

На правах рукописи

Строев Алексей Константинович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ
ОБРАБОТКИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ, ПОЗВОЛЯЮЩИХ
КОМПЕНСИРОВАТЬ ИХ ИСКАЖЕНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ
ЧЕРЕЗ НЕОДНОРОДНУЮ ИОНОСФЕРУ

Специальность 01.04.03

Радиофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2019

Работа прошла апробацию на кафедре «кафедре интеллектуальных информационных радиофизических систем» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: к. ф.-м. н. Виноградов Александр Георгиевич

Ведущая организация: ОАО «Научно-производственный комплекс «Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи»

Защита состоится 23.12.2019 в 12:00 на заседании диссертационного совета ФРКТ.01.04.03.001 по адресу 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского физико-технического института (национального исследовательского университета)

Работа представлена «14» октября 2019 г. в Аттестационную комиссию федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п.3.1 ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

Общая характеристика работы

Состояние проблемы и ее актуальность

Сверхширокополосные радиосигналы дециметрового и сантиметрового диапазонов находят все более широкое применение в ряде областей, в том числе в радиолокации космических объектов. Использование сверхширокополосных сигналов позволяет значительно улучшить характеристики радиолокационной системы, такие как разрешение по дальности, помехозащищенность, возможность распознавания наблюдаемых объектов.

Радиолокационные системы, как известно, реализуют косвенные измерения интересующих нас параметров. Так, дальность определяется по задержке принимаемого сигнала относительно излучаемого, а радиальная скорость – по доплеровскому сдвигу частоты. Для определения параметров наблюдаемого объекта по радиотехническим измерениям принятого сигнала необходима модель, связывающая эти величины. Такая модель должна, в том числе, учитывать особенности среды распространения.

Проходя через ионосферу, радиолокационные сигналы подвергаются существенным искажениям: возникают дополнительная задержка и дополнительный сдвиг частоты, изменяются направление распространения и поляризация сигнала, что вносит ошибки в результаты измерения. В случае сверхширокополосных сигналов к перечисленным искажениям добавляется дисперсионное расплывание импульса, которое может сделать невозможным согласованную фильтрацию и обнаружение сигнала.

Еще одной проблемой, вызываемой ионосферой, является влияние ионосферных неоднородностей. Неоднородности можно разделить на крупномасштабные и мелкомасштабные – через первые волна проходит, почти не меняя своего направления, а на вторых рассеивается, в том числе назад. При прохождении через крупномасштабные неоднородности может нарушаться когерентность сигнала при когерентном накоплении или при синтезировании апертуры. Влияние ионосферных неоднородностей сходно с влиянием турбулентной тропосферы, однако их структура хуже изучена. Для оптимального определения характеристик системы с учетом влияния неоднородностей необходима модель их влияния на распространяющийся сигнал, что, в свою очередь, требует исследования их статистических характеристик.

Еще более важной является проблема отражения от ионосферных неоднородностей, которое может вызывать появление ложных радиолокационных отметок. Особенно часто это случается в полярных регионах, где ионосферные неоднородности обладают высокой интенсивностью и вытянуты вдоль магнитного поля. Для модернизации алгоритмов защиты от ложной тревоги необходима модель рассеяния радиосигнала на случайно-неоднородном участке ионосферы.

Еще одним мешающим фактором при сверхширокополосном радиолокационном наблюдении в сложных условиях является отражение от подстилающей поверхности. Переход к сверхширокополосной радиолокации позволяет рассматривать использование сигналов в виде короткого немодулированного импульса. Корреляционная функция такого сигнала не имеет боковых лепестков, что позволяет ожидать

лучшего отношения сигнал-помеха при их использовании. Следует оценить, насколько значительным будет выигрыш, поскольку использование сигналов в виде короткого импульса может быть технически сложным. Эта задача математически близка к задаче рассеяния на участке случайно-неоднородной ионосферы и также рассматривается в диссертации.

Сложности, связанные с влиянием внешних условий, в том числе среды распространения, являются основным препятствием к повышению точности широкополосных радиолокационных систем. В связи с этим необходимы методы, позволяющие учесть влияние внешних условий на распространяющиеся широкополосные сигналы. Приведенные соображения определяют актуальность рассматриваемой проблемы.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является создание или модернизация методов и алгоритмов обработки широкополосных радиолокационных сигналов для работы в сложных условиях, в том числе вызванных влиянием ионосферы.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка модели ионосферных искажений широкополосного сигнала и их компенсации.
2. Реализация модели двухполосного метода измерения полного электронного содержания ионосферы с учетом протяженного объекта наблюдения и доплеровского сдвига. Оптимизация параметров двухполосного метода. Оценка

применимости двухполосного метода в зависимости от ширины полосы.

3. Определение статистических характеристик (корреляционной функции и спектральной плотности мощности) ионосферных флуктуаций на основе экспериментальных измерений электронной концентрации.
4. Создание радиофизической модели рассеяния радиолокационного сигнала на авроральных неоднородностях.
5. Разработка упрощенной модели отражения сигнала от случайно-неоднородной поверхности. Сравнение разных видов сверхширокополосных сигналов (ЛЧМ и короткого импульса) применительно к задаче наблюдения за объектом на фоне случайно-неоднородной поверхности.
6. Исследование влияния среды распространения на изображения, получаемые методом инверсного синтеза апертуры.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются широкополосные радиолокационные системы, работающие в сложных условиях. Предметом исследования являются методы и алгоритмы обработки широкополосных радиолокационных сигналов в сложных условиях.

Научная новизна

В работе представлены следующие новые результаты:

1. Предложен и исследован метод «центра масс» для измерения разности задержек сигналов на разных частотах. Показано, что данный метод является более устойчивым при наблюдении за протяженным объектом сложной формы, чем предлагаемый ранее корреляционный метод
2. Показано, что двухполосный метод измерения полного электронного содержания (total electron content, TEC) можно применять при наличии доплеровского сдвига без каких-либо модификаций.
3. Разработана методика выбора оптимального значения относительной полосы частот фильтров в двухполосном методе.
4. Получены оценки выигрыша в отношении сигнал-помеха при использовании сигнала в виде короткого импульса в задаче наблюдения объекта на фоне случайно-неоднородной поверхности.
5. Получены оценки снижения контраста радиолокационного изображения из-за влияния неоднородной ионосферы и тропосферы.
6. Разработаны упрощенные модели для решения радиолокационных задач с использованием широкополосных сигналов при наличии отражения от подстилающей поверхности или авроральных помех.

Достоверность

Достоверность результатов диссертации подтверждается использованием апробированного математического аппарата. Работа базируется на классических результатах теории радиолокации, распространения радиоволн, математического моделирования. Полученные результаты моделирования согласуются с теоретически ожидаемыми.

Практическая значимость работы

Результаты диссертации могут использоваться при разработке перспективных широкополосных и сверхширокополосных РЛС, предназначенных для работы в сложных радиофизических условиях. Проведенный анализ двухполосного метода подтверждает его применимость в практических радиолокационных задачах. Оптимизация ширины полосы фильтров в двухполосном методе позволяет значительно улучшить точность определения ТЕС.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие положения:

1. Относительная ошибка определения ТЕС двухполосным методом, вызываемая доплеровским сдвигом, составляет порядка v/c , что пренебрежимо мало для практически всех реально наблюдаемых объектов.
2. Предложенный метод «центров масс» улучшает стабильность двухполосного метода при наблюдении за сложным объектом.
3. Оптимальное значение относительной полосы фильтров в двухполосном методе равно 0.6 в

узкополосном пределе и уменьшается с ростом полосы используемого сигнала.

4. На частоте 1500 МГц ионосферные неоднородности могут снижать контраст радиолокационного изображения на 20-30%, что сопоставимо с влиянием тропосферной турбулентности (10-15%).
5. Использование сверхширокополосных сигналов в виде короткого немодулированного импульса при наблюдении объекта на фоне подстилающей поверхности улучшает отношение сигнал-помеха на 1–3 дБ по сравнению с ЛЧМ сигналом с такой же полосой.

Апробация результатов работы

Результаты работы докладывались на десяти конференциях, в том числе на международных конференциях En&T-2016 и En&T-2018 под эгидой IEEE, на международной конференции «Радиолокация, навигация, связь» в Воронеже, а также на всероссийских конференциях «РТИ Системы ВКО» и «Минцевские чтения».

Публикации

Основные результаты, посвященные моделированию двухполосного метода компенсации дисперсионных искажений широкополосных сигналов, опубликованы в журнале «Динамические системы», индексируемом Scopus. Результаты по использованию двухполосного метода при наличии существенного доплеровского сдвига опубликованы в сборнике материалов

конференции En&T-2016, также индексируемых в Scopus. В сборнике материалов конференции En&T-2018 опубликована статья, посвященная оптимизации параметров двухполосного метода. Другие результаты опубликованы в журналах и сборниках конференций, не входящих в список ВАК.

Внедрение результатов работы

Результаты работы вошли в состав ОКР «Сайга» и НИР «Компенсация».

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, характеризуется степень ее разработанности, определяются цели и задачи, осуществляется выбор предмета и объекта исследования. Формулируются положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** произведен обзор текущего состояния проблем, связанных с использованием сверхширокополосных сигналов в космической радиолокации. Рассмотрены методы генерации, излучения, приема и обработки СШП сигналов. Важнейшей проблемой является влияние на сигнал среды распространения. Особенностью космической радиолокации является влияние ионосферы.

В первой главе описаны основные эффекты, влияющие на распространяющийся в ионосфере сигнал. К ним относятся: отражение радиоволн достаточно низкой частоты, фазовый сдвиг, дополнительное групповое запаздывание, дисперсионные искажения, сдвиг частоты, рефракция, поляризационные эффекты

(Фарадея и Коттона-Мутона), рассеяние на мелкомасштабных неоднородностях, сцинтилляции и разрушение когерентности.

Отдельно рассмотрена проблема дисперсионных искажений сигнала при распространении через ионосферу, а также их компенсации. Дисперсионные искажения являются следствием того, что ионосферная фазовая задержка зависит от частоты. Величина вносимой ионосферой фазовой задержки дается формулой:

$$\varphi(\omega) = \frac{\omega}{c} L(\omega), \quad (1)$$

где $L(\omega)$ – дополнительный фазовый путь, вызываемый ионосферой, который может быть вычислен по формуле:

$$L(F) = -\frac{K}{F^2} \cdot \text{TEC}, \quad (2)$$

где $F = \omega / 2\pi$ – частота в МГц, $\text{TEC} = \int_0^R N(\mathbf{r}) d\sigma$ – полная электронная концентрация в м^{-2} , и $K = 40.3 \cdot 10^{-12} \text{ МГц}^2 \cdot \text{м}^3$, так что результат измеряется в метрах. TEC принято измерять в так называемых TECU: $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$. В невозмущенной ионосфере полное электронное содержание может достигать 20–30 TECU, а в возмущенной – 100 TECU и даже больше.

Влияние ионосферной дисперсии на распространяющийся сигнал заключается в основном в дополнительной групповой задержке и в ослаблении отклика. Дополнительный групповой путь определяется формулой (2) без знака минус, а зависимость амплитуды отклика от TEC можно найти по формуле

$$\max s_2(t) = \sqrt{\frac{2\pi}{a \cdot \text{TEC}}} \cdot C\left(\sqrt{\frac{2a \cdot \text{TEC}}{\pi}} \Delta\Omega\right), \quad (3)$$

где $C(x)$ – интеграл Френеля

Зависимость ослабления от ТЕС для ЛЧМ сигнала с частотой 1500 МГц и полосой 200 МГц приведена на рис. 1, а зависимость ошибок определения дальности и ослабления на 50 TECU – в таблице 1.

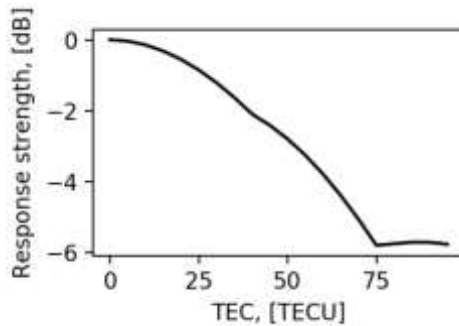


Рис. 1. Ослабление отклика в зависимости от полного электронного содержания.

Таблица 1. Ухудшение характеристик сигнала из-за ионосферы

Частота	150 МГц	300 МГц	1000 МГц	1500 МГц
Ошибка дальности/10 TECU	358 м	90 м	8 м	4 м
Ослабление на 50 TECU при полосе 10% от несущей	-10,6 дБ	-7,6 дБ	-2,0 дБ	-1,0 дБ

Для оптимальной обработки искаженного в ионосфере сигнала необходимо вместо согласованного с излученным сигналом фильтра со спектральной характеристикой $s^*(\Omega)$ использовать учитывающий искажения фильтр с характеристикой $s^*(\Omega)\exp[-i\hat{\phi}(\omega_0 + \Omega)]$, где $\hat{\phi}(\omega_0 + \Omega)$ определяется по формулам (1)–(2) с использованием некоторой оценки ТЕС. При цифровой обработке сигнала такая фильтрация делается тривиально. При аналоговой обработке можно использовать гребенку фильтров, настроенных на разные значения ТЕС. Главной сложностью в задаче компенсации ионосферных искажений является получение оценки ТЕС.

Существует целый ряд методов измерения или оценки полного электронного содержания: глобальные ионосферные модели, ионозонды, двухчастотный метод, использование данных

глобальных навигационных систем, некогерентное рассеяние, поляризационные методы.

Одним из новых методов компенсации ионосферных искажений является двухполосный метод. Его идея заключается в разбиении принятого радиолокационного сигнала на высокочастотную и низкочастотную составляющие и определение ТЕС по разности их задержек. Главными преимуществами двухполосного метода является его устойчивость к пространственно-временной изменчивости ионосферы, а также отсутствие дополнительных требований к конструкции или режиму работы станции, за исключением достаточной ширины полосы сигнала.



Рис. 2. Схема двухполосного метода

Схема двухполосного метода приведена на Рис. 2. Разбиение спектра сигнала на полосы изображено на Рис. 3. Оценка ТЕС дается формулой

$$\text{TEC} = \frac{\tau_2 - \tau_1}{2K \cdot \left(\frac{1}{\omega_1^2} - \frac{1}{\omega_2^2} \right)}. \quad (4)$$

Здесь τ_1 и τ_2 – задержки низкочастотной и высокочастотной части сигнала, а ω_1 и ω_2 – их частоты.

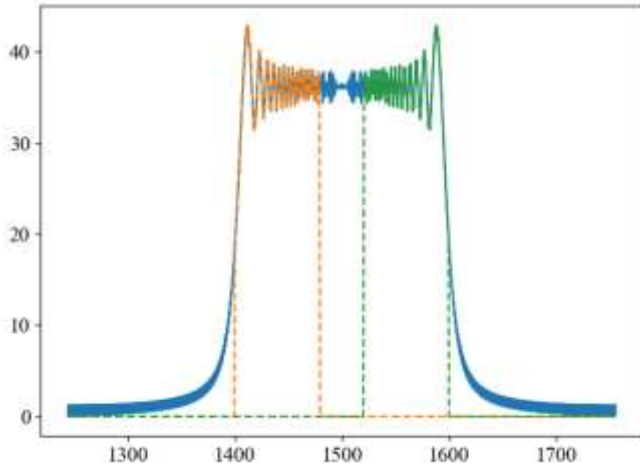


Рис. 3. Разбиение спектра сигнала на полосы.

Во **второй главе** рассмотрен ряд вопросов, связанных с двухполосным методом, которые требуют исследования.

Во-первых, двухполосный метод предполагает, что наблюдаемый объект является точечным. Показано, что существует конфигурация протяженного объекта (хотя и специально подобранная), при которой двухполосный метод не будет применим. Кроме того, при некоторых видах объекта корреляционный метод оценки разности задержек на разных частотах приводит к ошибкам. Предложен метод «центров масс», который устойчив к таким ошибкам, хотя и не оптимален при выделении сигнала на фоне шума.

Во-вторых, двухполосный метод подразумевает оценку ТЕС по искажениям принятого сигнала. Искажения, однако, могут вноситься не только ионосферой, но и доплеровским сдвигом частоты. Показано, что это почти не влияет на качество работы двухполосного метода: ошибка не превышает по порядку величины v/c .

В-третьих, в работе был исследован вопрос выбора оптимального разбиения сигнала на полосы. В узкополосном пределе получено оптимальное значение, равное 0.6 от полосы исходного сигнала. Данная величина будет уменьшаться при увеличении полосы частот, уменьшении несущей частоты или увеличении предельно допустимого ТЕС. Зависимость оптимального разбиения от полосы используемого сигнала при несущей 1500 МГц приведена на Рис. 4.

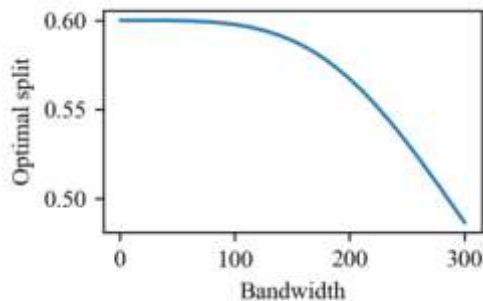


Рис. 4. Зависимость оптимального разбиения от ширины спектра сигнала (в МГц) при ТЕС равном 100 TECU

Третья глава посвящена исследованию статистических характеристик ионосферных неоднородностей на основе экспериментальных данных. Данные, использованные в качестве

основы для исследования, были получены в ходе программы Dynamics Explorer (США) спутником DE-2. Измеренная электронная концентрация приведена на Рис. 5.

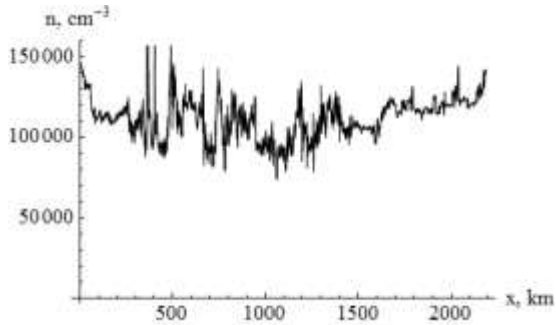


Рис. 5. Электронная концентрация в зависимости от пройденного расстояния

Первый способ обработки – построить и аппроксимировать коэффициент корреляции. Экспериментальный коэффициент корреляции может быть аппроксимирован формулой:

$$\psi(x) = \left[1 - \left(\frac{x^2}{a^2} \right)^{\frac{p}{2}} \right] \exp \left(-\frac{x^2}{b^2} \right), \quad (5)$$

где a, b, p – параметры аппроксимации. Формула подобрана так, чтобы быть допустимой корреляционной функцией (иметь положительный спектр), дифференцируемой в нуле, иметь степенную зависимость на средних расстояниях и быстро убывать на бесконечности. При помощи программы Wolfram Mathematica были подобраны следующие значения параметров: $p = 0.464$,

$\left(\frac{1}{a^2}\right)^{\frac{p}{2}} = 0.147$, $b = 47.6$. Коэффициент корреляции и его аппроксимация приведены на Рис. 6

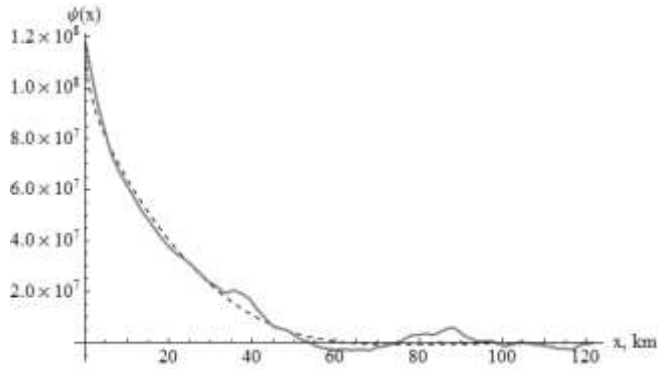


Рис. 6. Экспериментальный коэффициент корреляции (сплошная линия) случайного процесса и его аппроксимация (пунктирная линия).

Зная корреляционную функцию случайного процесса, можно найти его спектральную плотность мощности. Выражение получается достаточно громоздким:

$$\Phi(\kappa) = \frac{\sqrt{\pi} e^{-\frac{1}{4}b^2\kappa^2} - 2\left(\frac{1}{a}\right)^p \left(\frac{1}{b^2}\right)^{-\frac{p}{2}} \Gamma\left(\frac{p+3}{2}\right) {}_1F_1\left(\frac{p+3}{2}; \frac{3}{2}; -\frac{1}{4}b^2\kappa^2\right)}{8\pi^2 \left(\frac{1}{b^2}\right)^{3/2}}. \quad (6)$$

Второй способ обработки – найти квадрат модуля спектра исходной реализации, усреднить соседние отсчеты и найти аппроксимацию полученной линии, а из полученной оценки

одномерного спектра вычислить трехмерный спектр и прочие требуемые характеристики. Результат приведен на Рис. 7

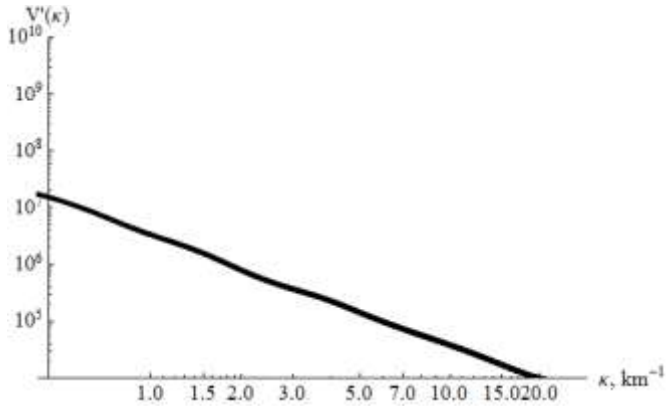


Рис. 7. График усредненного спектра в двойном логарифмическом масштабе.

В двойном логарифмическом масштабе график представляет собой прямую, следовательно, спектр является степенной функцией. Учтем также, что при малых κ (на больших пространственных масштабах) спектр должен оставаться конечным. Степенная аппроксимация спектральной плотности мощности имеет вид:

$$\tilde{V}(\kappa) = \frac{9.45 \cdot 10^4}{\left(0.00096 + \frac{\kappa^2}{4\pi^2}\right)^{0.99}}. \quad (7)$$

Тогда трехмерный спектр:

$$\Phi(\kappa) = \frac{756.13}{\left(0.00096 + \frac{\kappa^2}{4\pi^2}\right)^{1.99}} \quad (8)$$

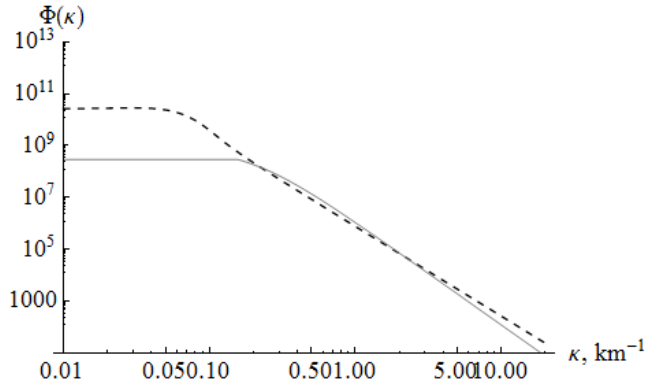


Рис. 8. Сплошная линия – трехмерный спектр (8), вычисленный из одномерного спектра (7); пунктирная – спектр (6), вычисленный из корреляционной функции (5).

Из Рис. 8 видно, что результат нахождения спектральной плотности мощности двумя рассмотренными способами заметно различается только при малых κ , то есть на больших пространственных масштабах. Это может быть связано с тем, что на больших масштабах модели, используемые для аппроксимации, перестают быть верными. Отметим, что крупномасштабные неоднородности оказывают влияние лишь при достаточно большом времени когерентной обработки, а также их проще компенсировать, так что более интересна именно мелкомасштабная часть, где полученные спектры приблизительно совпадают.

Знание трехмерного спектра флуктуаций позволяет определить характеристики распространения сигнала через ионосферу – структурные функции уровня и фазы сигнала. Полученные описанным образом структурные функции фаз могут

использоваться для моделирования когерентного накопления и инверсного синтеза апертуры.

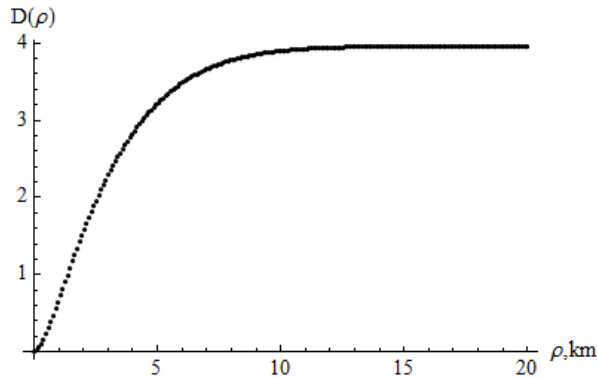


Рис. 9. Структурная функция фазы, вычисленная из спектра (8)

Четвертая глава описывает инверсное синтезирование апертуры с учетом влияния неоднородной среды распространения. Использование сверхширокополосных сигналов совместно с методом инверсного синтеза апертуры позволяет получать двухмерные радиолокационные изображения высокого разрешения. Синтезирование апертуры требует длительной когерентной обработки и, следовательно, может быть нарушено случайными изменениями фазы, вносимыми неоднородной тропосферой и ионосферой.

Флуктуации диэлектрической проницаемости в тропосфере и связанные с ними флуктуации фазы представляют собой локально-однородное изотропное случайное поле в интервале пространственных масштабов от миллиметров до сотен метров, называемом инерционным интервалом. В этом интервале

структурная функция фазы распространяющейся волны дается выражением:

$$D_{\psi}(\rho) = (\rho / r_{\text{coh}})^{5/3}, \quad l_0 \leq \rho \leq L_0, \quad (1.9)$$

где l_0 и L_0 — внутренний и внешний масштабы турбулентности, а r_{coh} — радиус когерентности,

$$r_{\text{coh}}^{-5/3} = 0,73 C_{\epsilon}^2 k^2 L. \quad (1.10)$$

Здесь C_{ϵ}^2 — структурная характеристика показателя преломления тропосферы (меняется от $10^{-18} \text{ см}^{-2/3}$ в спокойных условиях до $10^{-13} \text{ см}^{-2/3}$ в возмущенной тропосфере), $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число (λ — длина волны), а L — длина трассы волны в атмосфере.

Для учета ионосферных неоднородностей можно использовать структурную функцию фазы, полученную в третьей главе.

Изображение при $C_{\epsilon}^2 = 10^{-18} \text{ см}^{-2/3}$, частоте 1500 МГц, полосе 50 МГц, дальности 500 км, скорости 8 км/с, времени синтеза 5 с и без учета влияния ионосферы приведено на Рис. 10.

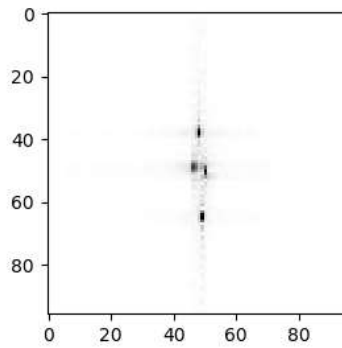


Рис. 10. Синтезированное изображение объекта без влияния среды распространения.

То же при $C_e^2 = 10^{-13} \text{ см}^{-2/3}$, то есть при сильной турбулентности, изображено на Рис. 11. Оно же с учетом влияния ионосферных неоднородностей – на Рис. 12. На Рис. 13 приведено влияние ионосферной дисперсии на качество радиолокационного изображения.

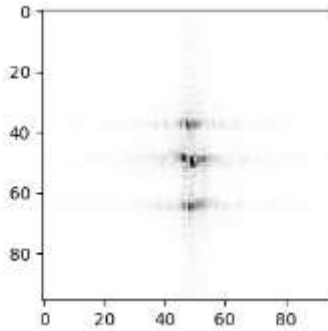


Рис. 11. Синтезированное изображение объекта при турбулентной тропосфере.

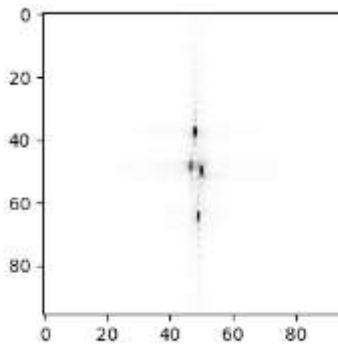


Рис. 12. Изображение с учетом ионосферных неоднородностей

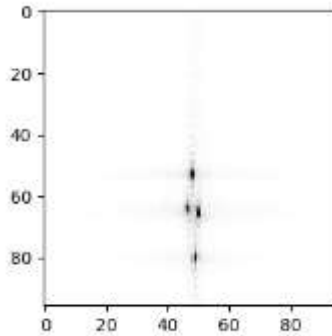


Рис. 13. Изображение с учетом ионосферной дисперсии (50 TECU).

В качестве критерия качества изображения выберем контраст, определяемый по формуле:

$$C = \frac{\sqrt{\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle}}{\langle I \rangle} \quad (11)$$

где I – модуль изображения, угловые скобки означают усреднение по изображению. Снижение контраста при росте интенсивности флуктуаций приведено на Рис. 14. Видно, что контраст снижается на 20-30%. Влияние тропосферной турбулентности для сравнения приведено на Рис. 15. Снижение контраста по критерию (11) оказывается даже слабее, чем из-за влияния ионосферы: 15-20%, и лишь при очень высоком уровне турбулентности. Влияние ионосферной дисперсии на контраст при заданных условиях оказывается незначительным.

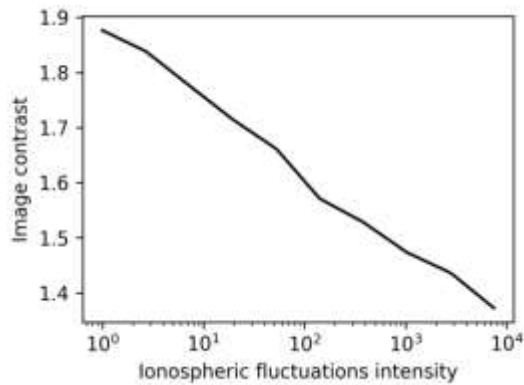


Рис. 14. Снижение контраста изображения из-за неоднородной ионосферы

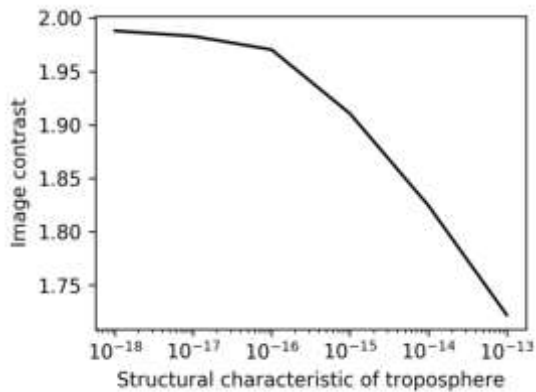


Рис. 15. Снижение контраста изображения из-за тропосферной турбулентности

Пятая глава посвящена вопросам сверхширокополосной радиолокации в условиях естественных помех. В качестве таких помех будем рассматривать отражение от подстилающей

поверхности, а также рассеяние на анизотропных ионосферных неоднородностях (авроральные отражения).

Авроральные отражения являются частой причиной появления ложных радиолокационных отметок при работе РЛС в полярных регионах. Они вызываются ионосферными флуктуациями, поэтому для их изучения нужна модель, основанная на их статистических характеристиках.

Для моделирования трехмерного случайного поля электронной концентрации применяется метод фильтрации белого шума, расширенный на трехмерный случай. Схема моделирования приведена на Рис. 16.

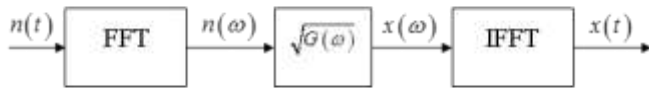


Рис. 16. Схема получения случайного процесса со спектральной плотностью $G(\omega)$ на основе белого шума $n(t)$

На Рис. 17 приведен пример реализации случайного поля (в плоскости Oxz). На Рис. 18 приведены нормированные корреляционные функции вдоль осей x и z . Пунктирной линией показана ожидаемая корреляционная функция, а сплошной – посчитанная из смоделированной реализации. Радиус корреляции составляет соответственно 1 и 10 м. Из рисунков видно, что качество моделирования случайного поля выбранным методом является приемлемым.

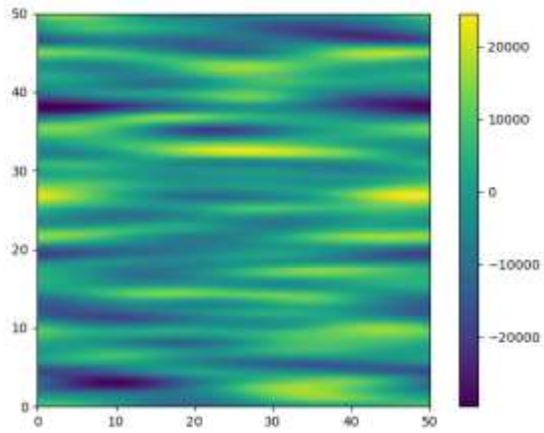


Рис. 17. Пример реализации случайного поля

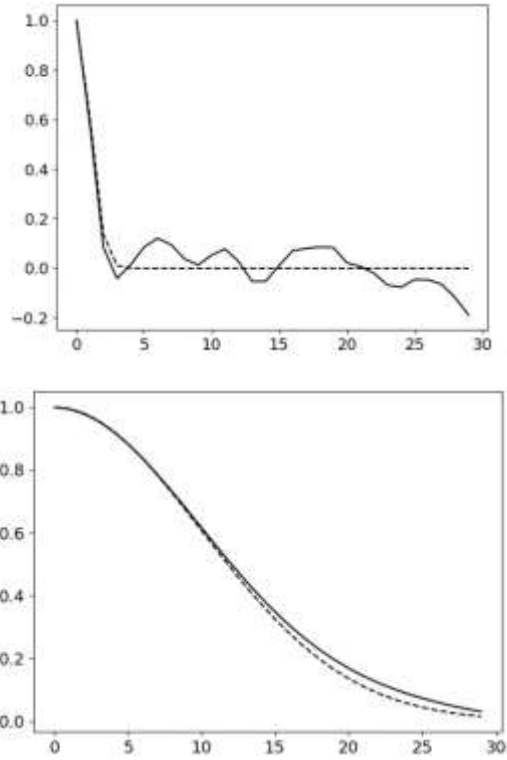


Рис. 18. Ожидаемые (пунктир) и полученные (сплошная линия) корреляционные функции вдоль осей x и z

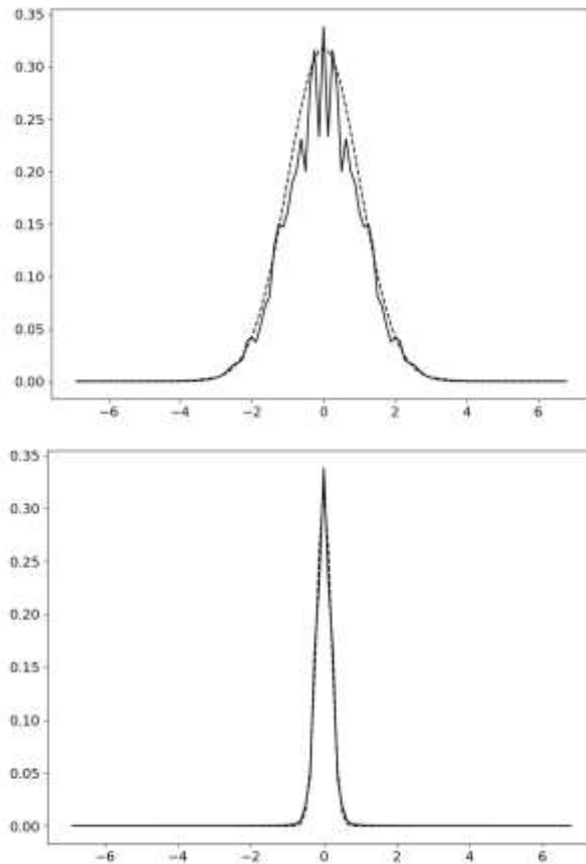


Рис. 19. Ожидаемая и полученная спектральная плотность моделируемых случайных полей вдоль осей x и z

Известно, что при отражении от авроральных неоднородностей наблюдается так называемый ракурсный эффект – зависимость отклика от угла наблюдения. Его можно рассчитать и аналитически. Для проверки правильности модели сравним ее результаты (усредненные по нескольким реализациям) с теоретически ожидаемыми. Результат приведен на Рис. 20.

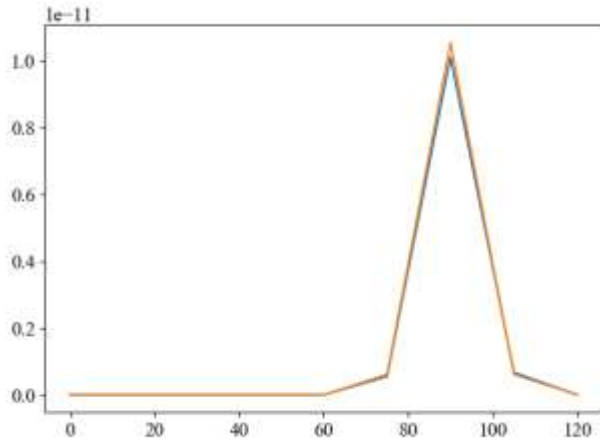


Рис. 20. Зависимость удельной ЭПР участка неоднородной ионосферы от угла наблюдения на частоте 450 МГц.

Как видно, ракурсный эффект моделируется правильно.

Созданная модель может быть использована для определения участков пространства, где возникновение авроральных помех наиболее вероятно. Для этого достаточно найти угол пересечения магнитного поля и вектора наблюдения и подставить его в модель. Направление магнитного поля в точке наблюдения можно найти по модели World Magnetic Model, WWM (<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/>).

Средняя ЭПР авроральных неоднородностей в зоне действия локатора с координатами Воркуты при угле места 5 градусов приведена на Рис. 21.

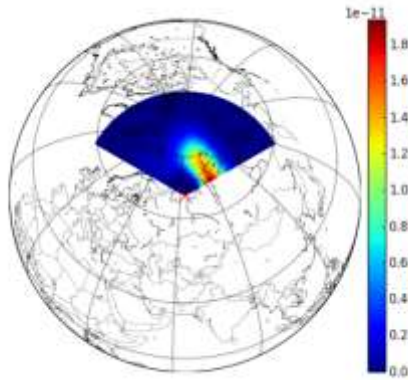


Рис. 21. Удельная ЭПР неоднородной ионосферы при угле места 5 градусов

Другим видом естественных пассивных помех является отражение от подстилающей поверхности. Сравним два вида СШП сигналов – ЛЧМ и короткоимпульсный – в задаче радиолокационного наблюдения при наличии помех такого рода. Можно ожидать, что импульсный сигнал окажется более эффективным, так как его функция неопределенности не имеет боковых лепестков.

Выберем модель, в которой отражение от поверхности описывается формулой

$$u(t) = \int F(x, y) \frac{\tilde{\sigma}(x, y)}{(4\pi R)^2} A(\Omega) \exp\left(-i(\omega_0 + \Omega) \frac{2R(x, y)}{c}\right) dx dy d\Omega \quad (1.12),$$

где $F(x, y)$ описывает диаграмму направленности антенны,

$\tilde{\sigma}(x, y) dx dy$ – ЭПР малого участка поверхности (случайная

функция), $A(\Omega)$ – спектр огибающей излученного сигнала, ω_0 – несущая частота сигнала.

Среднее отношение сигнал-помеха, полученное в результате моделирования, изображено на Рис. 22. Видно, что импульсный сигнал действительно эффективнее в данной задаче. Отметим, что результат получен при ограниченной полосе пропускания на прием; при более широкой полосе пропускания эффективность импульсного сигнала будет еще выше. С другой стороны, задача излучения короткого импульса большой энергии является сложной.

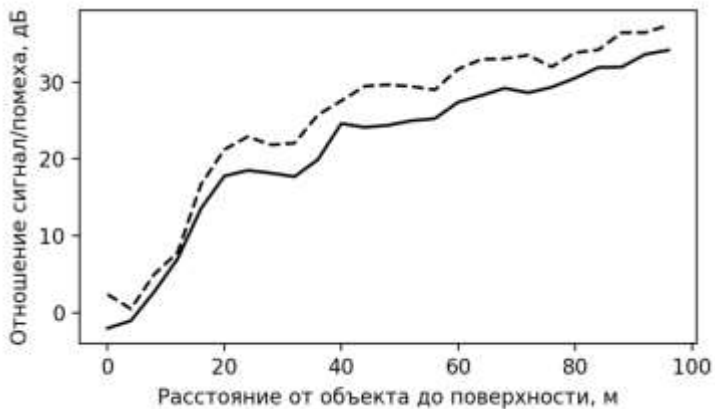


Рис. 22. Отношение сигнал-помеха при использовании ЛЧМ (сплошная линия) и импульсного сигнала (пунктир) в зависимости от расстояния между объектом и поверхностью

В **шестой главе** рассматривается практическая программная реализация описанных ранее моделей. Моделировалось распространение сигнала через ионосферу,

согласованная фильтрация, измерение ТЕС двухполосным методом, компенсация ионосферной дисперсии, инверсное синтезирование апертуры, рассеяние на мелкомасштабных ионосферных неоднородностях и отражение от подстилающей поверхности. При этом необходимо учесть такие эффекты как шум, доплеровский сдвиг, сложная форма наблюдаемого объекта, потеря когерентности при движении через неоднородности. В работе описывается методика моделирования дискретного шума с заданным отношением сигнал-шум, а также моделирование доплеровского сдвига с учетом ионосферной дисперсии. Также в шестой главе описана структура программного комплекса и приведены результаты работы.

Заключение

1. Проведен сравнительный обзор методов компенсации частотной дисперсии ионосферы. Одним из наиболее перспективных является двухполосный метод.
2. Предложен метод «центра масс» для оценки разности задержек на разных частотах. Он является более устойчивым, чем корреляционный метод, при наблюдении за протяженным объектом.
3. Исследовано влияние доплеровского сдвига на точность измерения ТЕС. Показано, что ошибка, вносимая доплеровским сдвигом, не превышает по порядку величины v/c , что несущественно во всех реальных задачах.

4. Изучен вопрос оптимального разбиения полосы в двухполосном методе. Оптимальное разбиение зависит от частоты и полосы сигнала и от максимального ожидаемого ТЕС. В большинстве задач оно будет лежать в диапазоне 0.5–0.6.
5. Исследовано ухудшение качества радиолокационных изображений из-за влияния турбулентной тропосферы и регулярной и неоднородной ионосферы. На частоте 1500 МГц ионосферные неоднородности снижают контраст изображения на 20-30%, а тропосферная турбулентность – на 10-15%.
6. Разработана радиофизическая модель авроральных отражений, которая может быть использована для улучшения алгоритмов защиты от ложной тревоги.
7. Проведено сравнительное исследование разных типов сверхширокополосных сигналов (ЛЧМ и короткого импульса) в задаче радиолокационного наблюдения на фоне подстилающей поверхности. Использование сигнала в виде короткого импульса позволяет улучшить отношение сигнал-помеха на 1–3 дБ.

Работы, опубликованные автором по теме диссертации

В журналах, индексируемых Scopus:

1. Alexey Stroeve. Effect of Doppler Shift on Accuracy of the Two-Band Method of TEC Estimation in Wideband

Radars // Proceedeings of the 2016 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT-2016)

2. Alexey Stroev. About the Choice of Frequency Band of Partial Filters used in the Two-Band Method of Estimation of Total Electron Content of Ionosphere // 2018 Engineering and Telecommunication (EnT-MIPT). 2018. P. 81–84.

В коллективной монографии:

3. Мощные надгоризонтные РЛС дальнего обнаружения: разработка, испытания, функционирование. Коллективная монография / Под ред. С. Ф. Боева. – М.: Радиотехника, 2013. – 168 с.: ил.

В журналах из списка ВАК:

4. *Зубарев А.Н., Лучин А.А., Строев А.К.* Синтез многомерных изображений в многопозиционной системе РЛС на основе обобщенного решения обратной задачи дифракции в приближении физической оптики. – Научные ведомости БелГУ – 2013. - №8, выпуск 26/1. – С. 117-120.
5. *Лучин А.А., Строев А.К., Жуков А.О.* Формирование трехмерных изображений в двухпозиционной системе активно-пассивных РЛС с использованием обратного синтеза апертуры и томографирования. – Научные ведомости БелГУ – 2013. – №9, т. 14. – С. 73-75.
6. Строев А.К. Моделирование сверхширокополосного радиолокатора, использующего двухполосный метод

компенсации ионосферных искажений. –
Динамические системы Том 7(35), №2, 2017 г.

В сборниках трудов конференций:

7. *Строев А.К.* Формирование радиолокационных изображений методом инверсного синтеза апертуры при использовании сигнала L-диапазона с учетом ионосферных искажений. // Доклад на 56-й конференции МФТИ. 25-30 ноября 2013, Москва.
8. *Строев А.К.* Когерентное накопление сигнала и обнаружение радиолокационных объектов в условиях влияния неоднородной ионосферы. // Доклад на 57-й научной конференции МФТИ, 24-29 ноября 2014, Москва.
9. *Сазонов В.В., Строев А.К.* Формирование радиолокационных изображений космических объектов наземными средствами L-диапазона с учетом атмосферных искажений. // Доклад на XXI-ой международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC-2015), 14-16 апреля 2015, Воронеж.
10. *Строев А.К.* Влияние отклонения луча на неоднородностях при распространении сверхширокополосного сигнала через ионосферу. // Доклад на 58-й научной конференции МФТИ, Москва, 2015.
11. *Строев А.К.* Обработка широкополосных сигналов после прохождения их через ионосферу с учетом

доплеровских искажений. // Доклад на конференцию «РТИ Системы ВКО-2016», Москва, 2016.

12. Строев А.К. Определение разности задержек сигнала на различных частотах для оценки полного электронного содержания ионосферы при наблюдении за сложным объектом. // Доклад на 59-й научной конференции МФТИ, Москва, 2016.
13. Строев А.К. Выбор оптимальной ширины полосы фильтров в двухполосном методе измерения полного электронного содержания ионосферы // Доклад на 61-й научной конференции МФТИ, Москва, 2018.