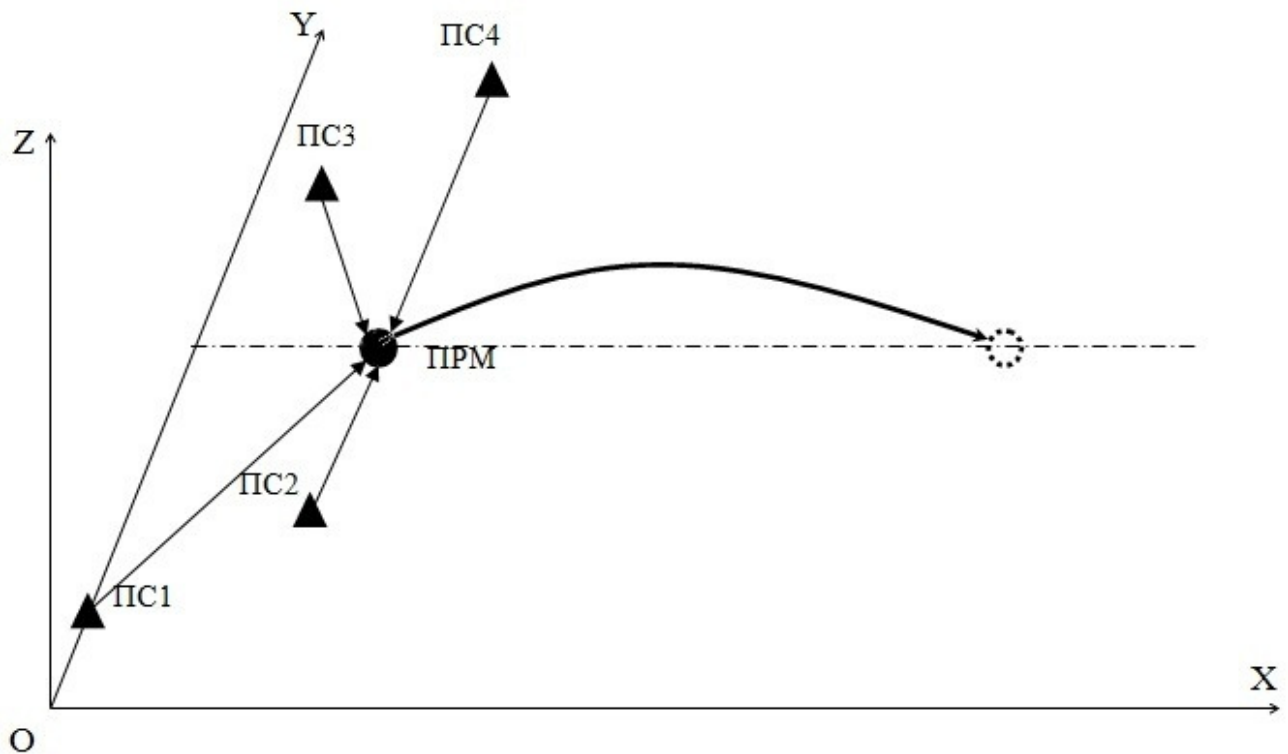


Рис. 1. Исследуемая модель

На земле расположены 4 псевдоспутника (ПС) с заранее известными координатами. ПС могут быть мобильными, т.е. по необходимости менять своё местоположение, тем самым меняя рабочую зону, но для данного исследования полагаем, что псевдоспутники не движутся – имеют постоянные координаты по осям X и Y, а по оси Z координаты ПС отличаются не более чем на 60 м, что обусловлено предполагаемыми неровностями рельефа. Максимальное расстояние между наиболее удаленными псевдоспутниками примем равным 200 км. Это ограничение выбрано на основе предположений о беспрепятственном расположении псевдоспутников, их видимости и точности проводимых НВО.

Приемник потребителя (ПРМ), для примера установлен на ракете, так же для простоты исследования предположим, что координаты ракеты по оси Y не меняются, т.е. ракета взлетает и летит к цели вдоль оси X по намеченной баллистической траектории. В реальности скорость ракеты меняется на всей протяженности полета, но для данного исследования будем полагать, что горизонтальная скорость полета ракеты максимальна в любой точке траектории и равна 5000 м/с, т.е. ракета является высокодинамичным потребителем. Максимальная дальность полета ракеты ограничена 300 км. Потолок полета ракеты установлен равным 50 км.

ПС непрерывно излучают навигационный сигнал с кодовым разделением, схожий по параметрам с сигналом, принятым для СРНС ГЛОНАСС.

2. КРИТЕРИЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАИЛУЧШЕГО ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ПСЕВДОСПУТНИКОВ, ОТНОСИТЕЛЬНО ПОТРЕБИТЕЛЯ

Выбор состава и конфигурации наземной группировки ПС, аналогично, как и орбитальной группировки НС, обеспечивает заданную рабочую зону, непрерывность НВО, возможность реализации различных методов НВО и т.д.

В качестве начальной цели исследования выберем определение наилучшего взаимного расположения псевдоспутников.

При выборе орбитальных параметров НС на этапе разработки подсистемы НС, а также при выборе рабочего созвездия в приемнике, основным критерием полагают геометрический фактор. Таким образом, важным условием достижения высокой точности навигационных определений является такое взаимное пространственное расположение псевдоспутников и потребителя, при котором обеспечивается требуемая точность НВО при заданном уровне погрешностей измерения псевдодальностей. На этом выводе основана концепция коэффициента геометрии K_G (в иностранной литературе англ. Dilution of Precision (DOP)), являющегося мерой уменьшения точности навигационных определений из-за особенностей пространственного расположения НС и потребителя.

Согласно [1] коэффициент геометрии можно рассчитать по следующей формуле:

$$K_G = \left(\text{tr} \left[\left(\tilde{H}^T \tilde{H} \right)^{-1} \right] \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где \tilde{H} - матрица направляющих косинусов для выбранного созвездия НС, $\text{tr}(\ast)$ обозначает след матрицы. Из (1) следует, что соотношение между

погрешностями определения псевдодальностей и пространственно-временных координат потребителя зависит только от вида матрицы направляющих косинусов \tilde{H} , т.е. от геометрии взаимного расположения псевдоспутников и потребителя.

Аналогично, приведем формулы для расчета коэффициента геометрии для системы псевдоспутников.

Пусть x, y, z - координаты потребителя, а x_i, y_i, z_i - координаты псевдоспутников, где i - номер соответствующего псевдоспутника.

В аппаратуре потребителя на этапе вторичной обработки на выходе схемы слежения за задержкой сигнала формируется оценка псевдодальности

$$\tilde{R}_i = R_{i,уст} + R' + \delta R,$$

где $R_{i,уст} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}$ (2), $R' = ct'$ (t' - смещение часов приемника потребителя относительно эталонов времени псевдоспутников), δR - ионосферные, эфемеридные и пр. погрешности. В оценку псевдодальности, наибольший вклад вносят ионосферные и эфемеридные погрешности, но т.к. псевдоспутники расположены на земле и их координаты известны, то погрешностями в данном случае можно пренебречь. На основе этого для i -того количества псевдоспутников имеем систему из i уравнений оценок псевдодальности:

$$\begin{cases} \tilde{R}_1 = R_{1,уст} + R' \\ \tilde{R}_2 = R_{2,уст} + R' \\ \dots \\ \tilde{R}_i = R_{i,уст} + R' \end{cases} \quad (3)$$

Из системы (3) получим матрицу направляющих косинусов

$$\tilde{H} = \begin{pmatrix} \frac{d}{dx} \tilde{R}_1 & \frac{d}{dy} \tilde{R}_1 & \frac{d}{dz} \tilde{R}_1 & \frac{d}{dR'} \tilde{R}_1 \\ \frac{d}{dx} \tilde{R}_2 & \frac{d}{dy} \tilde{R}_2 & \frac{d}{dz} \tilde{R}_2 & \frac{d}{dR'} \tilde{R}_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{d}{dx} \tilde{R}_i & \frac{d}{dy} \tilde{R}_i & \frac{d}{dz} \tilde{R}_i & \frac{d}{dR'} \tilde{R}_i \end{pmatrix};$$

$$\tilde{H} = \begin{pmatrix} \frac{x-x_1}{R_{1,уст}} & \frac{y-y_1}{R_{1,уст}} & \frac{z-z_1}{R_{1,уст}} & 1 \\ \frac{x-x_2}{R_{2,уст}} & \frac{y-y_2}{R_{2,уст}} & \frac{z-z_2}{R_{2,уст}} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{x-x_i}{R_{i,уст}} & \frac{y-y_i}{R_{i,уст}} & \frac{z-z_i}{R_{i,уст}} & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Подставив найденную матрицу направляющих косинусов (4) в уравнение (1), получим:

$$K_{\Gamma} = \sqrt{R_1 + R_6 + R_{11} + R_{16}},$$

где R_1, R_6, R_{11}, R_{16} - соответствующие диагональные члены матрицы $(\tilde{H}^T \tilde{H})^{-1}$.

Чаще всего для оценки точности определения координат местоположения потребителя используют параметры:

- $K_{\Gamma,П}$ (PDOP) – пространственный коэффициент геометрии (Position Delution of Precision);
- $K_{\Gamma,Г}$ (HDOP) – горизонтальный коэффициент геометрии (Horizontal Delution of Precision);

- $K_{G.B}$ (VDOP) – вертикальный коэффициент геометрии (Vertical Dilution of Precision).

Представим коэффициент геометрии K_G в другом виде

$$K_G^2 = K_{G.P}^2 + K_{G.t}^2,$$

где $K_{G.P} = \sqrt{R_1 + R_6 + R_{11}}$ - пространственный и $K_{G.t} = \sqrt{R_{16}}$ - временной (Time Delution of Precision – TDOP) коэффициенты.

Пространственный коэффициент геометрии, в свою очередь, можно разделить на две составляющие

$$K_{G.P}^2 = K_{G.G}^2 + K_{G.B}^2,$$

где $K_{G.G} = \sqrt{R_1 + R_6}$ (5) - горизонтальный и $K_{G.B} = \sqrt{R_{11}}$ - вертикальный коэффициенты.

Горизонтальный коэффициент геометрии характеризует точность навигационных измерений в горизонтальной плоскости потребителя, а вертикальный коэффициент геометрии, соответственно, в вертикальной. Так как псевдоспутники находятся на земле, обеспечить требуемую точность измерений в вертикальной плоскости потребителя не предоставляется возможным из-за того, что псевдоспутники расположены приблизительно на одном уровне с перепадами высот не более 60 метров, обусловленные рельефом местности. В модели исследования максимальное расстояние между наиболее удаленными псевдоспутниками принято равным 200 км. Это ограничение максимально влияет на горизонтальный коэффициент геометрии, чем оно больше, тем измерения точнее. Соответственно, критерием наилучшего взаимного расположения псевдоспутников является горизонтальный коэффициент геометрии $K_{G.G}$. Для наилучшей точности измерений по предлагаемой системе, псевдоспутники

следует расположить таким образом, чтобы значение горизонтального коэффициента геометрии было наименьшим.

2.1. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ГЕОМЕТРИИ. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ В СРЕДЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ MATLAB

Для нахождения координат потребителя, при использовании орбитальной группировки спутников, необходимы измерения по четырем НС. Аналогично, исследования значения горизонтального коэффициента геометрии проведем для 4-х псевдоспутников. Модель, для которой находится коэффициент геометрии, изображена на рис. 1, с обозначениями, используемыми в дальнейшем, показана на рис. 2.

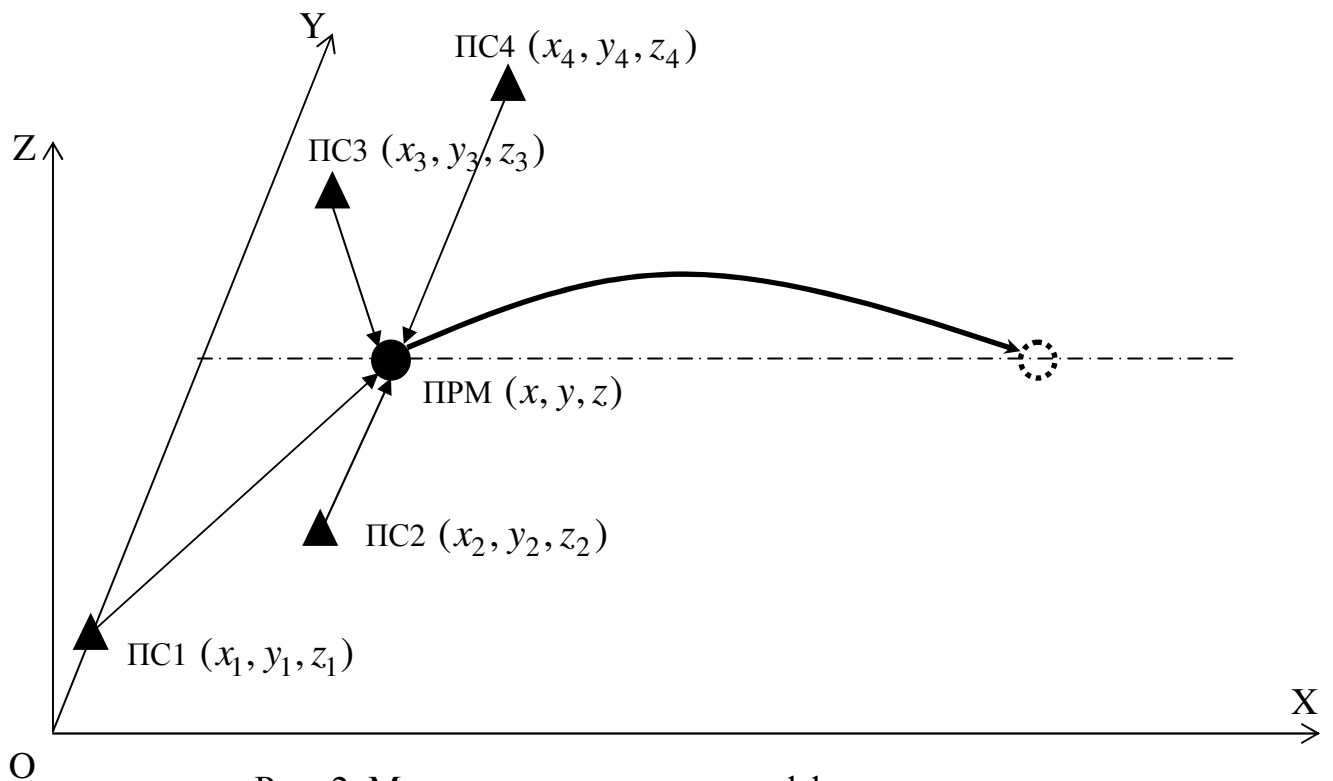


Рис. 2. Модель исследования коэффициента геометрии

Задана локальная система координат - $OXYZ$. Четыре псевдоспутника имеют собственные координаты: x_i, y_i, z_i , где i - номер соответствующего псевдоспутника, $i = \overline{1,4}$. Координаты потребителя: x, y, z . В соответствии с (4), матрица направляющих косинусов примет следующий вид

$$\tilde{H} = \begin{pmatrix} \frac{x-x_1}{R_{1,уст}} & \frac{y-y_1}{R_{1,уст}} & \frac{z-z_1}{R_{1,уст}} & 1 \\ \frac{x-x_2}{R_{2,уст}} & \frac{y-y_2}{R_{2,уст}} & \frac{z-z_2}{R_{2,уст}} & 1 \\ \frac{x-x_3}{R_{3,уст}} & \frac{y-y_3}{R_{3,уст}} & \frac{z-z_3}{R_{3,уст}} & 1 \\ \frac{x-x_4}{R_{4,уст}} & \frac{y-y_4}{R_{4,уст}} & \frac{z-z_4}{R_{4,уст}} & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Подставив истинную дальность (2) для каждого псевдоспутника и потребителя в матрицу (6), получим матрицу направляющих косинусов, где неизвестными будут только координаты потребителя

$$\tilde{H} = \begin{pmatrix} \frac{x-x_1}{\sqrt{(x_1-x)^2+(y_1-y)^2+(z_1-z)^2}} & \frac{y-y_1}{\sqrt{(x_1-x)^2+(y_1-y)^2+(z_1-z)^2}} & \frac{z-z_1}{\sqrt{(x_1-x)^2+(y_1-y)^2+(z_1-z)^2}} & 1 \\ \frac{x-x_2}{\sqrt{(x_2-x)^2+(y_2-y)^2+(z_2-z)^2}} & \frac{y-y_2}{\sqrt{(x_2-x)^2+(y_2-y)^2+(z_2-z)^2}} & \frac{z-z_2}{\sqrt{(x_2-x)^2+(y_2-y)^2+(z_2-z)^2}} & 1 \\ \frac{x-x_3}{\sqrt{(x_3-x)^2+(y_3-y)^2+(z_3-z)^2}} & \frac{y-y_3}{\sqrt{(x_3-x)^2+(y_3-y)^2+(z_3-z)^2}} & \frac{z-z_3}{\sqrt{(x_3-x)^2+(y_3-y)^2+(z_3-z)^2}} & 1 \\ \frac{x-x_4}{\sqrt{(x_4-x)^2+(y_4-y)^2+(z_4-z)^2}} & \frac{y-y_4}{\sqrt{(x_4-x)^2+(y_4-y)^2+(z_4-z)^2}} & \frac{z-z_4}{\sqrt{(x_4-x)^2+(y_4-y)^2+(z_4-z)^2}} & 1 \end{pmatrix}$$

Для расчета коэффициента геометрии, задана модель траектории движения потребителя, таким образом, координаты потребителя считаем известными в любой момент времени.

В соответствии с (5) рассчитаем значение горизонтального коэффициента геометрии

$K_{Г.Г} = \sqrt{R_1 + R_6}$, где R_1, R_6 - соответствующие диагональные члены матрицы $(\tilde{H}^T \tilde{H})^{-1}$.

Расчет коэффициента геометрии возможен для любой точки траектории движения потребителя, но для исследования возьмем 11 точек траектории, расположенных от начала до конца движения потребителя, чтобы получить зависимость изменения коэффициента геометрии на всей протяженности траектории.

Для расчета коэффициента геометрии написана программа в среде имитационного моделирования Matlab (см. приложение 1).

При первоначальном расположении наземных псевдоспутников будем руководствоваться аналогичными правилами расположения орбитальных спутников. Относительно потребителя псевдоспутники не должны быть расположены на одной линии, а расстояние между спутниками должно удовлетворять требованиям точности определения координат местоположения потребителя. Псевдоспутники расположены на земле, следовательно, перепады высот малы, выберем для них фиксированные значения: 10 м, 50м, 30м, 70м для первого, второго, третьего и четвертого псевдоспутников, соответственно. Исходя из расположения группировки спутников на орбите можно сделать вывод, что только через два НС из четырех, по которым проводятся измерения, можно провести прямую линию. Следовательно, координаты ПС вводим следующие, единица измерения - км:

- ПС1 (0, 50, 0.05);
- ПС2 (100, 116, 0.01);
- ПС3 (50, 182, 0.07);
- ПС4 (150, 250, 0.03).

После выполнения программы получаем следующие графики:

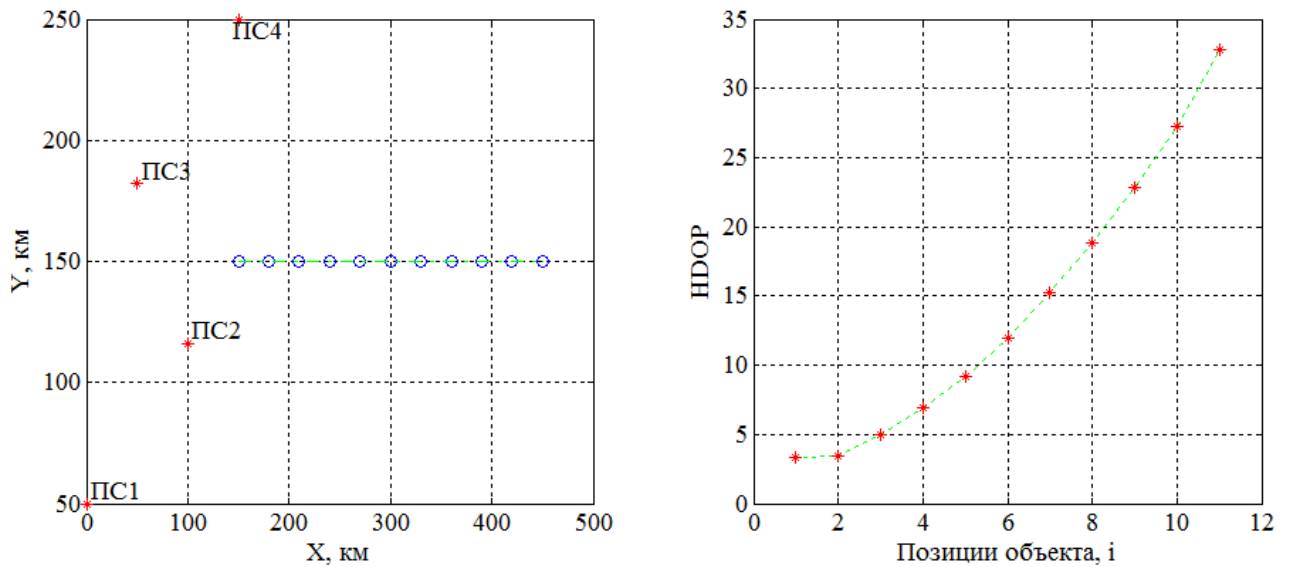


Рис. 3. Расположение псевдоспутников, относительно траектории движения потребителя (вид сверху) и зависимость горизонтального коэффициента геометрии $HDOP$ на всей протяженности траектории движения объекта. Шаг 1.

Максимальное значение горизонтального коэффициента геометрии равно 33. Меняя расположение псевдоспутников, проследим закономерности изменения горизонтального коэффициента геометрии с целью его уменьшения.

Вводим следующие координаты псевдоспутников:

- ПС1 (0, 50, 0.05);
- ПС2 (100, 86, 0.01);
- ПС3 (50, 212, 0.07);
- ПС4 (150, 250, 0.03).

После выполнения программы получаем следующие графики:

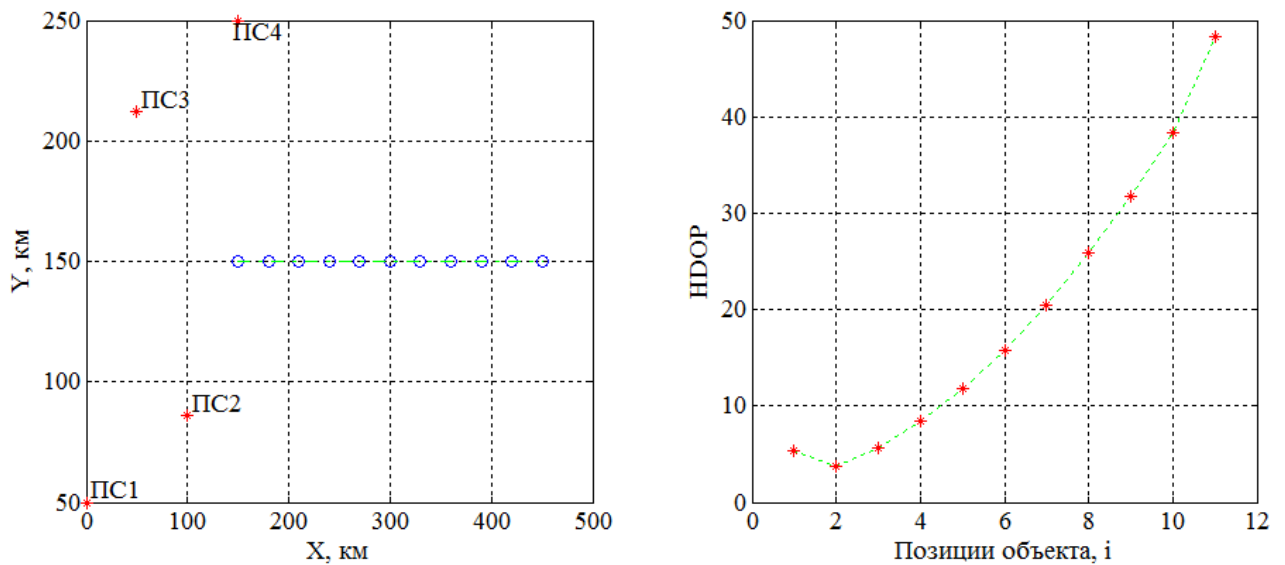


Рис. 4. Расположение псевдоспутников, относительно траектории движения потребителя (вид сверху) и зависимость горизонтального коэффициента геометрии $HDOP$ на всей протяженности траектории движения объекта. Шаг 2.

Максимальное значение горизонтального коэффициента геометрии увеличилось и стало равно 49. Увеличение $HDOP$ говорит о снижении точности проводимых навигационных измерений, следовательно, дальнейшее увеличение расстояния между $ПС2$ и $ПС3$ не целесообразно.

Вводим следующие координаты псевдоспутников:

- ПС1 (0, 50, 0.05);
- ПС2 (100, 130, 0.01);
- ПС3 (50, 170, 0.07);
- ПС4 (150, 250, 0.03).

После выполнения программы получаем следующие графики:

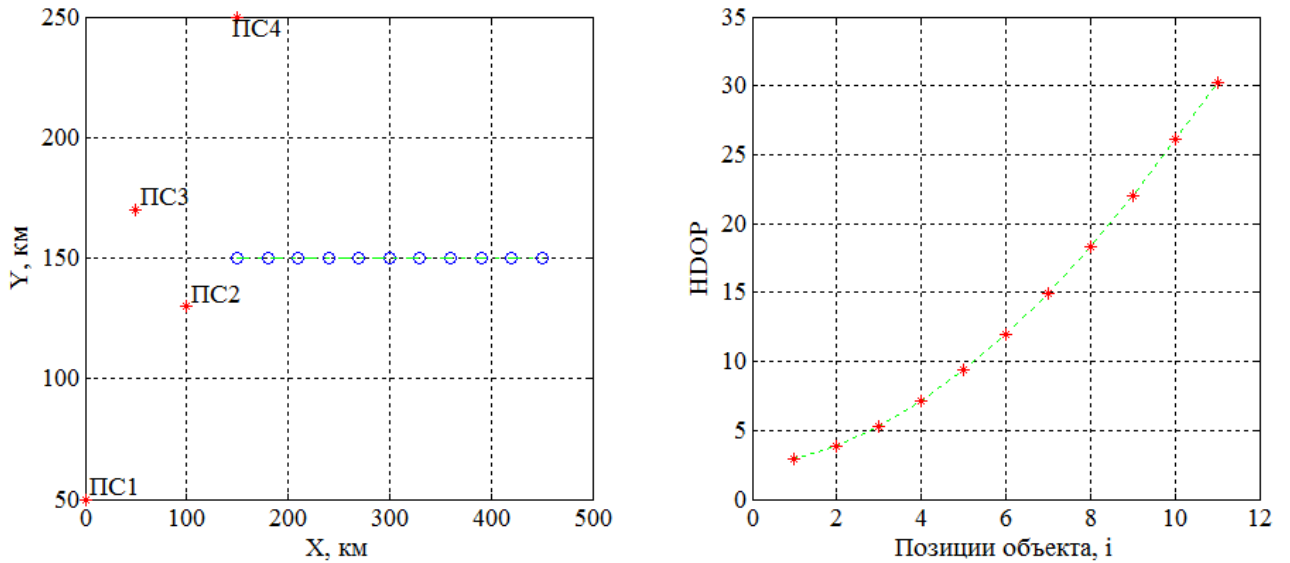


Рис. 5. Расположение псевдоспутников, относительно траектории движения потребителя (вид сверху) и зависимость горизонтального коэффициента геометрии $HDOP$ на всей протяженности траектории движения объекта. Шаг 3.

Максимальное значение горизонтального коэффициента геометрии стало 30. Следовательно, сокращение расстояния между $ПС2$ и $ПС3$ благоприятно влияет на увеличение точности навигационных измерений.

Продолжим тенденцию, вводя следующие координаты:

- ПС1 (0, 50, 0.05);
- ПС2 (100, 150, 0.01);
- ПС3 (50, 150, 0.07);
- ПС4 (150, 250, 0.03).

После выполнения программы получаем следующие графики:

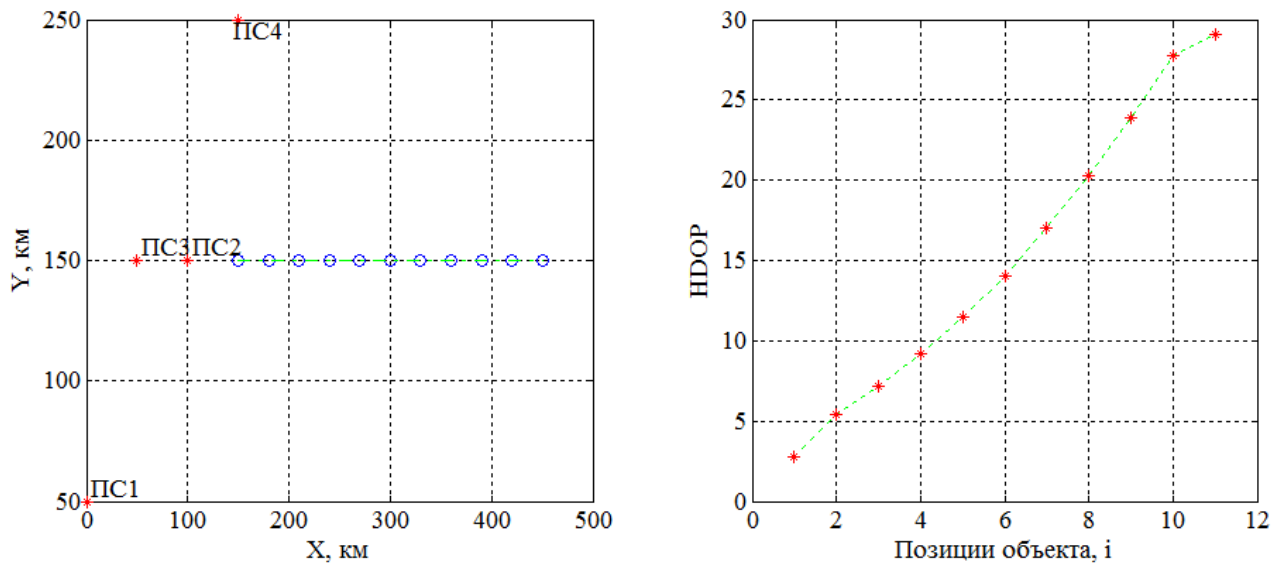


Рис. 6. Расположение псевдоспутников, относительно траектории движения потребителя (вид сверху) и зависимость горизонтального коэффициента геометрии $HDOP$ на всей протяженности траектории движения объекта. Шаг 4.

Как видно из графика, псевдоспутники $ПС2$ и $ПС3$ расположены на одной линии, а максимальное значение горизонтального коэффициента геометрии равно 29.

Проследим влияние перемещения $ПС1$ на значение коэффициента геометрии, введя следующие координаты:

- ПС1 (50, 50, 0.05);
- ПС2 (100, 150, 0.01);
- ПС3 (50, 150, 0.07);
- ПС4 (150, 250, 0.03).

После выполнения программы получаем следующие графики:

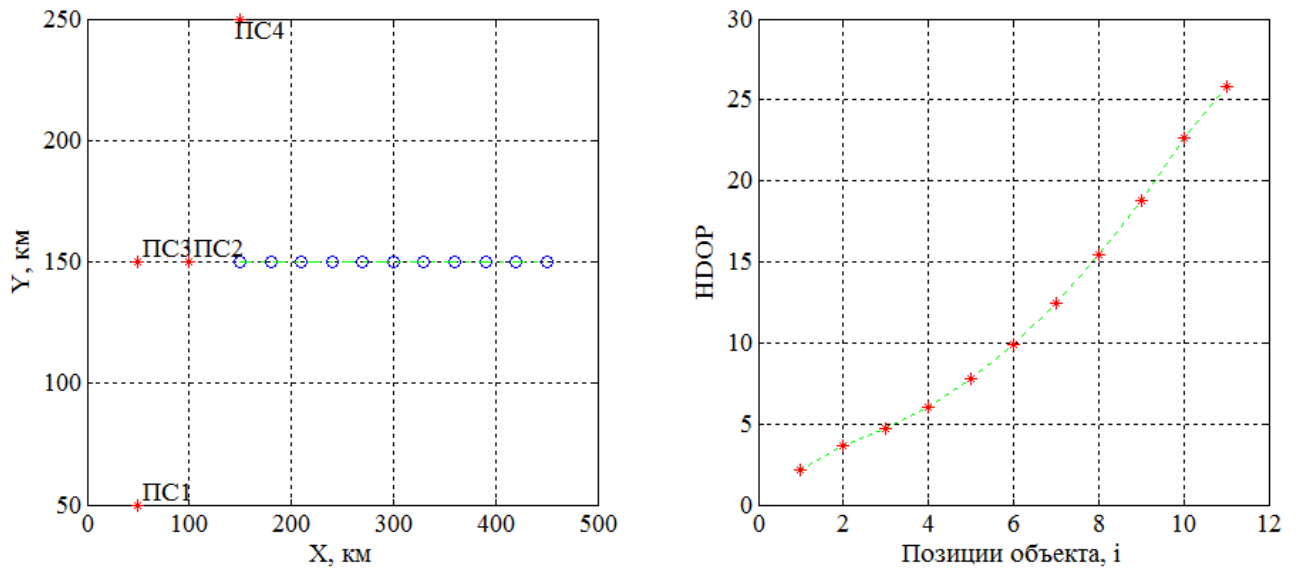


Рис. 7. Расположение псевдоспутников, относительно траектории движения потребителя (вид сверху) и зависимость горизонтального коэффициента геометрии $HDOP$ на всей протяженности траектории движения объекта. Шаг 5.

Максимальное значение горизонтального коэффициента геометрии снова снизилось и стало равным 26.

Продолжим благоприятную тенденцию. Вводим следующие координаты псевдоспутников:

- ПС1 (150, 50, 0.05);
- ПС2 (145, 150, 0.01);
- ПС3 (70, 150, 0.07);
- ПС4 (150, 250, 0.03).

После выполнения программы получаем следующие графики:

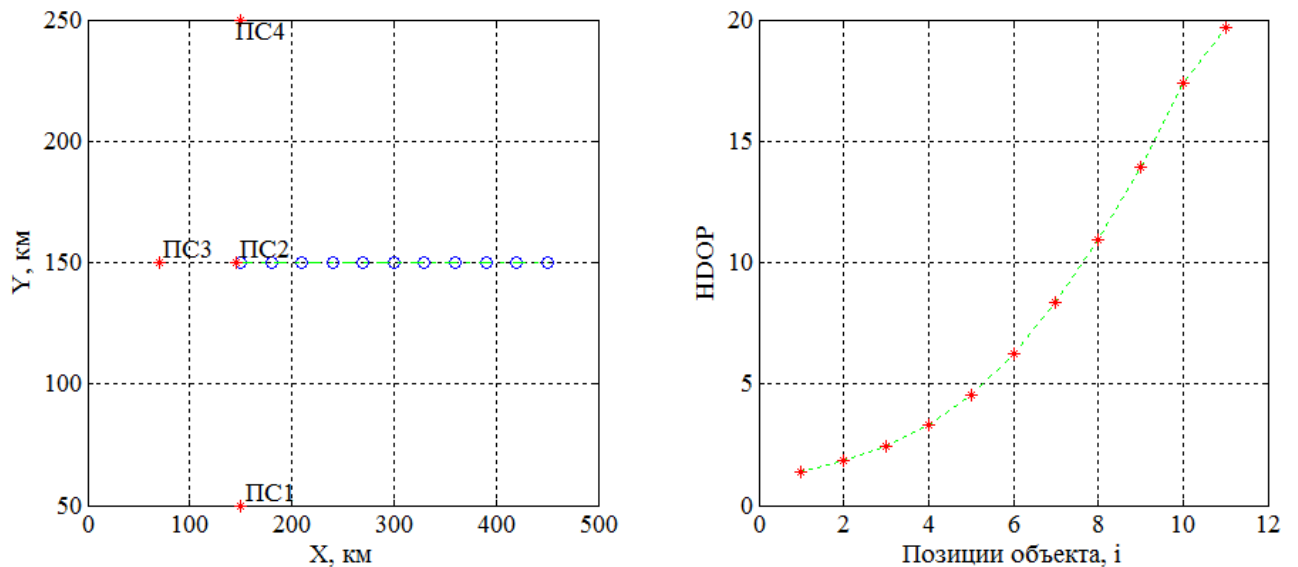


Рис. 8. Расположение псевдоспутников, относительно траектории движения потребителя (вид сверху) и зависимость горизонтального коэффициента геометрии $HDOP$ на всей протяженности траектории движения объекта. Шаг 6.

Максимальное значение горизонтального коэффициента геометрии снизилось до 19.

Дальнейшее изменение расположения псевдоспутников незначительно влияет на максимальное значение горизонтального коэффициента геометрии, так же как и добавление большего числа псевдоспутников.

На первом шаге расположения ПС максимальное значение $HDOP$ было равно 33, а входе изменения расстановки псевдоспутников максимальное значение горизонтального коэффициента геометрии удалось снизить почти вдвое и оно стало равным 19. Это значение достигается в конечной точке, расположенной на расстоянии 300 км от места запуска ракеты. На рис. 9 представлен график зависимости значений для вертикального коэффициента геометрии $VDOP$.

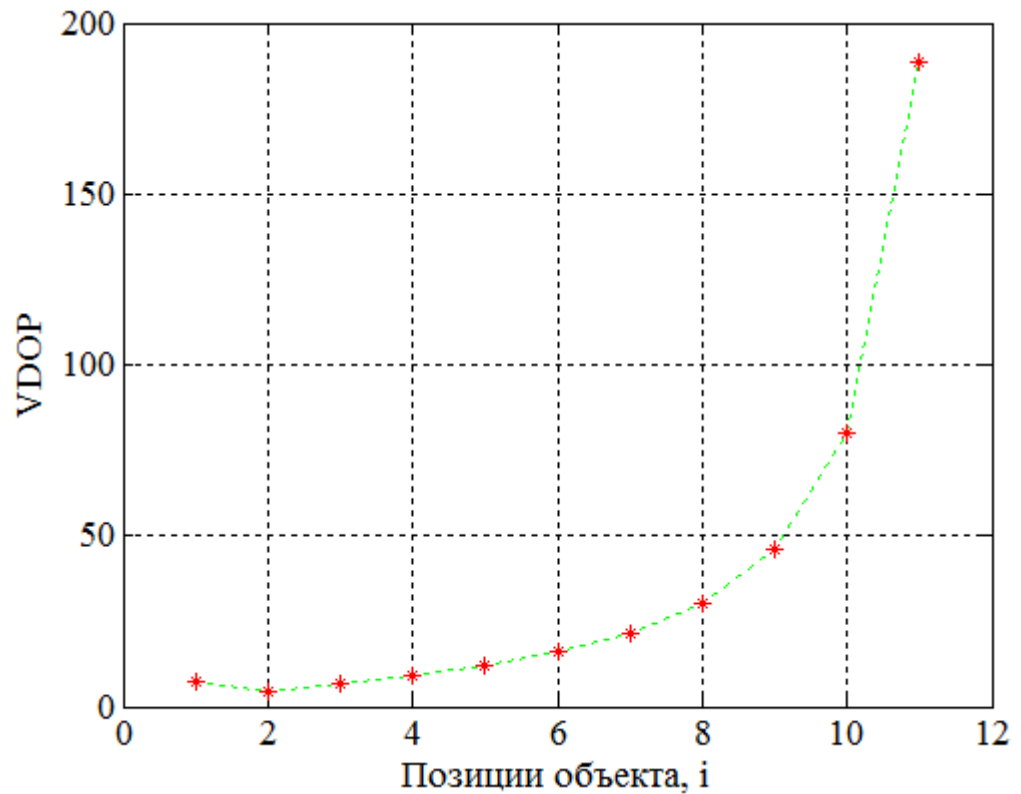


Рис. 9. Зависимость горизонтального коэффициента геометрии $VDOP$ на всей протяженности траектории движения объекта.

Как видно из графика вертикальный коэффициент геометрии имеет большие значения, в самой дальней точке траектории он равен 190, а значит, как отмечалось ранее (пункт 2), используя предложенные псевдоспутники определить координаты потребителя с требуемой точностью можно лишь в горизонтальной плоскости. В вертикальной плоскости определение координат потребителя будет не точным, так как по высоте координата псевдоспутников отличается незначительно. Для решения навигационной задачи с требуемой точностью, как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях, требуется дополнительная информация, получаемая, например, от орбитальной группировки НС или барометрического высотомера.

Также в ходе исследования было выявлено наилучшее расположение псевдоспутников, относительно потребителя:

- ПС1 (150, 50, 0.05);
- ПС2 (145, 150, 0.01);
- ПС3 (70, 150, 0.07);
- ПС4 (150, 250, 0.03).

Вид предлагаемого расположения псевдоспутников представлен на рис. 10.

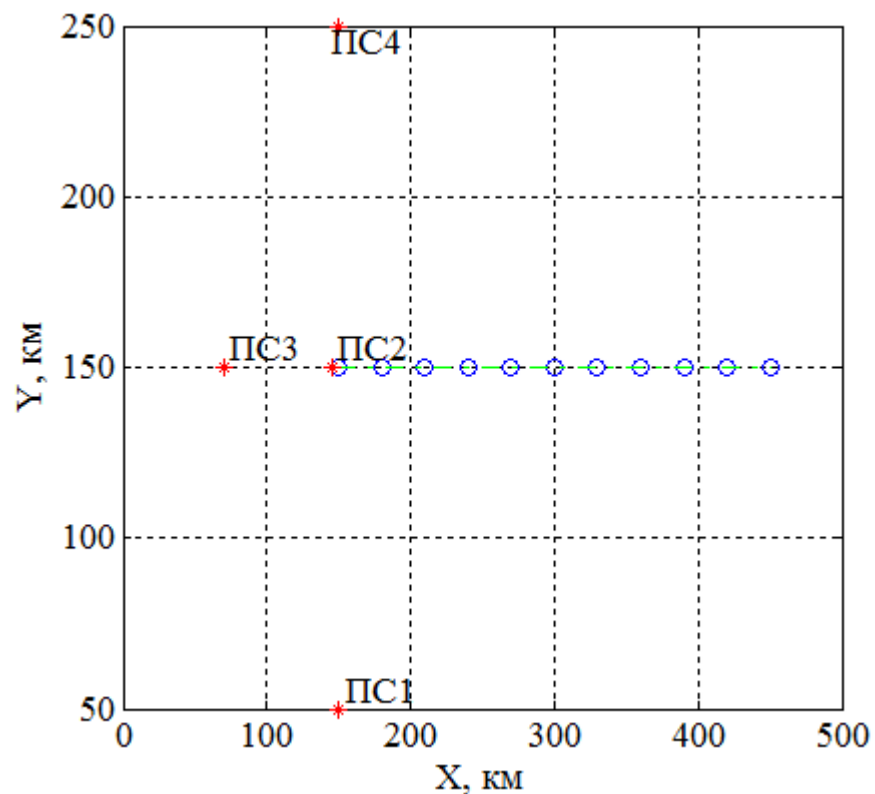


Рис. 10. Наилучшее взаимное расположение псевдоспутников

Таким образом, можно сделать вывод, что для проведения наиболее точных НВО псевдоспутники следует расположить в форме равнобедренного треугольника, чтобы расстояние между псевдоспутниками соответствовало следующим данным: расстояние между ПС1 и ПС2 равно 100 км, между ПС2 и ПС4 равно 100 км, а между ПС2 и ПС3 равно 75 км.

3. РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАВИГАЦИОННОЙ РАДИОЛИНИИ

В ходе исследования взаимного расположения псевдоспутников, относительно потребителя, выявлено, что для решения навигационной задачи с требуемой точностью нужна дополнительная информация, поступающая с орбитальной группировки НС. Для этого необходима аппаратура потребителя, позволяющая работать одновременно по двум сигналам, поступающим от спутников с орбиты, и с сигналами, поступающими от псевдоспутников с земли. Формат и частоты перспективных сигналов ГЛОНАСС с кодовым разделением окончательно не определены. Для исследования будем полагать, что группа наземных ПС излучает CDMA-сигнал (Code Division Multiple Access — множественный доступ с кодовым разделением) в диапазоне L1. Необходим выбор частоты излучения и расчет соответствующих энергетических характеристик исследуемой навигационной радиолинии.

Частоту излучения псевдоспутников выберем в соответствии с радиочастотным регламентом, предоставленным Международным союзом электросвязи (МСЭ). Данный нормативный документ содержит статьи, регламентирующие распределение и условия использования радиочастотного ресурса. Радиочастотный ресурс – это совокупность действующих и потенциально возможных частотных назначений на определенной территории, предназначенных для работы в эфире, удовлетворяющих требованиям МСЭ, и учитывающих:

- диапазон частот;
- ширину занимаемого спектра частот;
- используемые технологии;

- временной период действия разрешения на использование указанного ресурса.

Отметим, что радиочастотный ресурс не бесконечен и количество свободных частот не велико. В целях распределения частот мир разделен на три Района. Российская Федерация (РФ) относится к зоне, включенной в Район 1. В данном Районе подходящими для выбора являются частоты, лежащие в соседнем диапазоне, выделенном для спутниковой радионавигации. Интересующий нас диапазон: 1660,5 – 1668 МГц. В соответствии с радиочастотным регламентом, эта часть диапазона радиоастрономии отведена для пассивной службы космических исследований, для которой важно излучение «космос – Земля». Выбрав частоту излучения псевдоспутников в данном диапазоне, влияние на работу служб радиоастрономии будет не существенным, т.к. излучение исследуемой системы будет направленно от земли. Для исследуемой модели выберем частоту излучения равную 1664 МГц.

Рассчитаем энергетические характеристики исследуемой навигационной радиолинии. Частоте 1664 МГц соответствует длина волны $\lambda = 0.18$ м.

Требуемая мощность сигнала на входе приемной антенны в конце радиолинии $P_{ант_2} = -140$ дБВт.

Потери в свободном пространстве в начале радиолинии, на расстоянии $R_1 = 1000$ м от излучающей антенны

$$L_{F_1} = 20 \lg \left(\frac{\lambda}{4\pi R_1} \right) = -96.59 \text{ дБ.}$$

Потери в свободном пространстве в конце радиолинии, на расстоянии $R_2 = 3 \cdot 10^5$ м от излучающей антенны

$$L_{F_2} = 20 \lg \left(\frac{\lambda}{4\pi R_2} \right) = -146.14 \text{ дБ.}$$

Затухание в атмосфере $L_{ам} \approx 2$ дБ. Поляризационные потери $L_{пол} \approx 1$ дБ. Прочие потери $L_{пр} \approx 3...4$ дБ.

Вычислим эффективную мощность излучаемого сигнала $PG_{изл}$

$$P_{ант_2} = PG_{изл} - L_F - L_{ам} - L_{пол} - L_{пр},$$

$$PG_{изл} = P_{ант_2} + L_{F_2} + L_{ам} + L_{пол} + L_{пр} \approx 13.01 \text{ дБВт.}$$

При коэффициенте усиления антенны $G_a = +3$ дБ на её выходе (а, следовательно, на входе высокочастотной части приемника) получаем $P_{ex_2} = P_{ант_2} G_a \approx -137$ дБВт.

Для рассчитанной мощности излучаемого сигнала $PG_{изл}$ рассчитаем требуемую мощность сигнала на входе приемной антенны в начале радиолинии

$$P_{ант_1} = PG_{изл} - L_{F_1} - L_{ам} - L_{пол} - L_{пр} \approx -90.58 \text{ дБВт.}$$

Соответственно, на входе высокочастотной части приемника получаем $P_{ex_1} = P_{ант_1} G_a \approx -87.58$ дБВт.

В теории спутниковой навигации энергетические характеристики условий приема сигналов в аппаратуре потребителя принято характеризовать параметром

$q_{с/n_0} = \frac{P_{ex}}{N_0}$, представляющим собой отношение мощности полезного сигнала на

входе высокочастотной части приемника P_{ex} к спектральной плотности (односторонней) внутреннего шума приемника N_0 . Учитывая, что $N_0 = k k_{ш} T_0$, где $T_0 = 290$ К, $k = 1.38 * 10^{-23}$ - постоянная Больцмана, $k_{ш}$ - коэффициент шума приемника, и полагая $k_{ш} = 2.5$, получаем $N_0 = -201.5$ дБВт/Гц.

Отношение	сигнал/шум	в	начале	радиолинии
\tilde{q}_{1c/n_0}	$= 10 \log \left(\frac{P_{ex_1}}{N_0} \right)$	$= -87.58 + 201.5 = 113.92$	дБГц,	в конце радиолинии
\tilde{q}_{2c/n_0}	$= 10 \log \left(\frac{P_{ex_2}}{N_0} \right)$	$= -137 + 201.5 = 64.5$	дБГц.	

Конечный диапазон изменения отношения сигнал/шум для всей навигационной радиолинии: 113.92 – 64.5 дБГц.

4. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАДИОСИГНАЛЫ В СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ И СИСТЕМЕ ПСЕВДОСПУТНИКОВ

В СРНС определение координат потребителя осуществляется с использованием радиосигналов, которые излучаются непрерывно со всех находящихся в эксплуатации НС. В навигационной аппаратуре потребителя (НАП) принимаются и обрабатываются радиосигналы от всех видимых НС. Для решения задачи навигационных определений принимаемые радиосигналы должны иметь такую структуру, чтобы их можно было разделить с целью их последующей эффективной обработки, достаточно точно измерить параметры каждого принятого радиосигнала (задержку, доплеровское смещение частоты, фазу) и по измеренным параметрам радиосигналов определить координаты потребителя.

Предлагаемая система ПС излучает радиосигнал аналогичный перспективным радиосигналам СРНС ГЛОНАСС. Отсюда вытекают следующие основные требования, предъявляемые к используемым радиосигналам:

- возможность их эффективного разделения в приемнике;
- обеспечение высокой точности измерения параметров сигнала;
- обеспечение возможности определения координат и скорости потребителя.

Рассмотрим первое указанное требование.

Пусть $s_i(t, \lambda_i)$ - радиосигнал от i -го ПС ($i = \overline{1, n}$). λ_i - вектор измеряемых параметров радиосигнала. Тогда на входе приемника имеем групповой

(суммарный) сигнал $s(t) = \sum_{i=1}^n s_i(t, \lambda_i)$, который наблюдается на фоне аддитивного

внутреннего шума приемника $n(t)$:

$$y(t) = s(t) + n(t) = \sum_{i=1}^n s_i(t, \lambda_i) + n(t). \quad (7)$$

В теории оптимального приема и обработки сигналов [4] доказывается, что, если $n(t)$ - белый гауссовский шум, то для оценки параметров λ_j при наблюдении реализации (7) на интервале времени $[0, T]$ в приемнике должна выполняться операция

$$u(\lambda_j) = \int_0^T y(t) s_j(t, \widehat{\lambda}_j) dt, \quad (8)$$

где $\widehat{\lambda}_j$ - ожидаемое значение (оценка) параметров λ_j .

Подставляя в (8) представление (7), запишем

$$\begin{aligned} u(\lambda_j) &= \int_0^T \left(\sum_{i=1}^n s_i(t, \lambda_i) + n(t) \right) s_j(t, \lambda_j) dt = \\ &= \int_0^T s_j(t, \lambda_j) s_j(t, \widehat{\lambda}_j) dt + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \int_0^T s_i(t, \lambda_i) s_j(t, \widehat{\lambda}_j) dt + \int_0^T n(t) s_j(t, \widehat{\lambda}_j) dt. \end{aligned} \quad (9)$$

С точки зрения оценки параметров λ_j j -го радиосигнала два последних слагаемых в (9) являются мешающими. Поэтому, логично потребовать, чтобы мощность этих мешающих слагаемых была минимальна. Из этого требования вытекает условие

$$\int_0^T s_i(t, \lambda_i) s_j(t, \widehat{\lambda}_j) dt = 0. \quad (10)$$

Соотношение (10) должно выполняться при любых значениях λ_i и $\widehat{\lambda}_j$, если

$$\int_0^T s_i(t) s_j(t) dt = 0. \quad (11)$$

В теории сигналов условие (11) называют условием ортогональности двух сигналов на интервале времени $[0, T]$. Таким образом, одним из требований к используемым радиосигналам, является требование их ортогональности.

Для обеспечения ортогональности совокупности радиосигналов могут быть использованы различные принципы, которые принято называть методами разделения сигналов [1], а именно: частотное, временное, кодовое и др. В современных СРНС используют два метода разделения радиосигналов: в СРНС ГЛОНАСС – частотное, в СРНС GPS, Galileo – кодовое. В соответствии с концепцией развития СРНС ГЛОНАСС с 2013 г. в ней также планируется введение и использование новых радиосигналов с кодовым разделением, соответственно, для разделения сигналов предложенной системы псевдоспутников также используем кодовый метод разделения сигналов.

При кодовом разделении каждый сигнал излучается на одной и той же частоте и модулируется своим индивидуальным кодом, причем используемые коды должны быть по возможности ортогональны между собой. Неортогональность кодов приводит к ошибкам при разделении сигналов (внутрисистемные помехи).

Рассмотрим второе из указанных выше требований к радиосигналам – обеспечение высокой точности измерения параметров радиосигнала.

Основные навигационные параметры – дальность и скорость движения потребителя. Соответствующими им радионавигационными параметрами (параметрами радиосигнала) являются задержка τ радиосигнала и доплеровское смещение частоты f_D . Поэтому для высокоточного определения координат и скорости движения потребителя необходимо обеспечить высокую точность измерения τ и f_D принимаемого радиосигнала.

Из статистической теории оценивания параметров радиосигнала [4] известно, что минимальная среднеквадратическая ошибка σ_τ оценки задержки огибающей

при приеме сигнала $s(t)$ с известной начальной фазой на фоне некоррелированного гауссовского шума с односторонней спектральной плотностью N_0 при раздельном их измерении определяются соотношениями

$$\sigma_\tau = 1 / (\sqrt{2q\beta});$$

где $q = E / N_0$ - отношение сигнал/шум;

$$E = \int_0^T s^2(t) dt - \text{энергия радиосигнала за время наблюдения } T ;$$

$$\beta = \sqrt{1 / E \int_{-\infty}^{+\infty} (2\pi f)^2 |\dot{S}(f)|^2 df} - \text{эффективная ширина спектра радиосигнала};$$

$$\dot{S}(f) = \int_0^T s(t) e^{-i2\pi ft} dt - \text{спектральная плотность радиосигнала.}$$

Из приведенных соотношений следует, что для снижения среднеквадратической ошибки оценки задержки огибающей необходимо расширять ширину спектра радиосигнала. Для этого вводится тот или иной тип модуляции сигнала. Такие сигналы называют шумоподобными. В нынешней СРНС ГЛОНАСС в качестве такой модуляции принята фазовая манипуляция, а в перспективных сигналах СРНС ГЛОНАСС и сигналах ПС используется бинарная модуляция на поднесущих частотах.

Рассмотрим третье требование к радиосигналам СРНС – обеспечение возможности определения координат и скорости потребителя.

Измерение задержек и доплеровских частот радиосигналов, излученных с НС, является необходимым, но не достаточным условием для определения координат потребителя. В СРНС используется радиомаячный принцип определения координат потребителя, в соответствии с которым для определения

координат и скорости потребителя необходимо задать координаты $x(t)$ и составляющие вектора скорости $V(t)$ НС, на каждый текущий момент времени t . Для реализации принятой в СРНС концепции независимой навигации и принятого метода пассивных (беззапросных) дальномерных и доплеровских измерений по радиосигналам нескольких НС, данные о $x(t)$, $V(t)$ и времени t (далее именуемые навигационными данными) всех НС должны передаваться потребителю по тем или иным каналам передачи данных (связи). Один из таких каналов передачи навигационных данных может быть с использованием излучаемых радиосигналов от НС. С этой целью излучаемые радиосигналы дополнительно модулируются навигационными данными, представленными в цифровой форме (далее цифровая информация). При таком подходе один радиосигнал используется как для измерений радионавигационных параметров, так и для передачи цифровой информации (ЦИ). Такой радиосигнал называется однокомпонентным.

Наличие ЦИ в радиосигнале ухудшает характеристики измерения радионавигационных параметров. С целью устранения этого недостатка в перспективных СРНС для передачи ЦИ вводят специальный сигнал, который будем называть информационным радиосигналом. При этом радиосигнал, так же излучаемый с НС и используемый для измерения радионавигационных параметров, уже не модулируется ЦИ, а содержит только модуляцию, обеспечивающую расширение спектра радиосигнала в интересах точного измерения задержки радиосигнала. Такой сигнал принято называть пилотным радиосигналом. Таким образом в перспективных СРНС с НС излучается двухкомпонентный радиосигнал, содержащий пилотную и информационную компоненты. В дальнейшем при рассмотрении излучаемого сигнала ПС будем рассматривать лишь пилотную компоненту радиосигнала, т.к. она не модулируется ЦИ, а содержит только модуляцию, обеспечивающую расширение спектра в интересах точного измерения задержки радиосигнала.

Как отмечалось ранее, для необходимого расширения спектра радиосигнала в перспективных сигналах СРНС ГЛОНАСС и сигналах ПС используется бинарная модуляция на поднесущих частотах. В англоязычной литературе данный тип модуляции называется *binary offset carrier (BOC)*.

Под модуляцией $BOC(f_{sub}, f_{chip})$ понимается бинарная модуляция на поднесущих частотах, при которой f_{sub} - частота отстройки поднесущих, f_{chip} - частота следования символов (чипов) кода. Обычно частоты f_{sub}, f_{chip} выбираются кратными некоторой «базовой» частоте f_b (например, в GPS, Galileo и в перспективных радиосигналах ГЛОНАСС $f_b = 1,023$ МГц), т.е. $f_{sub} = f_s = mf_b, f_{chip} = f_c = nf_b$. Тогда для обозначения модуляции на поднесущих частотах используется сокращенная запись $BOC(m, n)$. Отметим, что аналогичное обозначение используется для фазовой манипуляции $BPSK(n)$, что соответствует скорости следования символов кода $f_c = nf_b$ [2].

Рассмотрим радиосигнал со стандартной бинарной фазовой манипуляцией (ФМ-2), для которого функцию модуляции дальномерным кодом представим в нормированном виде

$$\tilde{h}_{DK}(t) = \sum_{k=1}^L a_k \tilde{g}_{BPSK}(t - (k-1)\tau_c), \quad t \in [0, T_c], \quad (12)$$

$$\text{где } \tilde{g}_{BPSK}(t) = \begin{cases} 1/\sqrt{\tau_c}, & \text{при } 0 \leq t \leq \tau_c, \\ 0, & \text{при иных } t, \end{cases} \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{g}_{BPSK}^2(t) dt = 1.$$

Функция $h_{DK}(t)$ представляет собой периодическую последовательность цифровых символов ± 1 следующих с частотой $f_c = 1/\tau_c$. Пусть период кодовой последовательности составляет L символов. Тогда временной период кодовой последовательности равен $T_c = \tau_c L$. Последовательность символов $A = (a_1, a_2 \dots a_k \dots a_L)$ называют кодовой последовательностью, которую в СРНС

принято называть дальномерным кодом. В СРНС последовательность A выбирают такой, чтобы она была близка к чисто случайной последовательности, т.е. последовательности, в которой значения различных символов независимы между собой. Такие последовательности называются псевдослучайными последовательностями (ПСП).

Для формирования поднесущих частот в радиосигналах с BOC -модуляцией используется функция $sign(2\pi f_s t)$, т.е. колебание меандрового типа. Здесь $sign(x)$ - знаковая функция, принимающая значения ± 1 в зависимости от знака аргумента x . Функция модуляции дальномерным кодом имеет такой же вид, что и (12), в котором вместо $\tilde{g}_{BPSK}(t)$ используется функция

$$\tilde{g}_{BOC}(t) = \tilde{g}_{BPSK}(t) sign(\sin(2\pi f_s t + \Psi)),$$

где f_s - частота отстройки поднесущих, Ψ - начальная фаза модулирующей функции, которая для сигналов СРНС полагается равной $\Psi = 0$.

Обычно используют типы BOC -модуляции, в которых на длительности символа ПСП функции модуляции $\tilde{g}_{BPSK}(t)$ укладывается целое число полувольт функции $sign(\sin(2\pi f_s t))$. На рис. 11 для примера приведены графики, поясняющие формирование функции модуляции $BOC(1,1)$.

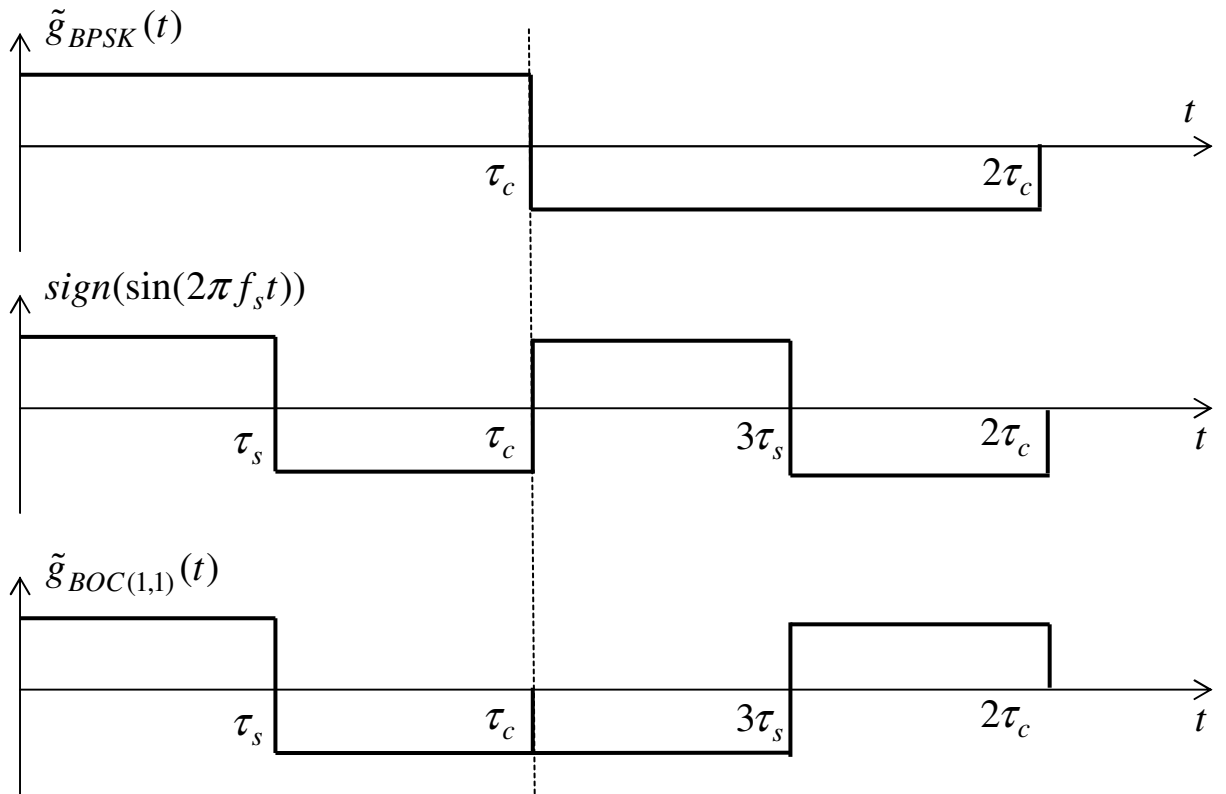


Рис. 11. Формирование функции модуляции $BOC(1,1)$

Нормированную корреляционную функцию (НКФ) огибающей радиосигнала с модуляцией $BOC(1,1)$ можно записать в виде:

$$\rho_{BOC(1,1)} = \begin{cases} 1 - \frac{3|\tau|}{\tau_c}, & \text{при } |\tau| \leq 0.5\tau_c \\ \frac{|\tau|}{\tau_c} - 1, & \text{при } 0.5\tau_c \leq |\tau| \leq \tau_c \\ 0, & \text{при } |\tau| \geq \tau_c \end{cases} \quad (13)$$

Вид НКФ (13) представлен на рис. 12.

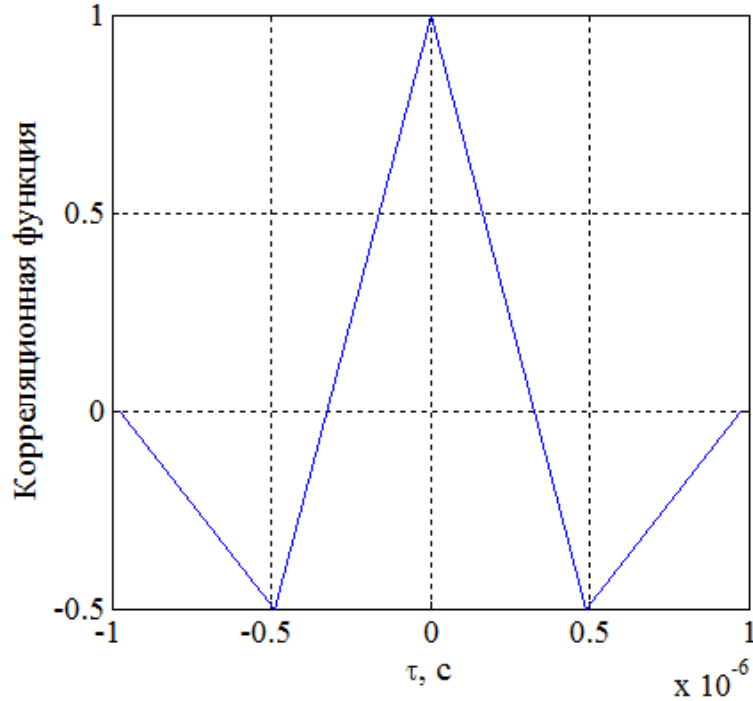


Рис. 12. НКФ для функции $BOC(1,1)$

Функция модуляции $BOC(1,1)$ планируется к использованию в пилотной компоненте перспективных радиосигналов ГЛОНАСС открытого доступа с кодовым разделением в частотных диапазонах $L1$ и $L2$ с частотой следования символов кода $\tilde{g}_{BPSK}(t)$ $f_c = 1,023$ МГц.

Предлагаемая система псевдоспутников также использует тип модуляции $BOC(1,1)$. Используемый дальномерный код представляется в виде последовательности Голда, со следующим образующим полиномом: $1 + x^3 + x^{10}$, начальное состояние для регистра сдвига: 1111111111. Период ПСП $L = 1023$ символов. Временная длительность периода $T_c = 1$ мс, длительность каждого символа $\tau_c \approx 0.9$ мкс. Частота следования символов кода $f_c = 1,023$ МГц.

5. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ЗАДЕРЖКОЙ РАДИОСИГНАЛА. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ В СРЕДЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ MATLAB

Навигационная аппаратура потребителей (НАП) СРНС предназначена для определения пространственных координат и составляющих вектора скорости потребителя, текущего времени и других навигационных параметров в результате приема и обработки радиосигналов, излучаемых навигационными спутниками [2].

С ПС излучается перспективный двухкомпонентный радиосигнал, содержащий пилотную и информационную компоненты. В данной работе рассматривается прием и обработка пилотной компоненты, т.к. она не модулируется ЦИ, а содержит только модуляцию, обеспечивающую расширение спектра в интересах точного измерения задержки радиосигнала. Так же будем полагать, что смещение бортовой шкалы времени (БШВ) и шкалы времени потребителя (ШВП) отсутствует, т.е. радионавигационным параметром является задержка радиосигнала τ .

Соответственно, принимаемый от i -го ПС сигнал имеет следующий вид

$$s_i(t_j, \tau_i) = A_i h_{ДКi}(t - \tau_i) \cos(\omega_{0i}t + \varphi_{0i}) + n(t),$$

где A - амплитуда сигнала, ω_{0i} - промежуточная частота, φ_{0i} - случайная начальная фаза, τ_i - задержка, $n(t)$ - внутренний БГШ приемника с односторонней спектральной плотностью N_0 .

На выходе ВЧ части приемника формируется вектор

$$y(t_j) = \left| s_1(t_j, \tau_1) + n_{j1}, s_2(t_j, \tau_2) + n_{j2}, \dots, s_n(t_j, \tau_n) + n_{jn} \right|^T$$

цифровых сигналов, состоящий из сигналов каждого ПС, где n_{jl} , $l = \overline{1, n}$ - независимые дискретные БГШ с нулевыми математическими ожиданиями и равными дисперсиями $\sigma_n^2 = N_0 / (2T_d)$.

Сигналы $y(t_j)$ попадают в блок первичной обработки, в котором проводятся поиски по задержке и частоте. После того, как принимается решение об обнаружении сигнала в некоторой ячейке поиска, включается система слежения за указанными параметрами.

Из-за того, что потребители находятся в движении относительно ПС, то задержка $\tau(t_j) = \tau_j$ изменяется во времени, поэтому для формирования соответствующих оценок следует воспользоваться теорией оптимальной фильтрации.

Теория оптимальной фильтрации основана на статистическом описании наблюдаемых y_j информационных процессов, а её основной задачей является нахождение апостериорной плотности вероятности $p(\lambda_j | Y_0^j)$ информативных процессов при заданном априорном описании динамики изменения и проведенных наблюдениях $Y_1^j = \{y_1, y_2, \dots, y_j\}$.

Получение оценки информативного процесса, переносимого радиосигналом, является задачей нелинейной фильтрации, решение которой может быть получено в том или ином приближении. При использовании гауссовского приближения АПВ $p(\lambda_j | Y_1^j)$ оптимальная оценка процесса $\hat{\lambda}_j$ формируется следящей системой, обобщенная схема которой изображена на рис. 13.

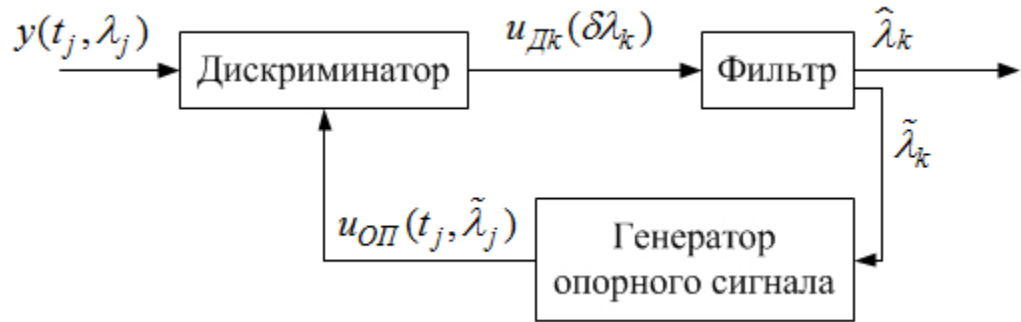


Рис. 13. Обобщенная схема следящей системы

Отсчеты $y(t_j, \lambda_j)$ наблюдаемого процесса в момент времени t_j (следующие с шагом дискретизации T_d) поступают на вход дискриминатора, на второй вход которого поступает опорный сигнал $u_{оп}(t_j, \tilde{\lambda}_j)$, сформированный для экстраполированного на данный момент времени t_j значения $\tilde{\lambda}_j$ оцениваемого параметра. Сигнал на выходе дискриминатора $u_{Дк}(\delta\lambda_k)$ пропорционален рассогласованию $\delta\lambda_k = \lambda_k - \tilde{\lambda}_k$ между значениями оцениваемого параметра λ , соответствующими входному и опорному сигналам. В теории оптимальной фильтрации [4] при приеме сигнала на фоне гауссовского белого шума процесс на выходе дискриминатора определяется соотношением

$$u_{Дк}(\tilde{\lambda}_k) = \left(\frac{\partial \ln f(Y_1^M, \lambda)}{\partial \lambda} \right)^T \Bigg|_{\lambda = \tilde{\lambda}_k}, \quad (14)$$

где $Y_1^M = \{y_{k-1,1}, y_{k-1,2}, \dots, y_{k-1,M}\}$ - отрезок реализации наблюдений на интервале времени $[t_{k-1,1}, t_{k-1,M}]$, где для индекса времени использована двойная нумерация $t_{k,0} = kMT_d = kT$, $T = MT_d$, $t_{k,l} = t_{k,0} + lT_d = kT + lT_d$, $t_{k,M} = t_{k+1,0}$; $f(Y_1^M, \lambda)$ - функция от наблюдаемого отрезка реализации Y_1^M и оцениваемого процесса λ .

Из (14) следует, что в дискриминаторе проводится накопление наблюдений на интервале $T = MT_d$, длительность которого должна быть много меньше времени корреляции процесса $\lambda(t)$ (который при этом полагается неизменным на данном интервале).

Если все параметры сигнала, кроме оцениваемого, известны, то $f(Y_1^M, \lambda)$ является функцией правдоподобия наблюдаемого отрезка реализации $p(Y_1^M | \lambda)$. Функцией правдоподобия называется условная плотность вероятности наблюдаемой реализации Y_1^M при заданных значениях оцениваемого параметра λ , рассматриваемая как функция этих параметров [4].

Данный приемник, как и любой приемник СРНС, содержит идентичные каналы слежения за сигналами. Соответственно, можно рассмотреть следящую систему для одного из каналов.

Так как в приемнике оцениваемый параметр сигнала (задержка τ) является неэнергетическим, то функцию правдоподобия можно представить в виде

$$f(Y_1^M, \lambda) = p(Y_1^M | \lambda) = \tilde{c} \exp \left(\sum_{l=1}^M s(t_{k-1,l}, \tau) y(t_{k-1,l}) \right). \quad (15)$$

В теории приема и обработки сигналов различают когерентную и некогерентную обработку. При когерентной обработке сигналов оценивается фаза принимаемого сигнала, а полученная оценка используется при формировании опорных сигналов дискриминаторов. При некогерентной обработке фаза сигнала не оценивается, а оценивается только несущая частота. Навигационный приемник с когерентной обработкой сигналов позволяет получить более высокую точность НВО, чем некогерентный приемник, а некогерентный приемник имеет большую помехоустойчивость, чем когерентный приемник. В данном приемнике используем когерентную обработку сигнала. При этом сигнальная функция, входящая в наблюдения на интервале накопления $T = [t_{k-1,1}, t_{k-1,M}]$, имеет следующий вид

$$s(t_{k-1,l}) = Ah_{ДК}(t_{k-1,l} - \tau_{k-1,l}) \cos(\omega_{\Pi} t_{k-1,l} + \varphi_{0,k}), \quad (16)$$

где ω_{Π} - промежуточная частота сигнала на выходе ВЧ-приемника.

Подставим (16) в (15), а затем полученное выражение в (14), проведем дифференцирование по оцениваемому параметру τ :

$$\begin{aligned} u_{ДК}(\hat{\tau}_k) &= \left(\frac{\partial \ln f(Y_1^M, \tau)}{\partial \tau} \right)^T \Bigg|_{\tau=\hat{\tau}_k} = \frac{1}{\exp\left(\frac{1}{\sigma_n^2} \sum_{l=1}^M s(t_{k-1,l}, \tau) y(t_{k-1,l})\right)} \times \\ &\times \exp\left(\frac{1}{\sigma_n^2} \sum_{l=1}^M s(t_{k-1,l}, \tau) y(t_{k-1,l})\right) \times \\ &\times \frac{A}{\sigma_n^2} \sum_{l=1}^M y(t_{k-1,l}) \frac{\partial h_{ДК}(t_{k-1,l} - \tilde{\tau}_k)}{\partial \tau} \cos(\omega_{\Pi} t_{k-1,l} + \varphi_{0,k}) = \\ &= \frac{A}{\sigma_n^2} \sum_{l=1}^M y(t_{k-1,l}) \frac{\partial h_{ДК}(t_{k-1,l} - \tilde{\tau}_k)}{\partial \tau} \cos(\omega_{\Pi} t_{k-1,l} + \varphi_{0,k}) \end{aligned}$$

Дифференцирование $h_{ДК}(t_{k-1,l} - \tilde{\tau}_k)$ по задержке заменим вычислением конечной разности. Введем расстройку $\Delta\tau$ и запишем

$$\frac{\partial h_{ДК}(t_{k-1,l} - \tilde{\tau}_k)}{\partial \tau} \approx \frac{h_{ДК}(t_{k-1,l} - (\tilde{\tau}_k + \Delta\tau/2)) - h_{ДК}(t_{k-1,l} - (\tilde{\tau}_k - \Delta\tau/2))}{\Delta\tau}$$

С учетом этого схема дискриминатора задержки из рис. 13, может быть представлена в виде, приведенном на рис. 14.

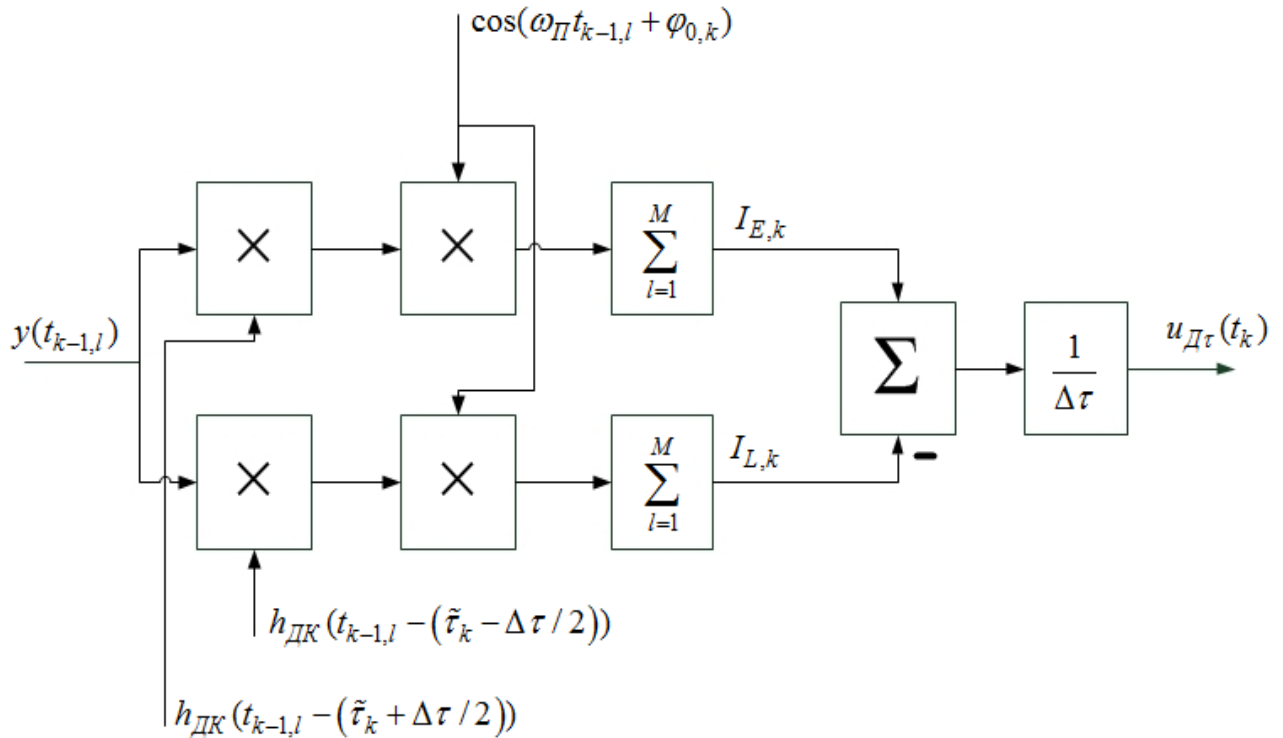


Рис. 14. Схема дискриминатора задержки огибающей сигнала

Компоненты

$$I_{E,k} = \frac{A}{\sigma_n^2} \sum_{l=1}^M y(t_{k-1,l}) h_{ДК}(t_{k-1,l} - (\tilde{\tau}_k + \Delta\tau/2)) \cos(\omega_{\Pi} t_{k-1,l} + \varphi_{0,k})$$

и

$$I_{L,k} = \frac{A}{\sigma_n^2} \sum_{l=1}^M y(t_{k-1,l}) h_{ДК}(t_{k-1,l} - (\tilde{\tau}_k - \Delta\tau/2)) \cos(\omega_{\Pi} t_{k-1,l} + \varphi_{0,k})$$

(17)

соответствуют опережающему (early) $h_{ДК}(t_{k-1,l} - (\tilde{\tau}_k + \Delta\tau/2))$ и запаздывающему (late) $h_{ДК}(t_{k-1,l} - (\tilde{\tau}_k - \Delta\tau/2))$ опорным сигналам, соответственно.

В ветках дискриминатора используются синфазные корреляторы с опережающим и запаздывающим опорными сигналами дальномерного кода,

соответственно, на выходах данных корреляторов имеем опережающую $I_{E,k}$ и запаздывающую $I_{L,k}$ синфазные компоненты.

В данной схеме дискриминатора задержки используется экстраполированная оценка $\tilde{\tau}_k$ информативного параметра, получаемая на выходе сглаживающего фильтра следящей системы (см. рис. 13).

Таким образом, данный дискриминатор задержки огибающей (ДЗО) может быть описан соотношением

$$u_{D\tau}(t_k) = \frac{I_{E,k} - I_{L,k}}{\Delta\tau}.$$

Исходя из этого, выведем его статистические характеристики.

Выражение для дискриминационной характеристики

$$U(\varepsilon_\tau) \approx (\bar{I}_{E,k} - \bar{I}_{L,k}), \quad (18)$$

где $\bar{I}_{E,k}$ и $\bar{I}_{L,k}$ - регулярные составляющие опережающей и запаздывающей синфазных компонент (17). В данном ДЗО отсутствуют ошибки по частоте и по фазе, следовательно, в соответствии с [1], для регулярных составляющих опережающих и запаздывающих компонент можно записать следующее выражение

$$\bar{I}_{E(L),k} = \frac{A^2 T}{N_0} \rho(\varepsilon_\tau \mp \Delta\tau/2) = 2q_{c/n_0} T \rho(\varepsilon_\tau \mp \Delta\tau/2), \quad (19)$$

где A - амплитуда сигнала, T - интервал накопления, N_0 - односторонняя спектральная плотность внутреннего шума приемника, $\rho(\varepsilon_\tau \mp \Delta\tau/2)$ - корреляционная функция дальномерного кода для запаздывающей и опережающей компонент.

Подставляя (19) в (18) запишем выражение для дискриминационной характеристики ДЗО

$$U(\varepsilon_\tau) \approx 2q_{c/n_0} T (\rho(\varepsilon_\tau - \Delta\tau/2) - \rho(\varepsilon_\tau + \Delta\tau/2)). \quad (20)$$

График нормированной к $2q_{c/n_0}T$ дискриминационной характеристики представлен на рис. 15 при $\Delta\tau = \frac{\tau_c}{3}$.

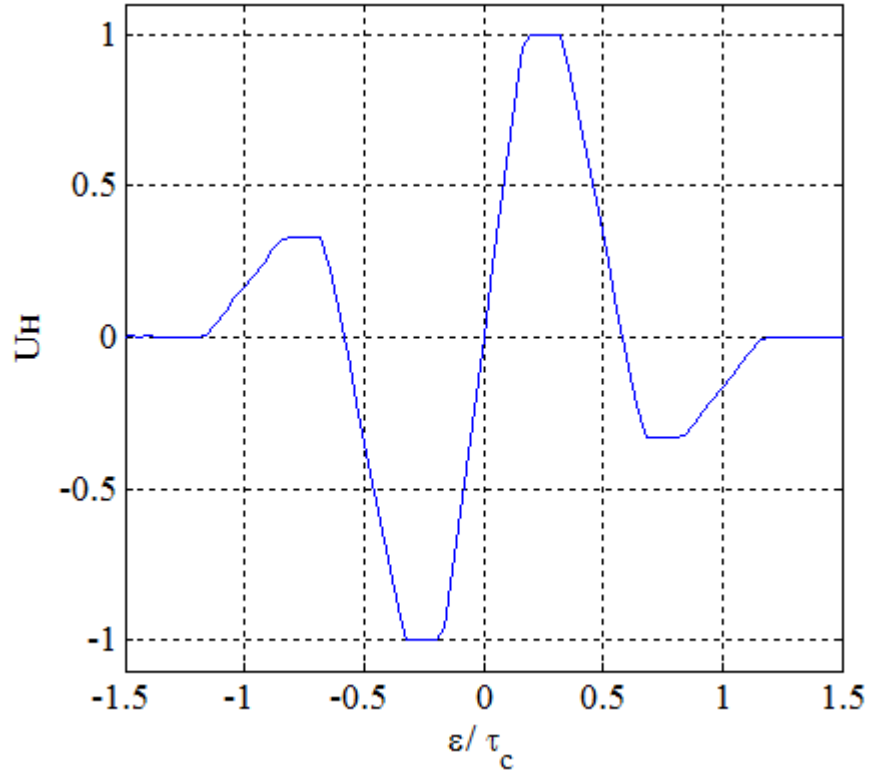


Рис. 15. Нормированная дискриминационная характеристика ДЗО

Апертура дискриминационной характеристики $\Delta_\tau = \pm 0.58\tau_c$.

Крутизна дискриминационной характеристики (20) равна

$$S_{D_\tau} = \left. \frac{\partial U(\varepsilon_\tau)}{\partial \varepsilon_\tau} \right|_{\varepsilon_\tau=0} = 2q_{c/n_0}T \left(\frac{1.5}{0.5\tau_c} - \left(-\frac{1.5}{0.5\tau_c} \right) \right) = 2q_{c/n_0}T \frac{6}{\tau_c} = \frac{12q_{c/n_0}T}{\tau_c}.$$

Флуктуационная характеристика ДЗО определяется соотношением

$$D_{\eta_\tau} = M[(I_{E\phi} + I_{L\phi})^2] = D_{I_{E\phi}} + D_{I_{L\phi}} - 2D_{I_{E\phi}I_{L\phi}}, \quad (21)$$

где $D_{I_{E\phi}}, D_{I_{L\phi}}$ - дисперсии флуктуационной составляющей синфазной опережающей и запаздывающей компонент, $D_{I_{E\phi}I_{L\phi}}$ - взаимная дисперсия синфазных компонент. В соответствии с [1], выражения для дисперсии

флуктуационной составляющей синфазной опережающей и запаздывающей компонент и взаимной дисперсии синфазных компонент, выглядят следующим образом

$$D_{I_{E\phi}} = D_{I_{L\phi}} = 2q_{c/n_0} T, \quad (22)$$

$$D_{I_{E\phi}I_{L\phi}} = \rho(\Delta\tau)A^2T / N_0 = 2q_{c/n_0} T \rho(\Delta\tau), \quad (23)$$

где A - амплитуда сигнала, T - интервал накопления, N_0 - односторонняя спектральная плотность внутреннего шума приемника.

Подставляя (22) и (23) в (21), запишем выражение для флуктуационной характеристики ДЗО

$$D_{\eta_\tau} = 4q_{c/n_0} T(1 - \rho(\Delta\tau)).$$

$$\text{При } \Delta\tau = \frac{\tau_c}{3}, \rho(\Delta\tau) \approx 0, \text{ следовательно, } D_{\eta_\tau} = 4q_{c/n_0} T. \quad (24)$$

Структура фильтра обобщенной следящей системы рис. 13. Определяется динамикой изменения информативного процесса λ_k . Поэтому при синтезе оптимальной следящей системы необходимо задать априорную модель изменения данного процесса, для чего используют его описание в пространстве состояний. Зададим априорную модель изменения задержки сигнала следующими уравнениями

$$\tau_k = \tau_{k-1} + T v_{\tau,k-1}, v_{\tau,k} = v_{\tau,k-1} + \xi_{\tau,k-1}, \quad (25)$$

где $\xi_{\tau,k-1}$ - ДБГШ с нулевым математическим ожиданием и дисперсией D_{ξ_τ} .

Запишем эквивалентное наблюдение

$$\tilde{y}_k = \tau_k + \tilde{\eta}_{\tau,k}, \quad (26)$$

где $\tilde{\eta}_{\tau,k}$ - ДБГШ с дисперсией

$$D_{\tilde{\eta}_\tau} = \frac{D_{\eta_\tau}}{S_{D_\tau}^2}.$$

Введем вектор $x = \begin{bmatrix} \tau_k & \nu_{\tau,k} \end{bmatrix}^T$. Записывая уравнения (25) в векторной форме, получаем

$$F = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \text{ а так же, исходя из (26), } H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

С учетом (27) уравнения оптимальной дискретной фильтрации конкретизируются в виде

$$\begin{aligned} \hat{\tau}_k &= \tilde{\tau}_k + K_{1,k} (\tilde{y}_k - \tilde{\tau}_k), \quad \tilde{\tau}_k = \hat{\tau}_{k-1} + T \hat{\nu}_{\tau,k-1}, \\ \hat{\nu}_{\tau,k} &= \hat{\nu}_{\tau,k-1} + K_{2,k} (\tilde{y}_k - \tilde{\tau}_k), \\ K_{1,k} &= D_{11,k} / D_{\tilde{\eta}_\tau}, \quad K_{2,k} = D_{12,k} / D_{\tilde{\eta}_\tau}, \end{aligned} \quad (28)$$

где D_{ij} , $i, j = \overline{1,2}$ - элементы матрицы D_x дисперсий ошибок фильтрации вектора x , удовлетворяющей следующим уравнениям

$$D_{x,k}^{-1} = \tilde{D}_{x,k}^{-1} + H^T H / D_{\tilde{\eta}_\tau}, \quad \tilde{D}_{x,k} = F D_{x,k-1} F^T + G G^T D_{\tilde{\eta}_\tau},$$

где $\tilde{D}_{x,k}$ - матрица дисперсий ошибок экстраполяции вектора x .

Для перехода к нелинейной следящей системе за задержкой сигнала представим (28) в виде

$$\begin{aligned} \hat{\tau}_k &= \tilde{\tau}_k + \frac{K_{1,k} T}{S_{D\tau}} \left[S_{D\tau} (\tilde{y}_k - \tilde{\tau}_k) \right], \quad \tilde{\tau}_k = \hat{\tau}_{k-1} + T \hat{\nu}_{\tau,k-1}, \\ \hat{\nu}_{\tau,k} &= \hat{\nu}_{\tau,k-1} + \frac{K_{2,k} T}{S_{D\tau}} \left[S_{D\tau} (\tilde{y}_k - \tilde{\tau}_k) \right], \end{aligned} \quad (29)$$

Заменим $S_{D\tau} (\tilde{y}_k - \tilde{\tau}_k)$ - линеаризованный статистический эквивалент дискриминатора на его нелинеаризованный эквивалент $u_{D\tau,k} = U_{D\tau}(\tau_k, \tilde{\tau}_k) + \eta_{\tau,k}$,

и вводя обозначения $\tilde{K}_1 = \frac{K_1 T}{S_{D\tau}}, \tilde{K}_2 = \frac{K_2 T}{S_{D\tau}}$ - коэффициенты сглаживающего

фильтра (СФ), представим (29) в виде

$$\begin{aligned}\hat{\tau}_k &= \tilde{\tau}_k + \tilde{K}_1 u_{D\tau,k}, \quad \tilde{\tau}_k = \hat{\tau}_{k-1} + T \hat{V}_{\tau,k-1}, \\ \hat{V}_{\tau,k} &= \hat{V}_{\tau,k-1} + \tilde{K}_2 u_{D\tau,k},\end{aligned}\quad (30)$$

Одной из важных характеристик следящих систем является их шумовая полоса пропускания Δf_{CC3} . Ширина полосы пропускания ССЗ зависит от динамики потребителя, т.е. от среднеквадратического значения ускорения вдоль линии потребитель – НС или ПС. Оптимальные значения полосы пропускания ССЗ лежат в пределах 0,5...4 Гц. Примем ширину полосы пропускания равную 2 Гц. В соответствии с [1]

$$K_2 = \left(\frac{\Delta f_{CC3}}{0.53} \right)^2 = 14.24, \quad K_1 = \sqrt{2K_2} = 5.34.$$

Таки образом значения коэффициентов сглаживающего фильтра равны $\tilde{K}_1 = 0.00534$, $\tilde{K}_2 = 0.01424$.

При заданной полосе пропускания Δf_{CC3} и односторонней спектральной плотности $\tilde{N}_\tau = D_{\tilde{\eta}_\tau} 2T$ эквивалентного шума наблюдений $\tilde{\eta}_\tau(t)$ выведем формулу для СКО флуктуационной ошибки оценки задержки

$$\begin{aligned}\sigma_{ф.ош.\tau} &= \sqrt{\Delta f_{CC3} \tilde{N}_\tau} = \sqrt{\Delta f_{CC3} D_{\tilde{\eta}_\tau} 2T} = \sqrt{\frac{\Delta f_{CC3} D_{\eta_\tau} 2T}{S_{D_\tau}^2}} = \\ &= \sqrt{\frac{\Delta f_{CC3} 8q_{c/n_0} T^2 \tau_c^2}{(12q_{c/n_0} T)^2}} = \sqrt{\frac{\Delta f_{CC3} \tau_c^2}{18q_{c/n_0}}}\end{aligned}$$

Для улучшения точности работы ССЗ с высокодинамичными потребителями в реальной НАП в сглаживающий фильтр вводится оценка доплеровской частоты $\tilde{\omega}_D$. Система фазовой автоподстройки (ФАП) имеет высокую точность измерения частоты Доплера. При этом, зная частоту несущей ω_0 , рассчитывается скорость

изменения задержки $V_\tau = \frac{\tilde{\omega}_D}{\omega_0}$, которую используем как дополнительную информацию в СФ.

Модель данной системы была написана в среде имитационного моделирования Matlab (см. приложение 2). Проведем анализ результатов моделирования.

На вход системы подавалось воздействие, на основе модели движения потребителя относительно псевдоспутников. ПС были расставлены в соответствии с выводами о наилучшем взаимном расположении из пункта 2.1, а именно: расстояние между ПС1 и ПС2 равно 100 км, между ПС2 и ПС4 равно 100 км, между ПС2 и ПС3 равно 75 км, соответственно, в геодезической системе координат $\{H, м; L, град; B, град\}$ были заданы следующие координаты псевдоспутников:

- ПС1 (50; 37.382040; 54.905985)
- ПС2 (10; 36.887656; 55.816507)
- ПС3 (70; 35.679160; 55.822693)
- ПС4 (30; 37.217246; 56.715190)

и начальная координата потребителя:

- ПРМ (40; 37.491043; 55.843788)

Общий вид расположения псевдоспутников и движения потребителя, соответствующий модели исследования, представлен на рис. 16 в подвижной геоцентрической системе координат принятой в СРНС ГЛОНАСС и определённой как ПЗ-90.

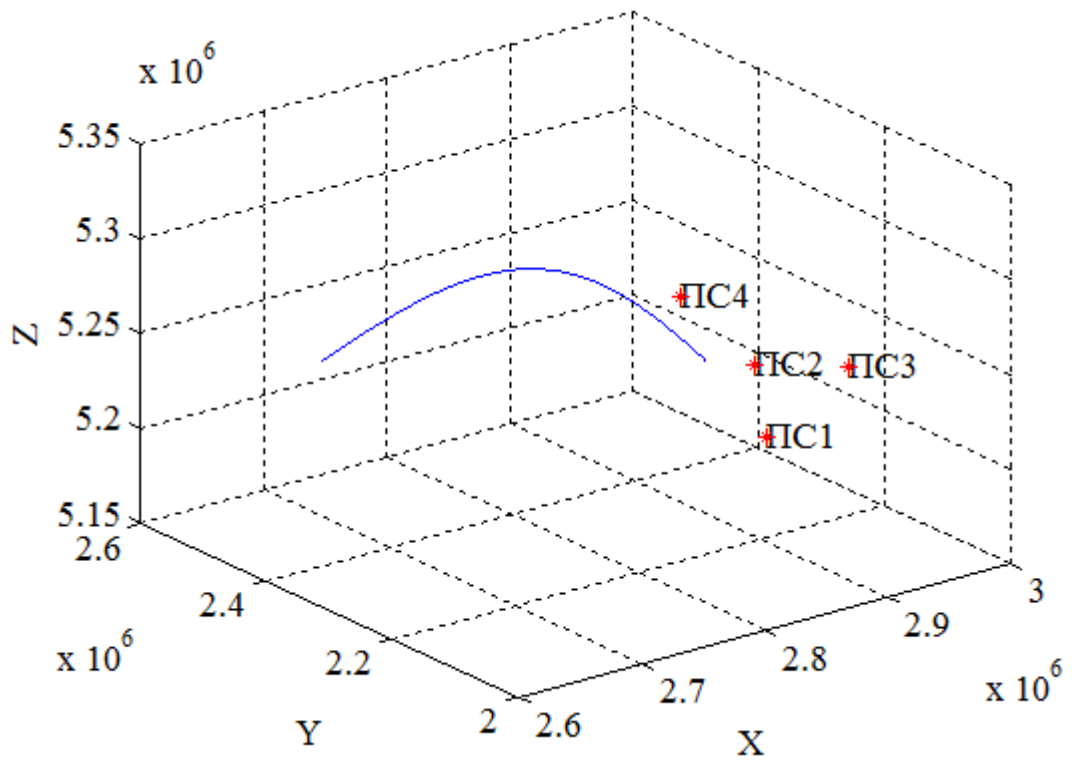


Рис. 16. Общий вид расположения псевдоспутников и траектория движения потребителя

Задержка радиосигнала $\tilde{\tau}_k$, как входное воздействие, полученное на основе движения потребителя относительно ПС, представлена на рис. 17.

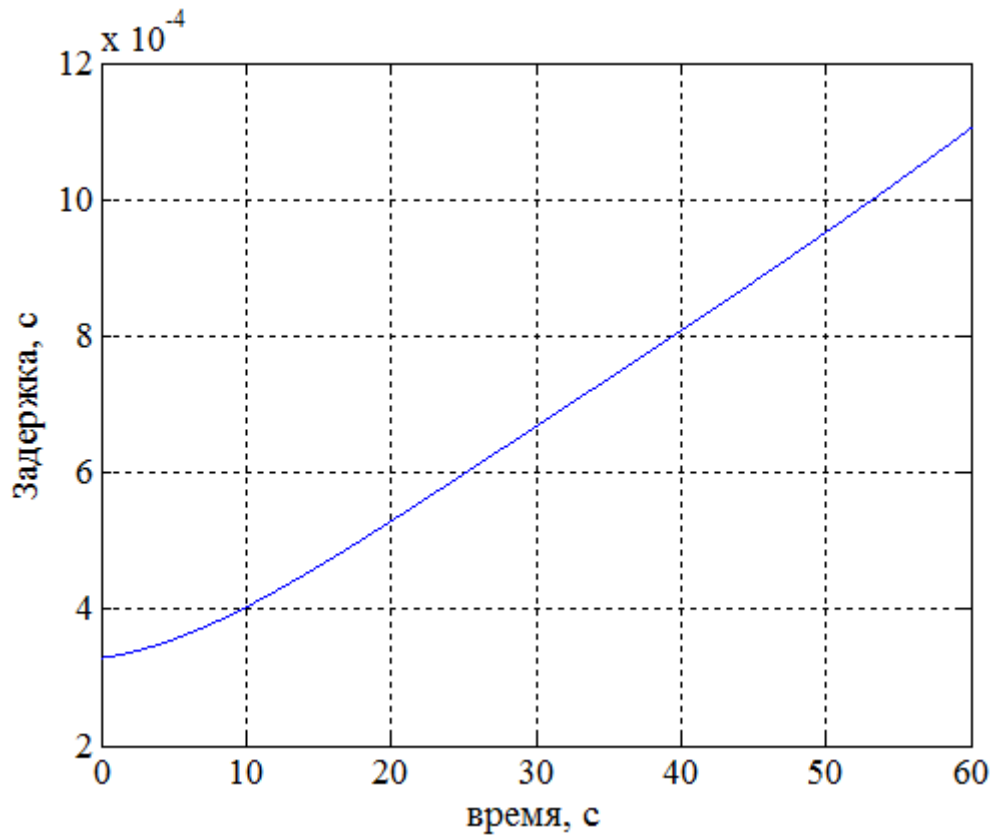


Рис. 17. Задержка радиосигнала от ПС

На рис. 18 показано, как меняется входной процесс и его оценка на выходе оптимального фильтра в отсутствии шума наблюдений, т.е. на вход приемника поступают наблюдения $y(t_k) = s(t_k) = Ah_{ДК}(t_k - \tilde{\tau}_k) \cos(\omega_{П} t_k + \varphi_{0,k})$. Шаг дискретизации по времени $T_d = 0.001$ с, время наблюдения $T_n = 4$ с. Для удобства последующих выводов графики представлены для оценки дальности $\tilde{R}_k = \tilde{\tau}_k \times c$, где c - скорость света.

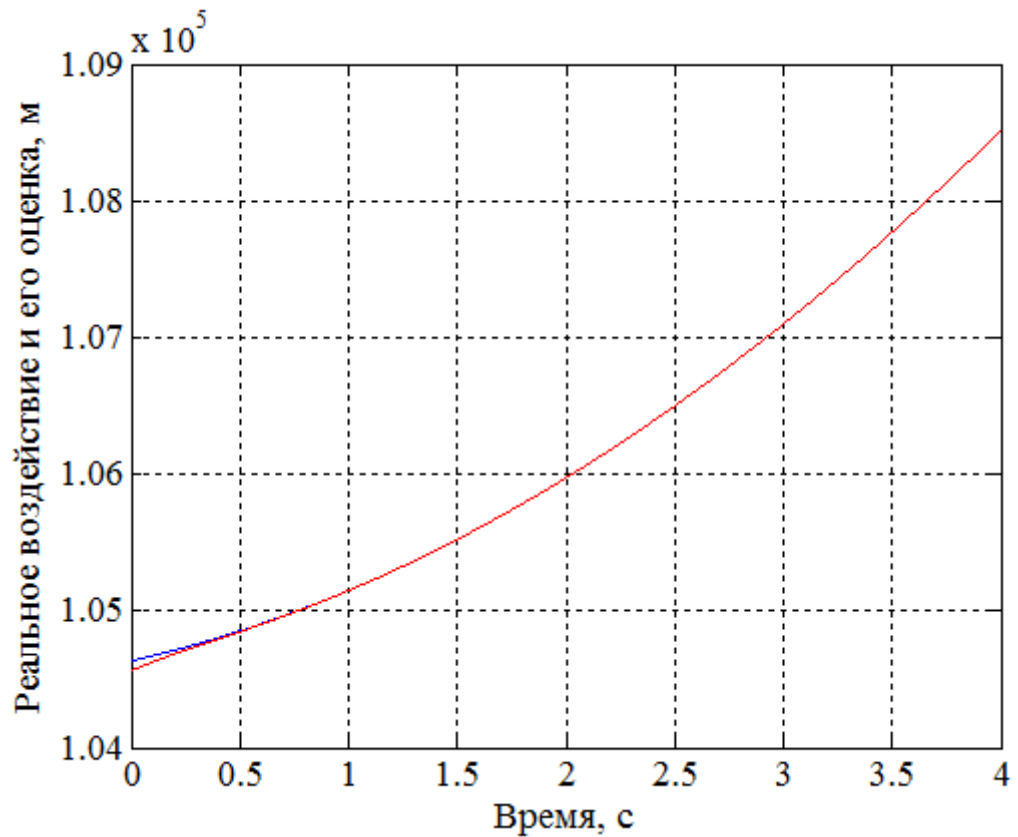


Рис. 18. График оценки и реального значения дальности от ПС

Как видно из графика оценка дальности \tilde{R}_k на начальном этапе наблюдения на выходе оптимального фильтра отличается от реальной. Затем с нарастанием времени наблюдения оценка дальности \tilde{R}_k на выходе оптимального фильтра приближается к реальному значению и далее в установившемся режиме стремится к нему.

Приведем график ошибки слежения по дальности, рис. 19.

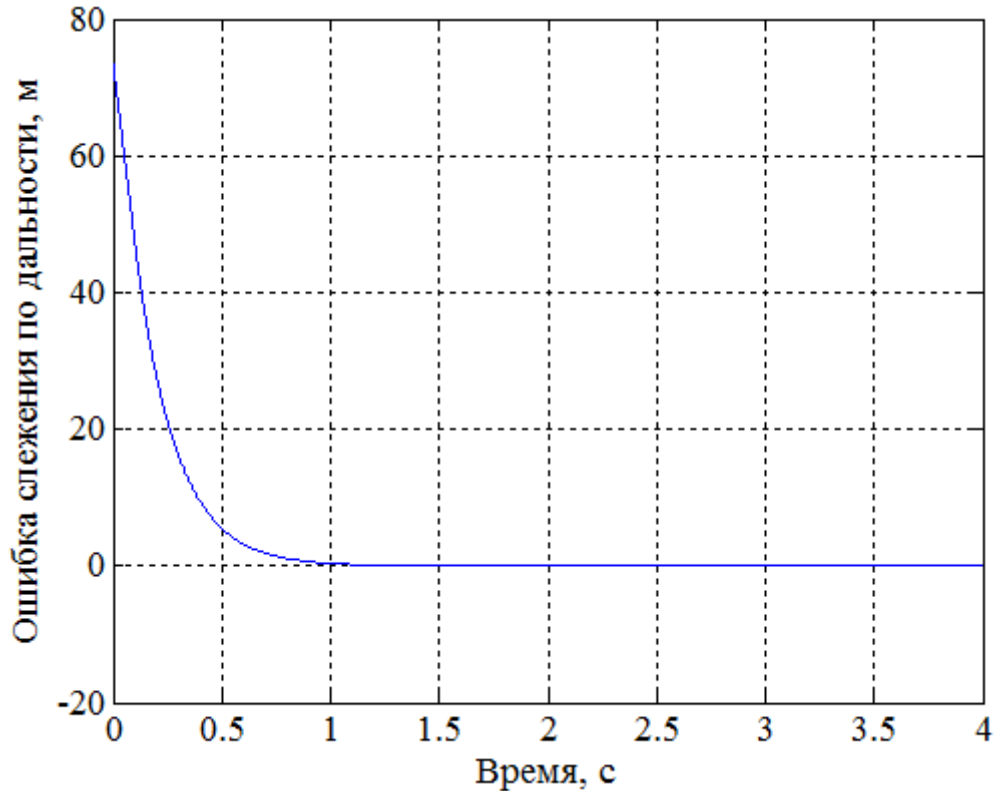


Рис. 19. График ошибки слежения по дальности от ПС

По графику видно, что происходит процесс слежения за изменением входного процесса, т.е. за задержкой радиосигнала. Время переходного процесса примерно равно 1.5 с. Характер графика соответствует принятой ранее полосе пропускания системы $\Delta f_{CC3} = 2$ Гц. Ошибка слежения в установившемся режиме составляет от 1.04×10^{-3} м до 1.89×10^{-3} м.

Проверим работоспособность системы при наличии входного сигнала с шумом, т.е. на вход приемника поступают наблюдения $y(t_k) = s(t_k) + n_k = Ah_{ДК}(t_k - \tilde{\tau}_k) \cos(\omega_{П} t_k + \varphi_{0,k}) + n_k$, где n_k - дискретный БГШ с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $\sigma_n^2 = N_0 / (2T_d)$. В пункте 3 для системы псевдоспутников был рассчитан диапазон изменения отношения сигнал/шум \tilde{q}_{c/n_0} для всей навигационной радиолинии: 113.92 – 64.5 дБГц. Наихудшее значение \tilde{q}_{c/n_0} в самой дальней точке движения потребителя равно

64.5 дБГц. Для СРНС ГЛОНАСС типичное значение отношения сигнал/шум равно от 40 дБГц до 45 дБГц. Для наглядности проведем моделирование для $\tilde{q}_{c/n_0} = 40$ дБГц. График ошибки слежения по дальности при $\tilde{q}_{c/n_0} = 40$ дБГц представлен на рис. 20, в увеличенном временном масштабе на рис. 21, при $\tilde{q}_{c/n_0} = 64.5$ дБГц на рис. 22, в увеличенном временном масштабе на рис. 23. Шаг дискретизации по времени $T_d = 0.001$ с, время наблюдения $T_H = 4$ с.

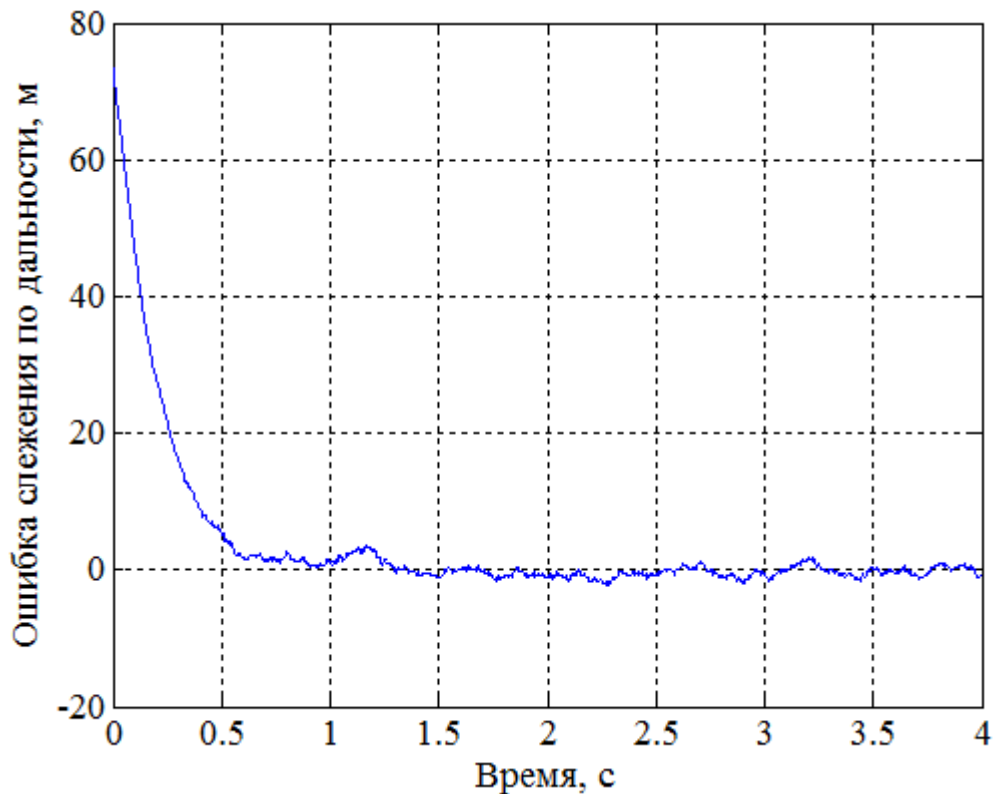


Рис. 20. График оценки ошибки слежения по дальности от ПС при наличии шума наблюдений для $\tilde{q}_{c/n_0} = 40$ дБГц

Время переходного процесса остаётся примерно равным 1.5 с. Характер графика соответствует принятой ранее полосе пропускания системы $\Delta f_{CC3} = 2$ Гц. Рассмотрим этот же график в увеличенном масштабе по времени наблюдения [1.5; 4].

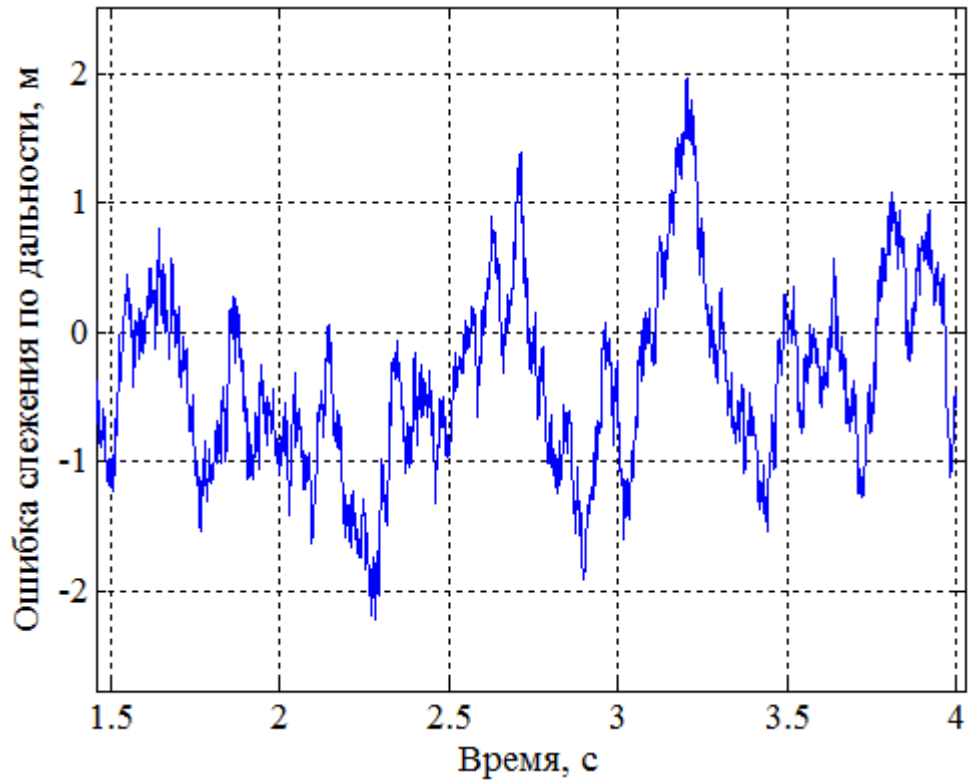


Рис. 21. График оценки ошибки слежения по дальности от ПС при наличии шума наблюдений для $\tilde{q}_{cln_0} = 40$ дБГц в увеличенном временном масштабе.

Расчетное значение СКО шумовой ошибки $\sigma_{\phi.ош.\tau} = 0.9$ м, что соответствует графику наблюдения. Ошибка слежения в установившемся режиме составляет до 1.5 м.

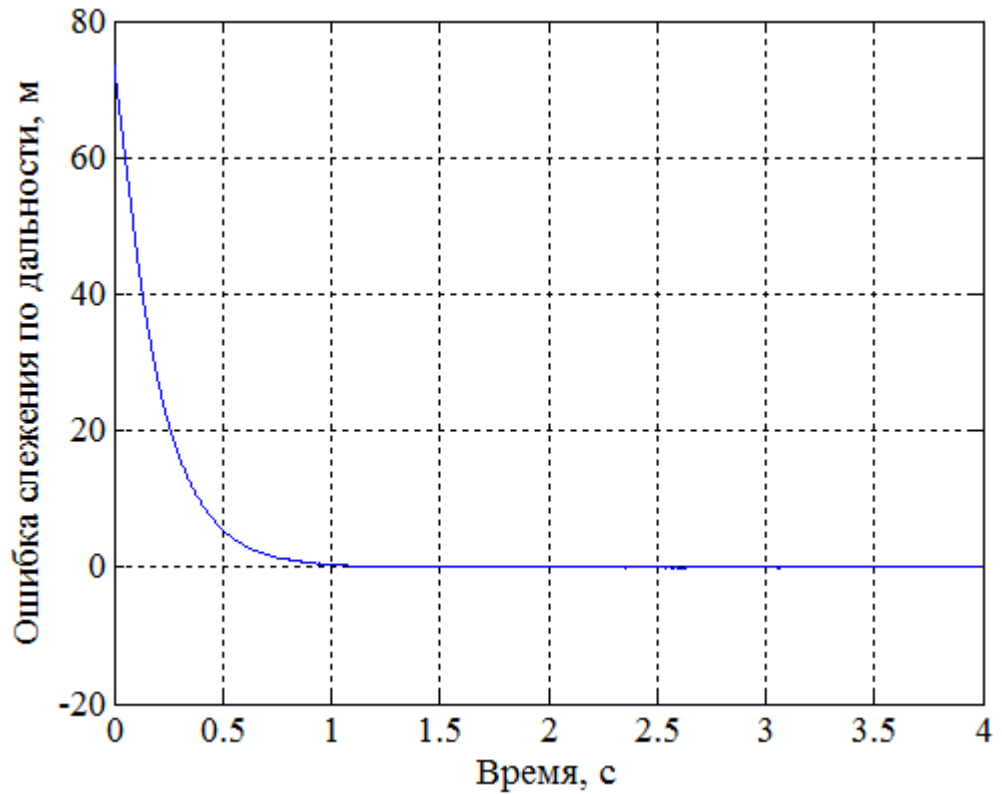


Рис. 22. График оценки ошибки слежения по дальности от ПС при наличии шума наблюдений для $\tilde{q}_{c/n_0} = 64.5$ дБГц

Время переходного процесса примерно равно 1.5 с. Характер графика соответствует принятой ранее полосе пропускания системы $\Delta f_{CC3} = 2$ Гц. Рассмотрим этот же график в увеличенном масштабе по времени наблюдения [1.5; 4].

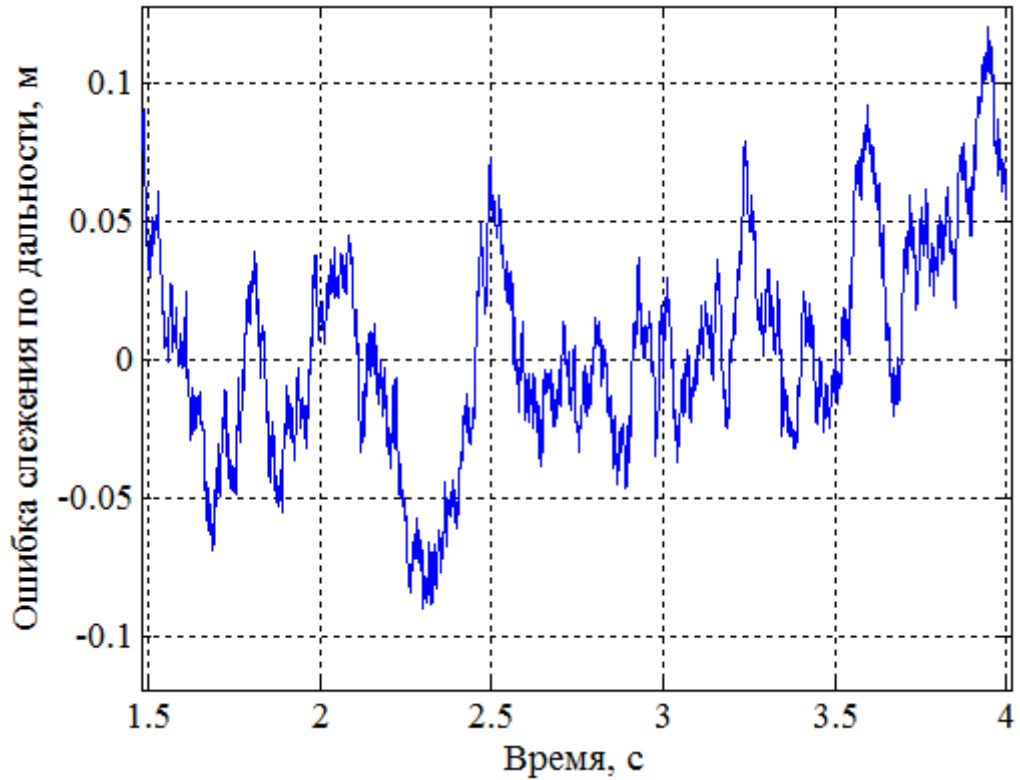


Рис. 23. График оценки ошибки слежения по дальности от ПС при наличии шума наблюдений для $\tilde{q}_{cln_0} = 64.5$ дБГц в увеличенном временном масштабе.

Расчетное значение СКО шумовой ошибки $\sigma_{\phi.ош.\tau} = 0.05$ м, что соответствует графику наблюдения. Ошибка слежения в установившемся режиме не превышает 0.1 м.

Результаты моделирования показывают значительное уменьшение ошибки слежения при работе по псевдоспутникам. Значения ошибок по дальности при работе по псевдоспутникам лежат в интервале $[-0.1; 0.1]$ м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследована дополнительная наземная система псевдоспутников. Которая может быть применена в случае недоступности решения по сигналам СРНС или решения с неприемлемой точностью. Наземная система псевдоспутников повышает устойчивость к средствам РЭБ за счет более высокого значения сигнал/шум, по сравнению с сигналами с орбитальных спутников, и увеличивает точность позиционирования, за счет отсутствия ионосферных и эфемеридных погрешностей, т.к. псевдоспутники расположены на земле, в заранее известных координатах.

Проведено исследование влияния относительного взаимного расположения псевдоспутников на точность определения координат потребителя. Составлена имитационная модель в среде Matlab для исследования горизонтального и вертикального геометрических факторов. На основе этого исследования сделан вывод о том, что приемлемая точность НВО при работе по предложенной системе псевдоспутников возможна лишь в горизонтальной плоскости, т.е. невозможно обеспечить точные измерения координат потребителя по высоте. Для решения навигационной задачи с требуемой точностью, как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях, требуется дополнительная информация, получаемая, например, от орбитальной группировки НС или барометрического высотомера. Для сигнала ПС выбрана частота излучения в соответствии с радиочастотным регламентом, предоставленным Международным союзом электросвязи (МСЭ). Рассчитаны энергетические характеристики навигационной радиолинии. Конечное значение отношения сигнал/шум в конце радиолинии, на расстоянии 300 км от ПС, равно 64.5 дБГц, что больше типичных значений СРНС ГЛОНАСС.

Исследован навигационный приемник, работающий по сигналам предложенных псевдоспутников, проведено соответствующее моделирование в Matlab. Результаты моделирования подтверждают, что увеличение отношения сигнал/шум благоприятно влияет на работу системы слежения за задержкой радиосигнала. В установившемся режиме значения ошибок слежения по дальности при работе по псевдоспутникам лежат в интервале $[-0.1; 0.1]$ м.

Точность измерения дальности при работе по ПС повышается в 10-15 раз, при этом, горизонтальный коэффициент геометрии ухудшается примерно в такое же число раз. Поэтому при определении координат потребителя в горизонтальной плоскости эти два фактора компенсируют друг друга, соответственно, точность определения координат потребителя по сигналам псевдоспутников получается такой же, что и по сигналам орбитальных НС.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Бакитько Р.В., Болденков Е.Н. и др. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010.
2. Перов А.И. Основы построения спутниковых радионавигационных систем. Учеб. пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2012.
3. Перов А.И. Методы и алгоритмы оптимального приема сигналов в аппаратуре потребителей спутниковых радионавигационных систем. Учеб. пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2012.
4. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. Учеб пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2003.
5. Ярлыков М.С. Статистическая теория радионавигации. - М.: Радио и связь, 1985.
6. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005.
7. «Регламент радиосвязи. Распределение, присвоение и использование радиочастот» Международный союз электросвязи (МСЭ).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Листинг программы в среде Matlab

```

clc
clear all;
close all;
% Зададим координаты псевдоспутников (км):
x1=150; y1=50; z1=0.05;
x2=145; y2=150; z2=0.01;
x3=0; y3=150; z3=0.07;
x4=150; y4=250; z4=0.03;
% Счетчик положений объекта:
i=0;
x=120;y=150;z=0.04;
for t=0:pi/10:pi
% Задаем уравнения движения объекта:
x=x+30;
y=y;
z=z+50*sin(t);
    i=i+1;
    X(i)=x;
    Y(i)=y;
    Z(i)=z;
% Матрица направляющих косинусов:
H=[(2*x - 2*x1)/(2*((x1 - x)^2 + (y1 - y)^2 + (z1 - z)^2)^(1/2)) (2*y - 2*y1)/(2*((x1 - x)^2 + (y1 - y)^2 + (z1 - z)^2)^(1/2)) (2*z - 2*z1)/(2*((x1 - x)^2 + (y1 - y)^2 + (z1 - z)^2)^(1/2)) 1;
(2*x - 2*x2)/(2*((x2 - x)^2 + (y2 - y)^2 + (z2 - z)^2)^(1/2)) (2*y - 2*y2)/(2*((x2 - x)^2 + (y2 - y)^2 + (z2 - z)^2)^(1/2)) (2*z - 2*z2)/(2*((x2 - x)^2 + (y2 - y)^2 + (z2 - z)^2)^(1/2)) 1;
(2*x - 2*x3)/(2*((x3 - x)^2 + (y3 - y)^2 + (z3 - z)^2)^(1/2)) (2*y - 2*y3)/(2*((x3 - x)^2 + (y3 - y)^2 + (z3 - z)^2)^(1/2)) (2*z - 2*z3)/(2*((x3 - x)^2 + (y3 - y)^2 + (z3 - z)^2)^(1/2)) 1;
(2*x - 2*x4)/(2*((x4 - x)^2 + (y4 - y)^2 + (z4 - z)^2)^(1/2)) (2*y - 2*y4)/(2*((x4 - x)^2 + (y4 - y)^2 + (z4 - z)^2)^(1/2)) (2*z - 2*z4)/(2*((x4 - x)^2 + (y4 - y)^2 + (z4 - z)^2)^(1/2)) 1];
% Корреляционная матрица ошибок:
R_osh=(inv(H*H));
% Вычисляем горизонтальный коэффициент геометрии:
horizontalRate=sqrt(R_osh(1)+R_osh(6));
HDOP(i)=horizontalRate;

```

```
verticalRate=sqrt(R_osh(11));
VDOP(i)=verticalRate;
```

```
T(i)=i;
z=0.04;
end
```

```
figure (1)
```

```
subplot(1,2,1);
```

```
plot(X,Y,'bo',X,Y,'g-.',x1,y1,'r*',x2,y2,'r*',x3,y3,'r*',x4,y4,'r*'); grid on;
```

```
%title('Расположение псевдоспутников (вид сверху)');
```

```
xlabel('X, км'); ylabel('Y, км'); text(x1+5,y1+5,z1+5,'ПС1');
```

```
text(x2+5,y2+5,z2+5,'ПС2'); text(x3+5,y3+5,z3+5,'ПС3'); text(x4-5,y4-5,z4-5,'ПС4');
```

```
subplot(1,2,2);
```

```
plot(T,HDOP,'g:',T,HDOP,'r*');
```

```
grid on;
```

```
%title('ГОРИЗОНТАЛЬНОГО коэффициента геометрии');
```

```
xlabel('Позиции объекта, i'); ylabel('HDOP');
```

```
figure (2)
```

```
plot(T,VDOP,'g:',T,VDOP,'r*');
```

```
grid on;
```

```
%title('ГОРИЗОНТАЛЬНОГО коэффициента геометрии');
```

```
xlabel('Позиции объекта, i'); ylabel('VDOP');
```

```
figure (3)
```

```
plot3(X,Y,Z,'bo',X,Y,Z,'g-.',x1,y1,z1,'r*',x2,y2,z2,'r*',x3,y3,z3,'r*',x4,y4,z4,'r*'); grid
```

```
on; title('Траектория движения объекта (объемный вид)');
```

```
xlabel('X'); ylabel('Y'); zlabel('Z'); text(x1+2,y1+2,z1+2,'ПС1');
```

```
text(x2+2,y2+2,z2+2,'ПС2'); text(x3+2,y3+2,z3+2,'ПС3'); text(x4-2,y4-2,z4-2,'ПС4');
```


ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Листинг программы в среде Matlab

```

clc
clear all;
close all hidden;
%profile on
c=299792458; % скорость света, м/с
j=sqrt(-1);
m=1;
f_c=1.023e+06; % частота следования символов кода (частота BPSK)
phi=0;
T=1e-03; % период функции модуляции/время накопления в корреляторе
f_sub=m*f_c; % частота отстройки поднесущих (частота меандров)
tau_s=1/(2*f_sub); % длительность половины периода модулирующей
гармонической функции.
wd = 2.513274122871835e+08;
Td = 2*pi / wd;
w_p = wd/6.283185307179587;
Nd = fix(T/Td); %кол-во периодов дискретизации
N=1023; % кол-во символов в одном периоде BPSK
tau_e=T/N; % длительность символа BPSK
N0=7.0795e-21; % спектральная плотность шума
disp=N0/(2*Td); %дисперсия шума
СКО=sqrt(disp); % СКО шума
q_dBHz=input('Введите значение отношения сигнал/шум, дБГц: ');
q=10^(q_dBHz/10); % перевод q из дБГц в Гц
A=sqrt(2*N0*q); % амплитуда входного сигнала
delt_f_dll=2; % значение полосы пропускания ССЗ, Гц / ССЗ (DLL ? Delay Locked
Loop)
TT=input('Введите желаемое время наблюдения процесса, с: '); % с, общее время
наблюдения процесса
Dtau = 2*tau_s/3; % задержка для E & L дальномерного кода в дискриминаторе
%коэффициенты усиления непрерывной системы фильтрации
Kn2=(delt_f_dll/0.53)^2;
Kn1=sqrt(2*Kn2);
%коэффициенты усиления дискретной системы фильтрации
K1=Kn1*T;
K2=Kn2*T;
S_d_tau =(12*q*T)/(2*tau_s); % крутизна дискриминационной характеристики
D_flukt_tau=delt_f_dll*(((2*tau_s)^2)/(18*q));

```

```

CKO_shum_osh=sqrt(D_flukt_tau);
% образующий полином 1+(x^3)+(x^10)
reg_1 = [1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]; % код Голда
for p=1:N
tmp = xor(reg_1(3), reg_1(10)); % суммирование по mod 2 с 3его и 10ого разряда
reg_1(2:10) = reg_1(1:9); % сдвигаем регистр на разряд вправо
reg_1(1) = tmp;
res(p) = reg_1(10); % снимаем результат с 10ого разряда регистра
end
%
last_vol=res(1023);
res(2:1023)=res(1:1022);
res(1)=last_vol;
PSP=res; %полученная BPSK (1023 символа '0' и '1')
% замени '0' на '1' в полученной PSP
for z=1:N
    if PSP(z)==0
        PSP(z)=1;
    else
        PSP(z)=-1;
    end
end
t=0:tau_s:T-tau_s;
numb=nan(1, length(t));
BPSK=nan(1, length(t));
for k=1:length(t)
    numb(k)=fix((t(k)+0.1e-07)/tau_e)+1; % номер символа ПСП - (+0.1e-07
нужно, чтобы символ определялся точнее)
    BPSK(k)=PSP(numb(k)); % каждый символ PSP берется дважды в такт
половине периода цифровой синусоиды
    r(k)=sign(sin((2*pi*f_sub*t(k))+pi/2)); % цифровая синусоида
    h(k)=r(k)*BPSK(k); % функция дальномерного кода с ВОС модуляцией
end % дальномерный код с ВОС (1,1) модуляцией
h_size=size(h,2);
% Delay data coming...
Mode=input('Выберите вариант работы: \n [1:по наземным ПС] \n [2:по
орбитальным НС] \n: '); %
switch Mode
    case 1
        PS_number=input('Выберите номер псевдоспутника (1-4): '); %
        Delay = Coordination2Delay_PS(PS_number);
    case 2
        Delay = Coordination2Delay_S;

```

```

end
Noise=input('Сигнал с шумом? \n [1:да] \n [2:нет] \n: '); %
switch Noise
    case 1
        yes = 1;
    case 2
        yes = 0;
end
% циклы оценки информативного параметра
t1=0:T:TT;
N_cell_delay=fix(Delay(1)/(0.5*tau_s)); % определим ячейку поиска по задержке
delay_0 = Delay(1); %задержка ДК принятого сигнала
delay_og= Delay(1)-(0.5*tau_s); % задержка опорного ГДК
(N_cell_delay)*0.5*tau_s
delta_delay=abs(delay_0-delay_og); %начальная ошибка по задержке
fprintf('Задержка ДК входного сигнала: %d м \n', delay_0*c);
fprintf('Задержка опорного ДК: %d м \n', delay_og*c);
fprintf('Начальная ошибка по задержке: %d м \n', delta_delay*c);
E_delay=nan(1,length(t1)-1);
Ud=nan(1,length(t1)-1);
time=nan(1,length(t1)-1);
X_est=nan(1,length(t1)-1);
F = [1 T;
      0 1];
K= [K1;
     K2];
for p=1:(length(t1)-1)
    nu(p)=(Delay(p+1)-Delay(p))/T; % скорость изменения задержки
end
Xest = [delay_og; 0]; % = [tau; nu];
wb = waitbar(0,'Подождите, пожалуйста, экспериментирую. ');
for n=1:(length(t1)-1)
    Xist=[Delay(n);nu(n)];
    Xextr=F*Xest;
    noise=CKO.*randn(1,Nd);
    y=A*h( 1+mod(fix( (Xist(1) + (0:Nd-1)*Td) / tau_s ), h_size) ) .*
cos(w_p*Td*(0:Nd-1) + phi)+noise*yes; % накопленные за T отсчеты сигнала
    I_e =(A/disp)*sum(y * (h( 1+mod(fix( (Xextr(1) + Dtau/2 + (0:Nd-1)*Td) / tau_s ),
h_size) ) .* cos(w_p*Td*(0:Nd-1) + phi)));
    I_l = (A/disp)*sum(y * (h( 1+mod(fix( (Xextr(1) - Dtau/2 + (0:Nd-1)*Td) / tau_s ),
h_size) ) .* cos(w_p*Td*(0:Nd-1) + phi)));
    U_d=(I_e-I_l);
    e_delay=Delay(n)-Xextr(1);

```

```

Xest = Xextr + K*(U_d/S_d_tau);
Xest(2)=nu(n);
E_delay(n)=e_delay;
Ud(n)=U_d/S_d_tau;
X_est(n)=Xest(1);
time(n)=t1(n);
waitbar(n/length(t1));
end %TT
close(wb)

fprintf('Конечная ошибка по задержке: %d м \n', E_delay(n)*c);
fprintf('Расчетное значение СКО шумовой ошибки: %d м \n',
СКО_shum_osh*c*yes);

figure ('Name','Переходный процесс');
plot(time,E_delay*c);
grid on;
set(gcf, 'color', 'white');
xlabel('Время, с');
ylabel('Ошибка слежения по дальности, м');

% figure (4)
% plot(time,Ud*c);
% grid on;
% set(gcf, 'color', 'white');
% xlabel('time, s');
% ylabel('Ud, m');

figure(5)
hPlot =plot(time,Delay(1:n)*c,'b-',time,X_est*c,'r-');
set( hPlot, 'LineWidth', 1);
grid on;
set(gcf, 'color', 'white');
xlabel('Время, с');
ylabel('Реальное воздействие и его оценка, м');

% построение дискриминационной характеристики
N_values=100;
tau = 4*tau_s * ((0:N_values-1)-N_values/2)/(N_values/2);
Udiscr = zeros(1, N_values);
for i=1:N_values

```

```

    s = A*h( 1+mod(fix( (delay_0 + (0:Nd-1)*Td) / tau_s ), h_size) ) .*
cos(w_p*Td*(0:Nd-1) + phi);
    Ie =(A/disp)*sum(s.* (h( 1+mod(fix( (delay_0 + tau(i) - Dtau/2 + (0:Nd-1)*Td) /
tau_s ), h_size) ) .* cos(w_p*Td*(0:Nd-1) + phi)));
    II = (A/disp)*sum(s.* (h( 1+mod(fix( (delay_0 + tau(i) + Dtau/2 + (0:Nd-1)*Td) /
tau_s ), h_size) ) .* cos(w_p*Td*(0:Nd-1) + phi)));
    Udiscr(i) = (Ie - II);
end
Ud_normir=Udiscr/(2*q*T);
figure ('Name','ДХ и Корреляц. ф-ия')
subplot(1,2,1);
plot(tau/(2*tau_s), Ud_normir, 'b')
grid on
set(gcf, 'YLimInclude', 'on', 'color', 'white');
xlim([-1.5 1.5]);
ylim([-1.1 1.1]);
xlabel('\epsilon/ \tau_c');
ylabel('Uн');

% построение корреляционной функции дальномерного кода функцией xcorr
% вариант 1
R=(xcorr(h,'coeff')); % корреляционная функция дальномерного кода через
функцию xcorr
tau_raz= -2*tau_s: tau_s :2*tau_s;
lt=length(tau_raz);
s1r=round(length(R)/2)-lt/2;
s2r=round(length(R)/2)+lt/2-1;
subplot(1,2,2);
plot(tau_raz,R(s1r:s2r)),grid on
set(gcf, 'color', 'white');
xlabel('\tau, c');
ylabel('Корреляционная функция');

% вариант 2
%sp_h=fft(h); % спектральная плотность;
%Spectr_h= abs(sp_h.*sp_h);
%h_size=size(h);
%R_h=real(ifft(Spectr_h))/h_size(2); % корреляционная функция дальномерного
кода через спектр
%f=0:2045;
%figure (3)
%hA=axes;
%plot(f, R_h), grid on

```

```
%set(hA, 'XLim', [-2 2])
```

```
function Delay = Coordination2Delay_PS(PS_number)
```

```
% clc
```

```
% clear all;
```

```
% close all hidden;
```

```
c=299792458; % скорость света, м/с
```

```
V_rocket=5000; % скорость ракеты, м/с
```

```
S_rocket=300000; % м
```

```
TT=S_rocket/V_rocket;
```

```
T=0.001;
```

```
t1=0:T:TT;
```

```
% координаты псевдоспутников, град., град., м.
```

```
PS1_B=54.905985; PS1_L=37.382040; PS1_H=50;
```

```
PS2_B=55.816507; PS2_L=36.887656; PS2_H=10;
```

```
PS3_B=55.822693; PS3_L=35.679160; PS3_H=70;
```

```
PS4_B=56.715190; PS4_L=37.217246; PS4_H=30;
```

```
a=6378136; % большая полуось, м
```

```
Alpha=1/298.257; %
```

```
e=sqrt(2*Alpha-Alpha^2); % эксцентриситет эллипсоида
```

```
PS_N1=a/(sqrt(1-(e^2)*(sin(PS1_B*pi/180))^2));
```

```
PS_N2=a/(sqrt(1-(e^2)*(sin(PS2_B*pi/180))^2));
```

```
PS_N3=a/(sqrt(1-(e^2)*(sin(PS3_B*pi/180))^2));
```

```
PS_N4=a/(sqrt(1-(e^2)*(sin(PS4_B*pi/180))^2));
```

```
% перевод геодезических координат псевдоспутников в геоцентрические
```

```
x1=(PS_N1+PS1_H)*cos(PS1_B*pi/180)*cos(PS1_L*pi/180);
```

```
y1=(PS_N1+PS1_H)*cos(PS1_B*pi/180)*sin(PS1_L*pi/180); z1=((1-(e^2))*PS_N1+PS1_H)*sin(PS1_B*pi/180);
```

```
x2=(PS_N2+PS2_H)*cos(PS2_B*pi/180)*cos(PS2_L*pi/180);
```

```
y2=(PS_N2+PS2_H)*cos(PS2_B*pi/180)*sin(PS2_L*pi/180); z2=((1-(e^2))*PS_N2+PS2_H)*sin(PS2_B*pi/180);
```

```
x3=(PS_N3+PS3_H)*cos(PS3_B*pi/180)*cos(PS3_L*pi/180);
```

```
y3=(PS_N3+PS3_H)*cos(PS3_B*pi/180)*sin(PS3_L*pi/180); z3=((1-(e^2))*PS_N3+PS3_H)*sin(PS3_B*pi/180);
```

```
x4=(PS_N4+PS4_H)*cos(PS4_B*pi/180)*cos(PS4_L*pi/180);
```

```
y4=(PS_N4+PS4_H)*cos(PS4_B*pi/180)*sin(PS4_L*pi/180); z4=((1-(e^2))*PS_N4+PS4_H)*sin(PS4_B*pi/180);
```

```
% координаты пользователя, град., град., м.
```

```
P_B=55.843788; P_L=37.491043;
```

```
% 300 км ~ 37.272177-42.106247=4.8340700000000004 град.
```

```
P_N=a/(sqrt(1-(e^2)*(sin(P_B*pi/180))^2));
```

```
V_rocket_deg=4.8340700000000004/(TT); % скорость ракеты, град/с
```

```

u=0:(pi/length(t1)):pi;
X=nan(1,length(t1));
Y=nan(1,length(t1));
Z=nan(1,length(t1));
Delay1=nan(1,length(t1));
Delay2=nan(1,length(t1));
Delay3=nan(1,length(t1));
Delay4=nan(1,length(t1));
for k=1:length(t1)
    P_L_i=P_L+V_rocket_deg*k*T;
    P_H=50000*sin(u(k));
    HI(k)=P_H;
    x=(P_N+P_H)*cos(P_B*pi/180)*cos(P_L_i*pi/180);
    y=(P_N+P_H)*cos(P_B*pi/180)*sin(P_L_i*pi/180);
    z=((1-(e^2))*P_N+P_H)*sin(P_B*pi/180);
    R1=sqrt((x1-x)^2+(y1-y)^2+(z1-z)^2);
    R2=sqrt((x2-x)^2+(y2-y)^2+(z2-z)^2);
    R3=sqrt((x3-x)^2+(y3-y)^2+(z3-z)^2);
    R4=sqrt((x4-x)^2+(y4-y)^2+(z4-z)^2);
    X(k)=x;
    Y(k)=y;
    Z(k)=z;
    Delay1(k)=R1/c;
    Delay2(k)=R2/c;
    Delay3(k)=R3/c;
    Delay4(k)=R4/c;
end

switch PS_number
    case 1
        Delay=Delay1;
    case 2
        Delay=Delay2;
    case 3
        Delay=Delay3;
    case 4
        Delay=Delay4;
    otherwise, disp('!!! Неверный номер псевдоспутника.')
end

% figure(1)

```

```
% plot3(X,Y,Z,X,Y,Z,'g-.',x1,y1,z1,'r*',x2,y2,z2,'r*',x3,y3,z3,'r*',x4,y4,z4,'r*'); grid on;
title('Model in geocentric coordinates');
% xlabel('X'); ylabel('Y'); zlabel('Z'); text(x1,y1,z1,'PS1'); text(x2,y2,z2,'PS2');
text(x3,y3,z3,'PS3'); text(x4,y4,z4,'PS4');
%
% figure(2)
% plot(t1,Delay4*c); grid on;
% xlabel('time,s'); ylabel('Delay1, m');
%
% figure(3)
% plot(t1,HI); grid on;
% xlabel('time,s'); ylabel('Hi, m');

end
```


**Магистерская диссертация
на тему:
Исследование навигационного
приемника, работающего по сигналам
наземных псевдоспутников**

Студент группы ЭР-20-07: Устинов А.Ю.
Научный руководитель: д.т.н. профессор Перов А.И.

Москва 2013

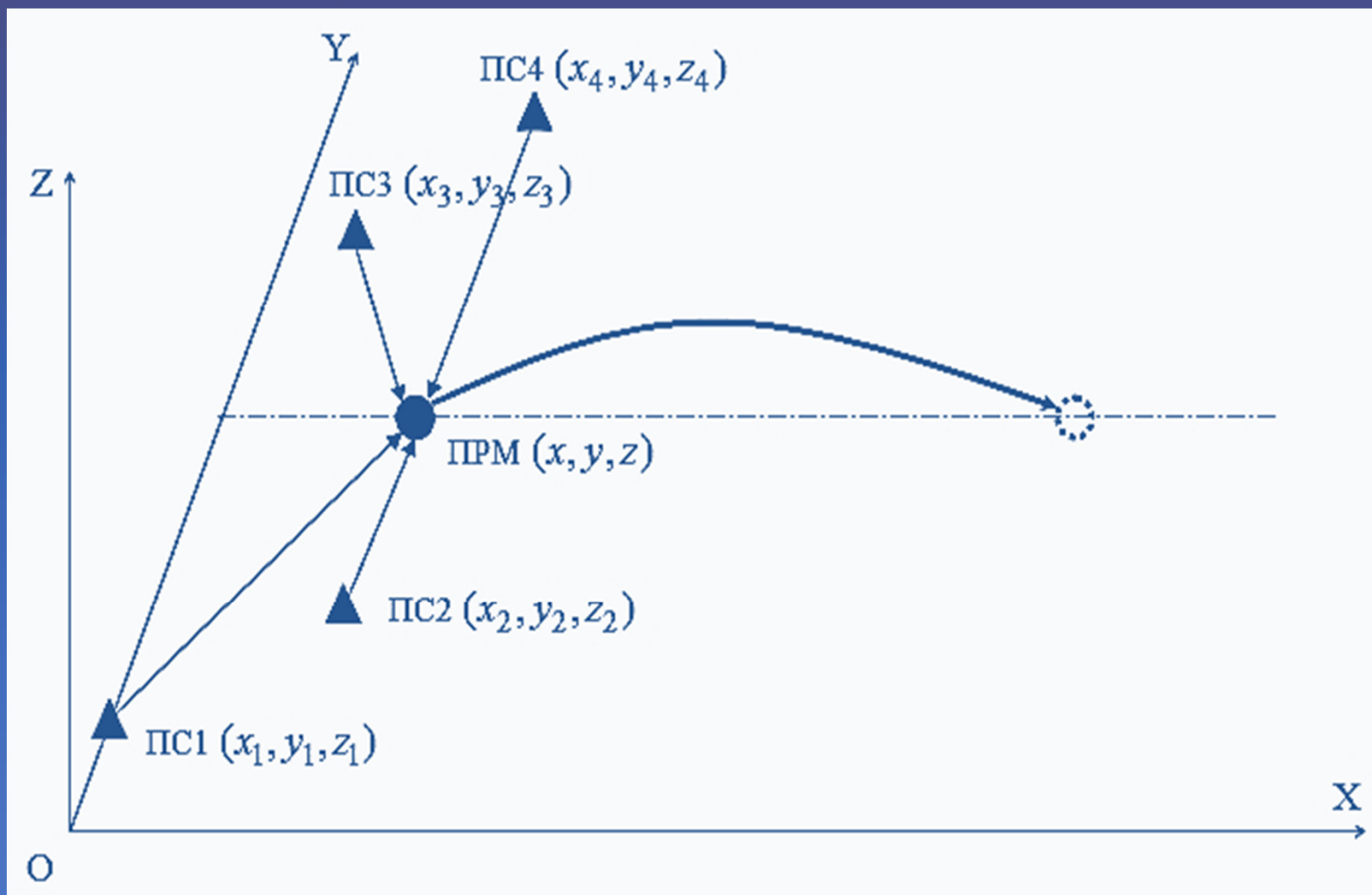
Проблемы СРНС

- Уязвимость НАП СРНС для средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ)
- Недостаточная точность позиционирования

Предлагаемое решение

- Дополнительная система псевдоспутников (ПС)

Исследуемая модель



Геометрический фактор, как критерий наилучшего взаимного расположения псевдоспутников, относительно потребителя

Коэффициент геометрии:

$$K_G = \left(\text{tr} \left[\left(\tilde{H}^T \tilde{H} \right)^{-1} \right] \right)^{1/2} \longrightarrow K_G = \sqrt{R_1 + R_6 + R_{11} + R_{16}}$$

Матрица направляющих косинусов:

$$\tilde{H} = \begin{pmatrix} \frac{x-x_1}{R_{1,уст}} & \frac{y-y_1}{R_{1,уст}} & \frac{z-z_1}{R_{1,уст}} & 1 \\ \frac{x-x_2}{R_{2,уст}} & \frac{y-y_2}{R_{2,уст}} & \frac{z-z_2}{R_{2,уст}} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{x-x_i}{R_{i,уст}} & \frac{y-y_i}{R_{i,уст}} & \frac{z-z_i}{R_{i,уст}} & 1 \end{pmatrix}$$

Истинное значение дальности:

$$R_{i,уст} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}$$

$$K_G = \sqrt{R_1 + R_6 + R_{11} + R_{16}}$$



$$K_G^2 = K_{G.\Pi}^2 + K_{G.t}^2$$



$$K_{G.\Pi} = \sqrt{R_1 + R_6 + R_{11}}$$



$$K_{G.\Pi}^2 = K_{G.\Gamma}^2 + K_{G.B}^2$$

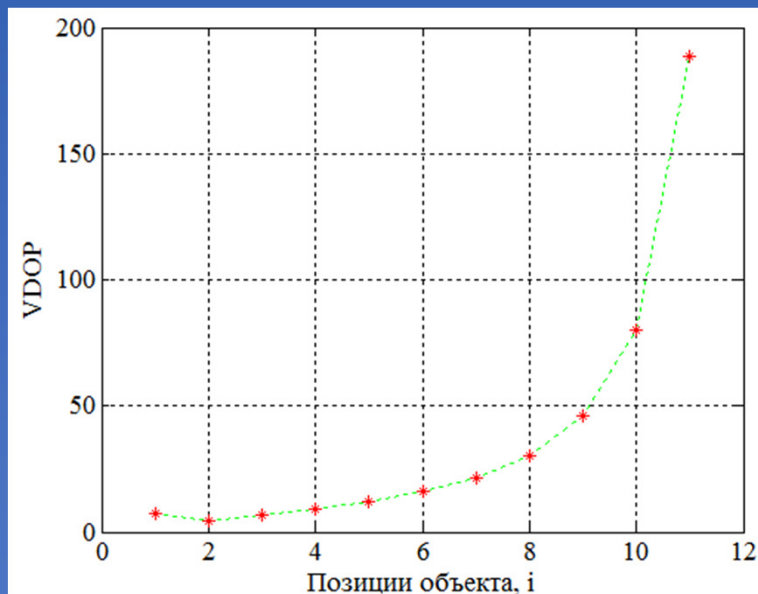
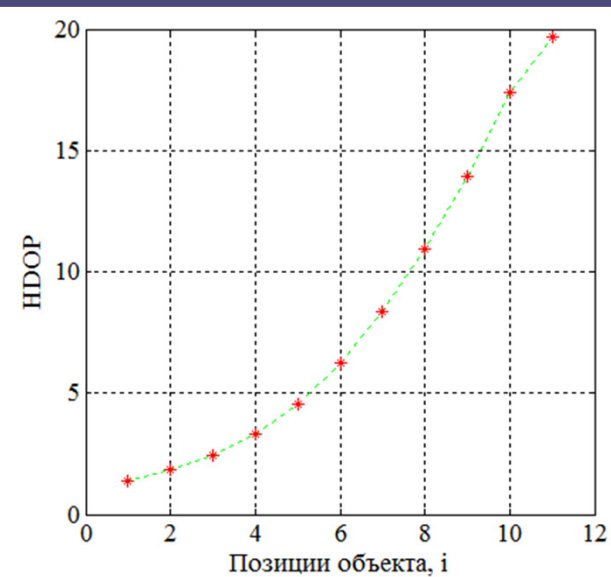
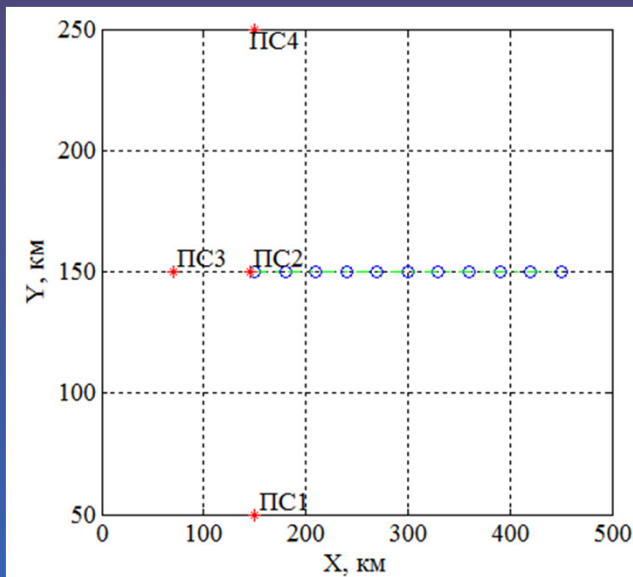


$$K_{G.\Gamma} = \sqrt{R_1 + R_6}$$



$$K_{G.B} = \sqrt{R_{11}}$$

Результаты моделирования



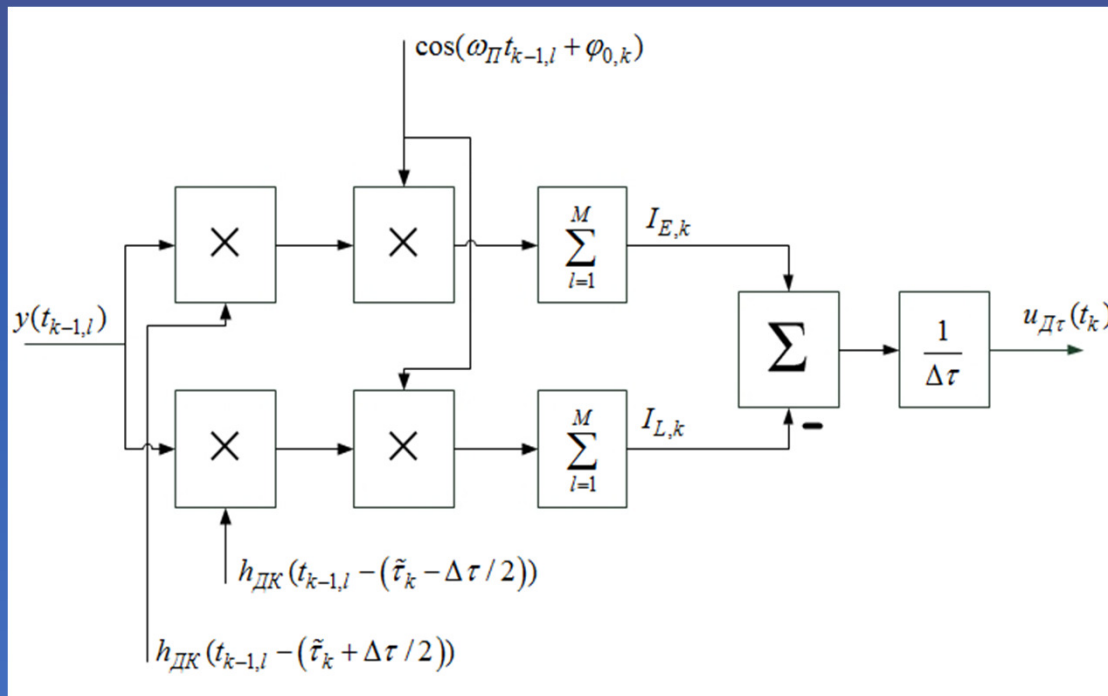
- Максимальное значение горизонтального коэффициента геометрии 19
- Максимальное значение вертикального коэффициента геометрии 190
- Рекомендуемое взаимное расположение ПС: расстояние между ПС1 и ПС2 равно 100 км, между ПС2 и ПС4 равно 100 км, а между ПС2 и ПС3 равно 75 км

Дискриминатор задержки огибающей сигнала

Вид принимаемого сигнала от i -го ПС:

$$s(t_{k-1,l}) = Ah_{ДК}(t_{k-1,l} - \tau_{k-1,1}) \cos(\omega_{П}t_{k-1,l} + \varphi_{0,k})$$

Схема дискриминатора задержки огибающей сигнала:



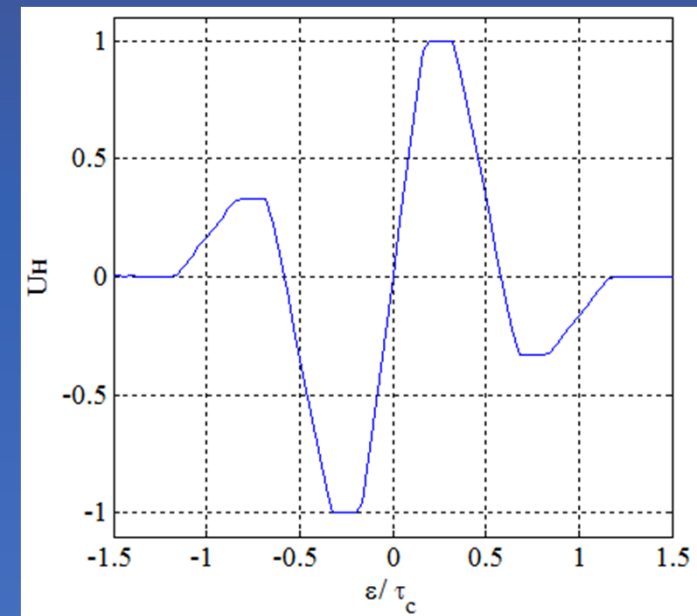
Дискриминатор описывается следующим соотношением:

$$u_{ДТ}(t_k) = \frac{I_{E,k} - I_{L,k}}{\Delta\tau}$$

Выражение для ДХ:

$$U(\varepsilon_\tau) \approx 2q_{c/n_0} T(\rho(\varepsilon_\tau - \Delta\tau/2) - \rho(\varepsilon_\tau + \Delta\tau/2))$$

Нормированная ДХ для сигнала ВОС(1,1) при $\Delta\tau = \frac{\tau_c}{3}$

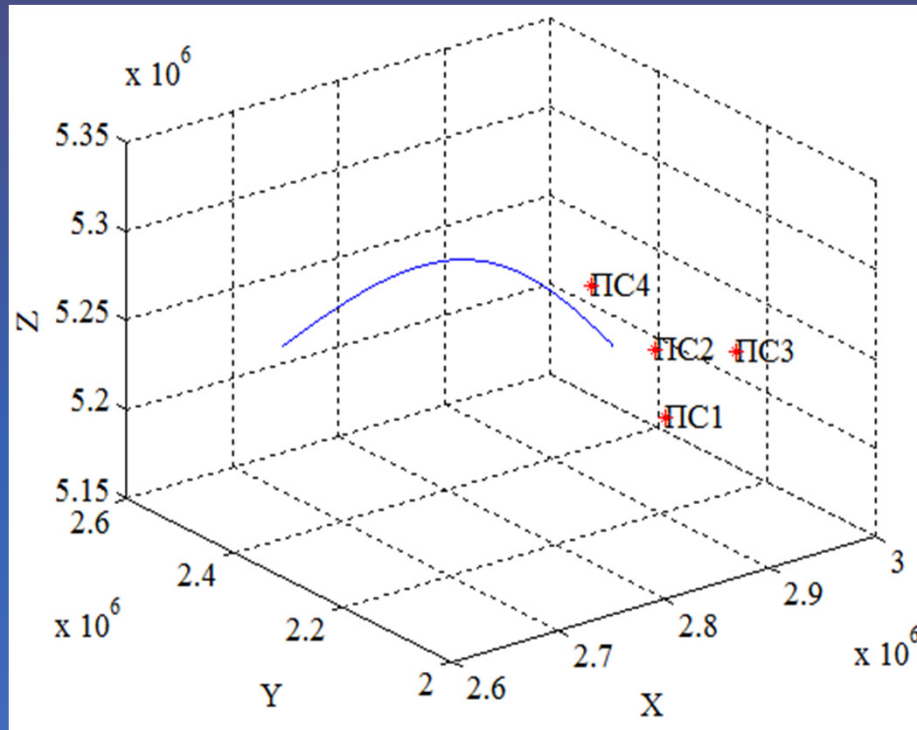


Выражение для ФХ:

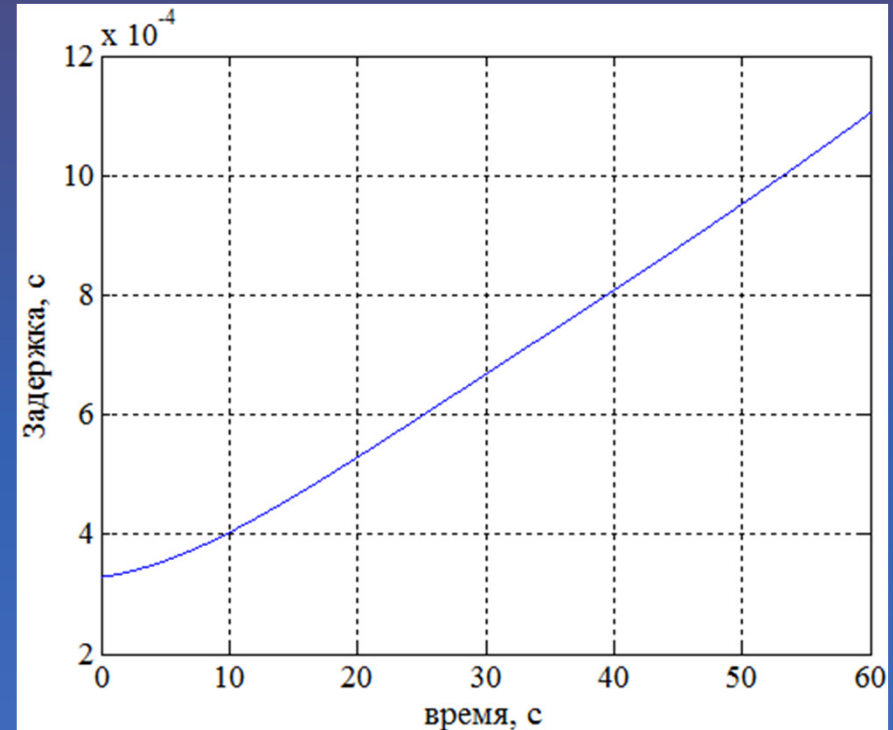
$$D_{\eta_\tau} = 4q_{c/n_0} T$$

Модель навигационной радиолинии

Общий вид расположения ПС и траектория движения потребителя:



Задержка радиосигнала от ПС:



- Система координат принятая в СРНС ГЛОНАСС и определенная как ПЗ-90;
- Расположение ПС в соответствии с результатами моделирования коэффициента геометрии;
- Выбрана частота излучения сигнала 1664 МГц;
- Расчетное отношение сигнал/шум \tilde{q}_{c/n_0} в конце радиолинии 64.5 дБГц.

Результаты моделирования в отсутствии шума

График оценки и реального значения дальности от ПС:

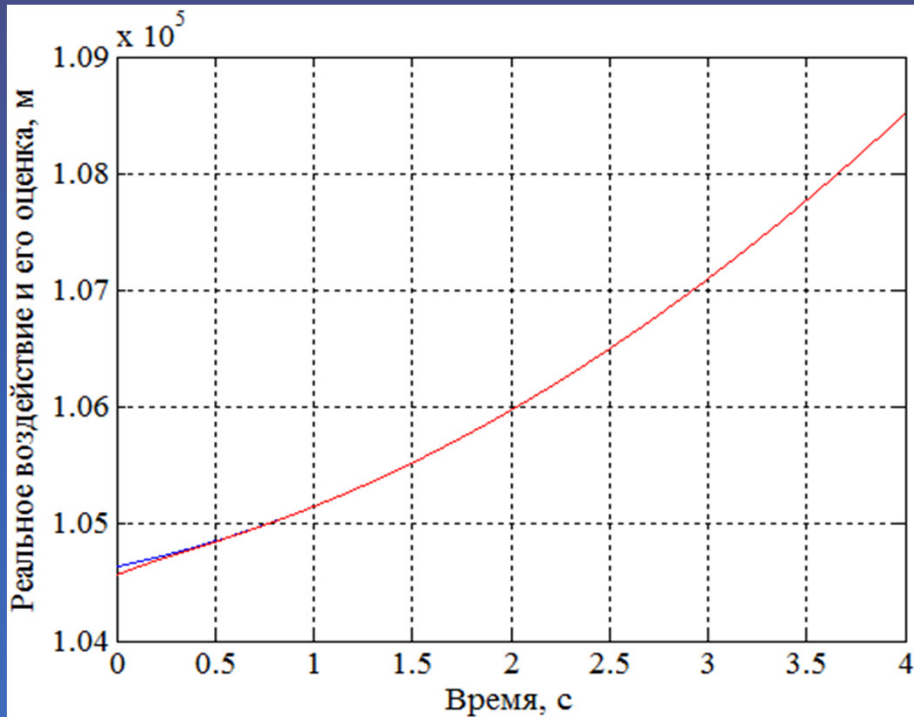
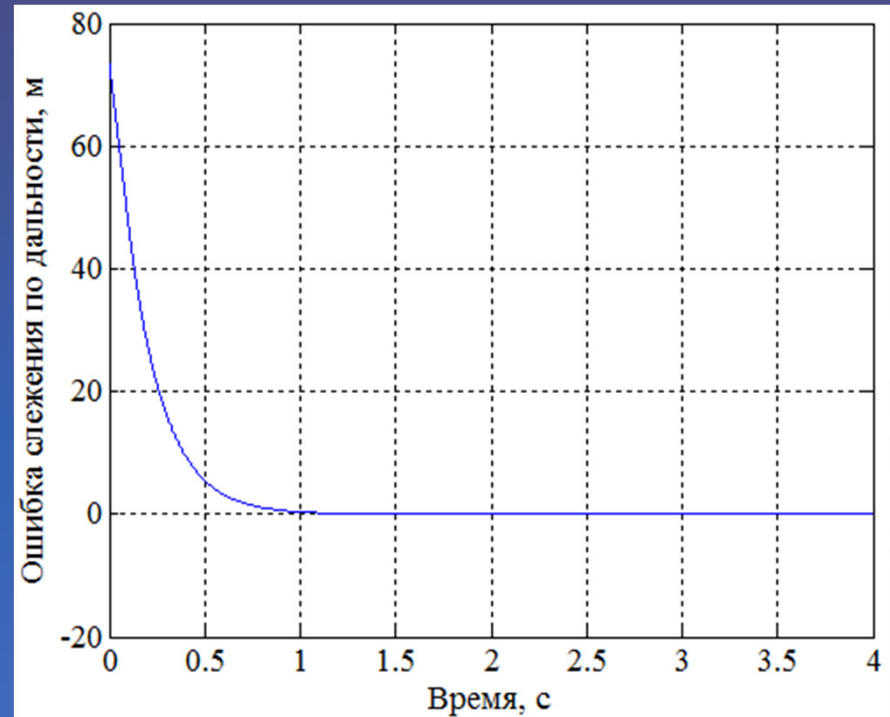


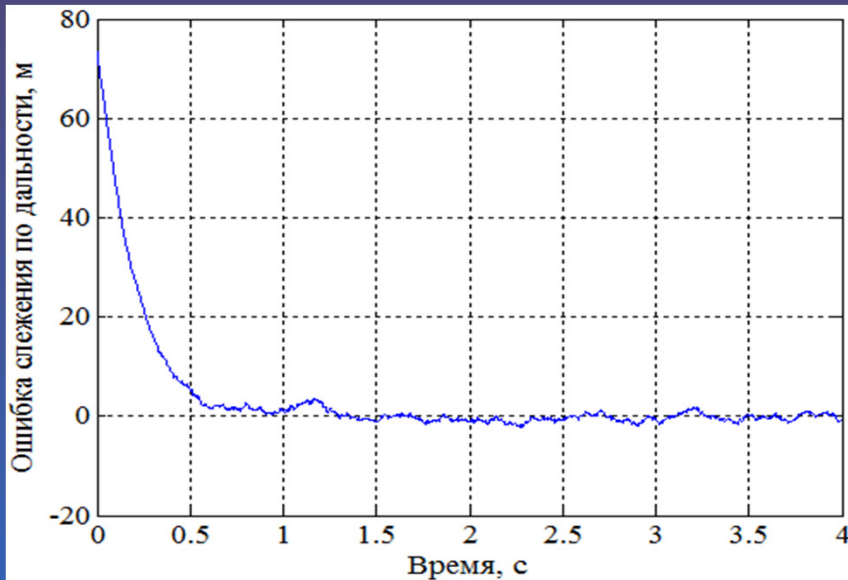
График ошибки слежения по дальности от ПС:



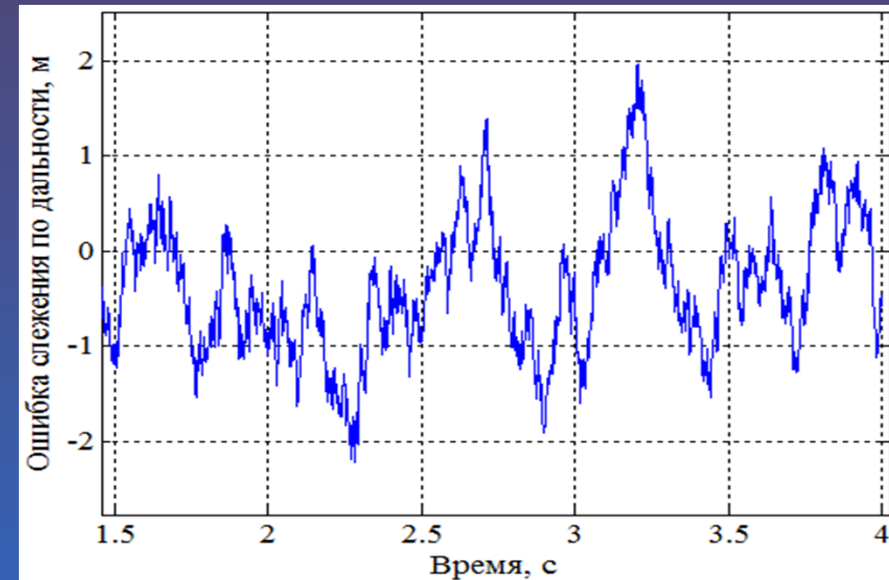
- Полоса пропускания следящей системы $\Delta f_{ССЗ} = 2$ Гц;
- Время переходного процесса 1.5 с;
- Ошибка слежения в установившемся режиме от 1.04×10^{-3} м до 1.89×10^{-3} м.

Результаты моделирования при наличии шума

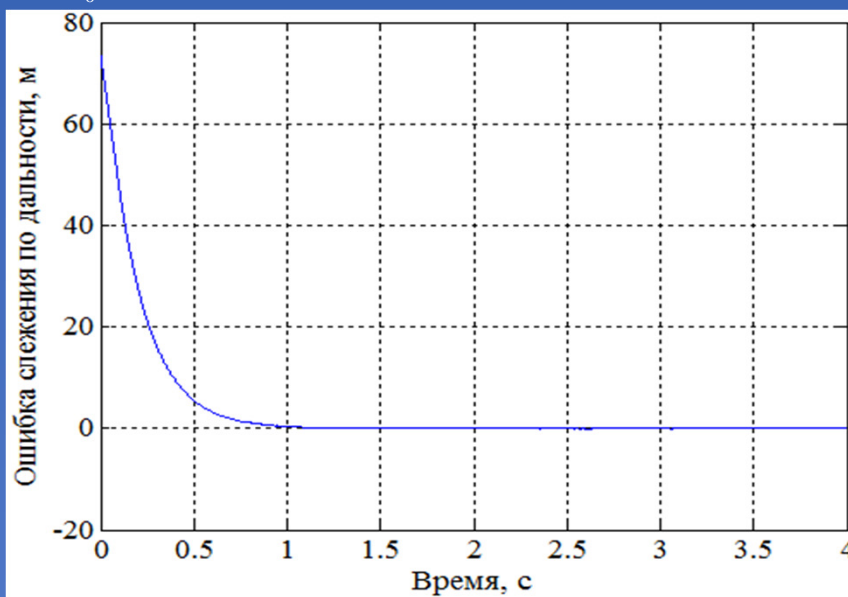
$$\tilde{q}_{c/n_0} = 40 \text{ дБГц}$$



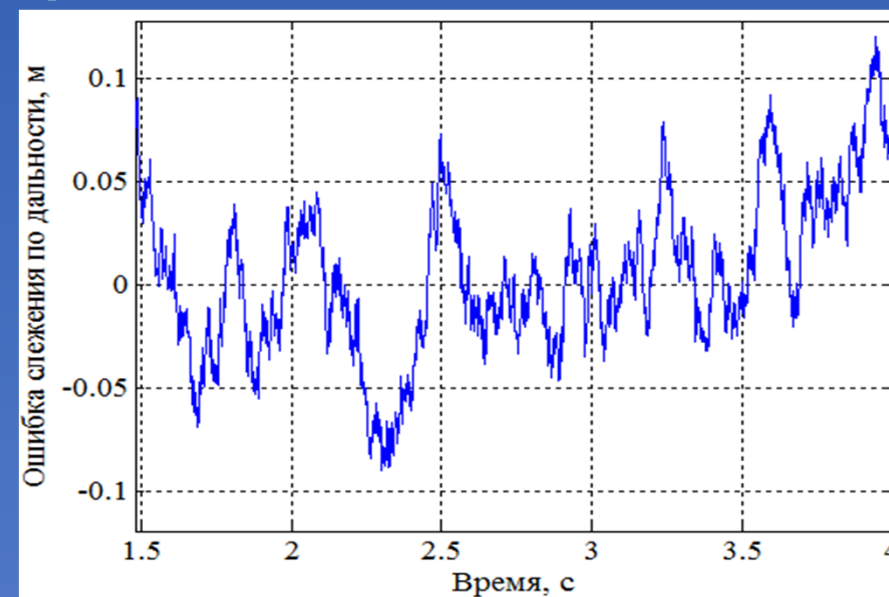
$$\sigma_{\phi_{\text{ош.}\tau} = 0.9 \text{ м}}$$



$$\tilde{q}_{c/n_0} = 64.5 \text{ дБГц}$$



$$\sigma_{\phi_{\text{ош.}\tau} = 0.05 \text{ м}}$$



Результаты работы

- В работе исследована дополнительная наземная система псевдоспутников, которая может быть применена в случае недоступности решения по сигналам СРНС или решения с неприемлемой точностью;
- Проведено исследование влияния относительного взаимного расположения псевдоспутников на точность определения координат потребителя;
- Для сигнала ПС выбрана частота излучения 1664 МГц в соответствии с радиочастотным регламентом, предоставленным Международным союзом электросвязи (МСЭ);
- Рассчитаны энергетические характеристики навигационной радиолинии. В конце радиолинии отношение сигнал/шум 64.5 дБГц;
- Исследован навигационный приемник, работающий по сигналам предложенных псевдоспутников, проведено соответствующее моделирование. В установившемся режиме значения ошибок слежения по дальности при работе по псевдоспутникам лежат в интервале $[-0,1;0,1]$ м;
- Точность измерения дальности при работе по ПС повышается в 10-15 раз, при этом, горизонтальный коэффициент геометрии ухудшается примерно в такое же число раз. Поэтому при определении координат потребителя в горизонтальной плоскости эти два фактора компенсируют друг друга, соответственно, точность определения координат потребителя по сигналам псевдоспутников получается такой же, что и по сигналам орбитальных НС.