

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор
АО «Радиотехнический институт имени
академика А.Л. Минца»
доктор военных наук, профессор



Ю.Г. Аношко

2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации - Акционерного общества «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца» на диссертацию Липаткина Владислава Игоревича на тему «Повышение качества обнаружения широкополосного сигнала и точности совместного оценивания его параметров в условиях частотной дисперсии ионосферы Земли», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 - Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

1. Актуальность темы исследования

Декаметровый диапазон частот активно используется при выполнении загоризонтной радиолокации, которая позволяет обнаруживать объекты на расстоянии в несколько тысяч километров за счет распространения сигнала в ионосферном канале. При построении радиолокаторов возникает задача обнаружения сигнала с одновременным оцениванием смещения по частоте и задержки сигнала, что в свою очередь позволяет оценить скорость объекта и расстояние до него.

В последнее время наблюдается тенденция к увеличению полосы частот сигналов, используемых для облучения обнаруживаемых объектов. Расширение полосы частот свыше 100 кГц в декаметровом диапазоне приводит к появлению искажений, связанных с частотной дисперсией коэффициента диэлектрической проницаемости плазмы ионосферы Земли. Появление дополнительных искажений снижает качество обнаружения и точность сопутствующего оценивания смещения по частоте и задержки сигнала.

Вход. № 4/23
« 23 » 01 2023.
ПОДПИСЬ

При разработке перспективных широкополосных загоризонтных радиолокаторов выполнение обнаружения сигнала с одновременным оцениванием множества его параметров, включая параметры специфичных для ионосферного канала искажений, позволяет повысить точность оценивания скорости и дальности объектов.

Появление дополнительного оцениваемого параметра приводит к увеличению вычислительной сложности обнаружения сигнала и оценивания его параметров, что, в свою очередь, требует использования вычислительно эффективных алгоритмов и производительных аппаратных платформ, например, графических процессоров, позволяющих выполнять параллельные вычисления.

2. Структура и основные результаты работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и одного приложения.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и решаемые задачи, указаны научная новизна и значение полученных соискателем результатов для практики, представлены сведения о структуре работы и приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **первом** разделе диссертации рассмотрена общая теория обнаружения сигналов с совместным оцениванием их параметров, выбрана модель ионосферного канала, рассмотрены дисперсионные искажения фазоманипулированных сигналов и их влияние на качество обнаружения и приема информации. Выполнена постановка научной задачи и выбран ближайший прототип.

Во **втором** разделе диссертации рассмотрено влияние оценивания наклона дисперсионной характеристики ионосферного канала на точность совместного оценивания других параметров сигналов, таких как задержка, частотный сдвиг и начальная фаза сигнала. Чтобы оценить данное влияние, получены общие выражения для дисперсии оценок, взаимных корреляционных функций и коэффициентов корреляции для оцениваемых параметров для фазоманипулированных сигналов с ФМ-2 с симметричным спектром в задаче оценивания четырех параметров, включая наклон дисперсионной характеристики ионосферного канала. 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. Общие полученные выражения для дисперсии оценок, взаимных корреляционных функций и коэффициентов корреляции для оцениваемых параметров упрощены для двух частных случаев: симметричные фазоманипулированные сигналы и фазоманипулированные

сигналы большой длины. В первом случае дисперсия оценки частотного сдвига становится близкой к аналогичной дисперсии в задаче оценивания трех параметров. Во втором случае 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.

Также в разделе рассмотрен случай неоптимального приема, когда поступающих на вход приёмника полезный сигнал искажен частотной дисперсией ионосферного канала, но оценивание данных искажений не выполняется. В данном случае существенно снижается точность оценивания 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.

В **третьем** разделе представлен алгоритм обнаружения сигнала, подверженного дисперсионным искажениям, с совместным оцениванием его параметров. Получены выражения для вычисления вероятностей пропуска цели и ложной тревоги в условиях оценивания параметров сигнала, включая параметр дисперсионных искажений для двух случаев. В первом случае рассматривается обнаружение сигнала с неизвестным наклоном дисперсионной характеристики и начальной фазой, а во втором обнаружение сигнала с неизвестным частотным сдвигом, задержкой, начальной фазой и наклоном ДХ. Все теоретические результаты подтверждены имитационным моделированием. Показано, что энергетические потери при обнаружении сигнала с неизвестным, оцениваемым наклоном ДХ составили порядка 1 дБ по сравнению с оцениванием детерминированного сигнала с неизвестной начальной фазой, а 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. При этом вероятность пропуска цели ниже более чем в 100 раз для ОСШ выше 15 дБ, а энергетический выигрыш составляет порядка 2 дБ, если оценивать наклон ДХ и учитывать его для вычисления порога при обнаружении сигнала, искажённого частотной дисперсией ионосферного канала.

В **четвертом** разделе автором представлен вычислительно эффективный алгоритм обнаружения сигнала и совместного оценивания его параметров в условиях широкополосного ионосферного канала. Вычислительная эффективность достигается за счет учета смещения частоты для его дальнейшей

оценки после согласованной фильтрации, применения алгоритма быстрой свертки и оценки смещения по частоте с помощью алгоритма БПФ. Вычислительная эффективность предложенного алгоритма подтверждается его сравнением с классической схемой обнаружения с совместным оцениванием параметров на основе набора корреляторов. Сравнение показало, что предложенный алгоритм требует в 10^5 раз меньше вычислительных затрат. На основе предложенного алгоритма разработано устройство обнаружения сигнала и совместного оценивания его параметров в условиях широкополосного ионосферного канала на графическом процессоре. Показано, что данное устройство 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. Разработанное устройство совместного обнаружения широкополосного сигнала декаметрового диапазона и оценивания его задержки, частотного сдвига, начальной фазы и наклона ДХ проверено на записях сигналов, полученных на реальной односкачковой трассе протяженностью ~ 3000 км.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

3. Научная новизна работы

Научная новизна работы заключается в:

- **новых** аналитических выражениях для элементов матрицы Фишера в рамках задачи оценивания четырех параметров сигнала: начальной фазы, смещения частоты, задержки и наклона дисперсионной характеристики канала;

- **новых** аналитических выражениях для дисперсий соответствующих оценок, корреляционных функций и коэффициентов корреляции для всех пар исследуемых оценок;

- **установление новых** корреляционных связей между оценками наклона дисперсионной характеристики канала и начальной фазой широкополосного фазоманипулированного сигнала, а также в установление того, что дисперсионные искажения сигнала приводят к ненулевой корреляционной связи между оценками задержки и частотного сдвига фазоманипулированного сигнала, которая уменьшается с ростом длительности сигнала;

- **новых** аналитических выражениях для вычисления среднеквадратического отклонения оценок начальной фазы, смещения частоты, задержки в условиях неоптимального приема, т.е. при отсутствии компенсации дисперсионных искажений;

- **новых** аналитических выражениях для расчета вероятностей ложной тревоги и пропуска цели в задаче обнаружения сигнала с совместным оцениванием его параметров, с учетом оценки наклона дисперсионной характеристики.

4. Теоретическая значимость результатов диссертационной работы заключается в развитии математического аппарата расчета показателей качества обнаружения фазоманипулированных сигналов и оценивания их параметров в условиях частотной дисперсии ионосферы Земли.

5. Практическая ценность результатов диссертационной работы не вызывает сомнений и заключается в том, что разработанное устройство обнаружения сигнала с одновременным совместным оцениванием его параметров на основе предложенного вычислительно эффективного алгоритма позволяет обрабатывать сигналы в полосе до 400 кГц и длительностью до 2 с в масштабе реального времени и было апробировано на модельных и натуральных записях сигналов.

6. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность проведенных соискателем научных положений, исследований, результатов и выводов подтверждается аргументированностью и доказательностью предложенных алгоритмов и моделей, корректностью применения математического аппарата и согласованностью результатов, полученных с помощью аналитических расчётов, теоретического анализа, имитационного моделирования и натурального эксперимента.

7. Личный вклад автора

Все выносимые на защиту результаты и положения, составляющие основное содержание диссертационной работы, разработаны и получены автором лично.

8. Соответствие работы заявленной специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.2.13 - Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

9. Апробация результатов работы

Диссертационная работа обсуждалась со специалистами в сфере радиотехники, радиосвязи и телекоммуникаций на международных всероссийских конференциях. Уровень апробации результатов диссертации, а также полнота их отражения в публикациях в отечественных периодических научных изданиях представляются вполне достаточными и удовлетворяют требованиям положения о присуждении ученых степеней. Материалы диссертационной работы были обсуждены на 4 научных конференциях. Автор опубликовал результаты своих диссертационных исследований в 3 рецензируемых изданиях ВАК, получил 4 свидетельства о государственной

регистрации программ для ЭВМ. Также 6 работ автора проиндексированы в базах данных SCOPUS (одна из которых в Q1).

10. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Основные положения, результаты и выводы диссертационной работы рекомендуется использовать при разработке широкополосных загоризонтных радиолокаторов и систем связи декаметрового диапазона.

11. Замечания по диссертационной работе

1. Автор рассматривает только сигналы с шириной полосы частот до 400 кГц, поэтому неясно, какое влияние окажет частотная дисперсия ионосферы Земли на качество обнаружения сигнала и точность совместной оценки его параметров при дальнейшем расширении полосы частот.

2. Автор рассматривает только двоичные фазоманипулированные сигналы, откуда неясно, можно ли применять полученный математический аппарат для расчета среднеквадратических отклонений оценок всех исследуемых в работе параметров для фазоманипулированных сигналов высших порядков.

3. В качестве аппаратной платформы для реализации предложенного устройства обнаружения сигнала с одновременным совместным оцениванием его параметров автором выбран графический процессор, но не представлено обоснование выбора конкретной модели используемого графического процессора.

12. Общее заключение по работе

Вышеприведённые замечания не снижают ценность и общую положительную оценку выполненного диссертационного исследования. Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, и имеет значение для развития радиотехнических систем. Работа написана на хорошем научном уровне. Автореферат диссертации достаточно полно и корректно отражает содержание исследования. В автореферате четко сформулированы цель исследования, научная задача, основные положения и выводы. Диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к квалификационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук и соответствует пунктам 2 и 3 паспорта специальности 2.2.13 - Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения. Автор диссертации, Липаткин Владислав Игоревич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по указанной специальности 2.2.13 - Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Отзыв ведущей организации по диссертации Липаткина В.И. был обсужден и одобрен на заседании секции №1 Научно-технического совета

АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца» 12 января 2023 г., протокол № 43.

Отзыв подготовили:


Начальник теоретического отдела
АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца»,
Кандидат физико-математических наук

«17» января 2023 г.

 Виноградов Александр Георгиевич

Ученый секретарь
АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца»,
доктор технических наук

«17» января 2023 г.

 Буханец Дмитрий Иванович