

ЛИПАТКИН Владислав Игоревич

**Повышение качества обнаружения широкополосного сигнала и точности
совместного оценивания его параметров в условиях частотной дисперсии
ионосферы Земли**

Специальность

2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 2022

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ)

Научный руководитель:	Лобов Евгений Михайлович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Радиотехнические системы» МТУСИ.
Официальные оппоненты:	Рябова Наталья Владимировна – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники и связи Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «ПГТУ»); Калачиков Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехнических систем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (СибГУТИ).
Ведущая организация:	Акционерное общество «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца» (АО РТИ)

Защита диссертации состоится «28» февраля 2023 года в 12:00 на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 55.2.002.01 при ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» по адресу: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8-а, ауд. А-211.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ:

<http://srd-mtuci.ru/images/Dis-Lipatkin/dis-Lipatkin.pdf>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета 55.2.002.01

доктор технических наук, доцент

М.В. Терешонок

Общая характеристика работы

Актуальность работы.

В настоящее время, декаметровый диапазон активно используется для осуществления связи в удалённых и труднодоступных регионах мира, в том числе в Арктике и Антарктике. Актуальность применения декаметровой радиосвязи в данных районах связана с тем, что такие системы могут предложить надёжные и дешёвые решения с минимальной инфраструктурой, хорошо себя зарекомендовавшие на протяжении десятилетий. Разработка принципиально новых решений в области создания перспективных высокоскоростных интеллектуальных систем связи декаметрового диапазона является необходимым условием для обеспечения связанности территории Российской Федерации, а также занятия и удержания лидерских позиций в освоении и использовании Арктики и Антарктики (согласно Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации).

Развитие систем связи декаметрового диапазона в настоящее время в Мире направлено на расширение используемой полосы частот с целью увеличения скорости передачи информации или использования частотного ресурса на вторичной основе. Как правило, такие системы работают в полосе частот, не превышающей 100 кГц, в которой искажения используемых сигналов, связанные с частотной дисперсией коэффициента диэлектрической проницаемости плазмы ионосферы Земли, не оказывают существенного влияния на качество связи. Указанные дисперсионные искажения с учетом нестационарности ионосферы Земли являются существенным препятствием для расширения спектра используемых сигналов свыше 100 кГц и приводят также к снижению количественных показателей качества обнаружения и различения сигналов, а также к снижению показателей точности сопутствующего оценивания параметров этих сигналов.

Обычно оценивание параметров сигнала происходит одновременно с его обнаружением по известной части радиограммы или зондирующего (обучающего) синхроимпульса. В едином алгоритме может оцениваться множество параметров принимаемого сигнала: задержка сигнала, сдвиг частоты сигнала, амплитуда и начальная фаза сигнала. Повышение показателей качества обнаружения сигнала и оценивания его параметров может быть достигнуто путем дополнительного оценивания степени дисперсионных искажений сигнала с последующей их компенсацией, что требует модификации известных алгоритмов и составляет актуальную задачу.

Аналогичная задача обнаружения сигнала с одновременным оцениванием множества его параметров, включая параметры специфичных для ионосферного канала искажений, возникает при разработке перспективных широкополосных загоризонтных радиолокаторов и ионозондов.

Степень разработанности темы.

Исследованию дисперсионных искажений широкополосных сигналов в ионосфере Земли в различных гео- и гелиофизических условиях посвящено множество работ. В России можно выделить две крупные научные школы, занимающихся непосредственно компенсацией

дисперсионных искажений широкополосных сигналов в ионосферном канале в задачах связи и зондирования: Поволжский государственный технологический университет (Иванов В.А., Иванов Д.В., Рябова Н.В. и др.), Московский технический университет связи и информатики (Аджемов С.С., Лобов Е.М. и др.). В качестве зарубежных работ стоит отметить работы сотрудников корпорации MITRE. В качестве работ, посвящённых исследованию применения широкополосных сигналов в ионосферном канале, стоит отметить работы сотрудников корпорации Harris (John W. Nieto, William N. Furman и др.), а также работы авторов А. Johansen и М. Jorgenson. Большое количество зарубежных работ посвящено исследованию свойств ионосферы с помощью зондирования (М. Hervas, М. Stanic, Н. Lamy, J. Vanhamel и др.). Отечественные ученые используют параметрическую модель для описания дисперсионных свойств ионосферного канала, в которой параметром является наклон дисперсионной характеристики канала. Наклон дисперсионной характеристики канала может быть оценен на приемной стороне на основе наблюдаемой реализации смеси сигнала с шумом, наряду с остальными параметрами сигнала.

Разработкой оптимальных алгоритмов оценивания параметров сигналов в различных условиях, а также исследованием качества этих алгоритмов занимается множество ученых в самых разных отраслях науки. Отдельно следует отметить две отечественные научные школы: Московский технический университет связи и информатики (Левин Б.Р., Шинаков Ю.С. и др.), и Воронежский государственный университет (Е.И. Куликов, А.П. Трифонов и др.). Существенный вклад в теорию обнаружения и оценивания внесли В.И. Тихонов и Б.И. Шахтарин. Среди зарубежных исследователей, которые достигли значительных результатов в задачах обнаружения и оценивания, можно выделить ряд ученых: Д. Миддлтон, Г.Л. Ван Трис, С.М. Кэй, Б.С. Леви, Г.В. Мустракис и др.

Основные теоретические результаты и практические разработки в области загоризонтной радиолокации в России были получены специалистами НИИДАР, РТИ им. академика А.Л. Минца, а наибольшая используемая полоса сигнала при этом составляет 100 кГц.

Исследователи упомянутых научных школ по алгоритмам оценивания параметров сигналов:

- при исследовании совместного оценивания параметров сигналов не учитывали возможные дисперсионные искажения сигналов, влияние этих искажений и процедуры их оценивания на точность оценивания других параметров;

- при исследовании задачи обнаружения сигналов, не учитывали влияние дисперсионных искажений и процедуры их оценивания на качество обнаружения сигналов.

Известные в настоящее время алгоритмы обработки сигналов вертикального и наклонного зондирования ионосферы предполагают работу в широкой полосе частот (~10 МГц), однако одновременная обработка осуществляется в диапазоне частот не превышающем десятки кГц, а также не исследуется потенциальная точность оценки частотного сдвига, который оказывает существенное влияние при длительном когерентном накоплении.

В открытой литературе отсутствуют алгоритмы обнаружения сигнала и совместного оценивания его параметров, которые учитывали бы наличие дисперсионных искажений сигнала и оценивание этих искажений наряду с остальными параметрами сигнала, что обусловило актуальность исследования. Отсутствие упомянутых алгоритмов не позволяет сделать вывод о качестве обнаружения сигнала и оценивания параметров сигнала в условиях дисперсионных искажений, с учетом неизбежного влияния дополнительного оцениваемого параметра, – наклона дисперсионной характеристики.

В диссертации под эффективностью алгоритмов понимается качество обнаружения сигналов и точность оценивания их параметров. Количественными показателями качества алгоритмов, используемыми в задаче обнаружения сигналов и показателями точности оценивания их параметров в классической литературе и в настоящей диссертации, являются:

- вероятность пропуска сигнала при его обнаружении (пропуск цели) для заданного уровня вероятности ложного обнаружения (ложной тревоги) в зависимости от отношения сигнал/шум;
- среднеквадратическое отклонение (или дисперсия) оценки в зависимости от отношения сигнал/шум.

Также рассматривается разность отношений сигнал/шум при одинаковых значениях показателя качества для разных алгоритмов или одного и того же алгоритма в различных условиях, для определения эквивалентного энергетического выигрыша или потерь в дБ.

Цель работы. Повышение качества обнаружения широкополосного сигнала и точности совместного оценивания его параметров в условиях частотной дисперсии ионосферы Земли.

Научная задача заключается в синтезе оптимальных алгоритмов совместного оценивания множества параметров сигнала с одновременным его обнаружением, включая оценивание наклона дисперсионной характеристики ионосферного канала, а также исследование количественных показателей эффективности полученных алгоритмов.

Для достижения поставленной цели и решения научной задачи в работе требуется решить комплекс взаимосвязанных частных научных задач:

- разработать алгоритм оптимального совместного оценивания параметров широкополосного сигнала декаметрового диапазона (начальной фазы, задержки, смещения частоты) в условиях дисперсионных искажений сигнала, включая оценивание наклона дисперсионной характеристики, как параметра, количественно описывающего дисперсионные искажения;
- получить выражения для вычисления показателей точности оценивания параметров сигнала в условиях дисперсионных искажений;
- разработать алгоритм оптимального совместного оценивания параметров широкополосного сигнала декаметрового диапазона с одновременным его обнаружением;
- получить выражения для вычисления вероятностей пропуска цели и ложной тревоги, а также для расчета порога обнаружения по критерию Неймана-Пирсона, в условиях оценивания

параметров сигнала, включая параметр дисперсионных искажений;

- провести вычислительные эксперименты для определения показателей эффективности разработанных алгоритмов;

- разработать вычислительно эффективный алгоритм совместного оценивания параметров широкополосного сигнала декаметрового диапазона с одновременным его обнаружением и устройство, реализующее указанный алгоритм на базе графических процессоров (GPU);

- провести эксперимент на реальной трассе для проверки разработанного устройства и подтверждения основных выводов, сформулированных по результатам исследования.

Объектом исследования являются широкополосные радиосигналы декаметрового диапазона длин волн.

Предметом исследования являются алгоритмы совместного оценивания множества параметров сигнала с одновременным его обнаружением, включая оценивание наклона дисперсионной характеристики ионосферного канала.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач исследования использовались методы цифровой обработки сигналов, теории электрической связи, теории случайных процессов, теории вероятностей, статистической радиотехники, методы вычислительного эксперимента.

Научная новизна работы.

1. Аналитические выражения элементов матрицы Фишера в рамках задачи оценивания четырех параметров сигнала, – начальной фазы, смещения частоты, задержки и наклона дисперсионной характеристики канала, – **получены впервые**. Выражения для дисперсий соответствующих оценок и корреляционных функций (а также коэффициентов корреляции) пар оценок **получены впервые**.
2. **Установлена** корреляционная связь между оценками наклона дисперсионной характеристики канала и начальной фазой широкополосного фазоманипулированного сигнала. **Установлено**, что дисперсионные искажения сигнала приводят к ненулевой корреляционной связи между оценками задержки и частотного сдвига фазоманипулированного сигнала, уменьшающейся с ростом длительности сигнала.
3. Аналитические выражения, позволяющие вычислить среднеквадратическое отклонение оценок начальной фазы, смещения частоты, задержки в условиях неоптимального приема, т.е. при отсутствии компенсации дисперсионных искажений - **получены впервые**.
4. Получены аналитические выражения для расчета вероятностей ложной тревоги и пропуска цели в задаче совместного оценивания параметров сигнала и одновременного его обнаружения, **отличающиеся от известных тем**, что учитывают область неопределенности оценки наклона дисперсионной характеристики.

Достоверность результатов и выводов обеспечивается корректностью применения

математических методов и соответствием результатов, полученных путем аналитических расчетов, численного моделирования и натурального эксперимента.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в полученных новых аналитических выражениях, позволяющих рассчитать дисперсию оценок параметров широкополосного сигнала в условиях дисперсионных искажений, включая дисперсию оценки наклона дисперсионной характеристики канала, а также вероятности ложной тревоги и пропуска цели при одновременном обнаружении упомянутого сигнала.

Практическая значимость заключается в разработанном вычислительно эффективном алгоритме и устройстве обнаружения сигнала с одновременным совместным оцениванием его параметров, которые были апробированы на модельных и натуральных записях сигналов.

Результаты диссертационного исследования использовались:

- при разработке программных модулей обработки широкополосных сигналов декаметрового диапазона в рамках СЧ ОКР «Близнец-ТУС»;

- при решении задач НИР «Алгоритмы обнаружения широкополосных сигналов со сверхбольшой базой, когерентным накоплением энергии сигналов и одновременным оцениванием их параметров в условиях дисперсионных искажений в ионосферном радиоканале».

Апробация работы.

Результаты, изложенные в диссертации, были представлены и обсуждены на следующих конференциях:

1. 2020 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications (SOSG 2020), г. Москва, МТУСИ, 2020 г.
2. 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO 2020), г. Светлогорск, Российская Федерация;
3. 2021 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications (SOSG 2021), г. Москва, МТУСИ, 2021 г.
4. 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO 2021), г. Светлогорск, Российская Федерация.

Публикации результатов.

По теме диссертации было опубликовано 14 работ. Из них 3 опубликованы в журнале из списка ВАК, 6 работ проиндексированы в базах данных Web of Science и SCOPUS (одна из которых в Q1). Получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора.

Все выносимые на защиту научные результаты получены соискателем лично. Из работ, опубликованных в соавторстве, в диссертацию включена только та их часть, которая выполнена лично соискателем.

Структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и одного приложения. Основная часть изложена на 156 страницах машинописного текста, содержит 107 рисунков и 3 таблицы; список литературы состоит из 149 наименований.

Соответствие паспорту специальности.

Проведенное автором исследование соответствует п. 2 «Исследование методов и алгоритмов обработки радиосигналов, учитывающих эффекты их рассеяния и отражения при прохождении через различные среды распространения» и п. 3 «Разработка и исследование радиотехнических устройств и систем, обеспечивающих улучшение характеристик точности, быстродействия и помехоустойчивости» паспорта специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Положения, выносимые на защиту.

1. Дисперсионные искажения фазоманипулированных сигналов **приводят** к ненулевой корреляции оценок задержки и сдвига частоты сигнала, уменьшающейся с увеличением длительности сигнала, при этом качество оценивания задержки сигнала и сдвига частоты будет стремиться к соответствующему значению при отсутствии дисперсионных искажений.

2. Оценивание параметров фазоманипулированных сигналов с одновременным оцениванием наклона дисперсионной характеристики в полосе 400 кГц **позволяет уменьшить** СКО оценки задержки до 10 раз, СКО оценки частотного сдвига до 1.7 раз, СКО оценки фазы до 2.4 раза при ОСШ выше 16 дБ, что эквивалентно энергетическому выигрышу от 4.5 дБ до 20 дБ при заданном уровне СКО оценок.

3. Разработанный алгоритм совместного оценивания параметров сигнала и его обнаружения в условиях дисперсионных искажений **позволяет уменьшить** вероятность пропуска цели более чем в 100 раз для ОСШ выше 15 дБ и **обеспечивает энергетический выигрыш** порядка 2 дБ в части обнаружения при фиксированном уровне вероятности ложной тревоги $1.0e-3$ по сравнению с алгоритмом обнаружения без компенсации дисперсионных искажений.

4. Устройство обнаружения широкополосного сигнала с одновременным совместным оцениванием начальной фазы, задержки, частотного сдвига сигнала и наклона дисперсионной характеристики канала, реализованное на GPU имеет вычислительно эффективную структуру и, **в отличие от известных, позволяет** в реальном масштабе времени обрабатывать сигналы длительностью до 2 с в полосе до 400 кГц с базой порядка 59 дБ и потерями в качестве оценивания относительно модели, не превышающими 1 дБ.

Краткое содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, проведен анализ современного уровня разработанных научно-технических решений, определены цель, задачи и методы исследований. Конкретизируются научная новизна, личный вклад в работу, практическая

значимость, сведения об апробации работы, публикациях автора, а также положения, выносимые на защиту.

В **первом** разделе «Совместное обнаружение сигнала и оценивание его параметров» рассматриваются особенности оценивания параметров сигналов, потенциальная точность их оценивания, теория обнаружения сигнала с оцениванием нескольких неизвестных неэнергетических параметров радиосигнала: задержки, сдвига частоты и начальной фазы.

Рассматривается оценивание параметров по критерию максимума правдоподобия. Приведены основные выражения для смещения, рассеяния и дисперсии оценки (нижняя граница Крамера-Рао). Приведенные выражения необходимы для получения характеристик точности совместного оценивания трёх неизвестных параметров: задержки, частотного сдвига и начальной фазы для сравнения их с характеристиками точности оценивания при влиянии на сигнал частотной дисперсии ионосферного канала. Приведены выражения для вероятностей пропуска цели и ложной тревоги при обнаружении сигнала с оцениванием нескольких неизвестных неэнергетических параметров. Ближайшим прототипом, взятым за основу в настоящей диссертации, является алгоритм обнаружения сигнала по критерию Неймана-Пирсона с одновременным совместным оцениванием трех упомянутых неизвестных параметров сигнала по критерию максимального правдоподобия.

Во **втором** разделе рассматривается влияние оценивания наклона дисперсионной характеристики ионосферного канала на точность совместного оценивания других параметров сигналов, таких как задержка, частотный сдвиг и начальная фаза сигнала.

В качестве математической модели использовалась модель в виде смеси комплексной огибающей полезного сигнала, искаженного частотной дисперсией ионосферного канала, и комплексной огибающей белого гауссовского шума

$$\dot{y}(t) = \dot{x}(t, \varphi, \tau, f_d, s) + \dot{n}(t) = e^{-j\varphi} e^{j2\pi f_d(t-\tau)} \dot{x}(t-\tau, s) + \dot{n}(t), \quad t = -T_n/2 \div T_n/2 \quad (1)$$

где $\dot{x}(t, s) = \dot{x}(t) * \dot{h}(t, s)$ – комплексная огибающая полезного сигнала, искажённая ионосферным каналом, $\dot{h}(t, s)$ – комплексная огибающая импульсной характеристики (ИХ) ионосферного канала, $\dot{x}(t)$ – комплексная огибающая полезного неискажённого сигнала, f_d – частотный сдвиг, τ – задержка, s – наклон дисперсионной характеристики (ДХ) – параметр, характеризующий дисперсионные искажения, φ – неизвестный фазовый сдвиг, $\dot{n}(t)$ – комплексная огибающая белого гауссовского шума с нулевым средним и дисперсией $\sigma_{ш}^2$, T_n – интервал наблюдения сигнала.

В качестве модели канала с частотной дисперсией принята модель канала с линейной зависимостью групповой задержки сигнала от центральной частоты (линейная дисперсионная характеристика с наклоном s). Частотная характеристика ионосферного канала в отсутствие многолучевого распространения сигнала может быть записана в форме

$$H(j2\pi f) = e^{-j\pi s f^2}, \quad f \in [-\Delta f / 2; \Delta f / 2] \quad (2)$$

где Δf - ширина полосы пропускания ионосферного канала, s - наклон дисперсионной характеристики (наклон ДХ). Фазочастотная характеристика канала описывается квадратичной зависимостью от частоты, а групповая задержка распространения – линейной с наклоном s мкс/МГц.

При оценивании неэнергетических параметров решение принимается по абсолютному максимуму вещественной части корреляционного интеграла (суммы в дискретном варианте алгоритма) (см. формулу (3)). Тогда для уравнения наблюдения (1), МП оценка f_d , τ , s , φ определяется как

$$\left[\hat{f}_{d,МП}, \hat{\tau}_{МП}, \hat{s}_{МП}, \hat{\varphi}_{МП} \right] = \arg \max_{\hat{f}_d, \hat{\tau}, \hat{s}, \hat{\varphi}} \left(\operatorname{Re} \left[\frac{2}{N_0} \int_{-T_u/2}^{T_u/2} \dot{y}(t) \tilde{u}^*(t, \hat{f}_d, \hat{\tau}, \hat{s}, \hat{\varphi}) dt \right] \right), \quad (3)$$

где $\dot{y}(t)$ - аддитивная смесь квадратур полезного сигнала и белого гауссовского шума в непрерывном времени, определяемая по (1), \hat{f}_d - оценка частотного сдвига, $\hat{\tau}$ - оценка задержки, \hat{s} - оценка наклона ДХ, $\hat{\varphi}$ - оценка начальной фазы, $\tilde{u}(t, \hat{f}_d, \hat{\tau}, \hat{s}, \hat{\varphi})$ - комплексная огибающая опорного сигнала, сформированного на основе априорных сведений об информационном сигнале и неизвестных оцениваемых параметрах, $\hat{f}_d \in \Delta_{f_d}$ - текущая оценка частотного сдвига, $\hat{\tau} \in \Delta_{\tau}$ - текущая оценка задержки, $\hat{s} \in \Delta_s$ - текущая оценка неизвестного наклона ДХ, $\hat{\varphi} \in [0; 2\pi]$ - текущая оценка неизвестной задержки, * - символ комплексного сопряжения, Δ_{f_d} - область определения неизвестного частотного сдвига, Δ_{τ} - область определения неизвестной задержки, Δ_s - область определения неизвестного наклона ДХ.

Корреляционная матрица МП оценок неизвестных параметров в первом приближении в отсутствии неопределяемых неизвестных параметров равна

$$K_{jp}(\hat{\boldsymbol{\theta}}_{МП} / \boldsymbol{\theta}) = \frac{A_{pj}}{\rho^2 \Omega} \Big|_{\hat{\boldsymbol{\theta}} \rightarrow \boldsymbol{\theta}}, \quad j = 1 \div \mu, p = 1 \div \mu, \quad (4)$$

где Ω – определитель матрицы Фишера W , состоящей из набора частных производных $\frac{\partial^2 S(\boldsymbol{\theta}_1, \boldsymbol{\theta}_2)}{\partial \theta_{1j} \partial \theta_{2p}}$, $S(\boldsymbol{\theta}_1, \boldsymbol{\theta}_2)$ - сигнальная составляющая логарифма функционала правдоподобия, A_{mj} – алгебраические дополнения матрицы W , $j = 1 \div \mu$, $p = 1 \div \mu$, μ - количество оцениваемых параметров. Для совпадающих индексов j и p значения в (4) соответствуют дисперсиям оценок исследуемых параметров, для несовпадающих – взаимным функциям корреляции оценок.

Матрицу Фишера W для четырёх неэнергетических оцениваемых параметров: f_d , τ , s , φ можно представить в форме

$$W = - \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 S}{\partial \hat{f}_d^2} & \frac{\partial^2 S}{\partial \hat{f}_d \partial \hat{\tau}} & \frac{\partial^2 S}{\partial \hat{f}_d \partial \hat{s}} & \frac{\partial^2 S}{\partial \hat{f}_d \partial \hat{\varphi}} \\ \frac{\partial^2 S}{\partial \hat{f}_d \partial \hat{\tau}} & \frac{\partial^2 S}{\partial \hat{\tau}^2} & \frac{\partial^2 S}{\partial \hat{\tau} \partial \hat{s}} & \frac{\partial^2 S}{\partial \hat{\tau} \partial \hat{\varphi}} \\ \frac{\partial^2 S}{\partial \hat{f}_d \partial \hat{s}} & \frac{\partial^2 S}{\partial \hat{\tau} \partial \hat{s}} & \frac{\partial^2 S}{\partial \hat{s}^2} & \frac{\partial^2 S}{\partial \hat{s} \partial \hat{\varphi}} \\ \frac{\partial^2 S}{\partial \hat{f}_d \partial \hat{\varphi}} & \frac{\partial^2 S}{\partial \hat{\tau} \partial \hat{\varphi}} & \frac{\partial^2 S}{\partial \hat{s} \partial \hat{\varphi}} & \frac{\partial^2 S}{\partial \hat{\varphi}^2} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$\begin{matrix} \hat{f}_d \rightarrow f_d \\ \hat{\tau} \rightarrow \tau \\ \hat{s} \rightarrow s \\ \hat{\varphi} \rightarrow \varphi \end{matrix}$

В (5) используется сигнальная составляющая логарифма функционала правдоподобия

$$S(f_d, \hat{f}_d, \tau, \hat{\tau}, s, \hat{s}, \varphi, \hat{\varphi}) = \text{Re} \left[e^{-j(\varphi - \hat{\varphi})} e^{-j2\pi f_d \tau} e^{j2\pi \hat{f}_d \hat{\tau}} \frac{1}{E_s} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{x}(t - \tau, s) \dot{x}^*(t - \hat{\tau}, \hat{s}) e^{j2\pi t(f_d - \hat{f}_d)} dt \right], \quad (6)$$

где $\dot{x}(t - \tau, s)$ и $\dot{x}(t - \hat{\tau}, \hat{s})$ - комплексные огибающие задержанного и искажённого частотной дисперсией полезного сигнала $\dot{x}(t)$ и опорного сигнала соответственно, E_s - энергия сигнала.

В диссертации были получены выражения для дисперсии оценок и коэффициентов корреляции для оцениваемых параметров для фазоманипулированных сигналов с ФМ-2 с симметричным спектром. Полученные выражения имеют вид

$$D(\hat{\tau}_{МП} / f_d, \tau, s, \varphi) = \frac{1}{\rho^2} \frac{(1 - \rho_{fs}^2(s))}{4\pi^2 F_{\text{эфф}}^2 (1 - \rho_{\tau f}^2(s) - \rho_{fs}^2(s))}$$

$$D(\hat{f}_{d,МП} / f_d, \tau, s, \varphi) = \frac{1}{\rho^2} \frac{1}{4\pi^2 T_{\text{эфф}}^2(s) (1 - \rho_{\tau f}^2(s) - \rho_{fs}^2(s))}$$

$$D(\hat{\varphi}_{МП} / f_d, \tau, s, \varphi) = \frac{1}{\rho^2 (1 - \rho_{\tau f}^2(s) - \rho_{fs}^2(s))} \left[\frac{\bar{f}^4 (1 - \rho_{\tau f}^2(s))}{(\bar{f}^4 - F_{\text{эфф}}^4)} + \frac{f_d^2}{F_{\text{эфф}}^2} + \frac{\rho_{fs}(s) \left(2F_{\text{эфф}}^3 \rho_{\tau f}(s) f_d - \rho_{fs}(s) \sqrt{(\bar{f}^4 - F_{\text{эфф}}^4)} (F_{\text{эфф}}^2 + f_d^2) \right)}{F_{\text{эфф}}^2 \sqrt{(\bar{f}^4 - F_{\text{эфф}}^4)}} \right]$$

$$D(\hat{s}_{МП} / f_d, \tau, s, \varphi) = \frac{(1 - \rho_{\tau f}^2(s))}{\pi^2 (\bar{f}^4 - F_{\text{эфф}}^4) (1 - \rho_{\tau f}^2(s) - \rho_{fs}^2(s)) \rho^2}$$

$$r(\hat{\tau}_{МП}, \hat{s}_{МП} / f_d, \tau, s, \varphi) = \frac{\rho_{fs}(s) \rho_{\tau f}(s)}{\sqrt{(1 - \rho_{\tau f}^2(s)) (1 - \rho_{fs}^2(s))}}$$

$$r(\hat{f}_{d,МП}, \hat{s}_{МП} / f_d, \tau, s, \varphi) = \frac{\rho_{fs}(s)}{\sqrt{(1 - \rho_{\tau f}^2(s))}}$$

$$r(\hat{f}_{d,МП}, \hat{\tau}_{МП} / f_d, \tau, s, \varphi) = \frac{\rho_{\tau f}(s)}{\sqrt{(1 - \rho_{fs}^2(s))}}$$

$$\begin{aligned} r(\hat{f}_{d,МП}, \hat{\varphi}_{МП} / f_d, \tau, s, \varphi) &= \\ &= \frac{-\rho_{\tau f}(s) f_d \sqrt{f^4 - F_{\text{эфф}}^4}}{\sqrt{F_{\text{эфф}}^2 (1 - \rho_{\tau f}^2(s) - \rho_{fs}^2(s)) \overline{f^4} + f_d^2 (1 - \rho_{fs}^2(s)) (f^4 - F_{\text{эфф}}^4) + F_{\text{эфф}}^2 V_1(s)}} + \\ &+ \frac{-\rho_{fs}(s) F_{\text{эфф}}^2}{\sqrt{f^4 (1 - \rho_{\tau f}^2(s) - \rho_{fs}^2(s)) + f_d^2 F_{\text{эфф}}^{-2} (1 - \rho_{fs}^2(s)) (f^4 - F_{\text{эфф}}^4) + V_1(s)}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r(\hat{\tau}_{МП}, \hat{\varphi}_{МП} / f_d, \tau, s, \varphi) &= \\ &= \frac{-f_d \sqrt{f^4 - F_{\text{эфф}}^4} \sqrt{(1 - \rho_{fs}^2(s))}}{\sqrt{F_{\text{эфф}}^2 (1 - \rho_{\tau f}^2(s) - \rho_{fs}^2(s)) \overline{f^4} + f_d^2 (1 - \rho_{fs}^2(s)) (f^4 - F_{\text{эфф}}^4) + F_{\text{эфф}}^2 V_1(s)}} + \\ &+ \frac{\rho_{\tau f}(s) \rho_{fs}(s) F_{\text{эфф}}^2}{\sqrt{(1 - \rho_{fs}^2(s)) \sqrt{f^4 (1 - \rho_{\tau f}^2(s) - \rho_{fs}^2(s)) + f_d^2 F_{\text{эфф}}^{-2} (1 - \rho_{fs}^2(s)) (f^4 - F_{\text{эфф}}^4) + V_1(s)}}} \end{aligned}$$

где $V_1(s) = \rho_{fs}(s) \left(\rho_{fs}(s) F_{\text{эфф}}^4 + 2F_{\text{эфф}} f_d \rho_{\tau f}(s) \sqrt{(f^4 - F_{\text{эфф}}^4)} \right)$, $\rho_{\tau f}(s) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t f_s(t, s) |\dot{x}(t, s)|^2 dt}{F_{\text{эфф}} T_{\text{эфф}}(s) \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{x}(t, s)|^2 dt}$ –

коэффициент частотно-временной связи, зависящий от истинного значения наклона ДХ,

$$\gamma(t, s) = 2\pi \int_0^t f_s(t, s) dt \text{ – закон угловой модуляции, } F_{\text{эфф}} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} f^2 |\dot{X}(j2\pi f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} |\dot{X}(j2\pi f)|^2 df}} \text{ – эффективная}$$

ширина спектра сигнала, $T_{\text{эфф}}(s) = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} t^2 |\dot{x}(t, s)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |\dot{x}(t, s)|^2 dt}}$ – эффективная длительность сигнала,

$$\eta(s) = \frac{1}{E_s} \int_{-\infty}^{\infty} t \frac{\partial \gamma(t, s)}{\partial s} |\dot{x}(t, s)|^2 dt, \rho_{fs}(s) = \frac{-\eta(s)}{\pi T_{\text{эфф}}(s) \sqrt{(f^4 - F_{\text{эфф}}^4)}} \text{ – коэффициент частотно-}$$

дисперсионной связи, $\overline{f^4} = \frac{1}{E_s} \int_{-\infty}^{\infty} f^4 |\dot{X}(j2\pi f)|^2 df$. Отметим, что данные выражения зависят от

коэффициента частотно-временной связи $\rho_{\tau f}(s)$ (см. рисунок 1) и коэффициента частотно-дисперсионной связи $\rho_{fs}(s)$ (см. рисунок 2), которые зависят от наклона ДХ.

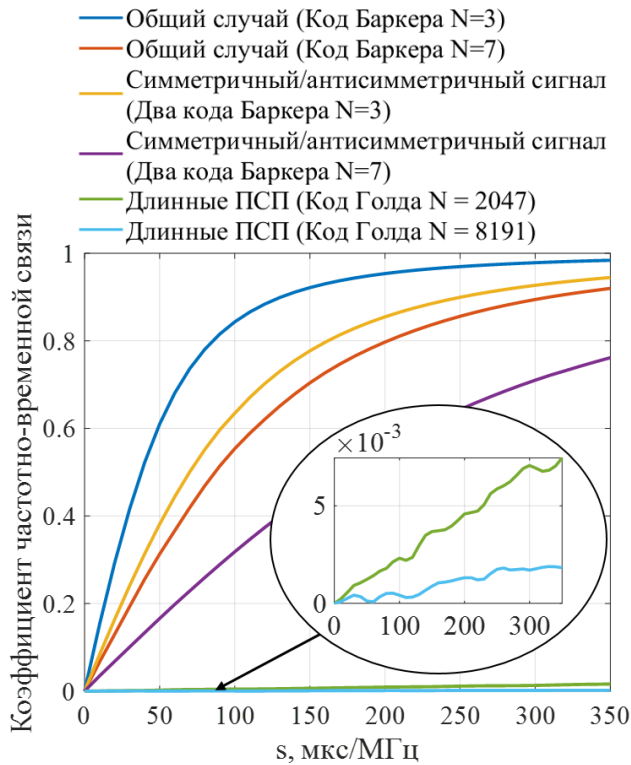


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента частотно-временной связи от наклона ДХ

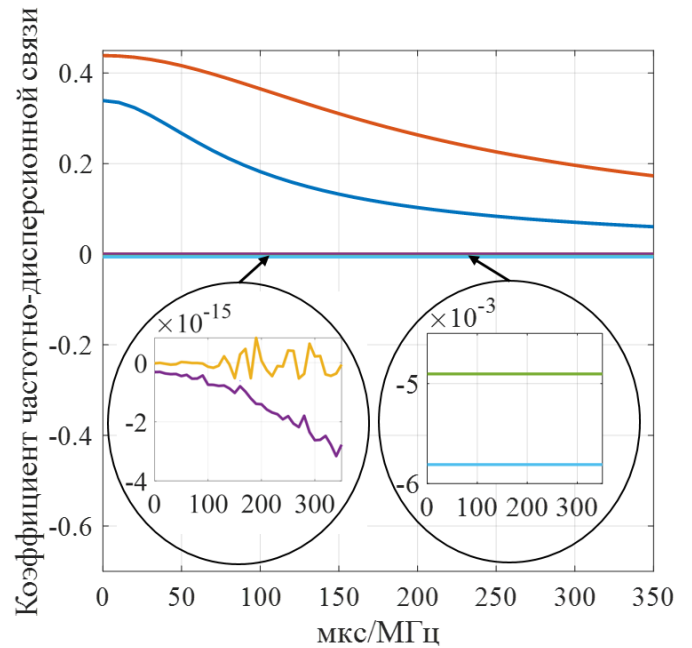


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента частотно-дисперсионной связи от наклона ДХ

В общем случае наблюдается увеличение дисперсий оценок задержки, частотного сдвига и начальной фазы сигнала из-за наличия дополнительных корреляционных связей, возникающих из-за дисперсионных искажений: частотно-временной связи, дисперсионно-частотной связи и связи между наклоном ДХ и начальной фазой. В диссертации показано, что для симметричных/антисимметричных во времени фазоманипулированных сигналов с ФМ-2 справедливо $\rho_{fs}(s) \approx 0$. При этом дисперсия оценки частотного сдвига становится близкой к аналогичной дисперсии в задаче оценивания трех параметров. Для фазоманипулированных сигналов с ФМ-2, сформированных на основе ПСП большой длины (тысячи бит) справедливо $T_{\varepsilon_{\phi\phi}}(s) \cong T_{\varepsilon_{\phi\phi}}$, $\rho_{\tau f}(s) \approx 0$, $\rho_{fs}(s) \approx 0$. При этом выражения для дисперсии оценок частотного сдвига и задержки соответствуют выражениям для дисперсий самостоятельной оценки этих параметров для исследуемого типа сигнала. Дисперсия фазы оценки при этом больше, чем при оценивании трех параметров без дисперсионных искажений. Дисперсия оценки наклона ДХ при совместном оценивании совпадает с известной дисперсией оценки наклона ДХ с неизвестной начальной фазой.

Корреляционная матрица оценок задержки, сдвига частоты и начальной фазы искаженного сигнала без учета оценивания наклона ДХ может быть вычислена в форме:

$$K_{jp}(\hat{\theta}_{МП} / \theta) = \frac{1}{\rho_{\Delta}^4 \hat{\Omega}^2} \sum_{q=1}^{\mu} \sum_{v=1}^{\mu} \hat{A}_{jv} \hat{A}_{pq} \left. \frac{\rho^2 \partial^2 S_N(\theta_1, \theta_2)}{\partial \theta_{1v} \partial \theta_{2q}} \right|_{\hat{\theta} \rightarrow \theta}$$

где $S_N(\boldsymbol{\theta}_1, \boldsymbol{\theta}_2) = S(f_{d1}, f_{d2}, \tau_1, \tau_2, \varphi_1, \varphi_2) = \text{Re} \left[e^{-j(\varphi_1 - \varphi_2)} e^{-j2\pi f_{d1}\tau_1} e^{j2\pi f_{d2}\tau_2} \times \frac{1}{\tilde{E}_s} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{x}(t - \tau_1) \dot{x}^*(t - \tau_2) e^{j2\pi t(f_{d1} - f_{d2})} dt \right]$

Сигнальная составляющая логарифма функционала правдоподобия при неоптимальном приёме имеет вид

$$S_{\Delta}(f_d, \hat{f}_d, \tau, \hat{\tau}, s, \varphi, \hat{\varphi}) = \text{Re} \left[e^{-j(\varphi - \hat{\varphi})} e^{-j2\pi f_d \tau} e^{j2\pi \hat{f}_d \hat{\tau}} \frac{1}{\tilde{E}_s} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{x}(t - \tau, s) \dot{x}^*(t - \hat{\tau}) e^{j2\pi t(f_d - \hat{f}_d)} dt \right]$$

– корреляционная функция помеховых составляющих логарифма функционала правдоподобия при неоптимальном приёме, равная сигнальной составляющей в точках $\boldsymbol{\theta}_1$, $\boldsymbol{\theta}_2$, $\hat{\Omega}$ – определитель матрицы W_{Δ} , \hat{A}_{jp} – алгебраические дополнения матрицы W_{Δ} , $\rho_{\Delta}^2 = \tilde{E}_s / \sigma_u^2$ – ОСШ с учетом потерь при неоптимальном приёме.

$$W_{\Delta} = - \left(\begin{array}{ccc} \frac{\partial^2 S_{\Delta}}{\partial \hat{f}_d^2} & \frac{\partial^2 S_{\Delta}}{\partial \hat{f}_d \partial \hat{\tau}} & \frac{\partial^2 S_{\Delta}}{\partial \hat{f}_d \partial \hat{\varphi}} \\ \frac{\partial^2 S_{\Delta}}{\partial \hat{f}_d \partial \hat{\tau}} & \frac{\partial^2 S_{\Delta}}{\partial \hat{\tau}^2} & \frac{\partial^2 S_{\Delta}}{\partial \hat{\tau} \partial \hat{\varphi}} \\ \frac{\partial^2 S_{\Delta}}{\partial \hat{f}_d \partial \hat{\varphi}} & \frac{\partial^2 S_{\Delta}}{\partial \hat{\tau} \partial \hat{\varphi}} & \frac{\partial^2 S_{\Delta}}{\partial \hat{\varphi}^2} \end{array} \right) \Bigg|_{\substack{\hat{f}_d \rightarrow f_d \\ \hat{\tau} \rightarrow \tau \\ \hat{\varphi} \rightarrow \varphi - \varphi_{sh}}}$$

Теоретические выражения для дисперсий и коэффициентов корреляции были проверены имитационным моделированием с использованием одиночного импульса, а также фазоманипулированных сигналов на основе кодов Баркера и М-последовательностей различной длины. На рисунках 3-5 приведены теоретические и экспериментальные зависимости СКО, корреляций и коэффициентов корреляций исследуемых оценок от ОСШ для трёх случаев:

1. Сигнал не искажён частотной дисперсией ионосферного канала, то есть содержит только три неизвестных параметра: частотный сдвиг, задержку и фазу, которые и оцениваются.
2. Сигнал искажён частотной дисперсией ионосферного канала, то есть содержит четыре неизвестных параметра: частотный сдвиг, задержку, фазу и наклон ДХ, однако опорный сминал приёмного устройства не содержит информации об ионосферном канале (производится оценка всех параметров кроме наклона ДХ).
3. Сигнал искажён частотной дисперсией ионосферного канала, то есть содержит четыре неизвестных параметра: частотный сдвиг, задержку, фазу и наклон ДХ; все неизвестные параметры оцениваются.

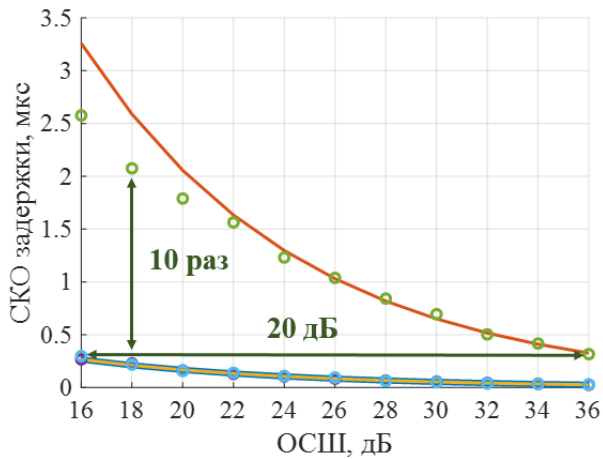


Рисунок 3 – Зависимость СКО оценки задержки от ОСШ

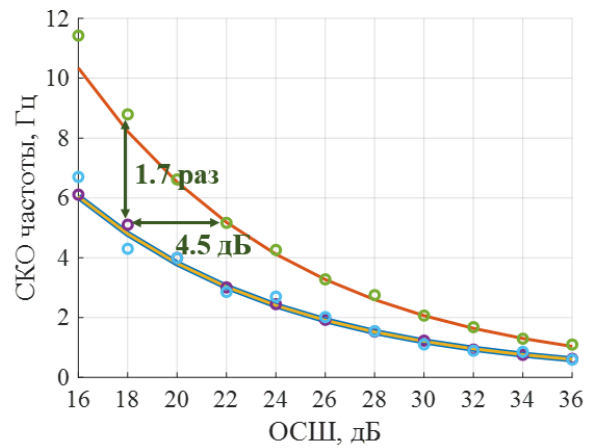


Рисунок 4 – Зависимость СКО оценки сдвига частоты от ОСШ

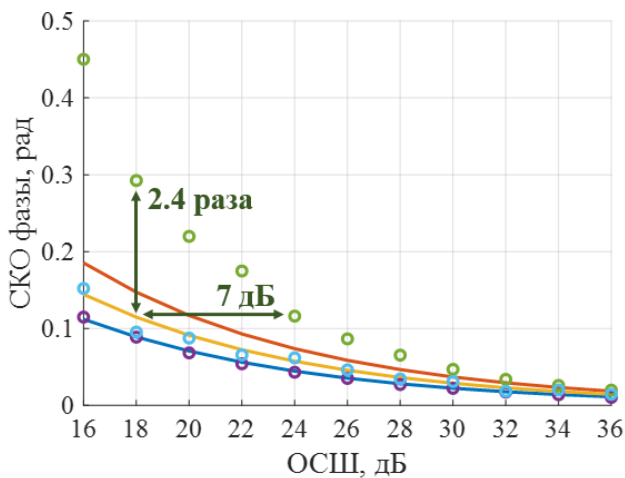


Рисунок 5 – Зависимость СКО оценки начальной фазы от ОСШ

- Теория с учетом корреляции ($s=0$ и не оценивается)
- Теория с учетом корреляции ($s \neq 0$ неизвестная и не компенсируется)
- Теория с учетом корреляции ($s \neq 0$ и оценивается)
- Эксперимент ($s=0$ и не оценивается)
- Эксперимент ($s \neq 0$ неизвестная и не компенсируется)
- Эксперимент ($s \neq 0$ и оценивается)

Из анализа приведённых зависимостей можно сделать вывод, что если в приёмном устройстве не учитывается влияние частотной дисперсии ионосферного канала, то это существенно снижает точность оценки остальных неизвестных параметров сигнала, например, при ОСШ 16 дБ СКО оценки задержки увеличивается примерно в 10 раз, СКО оценки частотного сдвига в 1.7 раза, СКО оценки фазы в 2.4 раза (сравнивались значения, полученные в ходе моделирования). Энергетический проигрыш при этом составляет порядка 20 дБ, 4.5 дБ и 7 дБ, соответственно, для каждого из вышеупомянутых параметров. На рисунке 6 приведено СКО наклона ДХ. Истинное значение наклона ДХ было выбрано равным $s=80$ мкс/МГц, частотного сдвига $f_d=12$ Гц, задержки $\tau=5$ мкс.

В третьем разделе представлен алгоритм совместного обнаружения сигнала, подверженного дисперсионным искажениям, и оценивания его параметров. Получены характеристики обнаружителя сигнала с двумя неизвестными параметрами – неизвестным наклоном ДХ и начальной фазой, а также с четырьмя неизвестными параметрами – неизвестным частотным сдвигом, задержкой, наклоном ДХ и начальной фазой.

Указанный алгоритм заключается в сравнении абсолютного максимума логарифма функционала отношения правдоподобия, найденного во время получения оценок параметров сигнала, с пороговым значением, которое определяется по критерию Неймана-Пирсона. Выражения для вероятностей ложной тревоги и пропуска цели при совместном обнаружении и оценивании четырех неизвестных неэнергетических параметров имеют вид

$$\alpha \approx \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{\xi C^3}{(2\pi)^{5/2} \rho^3} \exp\left(-\frac{C^2}{2\rho^2}\right)\right), & C \geq \rho\sqrt{3} \\ 1, & C < \rho\sqrt{3} \end{cases}, \quad (7)$$

$$\beta = \begin{cases} \exp\left(-\frac{\xi C^3}{(2\pi)^{5/2} \rho^3} \exp\left(-\frac{C^2}{2\rho^2}\right)\right) \times \\ \times \frac{\rho}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^C \exp\left(\frac{4\rho^4 - M^2}{4\rho^2}\right) D_{-2}\left(\frac{(2\rho^2 - M)}{\rho}\right) dM, & C \geq \rho\sqrt{3} \\ 0, & C < \rho\sqrt{3} \end{cases}, \quad (8)$$

где $\xi = 2\pi\Delta_{f_d}\Delta_{\tau}\Delta_s\sqrt{\Omega}$, Ω – определитель матрицы (5), Δ_{f_d} – область определения неизвестного частотного сдвига, Δ_{τ} – область определения неизвестной задержки, Δ_s – область определения неизвестного наклона ДХ, 2π – область определения начальной фазы.

С целью определения вклада, вносимого частотной дисперсией ионосферного канала в потери при обнаружении, и проверки корректности выражений (7) и (8) было проведено имитационное моделирование в Matlab. Моделирование проводилось для ФМ-2 сигнала, сформированного на основе М-последовательности длиной 2047. Ширина спектра составила 400 кГц. Истинное значение наклона дисперсионной характеристики было выбрано равным $s = 80$ мкс/МГц, частотного сдвига $f_d = 12$ Гц, задержки $\tau = 5.0$ мкс. Оценка этих параметров производилась с помощью метода МП. Для обнаружения сигнала был использован некогерентный обнаружитель Неймана-Пирсона с $\alpha = 10^{-3}$. Область определения наклона ДХ $\Delta_s = 320$ мкс/МГц, сдвига частоты $\Delta_{f_d} = 65$ Гц, задержки $\Delta_{\tau} = 8$ мкс. На рисунке 7 приведены теоретические и экспериментальные зависимости вероятности пропуска цели от ОСШ для 3 случаев: обнаружение детерминированного сигнала с неизвестной начальной фазой, обнаружение детерминированного сигнала с тремя неизвестными параметрами: частотным сдвигом, задержкой и начальной фазой и обнаружение детерминированного сигнала с четырьмя неизвестными параметрами: наклоном ДХ, частотным сдвигом, задержкой и начальной фазой.

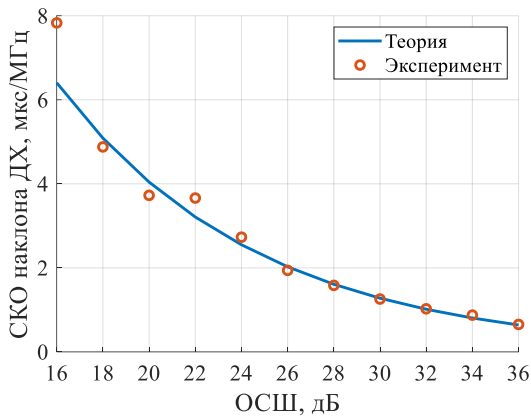


Рисунок 6 – Зависимость СКО оценки наклона ДХ от ОСШ

составляют около 1.5 дБ относительно обнаружения детерминированного сигнала с неизвестной начальной фазой и около 0.7 дБ при вероятности ложной тревоги 10^{-3} (см. рисунок 8) относительно сигнала с тремя неизвестными параметрами (наклон ДХ известен). При этом вероятность пропуска цели увеличивается более чем в 100 раз для ОСШ выше 15 дБ, если не оценивать наклон ДХ и не учитывать его для вычисления порога при обнаружении сигнала, искажённого частотной дисперсией ионосферного канала. Энергетические потери при этом составляют порядка 2 дБ.

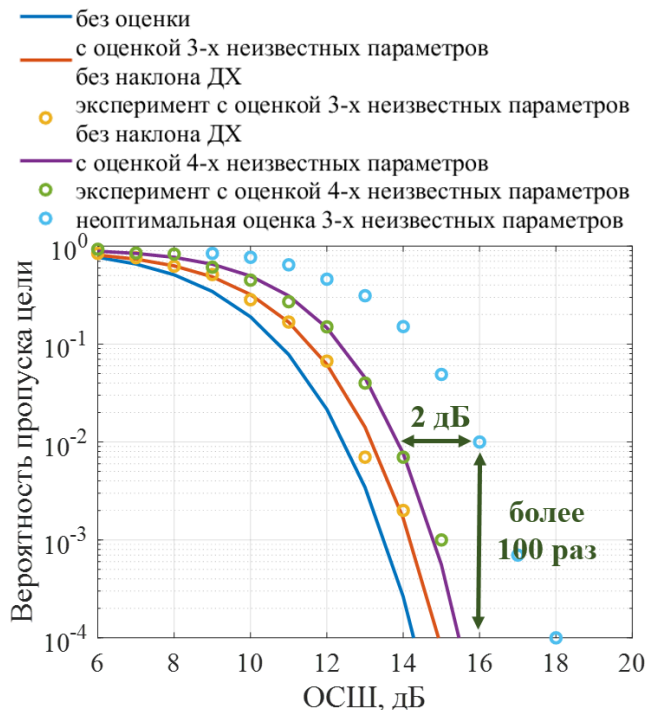


Рисунок 7 – Зависимость вероятности пропуска цели от ОСШ

В четвёртом разделе рассматривается разработанный вычислительно эффективный алгоритм и устройство обнаружения сигнала и совместного оценивания его параметров в условиях широкополосного ионосферного канала. Рассматриваются особенности оценивания частотного сдвига. Сравняются реализации устройства на центральном процессоре (CPU) и графическом процессоре (GPU). Показаны результаты тестирования разработанного устройства.

Также на рисунке 7 приведена экспериментальная зависимость вероятности пропуска цели от ОСШ при обнаружении детерминированного сигнала с четырьмя неизвестными параметрами, но с оценкой только трёх из них: частотного сдвига, задержки и начальной фазы (наклон ДХ не оценивается и, следовательно, не компенсируется).

Из приведённых зависимостей видно, что потери в ОСШ при обнаружении сигнала с четырьмя неизвестными параметрами, включая наклон ДХ,

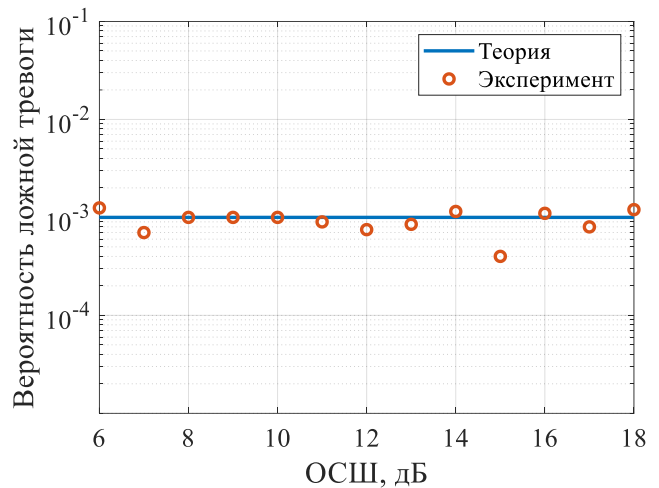
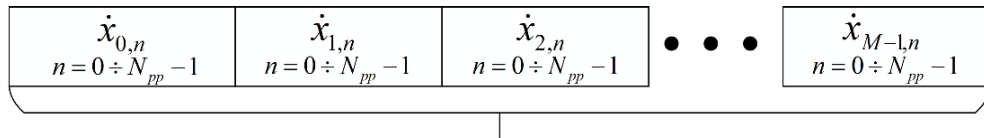


Рисунок 8 – Зависимость вероятности ложной тревоги от ОСШ

Большое количество согласованных фильтров (СФ) накладывает высокие требования к вычислительной платформе. Снижения вычислительной сложности позволяет достичь учет доплеровского сдвига частоты f_d для его дальнейшей оценки после согласованной фильтрации. Однако наличие частотной отстройки приводит к уходу фазы за время наблюдения комплексной огибающей на входе СФ, что приводит к потерям в ОСШ на выходе СФ. Разделение синхро-преамбулы на M частей (см. рисунок 9) и согласованная фильтрация с серией последовательностей (см. рисунок 10) позволяет уменьшить упомянутые потери.



Синхро-преамбула длительностью N_p , разделенная на M частей длительностью N_{pp}

Рисунок 9 – Разделенная на M частей синхро-преамбула

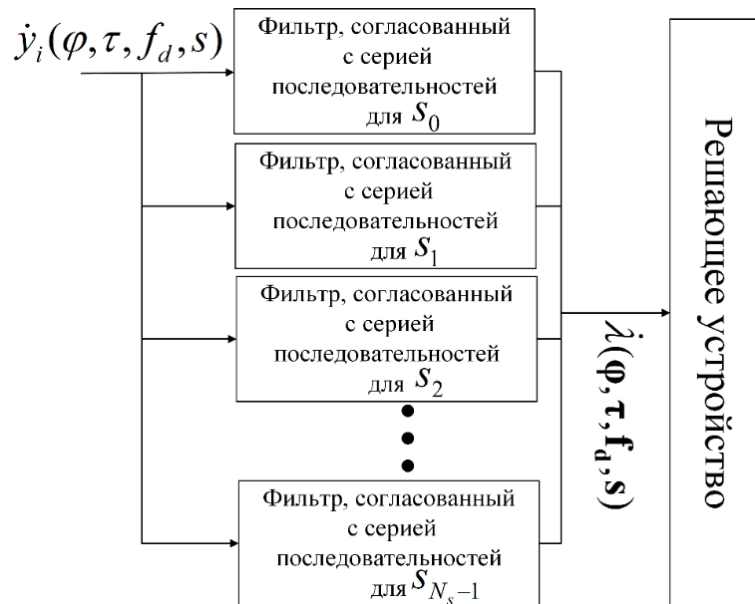


Рисунок 10 – Схема устройства совместного обнаружения и оценки параметров сигнала

Согласованный фильтр с серией последовательностей на GPU реализован с помощью алгоритма быстрой свертки «Overlap and Save» и библиотеки параллельного вычисления БПФ и ОБПФ на GPU – cIFFT, реализованную на OpenCL.

Оценка частотного сдвига выполнялась в двух вариантах. Первый вариант заключается в прямом перемножении на комплексные экспоненты с последующим суммированием откликов парциальных фильтров. Второй вариант выполнен с помощью БПФ через библиотеку cIFFT.

Тестирование разработанного устройства выполнялось на 6-ти ядерном центральном процессоре Intel Core i7-8700 с тактовой частотой 3.2 ГГц и графическом процессоре GeForce RTX 3060 с 3584 ядрами CUDA. Тестирование проводилось на сигнале с шириной полосы частот $\Delta F = 400 \text{ кГц}$ и длительностью $T = 7.05 \text{ с}$. База данного сигнала составляет 64.5 дБ. Увеличение количества возможных значений частотных сдвигов N_{f_d} приводит к незначительному увеличению

вычислительной сложности по сравнению с увеличением количества возможных значений наклона ДХ N_s (см. рисунок 11). Увеличение числа M приводит к увеличению вычислительной сложности (см. рисунок 12). Разработанные вычислительно эффективные алгоритмы существенно снижают вычислительную сложность (порядка 10^5) по сравнению с набором корреляторов (см. рисунок 11 и 12).

Реализация устройства с оценкой доплеровского сдвига через БПФ на GPU является наиболее вычислительно эффективной (см. рисунок 13) и позволяет обрабатывать один отсчет менее чем за 20 мкс при потерях не более 0.5 дБ (при длительности блока менее 80 мс и сдвиге частоты 3 Гц) по отношению к классической свертке (см. рисунок 14). Под классической сверткой понимается свертка, при которой умножение сворачиваемой последовательности на соответствующий гармонический множитель для компенсации частотного сдвига происходит до вычисления откликов парциальных фильтров.

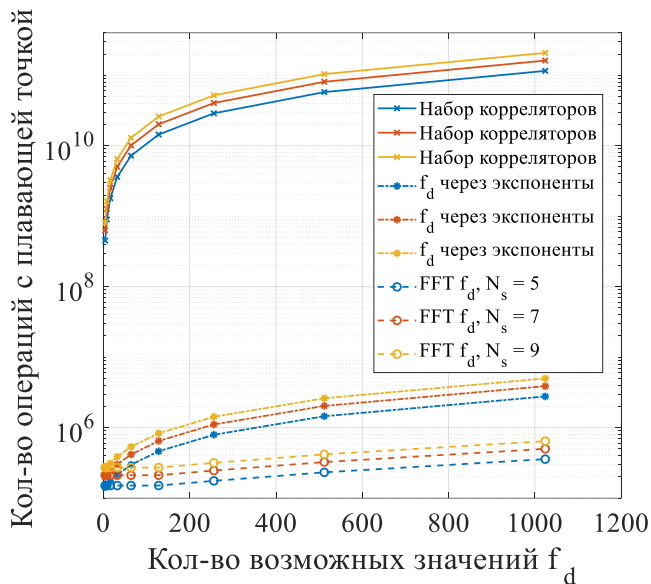


Рисунок 11 – Зависимость кол-ва комплексных умножений от N_{f_d} для разного кол-ва возможных значений наклона ДХ ионосферного канала N_s , $M = 86$, $N_{pp} = 32768$

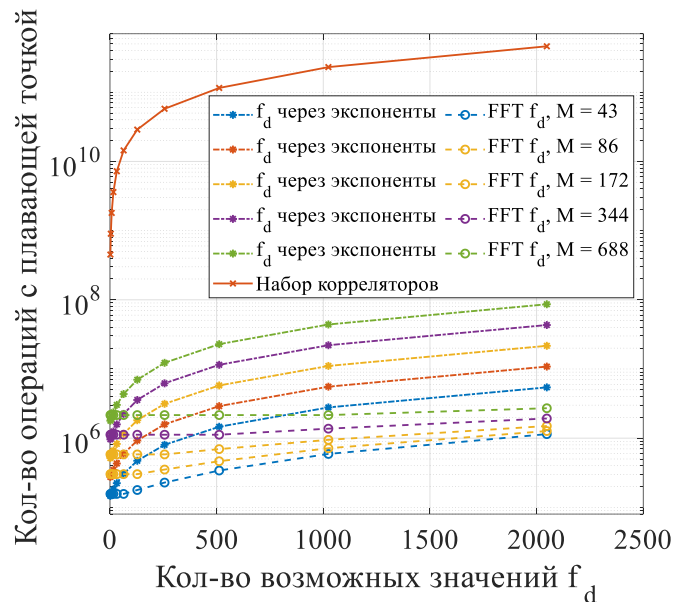


Рисунок 12 – Зависимость кол-ва комплексных умножений от кол-ва возможных значений f_d для различного кол-ва разбиений M исходного сигнала при $N_s = 10$

Из графика зависимости коэффициента реального времени от длительности обрабатываемого сигнала (см. рисунок 15) $K_r(T_s) = T_p / T_s$, где T_p - время обработки, T_s - длительность обрабатываемого сигнала, видно, что $K_r(T_s) \leq 1$ при $T_s < 2$ с. Отсюда следует, что разработанное устройство совместного обнаружения и оценивания параметров сигналов позволяет в реальном масштабе времени обрабатывать сигналы с длительностью до 2 с в полосе 400 кГц. Диапазон поиска по наклону ДХ был выбран от 0 до 100 мкс/МГц ($N_s = 11$) с шагом 10 мкс/МГц (максимальная погрешность при больших ОСШ 5 мкс/МГц, потери не превышают 0.1 дБ). Диапазон поиска по

частотному сдвигу от -6 до 6 Гц (погрешность варьировалась от 1.5 Гц до 0.025 Гц ($N_f \in 4:256$) в зависимости от длительности, потери не превышают 0.25 дБ). Количество значений задержек составляло $N_\tau = 16384$ с погрешностью 1.25 мкс. При классическом решении задачи совместного обнаружения и оценивания параметров сигналов с длительностью 2 с и шириной полосы частот 400 кГц в реальном масштабе времени необходимо $N_s \cdot N_f \cdot N_\tau = 11 \cdot 128 \cdot 16384 = 23068672$ корреляторов, которые заменяются разработанным устройством.

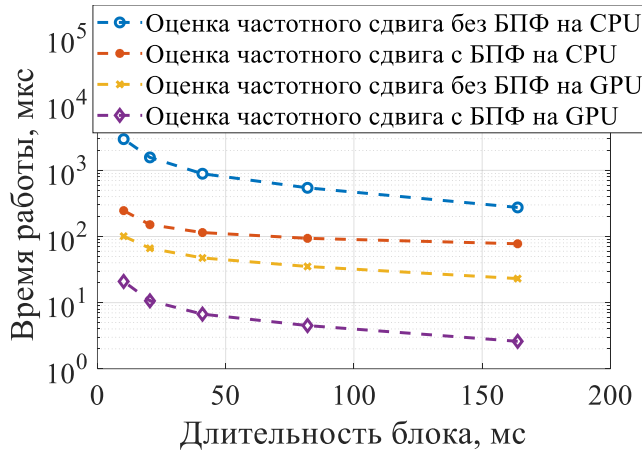


Рисунок 13 – Экспериментальное время работы алгоритмов на один входной отсчет при различной длительности блока

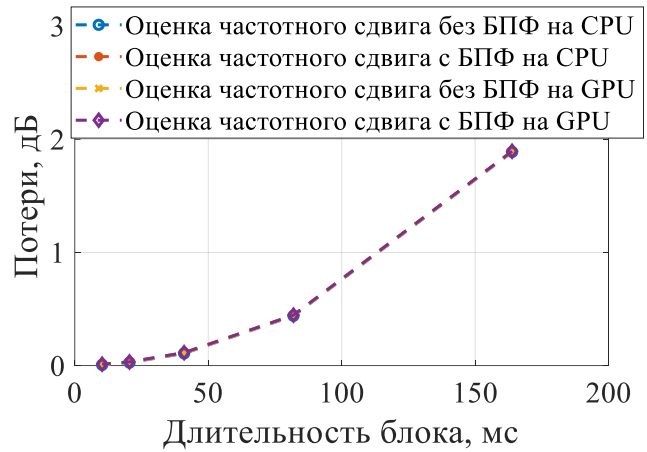


Рисунок 14 – Зависимость потерь по отношению к классической свертке от длительности блока при частотном сдвиге $f_d = 3$ Гц

В разделе приведены результаты натуральных испытаний на однокачковой трассе протяженностью ~ 3000 км, в результате которых была обработана запись сигнала с эфира с шириной спектра 400 кГц с дисперсионными искажениями. Оценка частотного сдвига $\hat{f} = 3.3$ Гц и наклона ДХ $\hat{s} = 90$ мкс/МГц. На рисунке 16 показан отклик СФ при различной ошибке в оценке наклона ДХ.

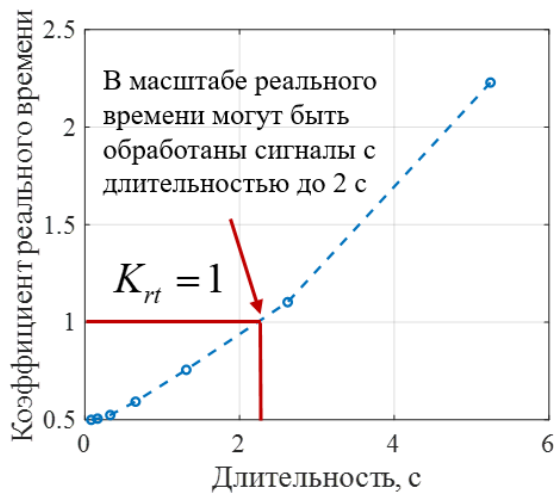


Рисунок 15 – Зависимость коэффициента реального времени от длительности обрабатываемого сигнала

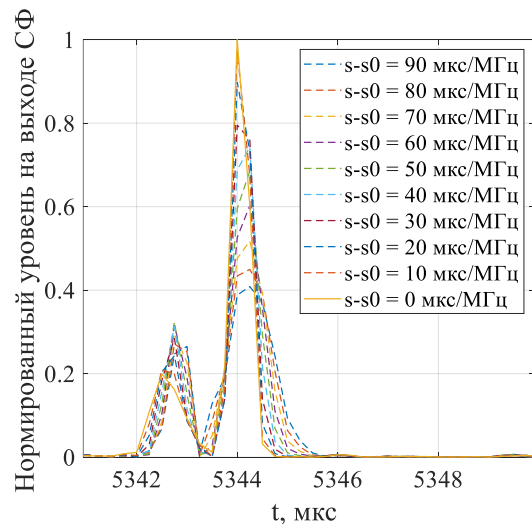


Рисунок 16 – Отклик СФ при различной ошибке в оценке наклона ДХ

На рисунке 17 и 18 представлены зависимости ОСШ и фазы на выходе СФ от ошибки оценивания наклона ДХ, полученные при моделировании и при обработке записи с эфира.

Можно видеть, что модуль отклика СФ и оцененный уровень ОСШ максимальны для оцененного значения наклона ДХ 90 мкс/МГц. На рисунке 17 показан отклик СФ при различной ошибке в оценке наклона ДХ. Красная кривая на рисунке 18 показывает смещение фазы отклика при ошибке в оценке наклона ДХ. Это, в свою очередь, подтверждает корреляционную зависимость оценок фазы и наклона ДХ, а также наличие смещения оценки фазы при неоптимальном приеме. Совпадение результатов, полученных при моделировании и при обработке записи с эфира, позволяют судить об адекватности разработанных алгоритмов и устройства.

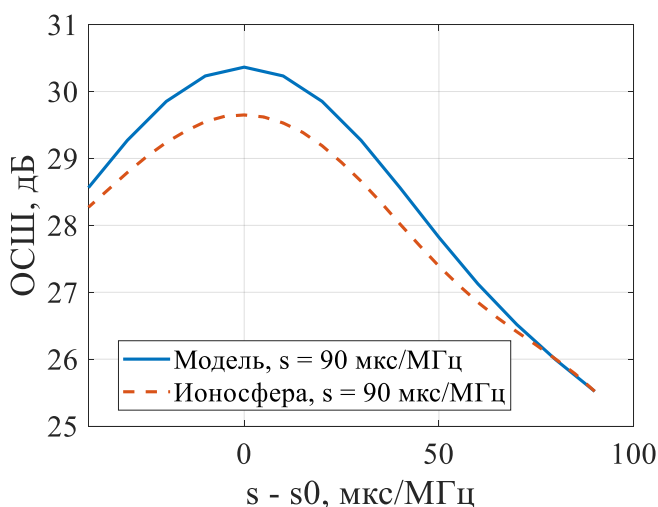


Рисунок 17 – Зависимость ОСШ на выходе СФ от ошибки оценивания наклона ДХ

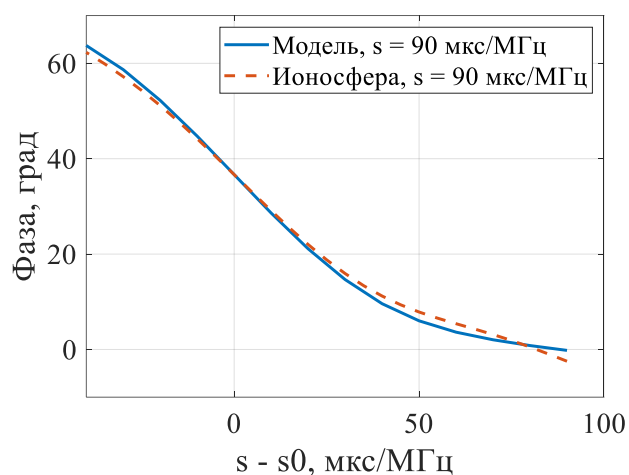


Рисунок 18 – Зависимость фазы на выходе СФ от ошибки оценивания наклона ДХ

Заключение

Основные итоги выполненного диссертационного исследования заключаются в следующем:

1. Разработан алгоритм оптимального совместного оценивания параметров широкополосного сигнала декаметрового диапазона (начальной фазы, задержки, смещения частоты) в условиях дисперсионных искажений сигнала, включая оценивание наклона дисперсионной характеристики (ДХ), как параметра, количественно описывающего дисперсионные искажения.

2. Проведено исследование показателей точности совместного оценивания четырёх неизвестных параметров широкополосного сигнала, искажённого частотной дисперсией ионосферного канала, а именно: наклона ДХ, сдвига частоты, задержки и начальной фазы.

Получены теоретические выражения для дисперсий и взаимных корреляций оценок указанных неизвестных параметров для фазоманипулированного сигнала. Установлена корреляционная связь между оценками наклона дисперсионной характеристики и начальной фазой широкополосного фазоманипулированного сигнала. Установлено, что дисперсионные искажения сигнала приводят к ненулевой корреляционной связи между оценками задержки и частотного сдвига. Получены упрощённые выражения для симметричных и антисимметричных фазоманипулированных сигналов, а также фазоманипулированных сформированных на основе длинных ПСП. Выявлено,

что в последнем случае дисперсии оценок задержки и частотного сдвига приближаются к выражениям для дисперсий самостоятельной оценки этих параметров с ростом длины последовательности, на основе которой сформирован сигнал, дисперсия оценки наклона ДХ при совместном оценивании совпадает с дисперсией некогерентной оценки только наклона ДХ. При этом большинство корреляционных связей стремится к нулю, за исключением корреляционной связи между оценками наклона ДХ и начальной фазы. Показано, что если в приёмном устройстве не учитывается влияние частотной дисперсии ионосферного канала, то это существенно снижает точность оценки остальных неизвестных параметров сигнала, например, при ОСШ 16 дБ СКО оценки задержки увеличивается примерно в 10 раз, СКО оценки частотного сдвига в 1.7 раза, СКО оценки фазы в 2.4 раза. Энергетический проигрыш при этом составляет порядка 20 дБ, 4.5 дБ и 7 дБ, соответственно, для каждого из вышеупомянутых параметров.

3. Разработаны два алгоритма оптимального совместного оценивания параметров широкополосного сигнала декаметрового диапазона с одновременным его обнаружением:

- алгоритм совместного обнаружения сигнала и оценивания наклона ДХ (при неизвестной начальной фазе);
- алгоритм совместного обнаружения сигнала и оценивания неизвестных параметров: задержки, частотного сдвига, начальной фазы и наклона ДХ.

Оценивание параметров проводится по критерию максимума функционала правдоподобия. Обнаружение сигнала осуществляется по критерию Неймана-Пирсона.

4. Получены выражения для вычисления вероятностей пропуска цели и ложной тревоги, а также для расчета порога обнаружения по критерию Неймана-Пирсона, в условиях оценивания параметров сигнала, включая параметр дисперсионных искажений для двух случаев:

- обнаружение сигнала с неизвестным наклоном дисперсионной характеристики и начальной фазой;
- обнаружение сигнала с неизвестным частотным сдвигом, задержкой, начальной фазой и наклоном ДХ.

Проведено имитационное моделирование, в ходе которого были получены экспериментальные зависимости вероятностей пропуска цели и ложной тревоги. Экспериментальные зависимости совпали с теоретическими, что подтверждает корректность полученных выражений для вероятности ложной тревоги и вероятности пропуска цели.

5. Проведено исследование влияния дисперсионных искажений и их оценивания на качество обнаружения сигнала. В ходе исследования было показано:

- энергетические потери при обнаружении сигнала с неизвестным, оцениваемым с помощью метода МП, наклоном ДХ составили порядка 1 дБ по сравнению с оцениванием детерминированного сигнала с неизвестной начальной фазой;
- энергетические потери при обнаружении сигнала с четырьмя неизвестными параметрами,

включая наклон ДХ, составляют около 1.5 дБ относительно обнаружения детерминированного сигнала и около 0.5 дБ относительно сигнала с тремя неизвестными параметрами (наклон ДХ известен). Однако вероятность пропуска цели ниже более чем в 100 раз для ОСШ выше 15 дБ, при этом энергетический выигрыш составляет порядка 2 дБ, если оценивать наклон ДХ и учитывать его для вычисления порога при обнаружении сигнала, искажённого частотной дисперсией ионосферного канала. Следовательно, оценка наклона ДХ и учёт её влияние при расчёте порога обнаружителя повышает качество приёма.

6. Разработано два вычислительно эффективных алгоритма совместного обнаружения широкополосного сигнала декаметрового диапазона и оценивания задержки, частотного сдвига, начальной фазы и наклона ДХ, в которых оценка частотного сдвига выполняется с помощью умножения откликов парциальных СФ на гармонические множители и с помощью БПФ.

Показано, что алгоритм, основанный на оценке частотного сдвига через БПФ, является более вычислительно эффективным, чем алгоритм с оценкой частотного сдвига путем умножения откликов парциальных СФ на гармонические множители. Выигрыш в производительности составил от 5 до 10 раз, в зависимости от длины блока в парциальном СФ.

Реализация устройства совместного обнаружения и оценивания задержки, частотного сдвига, начальной фазы и наклона ДХ с оценкой частотного сдвига с помощью БПФ на базе графического процессора позволяет выполнять совместное обнаружение и оценивание всех исследуемых в работе параметров сигнала в полосе до 400 кГц и длительностью до 2 с в масштабе реального времени. При этом эквивалентное количество корреляторов, необходимое для совместного обнаружения сигнала и оценивания всех исследуемых в работе параметров сигнала, составляет порядка $2 \cdot 10^7$ при классическом решении задачи. Разработанное устройство обладает меньшей в 10^5 раз вычислительной сложностью по сравнению с набором корреляторов.

Получены выражения для расчета вычислительной сложности предложенных алгоритмов. Показано, что длительность блока в парциальном СФ влияет на потери по отношению к классической свертке. Уменьшение длительности блока приводит к уменьшению потерь по отношению к классической свертке, но приводит к увеличению вычислительной сложности. Потери в разработанном устройстве по отношению к теоретическим результатам не превышают 0.5 дБ в СКО оценки задержки, не превышают 1 дБ в СКО оценки частотного сдвига, не превышают 0.1 дБ в СКО оценки наклона ДХ и не превышают 1 дБ в СКО оценки начальной фазы при ОСШ выше 20 дБ.

7. Выполнена проверка разработанного устройства совместного обнаружения широкополосного сигнала декаметрового диапазона и оценивания его задержки, частотного сдвига, начальной фазы и наклона ДХ на реальной однокачковой трассе протяженностью ~3000 км. Результаты натурных испытаний подтвердили основные выводы, сформулированные по результатам проведенного исследования.

К перспективам дальнейшей разработки темы можно отнести расширение математического аппарата в задаче оптимального совместного оценивания параметров широкополосного сигнала декаметрового диапазона с одновременным его обнаружением на большее количество сигналов, например, сигналов с линейной частотной модуляцией и дискретных частотных сигналов.

Поставленные задачи решены. Цель достигнута.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из списка ВАК

1. Алгоритмы оценки и компенсации дисперсионных искажений широкополосных сигналов ионосферных радиолиний связи / С.С. Аджемов, Е.М. Лобов, Н.А. Кандауров, Е.О. Лобова, **В.И. Липаткин** // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. – 2021. – Т. 13. № 5. – С. 57-74. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-5-57-74
2. **Липаткин, В.И.** Алгоритм обнаружения широкополосного сигнала в условиях его дисперсионных искажений при одновременной оценке множества параметров / **В.И. Липаткин**, Е.О. Лобова // Электросвязь. – 2022. – № 7. – С. 23-29.
3. **Lipatkin, V.I.** The quality of estimation of parameters of a broadband signal with non-optimal reception under conditions of dispersion distortions in the Earth's ionosphere / **V.I. Lipatkin**, E.M. Lobov, E.O. Lobova // T-Comm: Telecommunications and transport. – 2022. – Т. 16, № 8. – С. 46-53.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science

4. **Lipatkin, V.I.** Broadband Noise-like Signal Parameters Joint Estimation Quality with Dispersion Distortions in the Ionospheric Channel / **V.I. Lipatkin**, E.O. Lobova // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – 2020. – 6 p. doi: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166082
5. **Lipatkin, V.I.** Wideband Signals Dispersion Distortions Optimum Tracking Compensator Based On Digital Filter Banks Using Farrow Filters / **V.I. Lipatkin**, E.O. Lobova, N.A. Kandaurov // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2020. – 2020. – 6 p. doi: 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078656.
6. **Lipatkin, V.I.** The Influence of the Quality of the Estimation of Dispersion Distortions of a Broadband HF Signal on the Noise Immunity of a Radio Link / **V.I. Lipatkin**, E.O. Lobova and K.E. Telengator // 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – 2021. – 5 p. doi: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488371.
7. **Lipatkin, V.I.** Cramer-Rao Bounds for Wideband Signal Parameters Joint Estimation in Ionospheric Frequency Dispersion Distortion Conditions / **V.I. Lipatkin**, E.M. Lobov, E.O. Lobova, N.A. Kandaurov // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2021. – 2021. – 7 p. doi: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416074.
8. Kandaurov, N.A. Implementing Digital Downconversion on a GPU / N.A. Kandaurov, **V.I. Lipatkin**, V.O. Varlamov // 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in

Telecommunications (SYNCHROINFO). – 2021. – 8 p. doi: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488398.

9. **Lipatkin, V.I.** Computationally Efficient Implementation of Joint Detection and Parameters Estimation of Signals with Dispersive Distortions on a GPU / **V.I. Lipatkin**, E.M. Lobov, N.A. Kandaurov // Sensors. – 2022. – № 9: 3105. – 15 p. doi: 10.3390/s22093105

Публикации в других изданиях

10. Investigation of the Influence of Dispersion Distortions of Wideband Signals on the Quality of their Delay and Frequency Shift Estimation / E.M. Lobov, N.A. Kandaurov, E.O. Lobova, **V.I. Lipatkin** // SynchroInfo Journal. – 2021. – Vol. 7, №1. – P. 11-16.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020619922 Российская Федерация. Программный модуль оценки параметров сигналов / Н.А. Кандауров, **В.И. Липаткин**, Д.С. Чиров, Е.О. Кандаурова; заявитель и правообладатель МТУСИ. – № 2020616919; заявл. 30.06.2020; опубл. 26.08.2020. – 1 с.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619517 Российская Федерация. Программа обработки широкополосных сигналов на GPU в режиме реального времени / Н.А. Кандауров, Е.М. Лобов, **В.И. Липаткин**; заявитель и правообладатель МТУСИ. – № 2021618621; заявл. 02.06.2021; опубл. 10.06.2021. – 1 с.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022615306 Российская Федерация. Программа оценки качества приема зондирующих сигналов в ионосферном канале / Н.А. Кандауров, **В.И. Липаткин**, Е.О. Лобова; заявитель и правообладатель МТУСИ. – № 2022614265; заявл. 22.03.2022; опубл. 30.03.2022. – 1 с.
14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022615298 Российская Федерация. Программный модуль совместного обнаружения и оценки параметров сигнала на GPU/ **В.И. Липаткин**; заявитель и правообладатель МТУСИ. – № 2022614204; заявл. 22.03.2022; опубл. 30.03.2022. – 1 с.