

На правах рукописи



СЕРКИН Фёдор Борисович

**ЛОКАЛЬНАЯ СИСТЕМА МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ С ИНТЕГРИРОВАННЫМ КАНАЛОМ
ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2016

Работа выполнена на кафедре «Инфокоммуникации» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры 408
Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)
Важенин Николай Афанасьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
СМ5 МГТУ им. Н. Э. Баумана «Автономные
информационные и управляющие системы»,
Шахтарин Борис Ильич

кандидат технических наук, и.о. начальника
лаборатории отдела 3021 ИАЦ КВНО ФГУП ЦНИИмаш,
Болкунов Алексей Игоревич

Ведущая организация: **АО «Российские космические системы»**

Защита диссертации состоится «27» декабря 2016 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д.212.125.03 Московского авиационного института (национального исследовательского университета) по адресу 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте ma1.ru и в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.212.125.03
д.т.н., с.н.с.



Сычев М.И.

Общая характеристика работы.

Актуальность темы исследования

Исследования и разработки радиосистем, позволяющих определять местоположение подвижных объектов берут начало в середине 20 века. Широкое распространение получили глобальные спутниковые навигационные системы, позволяющие определять местоположение объектов с высокой точностью. Однако, в настоящее время возникает задача местоопределения не только под открытым небом, но и в областях, где спутниковые сигналы сильно искажены или недоступны, например, в цехах, ангарах, глубоких карьерах, офисных помещениях и т.п. При наличии сильной многолучевости или затенения получить высокую точность местоопределения с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) становится затруднительно. Однако, существуют системы локального местоопределения, которые способны дополнить или полностью заменить ГНСС на некоторой ограниченной территории или внутри помещений. В качестве сигналов таких систем могут использоваться сверхширокополосные сигналы, сигналы систем связи на основе стандартов IEEE 802.11, IEEE 802.15 и т.д. Подобные системы могут также строиться на основе использования магнитного поля, звуковых и оптических сигналов. Одним из направлений создания локальных систем местоопределения являются псевдоспутниковые системы, излучающие сигналы подобные сигналам ГНСС. В настоящее время широкое практическое применение получают и системы относительного местоопределения, в которых объект всегда начинает движение из известной точки. Примером реализации относительного местоопределения является система компании Locata.

Одной из основных проблем при реализации систем местоопределения является наличие большого количества помеховых сигналов в эфире, затрудняющих оценку радиотехнических параметров сигналов системы. Особенно остро данная проблема встает при работе системы в ISM-диапазоне (ISM – Industrial, Scientific, Medical), где, как известно, работает множество излучающих устройств, в том числе и системы передачи информации. Другой востребованной особенностью систем локального местоопределения является реализация высокоскоростного канала передачи информации. На данный момент реализация такого канала возможна, например, в системах на основе стандарта IEEE 802.11, однако, в связи с информационной направленностью стандарта, в его рамках оказывается затруднительно реализовать известные высокоточные алгоритмы оценки радиотехнических параметров сигнала. Несмотря на многочисленные попытки реализации на основе протокола IEEE 802.11 системы высокоточного местоопределения, до настоящего времени эту задачу нельзя считать в полной мере решенной.

Таким образом, научный и практический интерес представляет разработка принципов построения и алгоритмов обработки сигналов системы высокоточного местоопределения с интегрированным высокоскоростным каналом передачи данных. Максимальные ошибки местоопределения не должны превышать 10-20 см, а скорость передачи данных при этом может достигать десятков Мбит/с. Данная система должна быть способной работать в условиях отсутствия сигналов ГНСС, при наличии сильной многолучевости, а также во взаимодействии с работающими в этом же пространстве сетями стандарта IEEE 802.11. В данной работе предложены и исследованы новые алгоритмы совмещения широко распространенной системы связи на базе стандарта IEEE 802.11 и системы определения местоположения, использующей разностно-дальномерный метод местоопределения. Проведен анализ качества работы информационной и навигационной составляющих системы в условиях многолучевости. Также представлены результаты разработки прототипа навигационной части данной системы и результаты экспериментов по определению относительного перемещения объекта на плоскости в условиях реальной многолучевости, характерной для офисного помещения и открытого пространства. В ходе разработки данной системы был решен ряд научно-технических задач, связанных с минимизацией влияния навигационной и информационной составляющих системы друг на друга, минимизацией влияния эффектов дискретности в цифровых синтезаторах частоты петель слежения, а также с анализом существующих и разработкой новых алгоритмов оценки отношения сигнал/шум для управления качеством работы системы.

Цель диссертационной работы и решаемые задачи

Целью диссертационной работы является разработка и анализ новых алгоритмов и аппаратно-программных средств совмещения системы беспроводной передачи информации на основе стандарта IEEE 802.11 и системы высокоточного местоопределения. Для достижения поставленной цели, решались следующие задачи:

1. Анализ существующих систем, сочетающих в себе функции передачи данных и местоопределения.
2. Разработка и анализ структуры сигналов и оценка влияния навигационной и информационной составляющих друг на друга.
3. Разработка и анализ алгоритмов формирования и обработки сигналов для реализации совместимости системы местоопределения и сети передачи данных протокола IEEE 802.11.
4. Сравнительный анализ алгоритмов построения цифровых синтезаторов частоты в петлях слежения за задержкой в навигационных приемниках для минимизации эффектов дискретности.

5. Сравнительный анализ алгоритмов оценки текущего отношения сигнал/шум на основе квадратурных компонент принимаемого сигнала для управления качеством связи и местоопределения.
6. Разработка имитационных моделей совмещенной системы для анализа характеристик информационной и навигационной составляющих системы, а также исследования влияния эффектов многолучевости.
7. Разработка прототипа совмещенной системы на основе технологии программно-определяемого радио для экспериментального подтверждения работоспособности и эффективности разработанных алгоритмов совмещения и анализа точности местоопределения в реальных условиях.

Методы исследования

В работе использовался математический аппарат теории электрической связи, математического анализа, теории вероятностей и математической статистики. В виду сложности аналитического решения поставленных задач в качестве основного метода исследования использовался метод компьютерного имитационного моделирования. Для проведения имитационного моделирования и экспериментов при поддержке программных средств MS Windows, Linux, Mathworks MATLAB и аппаратной платформы LabVIEW USRP использовались технологии модельно-ориентированного проектирования, программно-определяемого радио и многопоточного программирования.

Научная новизна

1. Предложены модификации алгоритмов формирования и обработки сигналов стандарта IEEE 802.11, позволяющие реализовать возможность высокоточного определения местоположения подвижных объектов, сохранив функционал системы передачи данных.
2. С помощью разработанной имитационной модели получены характеристики работы навигационного и информационного каналов предложенной совмещенной системы для условий распространения сигнала, определенных статистическими моделями ETSI.
3. Получены и исследованы новые алгоритмы оценки отношения сигнал/шум на основе квадратурных составляющих сигнала, позволяющие при наличии избыточного количества передатчиков за счет исключения заведомо ложных измерений уменьшить СКО ошибки местоопределения.
4. Исследовано влияние различных алгоритмов построения цифровых синтезаторов частоты на качество работы системы слежения за задержкой, выделены наиболее эффективные из них.
5. С использованием прототипа совмещенной системы, реализованного на основе технологии программно-определяемого радио, экспериментально получены характеристики работы

совмещенной системы в реальном помещении и на открытом пространстве, проведена оценка применимости известных статистических моделей ETSI для анализа характеристик совмещенной системы.

6. Экспериментально подтверждена принципиальная возможность получения высокоточных фазово-кодовых измерений в совмещенной системе на основе предложенных технических решений.

Практическая ценность

Практическая ценность работы заключается в том, что в ней разработаны и апробированы алгоритмы формирования и обработки сигналов, позволяющие реализовать систему высокоточного местоопределения с интегрированным каналом передачи данных, совместимую с широко распространенными сетями Wi-Fi. Предложенные алгоритмы и технические решения могут быть использованы на практике при разработке и создании систем автоматического управления строительной, сельскохозяйственной и иной техникой в условиях, когда сигналы спутниковых систем отсутствуют или сильно искажены.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенные модификации алгоритмов формирования и обработки сигналов стандарта IEEE 802.11 в условиях испытательного полигона или офисного помещения обеспечивают возможность получения сантиметровой точности относительного местоопределения при использовании фазовых измерений и наличии избыточности радиопередатчиков при наличии сигналов прямого распространения без ухудшения качества передачи информации.

2. Разработанные математические модели и методика анализа предложенных алгоритмов оценки отношения сигнал/шум на основе обработки квадратурных компонент принимаемого сигнала подтверждают возможность обеспечения оценки текущего отношения сигнал/шум при отсутствии систематической ошибки оценки фазы и при отношениях сигнал/шум более 0 дБ с ошибкой менее 0.1 дБ по отношению к границе Крамера-Рао, а при значениях систематической ошибки оценки фазы до $\pi/8$ - с максимальной ошибкой до 0.1 дБ.

3. Разработанные математические модели и методика анализа предложенного алгоритма реализации прямого двухуровневого цифрового синтезатора частоты с использованием добавления псевдослучайного процесса к текущему значению фазы синтезатора подтверждают возможность подавления низкочастотных составляющих спектра корреляционного сигнала не менее, чем на 49 дБ по сравнению с реализацией на накопительном сумматоре.

4. Экспериментально подтверждено, что использование сигнала от дополнительной базовой станции позволяет за счет избыточности измерений сократить ошибки оценки позиции на плоскости, связанные с многолучевым распространением сигналов, более чем в 3 раза.

Внедрение

Программные и аппаратные реализации предложенных алгоритмов внедрены в ООО «Топкон Позиционинг Системс» при разработке и исследовании перспективных систем местоопределения.

Достоверность

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью исходных положений и математических моделей, используемых при разработке предложенных алгоритмов, строгостью проведения их математического анализа и результатами моделирования. Что подтверждается совпадением в частных случаях результатов математического анализа и имитационного моделирования с ранее известными теоретическими результатами. Также достоверность результатов работы подтверждена сопоставлением указанных результатов с экспериментальными результатами, полученными с использованием прототипа.

Апробация результатов работы

Результаты исследований докладывались на 7 конференциях: Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике - 2013» (МАИ, Москва, 2013); на «15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2013» (Испания, Картахена, 2013); на 18-ой Международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация», (МАИ, Москва, 2013); на 12-ой Международной конференции «Авиация и Космонавтика – 2013» (МАИ, Москва, 2013); на 13-ой Международной конференции «Авиация и Космонавтика – 2014» (МАИ, Москва, 2014); на 20-ой Международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация» (г. Евпатория, Крым, 2015), на 14-ой Международной конференции «Авиация и Космонавтика – 2015» (МАИ, Москва, 2015);

Публикации

Результаты исследований опубликованы в 4 работах, из которых 4 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК.

Личный вклад автора

Автором диссертационной работы лично проведен обзор и анализ существующих систем высокоточного локального местоопределения; предложены и исследованы алгоритмы формирования и обработки сигналов, реализующие возможность одновременной высокоскоростной передачи информации и высокоточного местоопределения; разработана реализация предложенных

алгоритмов в виде лабораторного макета и проведены экспериментальные исследования характеристик его функционирования в условиях офисного помещения и испытательного полигона; проведен сравнительный анализ алгоритмов построения цифровых синтезаторов частоты петель слежения, на основе которого сформулированы рекомендации по выбору алгоритма для снижения шумов дискретности. Совместно с научным руководителем Н.А. Важениным выполнена разработка и анализ новых алгоритмов оценки отношения сигнал/шум, используемых в системе для адаптивного выбора модуляционно-кодовой схемы в информационном канале, а также отбраковки заведомо ложных измерений при расчете координат.

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и содержит 83 рисунка, 110 формул, 7 таблиц и 98 позиций списка литературы. Общий объем работы 127 страниц.

Соответствие работы паспорту специальности

Работа соответствует паспорту специальности 05.12.14 «Радиолокация и радионавигация». Пункт 6 - «Исследование и разработка устройств радионавигации, в том числе космических, с целью повышения точности местоопределения объектов в пространстве, эффективности управления объектами и широкого использования радионавигационных устройств в народном хозяйстве», пункт 8 – «Исследование и разработка каналов передачи информации в многопозиционных системах».

Краткое содержание работы.

Во введении представлена общая характеристика работы, научная новизна, отмечена актуальность работы и сформулирована цель работы. Обоснована практическая ценность работы, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ систем, способных обеспечивать дециметровую или сантиметровую точность локального местоопределения. Приведена классификация данных систем по типам используемых сигналов, а также основные характеристики данных систем. Сформулированы основные проблемы существующих систем и направления исследования. В таблице 1 показаны основные характеристики рассмотренных систем.

Проведенный анализ текущего состояния систем локального местоопределения показал, что рассмотренные системы имеют определенные недостатки и преимущества, которые возможно кратко сформулировать следующими образом:

- Если система обладает высокоскоростным каналом передачи данных, она часто имеет неудовлетворительную точность измерений. Ярким примером данного вывода являются системы на основе оценки мощности принятого сигнала, например, WiFiSLAM. И наоборот, если система

позволяет определять какой-либо радиотехнический параметр сигнала с высокой точностью, информационный канал в ней либо отсутствует вовсе, либо имеет очень низкую скорость передачи

Таблица 1 - Сравнительный анализ систем локального местоопределения.

Система	Скорость передачи данных в информационном канале	Радиус действия сенсора	Точность определения местоположения
WiFiSLAM	До 54 Мбит/с в случае использования протокола IEEE 802.11g	300 м	2-2.5 м
R.Exel	До 11 Мбит/с по протоколу IEEE 802.11b	300 м	10-30 см
A.Gaber, A.Omar	До 6933 Мбит/с по протоколу IEEE 802.11ac.	300 м	1-3 см
decaWave	До 6.8 Мбит/с по протоколу IEEE 802.15.4a	290 м	10 см
Locata	100 бит/с	10 км	1-20 см
WhereNet	До 54 Мбит/с в случае использования протокола IEEE 802.11g	1 км	2-3 м
Cricket	19.2 Кбит/с	10 м	10 см
Topaz	До 4 Мбит/с	10 м	2-3 м
Firefly	-	7 м	3 мм
DAEDALUS	-	350 м	1 мм
MotionStar	-	3 м	1 см
Beer	-	20 м	0.4 см
<u>Разрабатываемая система</u>	<u>До 6933 Мбит/с по протоколу IEEE 802.11ac.</u>	<u>до 10 км</u>	<u>1-20 см</u>

информации. Здесь примером может быть система Locata. Однако, исключением являются системы на основе стандарта IEEE 802.11ac от A. Gaber и A. Omar и на основе стандарта IEEE 802.11b от R. Exel. Но они имеют высокую сложность технической реализации и ограничения, связанные со сложностью реализации точной синхронизации устройств средствами Ethernet.

- Если система имеет способность противостоять замираниям, то, как правило, она имеет малый радиус действия (например, системы на основе сверхширокополосных сигналов). И наоборот, если система способна обеспечить большой радиус действия, то она, как правило, уязвима для замираний. Исключением из данного правила является система Locata, реализующая прогрессивные методы борьбы с замираниями, такие как разнесенная передача сигнала, частотное

разнесение и избыточное количество базовых станций, добиваясь таким образом радиуса действия в несколько километров и высокой точности местоопределения.

- Большинство данных систем не способны сосуществовать с какими-либо другими устройствами, работающими в том же диапазоне, без потери пропускной способности или точности измерений. В частности, в работах авторов Rizos С., Dempster А. и Khan F. проведены детальные исследования вопросов совместимости системы Locata и сетей протокола IEEE 802.11, в которых доказано наличие проблемы и приведены количественные оценки ухудшения качества позиционирования, а также падения пропускной способности сети Wi-Fi.

Таким образом, опираясь на опыт исследований других авторов и анализ существующих систем, представляет интерес система, в первую очередь совместимая с широко распространенными устройствами передачи информации. За основу можно взять стандарт IEEE 802.11 – Wi-Fi. Сигналы станции на основе данного стандарта, благодаря наличию помехоустойчивых модуляционно-кодовых схем на основе фазовой манипуляции, возможно принимать в радиусе нескольких километров вне помещений и нескольких сотен метров внутри промышленных помещений, торговых центров и офисных помещений. Стандарт обладает гибкими возможностями управления доступом к среде и работает в ISM-диапазоне. Из анализа существующих систем местоопределения можно видеть, что высокую точность измерений удастся обеспечить с помощью разностно-дальномерного метода местоопределения. Таким образом, в случае формирования и обработки сигналов стандарта IEEE 802.11 в данном методе определения позиции могут быть использованы измерения задержки и фазы сигнала. Однако, необходимо учитывать требование на синхронизацию системы передающих станций, которую возможно реализовать, используя известное разделение на ведущие и ведомые базовые станции. В этом случае ведущая базовая станция излучает сигнал, по которому ведомые базовые станции синхронизируют свои шкалы времени.

Во второй главе описаны предлагаемые алгоритмы совмещения высокоточной системы местоопределения и высокоскоростного канала передачи информации. Материалы данной главы опубликованы в [4, 8, 9, 10, 12].

Анализ функциональных особенностей системы Locata и протокола IEEE 802.11 показал, что основной проблемой при реализации местоопределения является использование в стандарте множественного доступа с контролем несущей и избеганием коллизий. При реализации системы местоопределения известными методами в рамках сети с подобным методом доступа не удастся обеспечить строгую периодичность передачи навигационных последовательностей, необходимую для реализации высокоточного местоопределения. Однако, в устройствах протокола предусмотрена

процедура проверки занятости среды передачи, называемая Clear Channel Assessment (CCA). В рамках этой процедуры устройства сканируют эфир на предмет наличия сигналов протокола. При наличии Wi-Fi-сигнала в эфире устройства не инициируют передачу данных, ожидая, пока среда освободится.

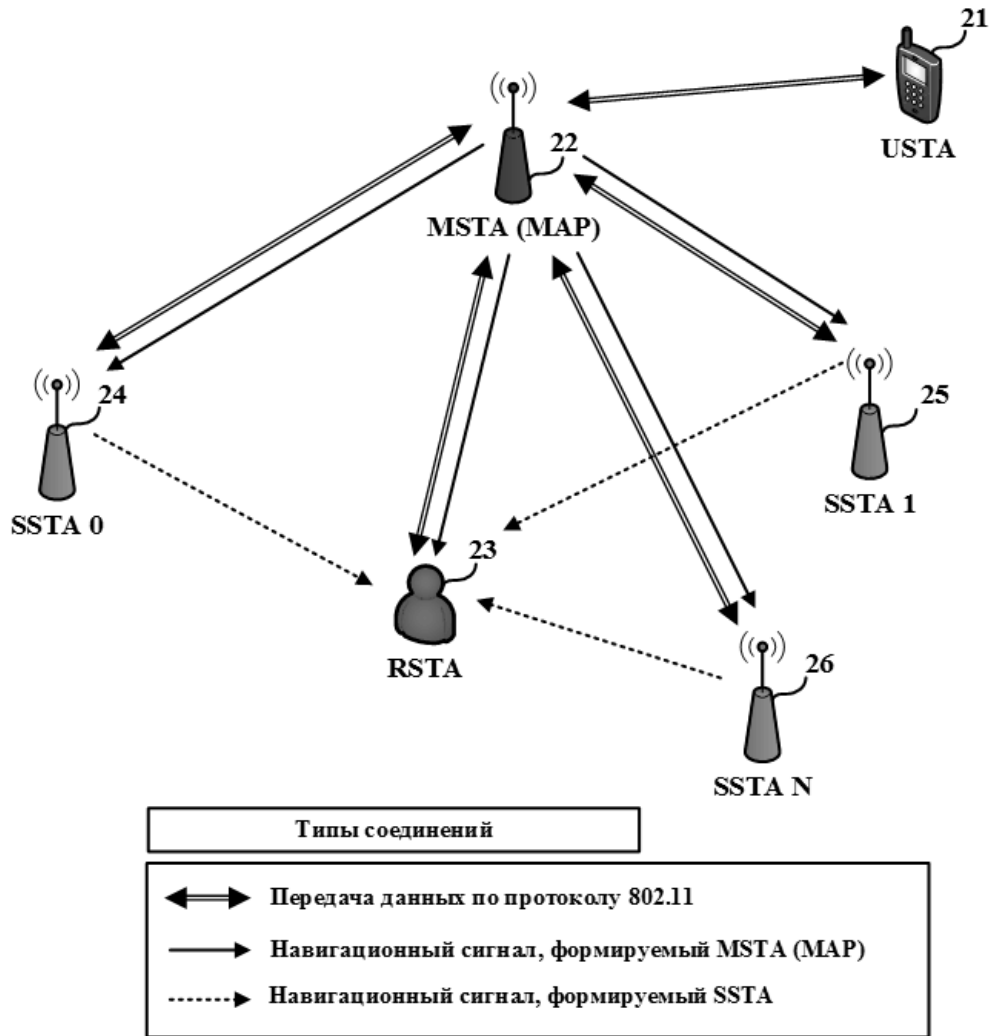


Рисунок 1 – Схема совмещенной системы и типы излучаемых сигналов.

Учитывая вышеизложенное, выходная система должна содержать (рис. 1):

- модифицированную точку доступа протокола IEEE 802.11 (Master Station (Access Point) – MSTA/MAP), выступающую в роли ведущей базовой станции, и реализующую помимо стандартных механизмов доступа к среде предлагаемые алгоритмы совмещения систем. Устройство 22 на рис. 1;
- модифицированные станции протокола IEEE 802.11 (Slave (fixed) Station - SSTA), выступающих в роли ведомых базовых станций, также реализующих предлагаемые алгоритмы совмещения систем. Устройства 24,25,26 на рис. 1;

- модифицированные станции протокола IEEE 802.11 (Rover (mobile) Station – RSTA), выступающие в роли подвижных абонентов (роверов), определяющих свое местоположение по сигналам системы разностно-дальномерным методом, а также участвующих в обмене информацией с точкой доступа и другими станциями. Устройство 23 на рис. 1.

- стандартные устройства протокола IEEE 802.11 (User Station – USTA). Устройство 21 на рис. 1.

В данной главе рассмотрены предлагаемые алгоритмы совмещения информационной и навигационной систем, которые в частности реализуют периодичность излучения навигационных последовательностей на базе протокола IEEE 802.11. Следует отметить, что вопросы формирования и обработки информационной и навигационной составляющих сигналов в этом случае должны рассматриваться совместно. Ниже представлены предлагаемые алгоритмы формирования модифицированных сигналов:

1. Использование фрагмента преамбулы стандартного кадра протокола IEEE 802.11b в качестве навигационной псевдослучайной последовательности (ПСП) или введение дополнительной ПСП в сигнал с прямым расширением спектра кодом Баркера, излучаемый базовыми станциями. В последнем случае при реализации квадратурного модулятора информационные символы со стандартным типом модуляции формируются в синфазной компоненте, в то время как навигационная ПСП генерируется в квадратурной компоненте сигнала на частоте кода Баркера. Исследования показали, что за счет обеспечения низкого уровня взаимной корреляции между преамбулой информационного кадра и навигационной ПСП может быть реализована возможность приема модифицированного сигнала стандартными устройствами протокола IEEE 802.11 и, как следствие, реализация совместимости систем. Кроме того, стандартное устройство протокола IEEE 802.11, проведя оценку состояния среды, идентифицирует наличие сигнала и не инициирует передачу данных, тем самым не нарушает работу системы местоопределения.

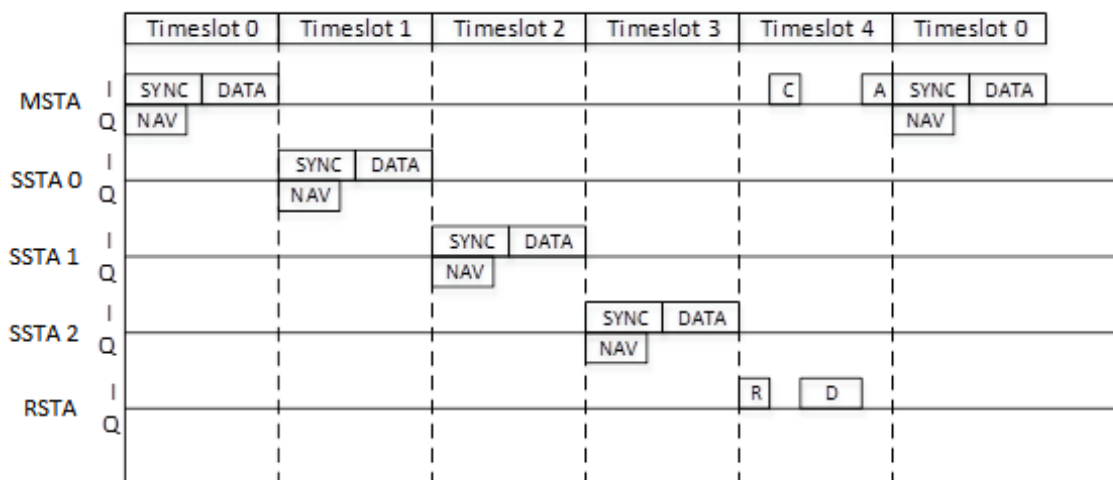


Рисунок 2 – Временная диаграмма алгоритма совмещения.

На рис. 2 показаны сигналы, формируемые в синфазной (I) и квадратурной (Q) составляющих. По осям отмечены базовые станции (MSTA – ведущая базовая станция, SSTA0-SSTA2 – ведомые базовые станции) и мобильная станция RSTA. Наверху рисунка показаны временные отрезки (Timeslot), выделяемые разным устройствам для работы. Блок SYNC означает передачу преамбулы информационного кадра протокола IEEE 802.11, блок DATA означает передачу данных. Блоки R, C, D, A описывают процесс передачи информации в рамках процедуры «RTS/CTS-handshake», описанной в стандарте. Блок NAV означает передачу псевдослучайного кода, соответствующего данной базовой станции. Можно видеть, что начало навигационной последовательности всегда совпадает с началом кадра IEEE 802.11.

2. Показано, что для увеличения длительности навигационной ПСП, а также упрощения реализации системы и минимизации отличий между модифицированным и стандартным сигналами протокола IEEE 802.11, чипы вводимой навигационной ПСП возможно формировать в квадратурной компоненте на частоте информационных символов с прямым расширением спектра кодом Баркера. При этом качество местоопределения по сравнению с первым алгоритмом не ухудшается, поскольку итоговые ПСП обладают схожими корреляционными характеристиками. Однако, становится возможным формировать навигационную ПСП на протяжении всего информационного кадра, увеличивая тем самым радиус действия системы.

3. Рассмотренные алгоритмы обычно предполагают излучение модифицированных сигналов без межкадровых интервалов, предусмотренных протоколом IEEE 802.11, однако, при реализации топологии подобной локальной системы местоопределения, в которой расстояния между передатчиками могут достигать единиц километров возникают случаи, когда разница задержек

распространения сигналов от базовых до мобильной станции оказывается настолько большой, что стандартные устройства протокола IEEE 802.11, проведя оценку состояния среды, могут принять решение, что среда свободна, и инициировать передачу данных, тем самым нарушив периодичность передачи навигационных ПСП. Для решения данной проблемы возможно использовать механизмы контроля состояния среды, при реализации которых точка доступа формирует служебные кадры, в которых передается информация о зарезервированных временных интервалах, в которые устройствам протокола IEEE 802.11 запрещено излучать сигнал. В работе предлагается модификация протокола, позволяющая разделить данные интервалы на навигационную и информационную части, реализуя тем самым периодичность передачи навигационных ПСП и канал передачи данных. При этом, в отличие от других предложенных алгоритмов, в данном случае в канале передачи данных возможно использовать любую модуляционно-кодировую схему, предусмотренную протоколом IEEE 802.11, достигая скорости передачи данных в сотни Мбит/с при сантиметровой точности местоопределения.

Для защиты предложенных новых технических решений, используемых в реализации системы, поданы заявки на патенты №2016000311 от 24.05.2016, №14865240 от 25.09.2015, №2015110604 от 25.03.2015, получен патент США US9425908 В1 от 23.08.2016 и патент РФ № 2598693 от 04.08.2016.

Предложенные алгоритмы формирования сигналов предусматривают возможность приема их информационной составляющей стандартными устройствами протокола IEEE 802.11, однако, при реализации модифицированной мобильной станции, способной также определять свое местоположение, необходимо учитывать следующие особенности:

1. При оценке задержки навигационной ПСП для повышения точности измерения, как правило, частота дискретизации выбирается не кратной чиповой частоте. Однако, системы связи обычно используют кратную частоту дискретизации, т.к. это оказывается более эффективным в плане использования вычислительных ресурсов устройств, а также помехоустойчивости и стабильности работы систем синхронизации. Таким образом, в работе необходимо было провести исследования качества работы информационного канала при реализации приемного устройства на не кратной частоте дискретизации, которые показали потери в отношении сигнал/шум менее 0.5 дБ.

На рис. 3.а представлены зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при дискретизации сигнала на кратной и не кратной частотах дискретизации в сравнении с теорией. Также на данном рисунке отражены результаты калибровки модели для случая распространения сигнала в условиях многолучевости в сравнении с теорией, которые доказывают правильность

работы модели. Для моделирования системы в условиях, характерных для небольших офисных помещений, были выбраны модели А и D, разработанные ETSI. На рис. 3.б показаны зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для данных моделей в сравнении с многолучевыми каналами Релея и Райса.

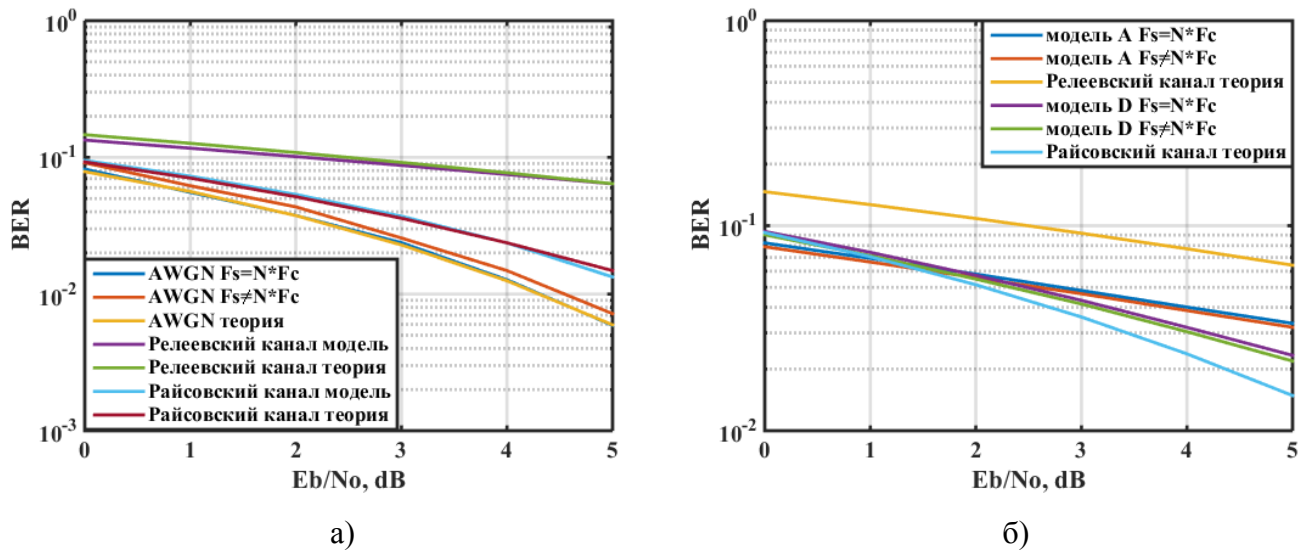


Рисунок 3 – Результаты имитационного моделирования информационного канала системы.

2. Поскольку приемные устройства протокола IEEE 802.11, как правило, не предполагают реализации цифровых петель слежения, т.к. работают в непериодическом импульсном режиме, в данной главе представлена математическая модель канала слежения, работающего в периодическом импульсном режиме. Имитационное моделирование подтвердило правильность функционирования описанных алгоритмов, а также было проведено исследование характеристик системы из нескольких базовых станций и одной мобильной, реализованных на базе данных алгоритмов в случае наличия многолучевости с сигналом прямого распространения (Модель D ETSI). Максимальные ошибки при кодовых измерениях по оси X не превышают 4.21 м и имеют СКО, равное 0.62 м, а по оси Y не превышают 2.79 м и имеют СКО, равное 0.44 м. Данные ошибки можно объяснить искажениями фронтов чипов кода вследствие наличия многолучевости. Максимальные ошибки при фазовых измерениях по оси X не превышают 0.29 м и имеют СКО, равное 0.1 м, а по оси Y не превышают 0.13 м и имеют СКО, равное 0.03 м. В данном случае ошибки можно объяснить наличием перескоков в петле ФАП, возникающих вследствие многолучевости. Поскольку оценивается относительное перемещение – конечная оценка положения мобильной станции будет содержать все ошибки, которые возникли по ходу движения.

Таким образом, в данной главе решены задачи разработки и анализа структуры сигналов и оценки влияния навигационной и информационной составляющих друг на друга, а также разработки

и анализа алгоритмов формирования и обработки сигналов для реализации совместимости системы местоопределения и сети передачи данных протокола IEEE 802.11.

В третьей главе проведен сравнительный анализ существующих алгоритмов оценки отношения сигнал/шум, используемых в мобильной станции для исключения искаженных измерений (аномальных ошибок) при решении навигационной задачи. Предложены новые алгоритмы, позволяющие обеспечить точность оценки, близкую к границе Крамера-Рао как при отсутствии систематической ошибки в петле фазовой автоподстройки частоты, так и при ее наличии.

При наличии избыточности измерений в навигационной подсистеме при решении навигационной задачи возникает возможность повышения эффективности ее работы за счет исключения некоторых измерений, несущих заведомо ложную информацию вследствие искажения в эфире. Одним из параметров, на основе которого можно исключить искаженные измерения, является оценка отношения сигнал/шум. В информационной подсистеме данные алгоритмы также необходимы, т.к. с их помощью возможно реализовать адаптивное управление модуляционно-кодowymi схемами для достижения максимально возможной пропускной способности канала. Материалы данной главы опубликованы в [2, 5, 6].

Рассмотрение алгоритмов оценки текущего отношения сигнал-шум в гауссовом канале с модуляцией ФМн-2 позволяет выделить две категории алгоритмов, различающиеся методами вычисления мощности сигнала и мощности шума: на основе квадратурных составляющих сигнала (1-4) и на основе вычисления текущего значения длины вектора (5-6).

$$SNR = \frac{|\overline{I_Y}|^2 + \overline{Q_Y}]^2}{I_Y^2 + \overline{Q_Y^2} - (|\overline{I_Y}|^2 + \overline{Q_Y}]^2)}, \quad (1)$$

$$SNR = \frac{\overline{I_Y^2} - \overline{Q_Y^2} + 2\overline{Q_Y}]^2}{2 \cdot (\overline{Q_Y^2} - \overline{Q_Y}]^2)}, \quad (2)$$

$$SNR = \frac{|\overline{I_Y}|^2 + \overline{Q_Y}]^2}{2 \cdot (\overline{Q_Y^2} - \overline{Q_Y}]^2)}, \quad (3)$$

$$SNR = \frac{\overline{I_Y^2} - \overline{Q_Y^2} + 2\overline{Q_Y}]^2}{I_Y^2 + \overline{Q_Y^2} - (|\overline{I_Y}|^2 + \overline{Q_Y}]^2)}, \quad (4)$$

где $\overline{Q_Y} = \overline{Q_Y \cdot \text{sign}(I_Y)}$.

$$SNR \approx \frac{\sqrt{I_y^2 + Q_y^2}^2}{2 \cdot \left(\sqrt{I_y^2 + Q_y^2}^2 - \sqrt{I_y^2 + Q_y^2}^2 \right)}. \quad (5)$$

$$SNR \approx \frac{\sqrt{I_y^2 + Q_y^2}^2}{2 \cdot \left(\sqrt{I_y^2 + Q_y^2}^2 - \sqrt{I_y^2 + Q_y^2}^2 \right)} - 1. \quad (6)$$

Результаты работы данных формул для случая отсутствия систематической ошибки в системе фазовой синхронизации (СФС) в сравнении с границей Крамера-Рао (CRLB – Cramer-Rao Lower Bound) показаны на рис. 4.

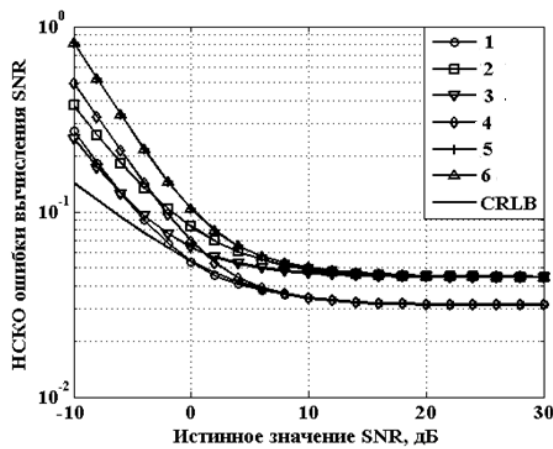


Рисунок 4 – Нормированное среднеквадратическое отклонение (НСКО) ошибки вычисления SNR.

Поскольку формулы (5-6) основаны на вычислении длины вектора, они являются устойчивыми к наличию ошибки в СФС. Графики ошибки оценки отношения сигнал/шум при наличии ошибки СФС для формул (1-4) представлены соответственно на рис 5-6.

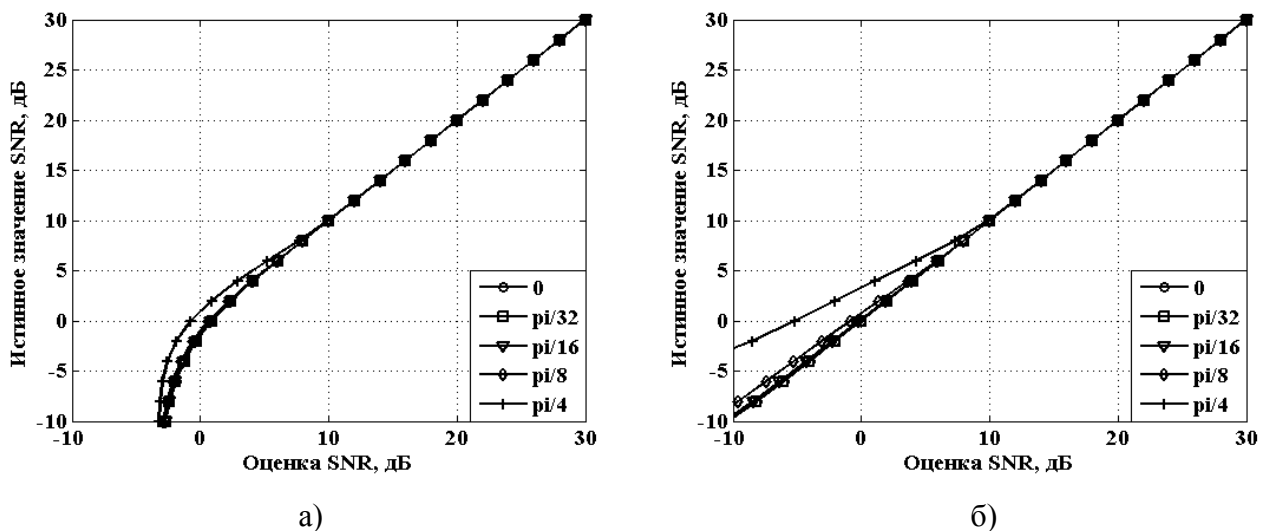


Рисунок 5 – Зависимость оценки SNR от ошибки смещения в СФС для (1), (а) и (2), (б).

Из результатов видно, что алгоритмы 2, 4 не допускают ошибок больше 1 дБ при значениях ошибки смещения до $\pi/8$. При значениях ошибки смещения больше $\pi/8$ в данных алгоритмах ошибка может возрасти до 7-8 дБ. Алгоритмы же 1, 2 имеют ошибки до 7-8 дБ и без ошибки смещения в СФС.

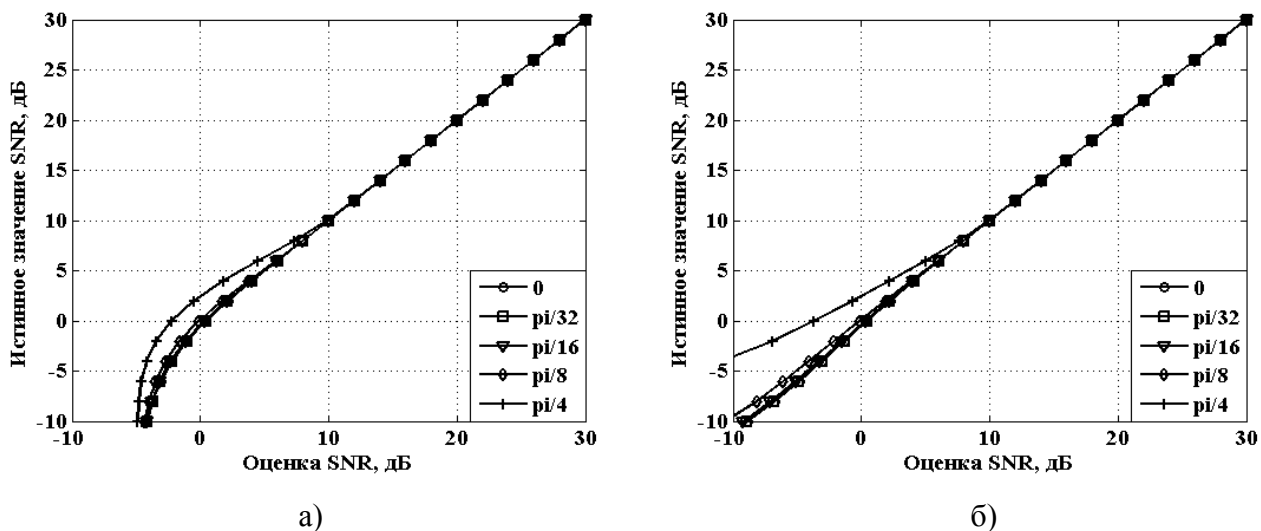


Рисунок 6 – Зависимость оценки SNR от ошибки смещения в СФС для (3).

В четвертой главе проанализированы особенности реализации цифровых синтезаторов частоты в цифровых петлях слежения применительно к системе слежения за задержкой (ССЗ) для минимизации негативных эффектов, связанных с дискретностью цифровой ССЗ. Материалы данной главы опубликованы в [3].

При реализации цифровой ССЗ в навигационной составляющей совмещенной системы появляется проблема, связанная с ошибками дискретности, возникающими при формировании частоты в ЦСЧ. Данные ошибки приводят к смещению дискриминаторной характеристики. Данное смещение влияет на формируемые измерения задержки кода, в связи с чем возникают ошибки при расчете координат мобильной станции. В данной главе исследованы существующие и предложены новые алгоритмы реализации цифровых синтезаторов частоты (ЦСЧ) с использованием алгоритмов введения псевдослучайного процесса (длиттера) в фазу ЦСЧ. Для локализации исследуемых эффектов в ЦСЧ, возникающих при работе ССЗ, заданы следующие условия:

- 1) петля слежения разомкнута;
- 2) отсутствуют ошибки по частоте и фазе между генерируемым и принятым кодом;
- 3) отсутствуют шумы во входном сигнале.

Блок-схема модели для описанных условий представлена на рис. 7.



Рисунок 7 – Блок-схема имитационной модели MATLAB/Simulink.

Заданные значения частоты дискретизации и частоты следования чипов кода поступают на вход ЦСЧ для расчета номинального шага. ЦСЧ формирует пилообразный сигнал заданной частоты, а также сигнал сброса для сумматоров. Генератор ПСП и стробов на основе сигнала ЦСЧ формирует отсчеты кода и стробов. Данные отсчеты перемножаются и накапливаются в соответствии с изображенной схемой, получая тем самым корреляционные сигналы (компоненты) I и dI .

На рис. 8, 9 представлены результаты работы четырех алгоритмов реализации ЦСЧ при формировании частоты кода $f_c = 10.23$ МГц с использованием частоты дискретизации $f_s = 50$ МГц: а) на основе 32-битного регистра, б) на основе 16-битного регистра с 16-битным сложением потоков импульсов (СПИ), в) на основе 32-битного регистра с двусторонним дилиттером, г) на основе 32-битного регистра с односторонним дилиттером.

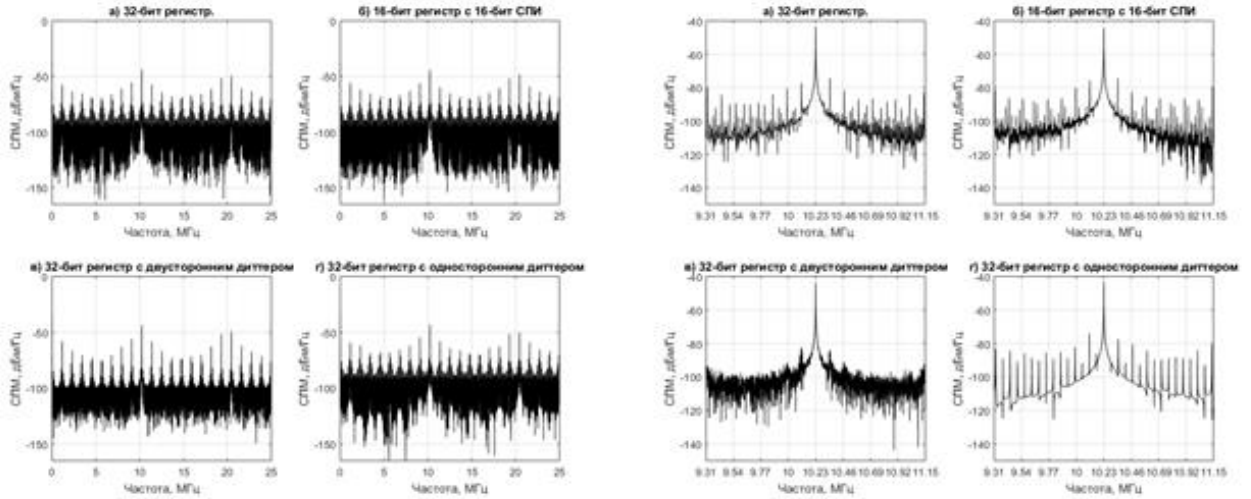


Рисунок 8 – Спектр сигнала ЦСЧ. Общий характер и увеличение вблизи f_c .

По рис. 8.а видно, что при дробном соотношении частот дискретизации и кода, в сигнале ЦСЧ формируются паразитные гармоники различной амплитуды. Можно также видеть различный характер спектра для различных алгоритмов реализации ЦСЧ.

На рис. 9 изображен спектр компоненты dI для различных алгоритмов построения ЦСЧ. Можно видеть, что во всех случаях в компоненте присутствует псевдослучайный процесс. Для формирования несмещенной дискриминаторной характеристики в ССЗ важно минимизировать низкочастотные составляющие в спектре компоненты dI . Можно видеть, что в сравнении со схемой на НС в данном случае введение двустороннего диттера уменьшает низкочастотные составляющие на ~ 22 дБм/Гц, введение одностороннего диттера – на ~ 49 дБм/Гц, а построение ЦСЧ на основе НС с СПИ – на ~ 52 дБм/Гц.

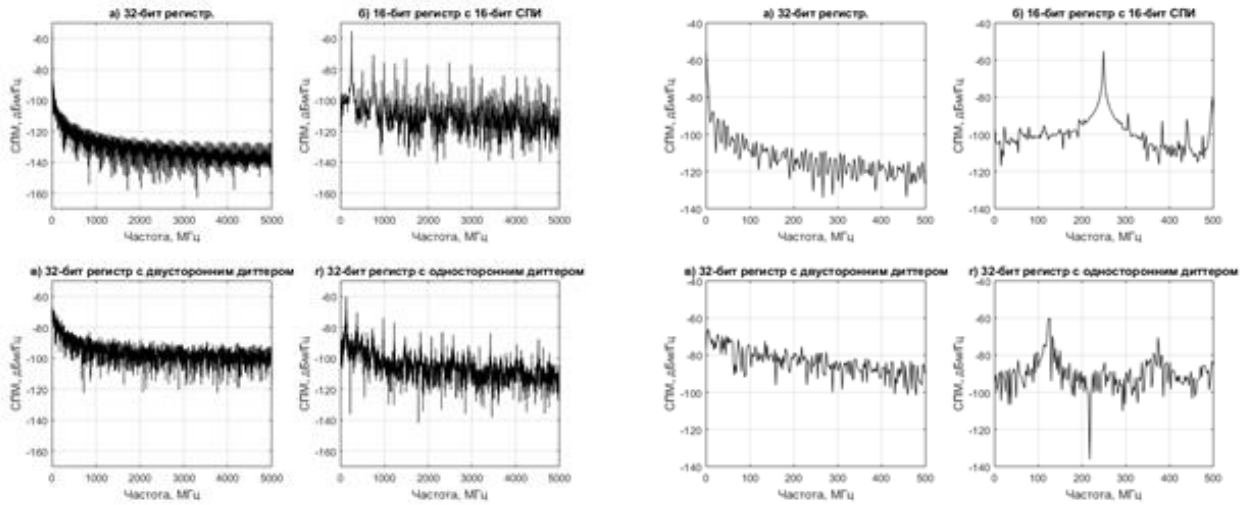


Рисунок 9 – Спектр компоненты dI. Общий характер и увеличение вблизи полосы ССЗ.

Эмпирически была получена формула для оценки положения паразитных гармоник в спектре сигнала ЦСЧ:

$$\Delta = \left| \left[\left(\frac{f_s}{f_c} \right) - \text{round} \left(\frac{f_s}{f_c} \right) \right] \times f_c \right|, \quad (7)$$

где Δ – шаг в Гц, через который в обе стороны от полезных составляющих спектра пилообразного сигнала расположены в порядке убывания амплитуды паразитные гармоники, функция round округляет число до ближайшего целого. Например, для данного случая $\Delta = 1.15$ МГц (см. рис. 10).

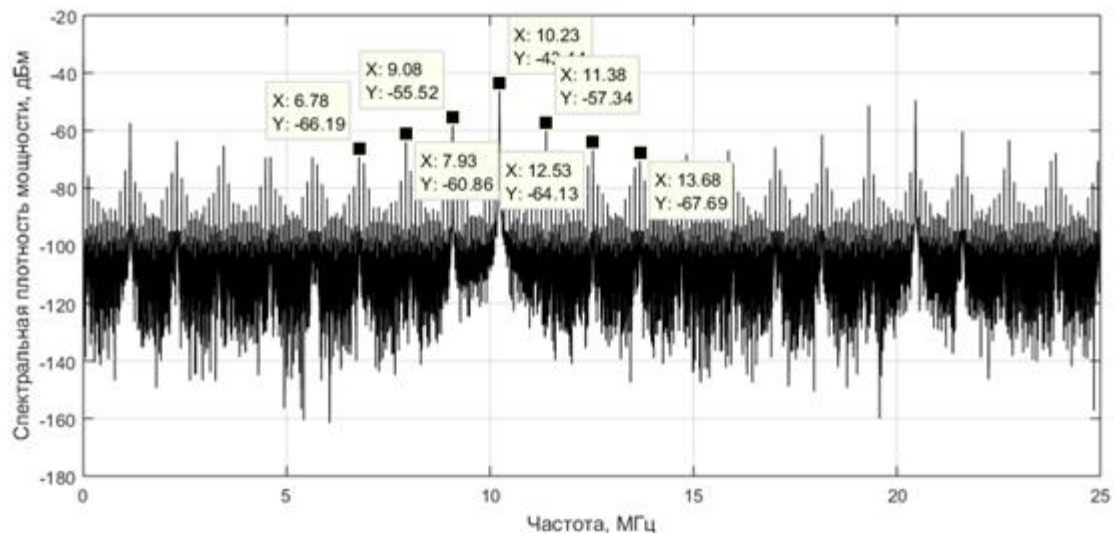


Рисунок 10 – Спектр сигнала ЦСЧ. Иллюстрация применения формулы (7).

В пятой главе представлены результаты разработки и исследования характеристик работы прототипа совмещенной системы. Материалы данной главы опубликованы в [1, 4, 7, 8, 10, 11, 12].

При анализе качества работы совмещенной системы в реальных условиях эффекты многолучевости и помеховая обстановка могут отличаться от заданных при имитационном моделировании. Кроме того, возникают различные эффекты, связанные с реализацией алгоритмов на какой-либо аппаратной платформе. Проведение эксперимента с прототипом может подтвердить работоспособность разработанных алгоритмов и технических решений, а также позволяет произвести оценку потенциальной точности разрабатываемой совмещенной системы в реальных условиях. В настоящее время на рынке появилось множество устройств, реализованных на основе технологии программно-определяемого радио - ПОР (SDR – Software Defined Radio), которые позволяют прототипировать широкополосные системы с использованием высокой частоты дискретизации в реальном времени с использованием компьютеров общего назначения. На основе данной технологии были разработаны прототипы отдельных элементов и системы в целом, проведена верификация прототипа и эксперименты в помещении и на испытательном полигоне.

В рамках работы на испытательном полигоне был развернут прототип совмещенной системы. На рис. 11-12 показана схема и фотографии экспериментальной установки.

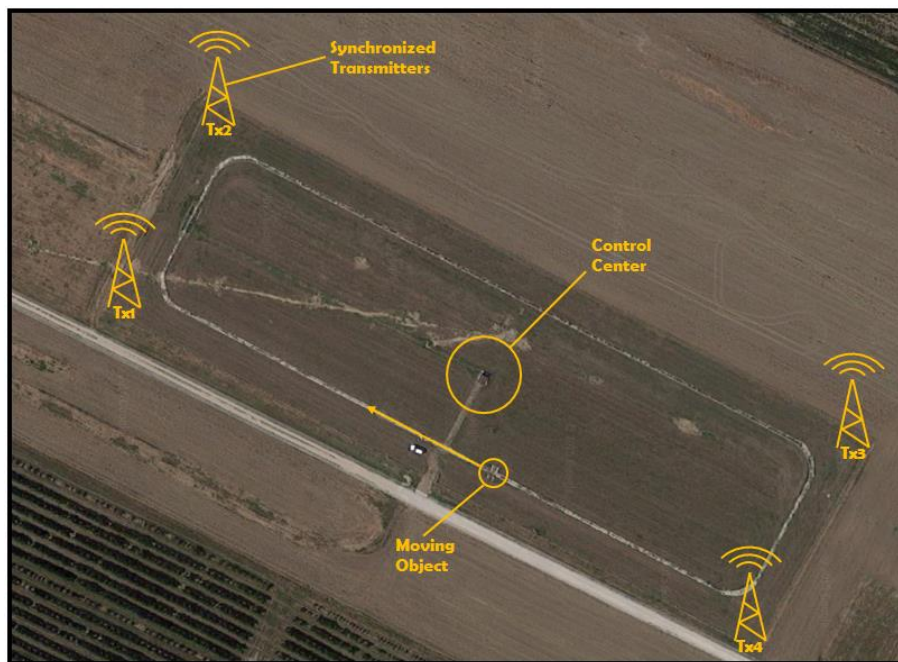


Рис. 11 – Экспериментальная установка на испытательном полигоне.

На полигоне были установлены 4 синхронизированных прототипа базовых станций совмещенной системы Tx1-Tx4, управляемые из центра полигона (Control Center). По рельсам из начальной точки движется платформа (Moving Object), на которой установлена мобильная станция совмещенной системы. В конце движения платформа возвращается в начальную точку.



Рисунок 12 – Фотография прототипа базовой и мобильной станций совмещенной системы.

В рамках эксперимента платформа двигалась со скоростью 12 км/ч по рельсам полигона. В результате эксперимента были получены кодовые и фазовые измерения, по которым были вычислены соответственно оценки координат мобильной станции, а также оценка её относительного перемещения при заданной истинной начальной точке. Результат оценки координат X и Y по кодовым измерениям показан на рис. 13.а. На рис. 13.б представлен результат оценки перемещения мобильной станции относительно начальной точки по фазовым измерениям.

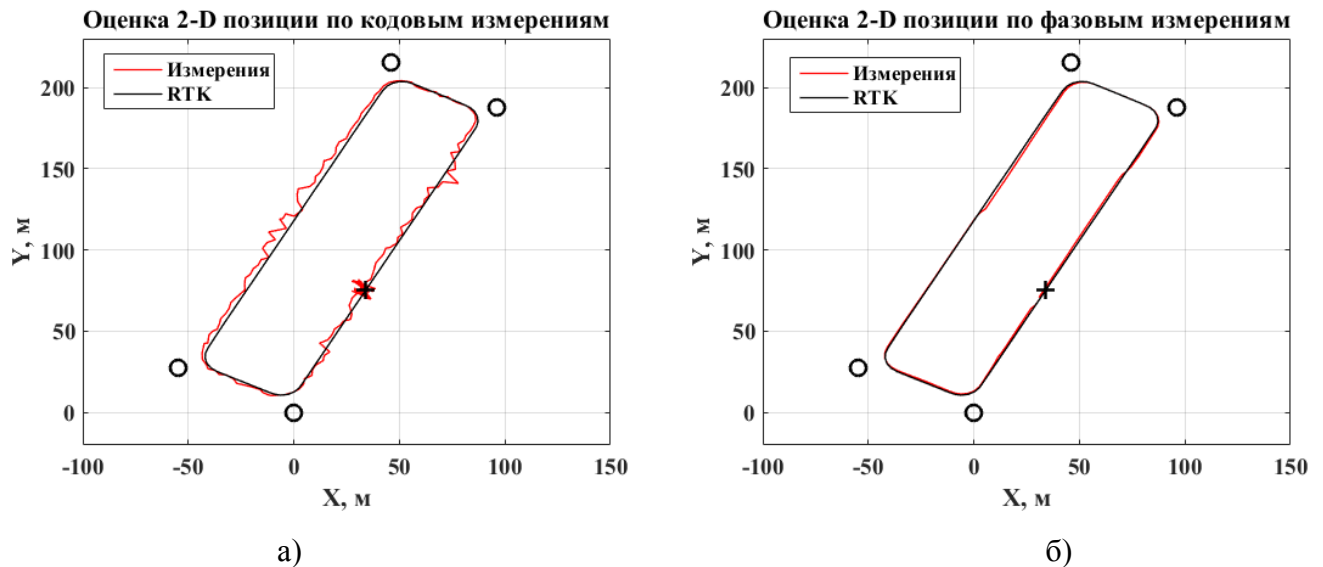


Рисунок 13 – Оценка координат мобильной станции по кодовым измерениям(а) и оценка перемещения мобильной станции относительно начальной точки по фазовым измерениям(б).

В обоих случаях эталонной траекторией движения считается оценка позиции, полученная с помощью навигационного приемника Topcon методом RTK (Real Time Kinematic). На рис. 14.а и 14.б показаны ошибки оценки 2-D позиции для кодовых и фазовых измерений соответственно. СКО

ошибки 2-D позиции по кодовым измерениям составило 3.5 м, максимальные ошибки до 8 м, СКО ошибки фазовым измерениям составило 0.5 м, максимальные ошибки до 1 м.

Можно видеть значительные искажения в фазовых и кодовых измерениях, которые связаны с эффектами многолучевости, а также помехами других устройств в эфире. Ошибка оценки начального положения мобильной станции по кодовым измерениям связана с большой погрешностью оценки координат базовых станций. На данную ошибку также влияет разность высот, на которых находятся базовые и мобильная станции, а также ошибка синхронизации системы базовых станций.

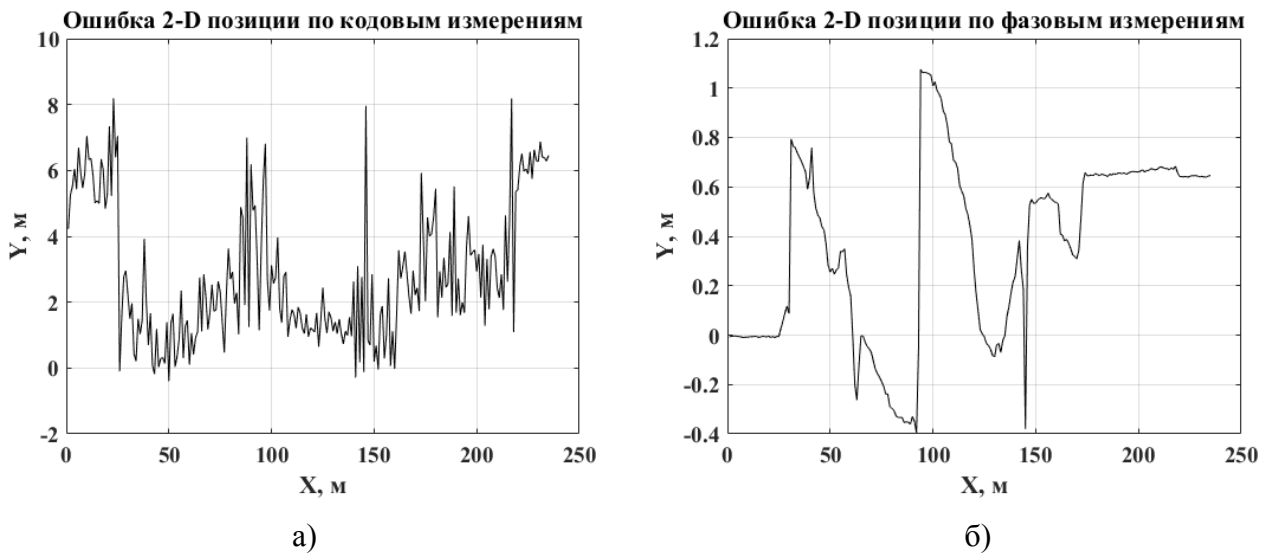


Рисунок 14 – Ошибка оценки 2-D позиции мобильной станции по кодовым (а) и фазовым (б) измерениям.

Известно, что основным методом борьбы с искажениями, связанными с многолучевостью и помехами от других устройств является введение какого-либо типа избыточности, например, увеличение количества базовых станций, введение излучения на дополнительной несущей частоте и др. В данном случае для решения плоской навигационной задачи разностно-дальномерным методом достаточно измерений, полученных от трех базовых станций. Таким образом, при детектировании перескоков оценки фазы в измерениях, возможно исключать измерения параметров сигнала одной из четырех базовых станций из расчета относительных координат мобильной станции. Результаты измерений для данного случая показаны на рис. 15. Ошибки вычисления оценки 2-D позиции показаны на рис. 16.

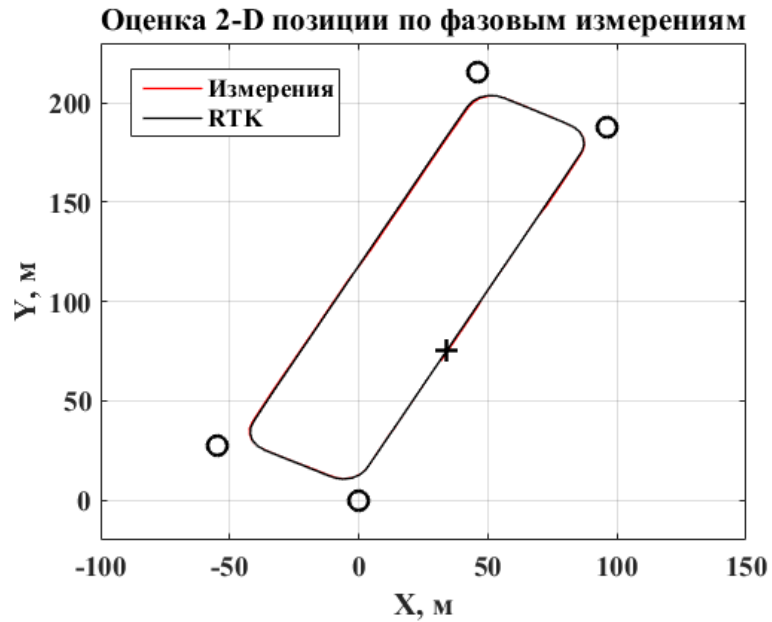


Рисунок 15 - Оценка перемещения мобильной станции относительно начальной точки по фазовым измерениям с использованием избыточности измерений.

Можно видеть, что исключение измерений параметров сигнала от одной из базовых станций в моменты, когда в его измерениях зафиксирован перескок фазы, позволяет уменьшить более чем вдвое ошибки оценки 2-D позиции мобильной станции, что экспериментально подтверждает возможность достижения высокой точности позиционирования в разрабатываемой системе.

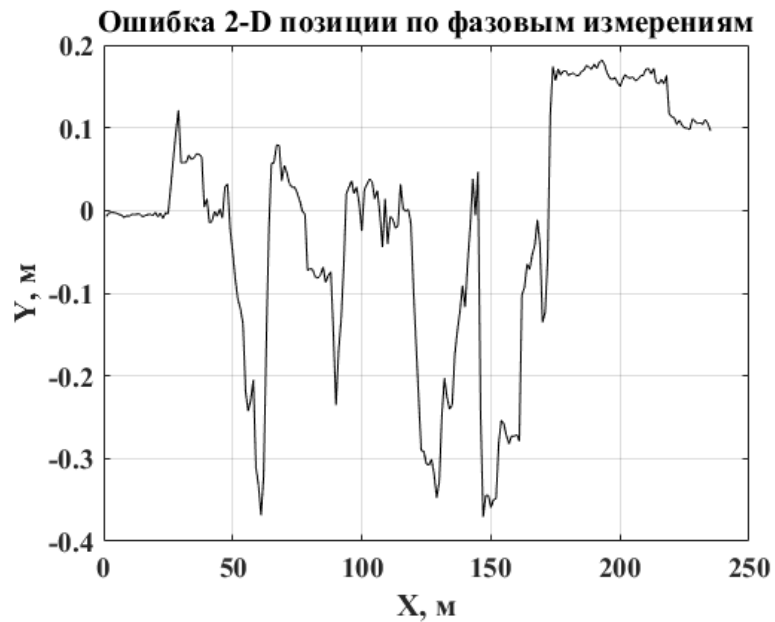


Рисунок 16 - Ошибка оценки 2-D позиции мобильной станции относительно начальной точки по фазовым измерениям с использованием избыточности измерений.

Основные результаты и выводы по работе

1. Сравнительный анализ существующих систем локального местоопределения показал:

- Среди систем локального местоопределения наибольшее распространение получили модифицированные псевдоспутниковые системы. Также для решения задачи местоопределения часто используются системы передачи данных. Рассмотренные системы местоопределения используют различные радиотехнические параметры сигнала: задержку, фазу, принятую мощность сигнала.

- Точность большинства рассмотренных систем лежит в диапазоне до 2-3 метров. Наиболее точными являются системы на основе сверхширокополосных сигналов, а также модифицированные псевдоспутниковые системы, точность которых лежит в диапазоне до 10-20 см.

- При реализации в системе высокоскоростного канала передачи данных, например, средствами стандарта IEEE 802.11, ошибки местоопределения в известных системах, как правило, оказываются не меньше 1-2 метров. И наоборот, если система изначально строится для достижения высокой точности местоопределения, канал передачи данных оказывается низкоскоростным или отсутствует вовсе.

- При условии работы в едином частотном диапазоне, большая часть рассмотренных систем не способна сосуществовать с какими-либо другими системами, в том числе беспроводными сетями передачи информации.

2. На основе стандарта IEEE 802.11 предложены алгоритмы совмещения информационной и навигационной подсистем, позволяющие сохранить высокую скорость передачи информации, свойственную стандарту IEEE 802.11, а также реализовать функционал системы высокоточного местоопределения.

3 Разработана математическая модель совмещенной системы, включающая модели формирования прерывистого сигнала, а также модели канала слежения за прерывистым сигналом.

4. Проанализированы характеристики имитационной модели совмещенной системы:

- Получены зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для заданных моделей офисной многолучевости для случая наличия/отсутствия сигнала прямого распространения. Анализ показал, что при совмещении систем вероятность битовой ошибки в информационном канале не ухудшается.

- В навигационной подсистеме при наличии многолучевости с наличием прямого сигнала распространения максимальные ошибки при фазовых измерениях по оси X не превышают 0.29 м и имеют СКО, равное 0.1 м, а по оси Y не превышают 0.13 м и имеют СКО, равное 0.03 м. В данном

случае ошибки можно объяснить наличием перескоков фазы в петле ФАП, возникающих вследствие многолучевости.

5. Проведенный сравнительный анализ алгоритмов оценки текущего отношения сигнал/шум при использовании квадратурных компонент сигнала показал, что:

- Все рассмотренные алгоритмы имеют систематические ошибки вычисления оценки при отношении сигнал/шум менее 10 дБ. Минимальный уровень ошибок при таких значениях отношения сигнал/шум удается достичь с помощью соотношения (2);
- При ошибке смещения в СФС до $\pi/8$ лучшие результаты показывают алгоритмы (2) и (4);
- Рассмотренные выражения для оценки отношения сигнал-шум, основанные на оценке длин векторов, являются устойчивыми к наличию ошибки смещения в СФС, однако, они дают наибольшее, среди рассмотренных алгоритмов, значение ошибки при уменьшении отношения сигнал/шум ниже 10 дБ.

6. По результатам сравнительного анализа и имитационного моделирования различных алгоритмов построения ЦСЧ для использования в ССЗ можно заключить, что в сравнении со схемой построения ЦСЧ на НС, введение двустороннего диттера в фазу ЦСЧ позволяет подавить низкочастотные составляющие спектра компоненты dI на ~ 22 дБ. При введении одностороннего диттера подавление возрастает до ~ 49 дБ. При построении ЦСЧ на НС с СПИ подавление низкочастотных составляющих составляет ~ 52 дБ. При этом характеристики подавления различных схем построения ЦСЧ не зависят от структуры используемой ПСП. Таким образом, Схема построения ЦСЧ на НС с СПИ в рассматриваемых условиях оказывается наиболее эффективной для подавления низкочастотных составляющих в спектре компоненты dI и минимизации эффектов дискретности и может быть рекомендована для использования при реализации петель слежения навигационных приемников.

7. Эксперименты с прототипом совмещенной системы на испытательном полигоне подтвердили работоспособность и эффективность предложенных алгоритмов формирования и обработки сигналов, а также показали, что точность оценки относительного перемещения мобильной станции по измерениям сигналов от трех базовых станций варьируется в диапазоне от единиц сантиметров до нескольких метров вследствие наличия многолучевости и помех в канале распространения сигнала.

8. Экспериментально подтверждено, что точность оценки относительного перемещения мобильной станции по фазовым измерениям может достигать единиц сантиметров при введении избыточности, в данном случае дополнительной базовой станции, в локальную систему местоопределения.

Список работ, опубликованных по теме диссертации.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Серкин Ф.Б., Анализ особенностей использования аппаратно-программных средств USRP при исследовании беспроводных средств USRP при исследовании беспроводных систем передачи информации // Журнал «Информационно-измерительные и управляющие системы» № 1, М.:Радиотехника, 2014, стр. 63-67.
2. Серкин Ф.Б., Важенин Н.А., Вейцель В.В. Сравнительный анализ алгоритмов оценки отношения сигнал-шум на основе квадратурных компонент принимаемого сигнала // Электронный журнал «Труды МАИ» №83, М.:МАИ, 2015, 24 стр, URL: http://www.mai.ru/upload/iblock/c80/serkin_vazhenin_veytsel_rus.pdf.
3. Серкин Ф.Б., Исследование эффектов квантования частоты в двухуровневых цифровых синтезаторах частоты, // Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки» №2, М.: Научные технологии, 2016, стр. 29-36.
4. Серкин Ф.Б., Важенин Н.А., Вейцель А.В., Анализ характеристик прототипа локальной системы местоопределения // Электронный журнал «Труды МАИ» №86, М.:МАИ, 2016, 22 стр, URL: http://www.mai.ru/upload/iblock/7ce/serkin_vazhenin_veytsel_rus.pdf.

Патенты

5. Vazhenin N.A., Veitsel A.V., Serkin F.B., Veitsel V.V., Method and Apparatus for estimating the current signal-to-noise ratio, Патент США № US 9425908 B1 от 23.08.2016 с приоритетом от 25.09.2015.
6. Важенин Н.А., Вейцель А.В., Вейцель В.В., Серкин Ф.Б., Способ и устройство для оценки текущего отношения сигнал-шум, Патент на изобретение РФ № 2598693 от 27.09.2016 с приоритетом от 25.03.2015.

Публикации в других изданиях и сборниках докладов конференций

7. Serkin F.B., Vazhenin N.A., USRP platform for communication systems research // IEEE Xplore Digital Library, 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Spain, 2013, 4 p.
8. Серкин Ф.Б., Вейцель А.В., Важенин Н.А., Анализ аппаратно-программных методов формирования сигналов для ГНСС // Сборник тезисов докладов 18-ой Международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация», Евпатория, Крым, 2013, стр. 96-97.
9. Серкин Ф.Б., Исследование корреляционных свойств и особенности приема сигналов стандарта IEEE 802.11b // Тезисы докладов 12-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2013», 2013, стр. 504-505.

10. Серкин Ф.Б., Анализ функционирования систем фазовой и символьной синхронизации с использованием гибридной аппаратно-программной среды проектирования // Тезисы докладов 13-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2014», 2014, стр. 433-435.
11. Серкин Ф.Б., Вейцель А.В., Важенин Н.А., Анализ характеристик прототипа навигационной системы на основе программно-определяемого радио // Сборник тезисов докладов 20-ой Международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация», Евпатория, Крым, 2015, стр. 211-212.
12. Серкин Ф.Б., Разработка и исследование характеристик системы позиционирования с интегрированным каналом передачи данных // Тезисы докладов 14-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2015», 2015, стр. 460-462.