

На правах рукописи

Николаев Петр Николаевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ
ОПЕРАТИВНОЙ ДВУМЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ
ИОНОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МЕЖСПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Самара – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» на межвузовской кафедре космических исследований.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Филонин Олег Васильевич**.

Официальные оппоненты:

Вайсберг Олег Леонидович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук, отдела физики космической плазмы, главный научный сотрудник;

Клюев Дмитрий Сергеевич, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электродинамики и антенн федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики».

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное учреждение **Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова**, г. Москва.

Защита состоится 17 декабря 2019 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.215.05 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет), по адресу: 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Самарского университета и на сайте http://ssau.ru/resources/dis_protection/nikolaev/.

Автореферат разослан

Учёный секретарь

диссертационного совета

Всеволод Анатольевич Колпаков

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Диссертация посвящена разработке и исследованию методов оценки электронной концентрации ионосферы и выявления ионосферных возмущений, решая задачу оперативной двумерной томографии ионосферы группировкой спутников, используя косвенные межспутниковые измерения абсолютного полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы, определяемые из характеристик принимаемых многочастотных сигналов приёмной аппаратурой спутников.

Методы исследования ионосферы подразделяются на два направления: методы, изучающие её влияние на распространение радиоволн в разнообразных радиофизических задачах и методы исследования, протекающих в ней физико-химических процессов. В ионосфере выделяется четыре слоя D, E, F1, F2, высоты которых варьируются в зависимости от времени положения Солнца в зените, времени суток, сезона, уровня солнечной активности. Параметры ионосферы (электронная плотность, электронная температура, ионная температура) чувствительны к постоянно меняющейся гелио- и геомагнитной обстановке. Важность исследования ионосферы связана с функционированием спутниковых систем навигации и связи (Hofmann-Wellenhof 2001). Кроме того, ионосфера способна изменяться под воздействием природных и антропогенных факторов, например, она является предвестником больших землетрясений, которые согласно работе (Пулинец 2012) появляются от 1 до 10 дней до землетрясения.

Оперативное исследование ионосферы возможно осуществлять с помощью томографических методов, используя для получения измерений группировку спутников, одни из которых содержат передатчики, другие приёмники, в этом случае измерениями являются оценки ПЭС ионосферы, определяемые из характеристик принимаемых многочастотных сигналов приёмной аппаратурой. Решение задачи томографии ионосферы, заключающееся в оценке вертикального профиля электронной концентрации в плоскости орбиты, группировкой спутников практически в реальном времени позволит оперативно обнаруживать воздействия на ионосферу. Решив задачу методом пусть менее точным по сравнению с наземными, возможно выявить отклонения электронной концентрации от средних значений и передавать на Землю только те массивы данных, которые содержат эти отклонения, не передавая весь массив измеряемой информации.

Таким образом, существует потребность в оперативном дистанционном зондировании ионосферы, позволяющем получать информацию о её состоянии в реальном времени и решать ряд научных и прикладных задач. Актуальность диссертации обусловлена необходимостью оперативного мониторинга состояния ионосферы для чего требуется разработка новых методов, способных осуществлять оценку профиля электронной концентрации на орбите, решая задачу оперативной двумерной томографии ионосферы группировкой спутников.

Степень разработанности темы. В настоящее время с развитием навигационных спутниковых систем стало возможным осуществлять дистанционное зондирование ионосферы в широком диапазоне различных позиций приёмопередающих систем и производить реконструкцию её структуры на основе методов компьютерной томографии. Сегодня наибольшее распространение получил подход радиотомографии (РТ) ионосферы с использованием наземных приёмных станций (Austen 1988, Афраймович 1989). Другой перспективный вариант РТ ионосферы с использованием приёмной аппаратуры, установленной на спутниках низкоорбитальной (НО) группировки рассмотрен в работе (Романов 2011). Авторами данной статьи рассмотрено две схемы регистрации сигналов: приём спутниками группировки сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС); приём и передача сигналов спутниками группировки, содержащими приёмные и передающие устройства. Применение методов томографической реконструкции к данным абсолютного ПЭС, получаемым по схеме регистрации на трассах спутник-спутник, должно обеспечить непрерывное получение информации о профиле электронной концентрации ионосферы в плоскости орбит группировки спутников.

На сегодняшний день в задаче РТ абсолютное ПЭС, пропорциональное интегралу от профиля электронной ионосферы, нельзя определить с аддитивной ошибкой меньше 10%, что не позволяет решить задачу РТ с приемлемой точностью по фазовым измерениям (Leitinger 1975, Солодовников 1988, Куницын 1991, Kunitsyn 2003). Чтобы обойти данное ограничение, используются фазоразностные методы РТ, где в качестве исходных данных выступает доплеровская частота с малой ошибкой измерения (Куницын 1991, Kunitsyn 2003). Фазоразностные методы позволяют восстановить мелкие неоднородности в ионосфере, но в отличие от фазовых методов не способны с высокой точностью находить фоновые значения электронной концентрации. Тем не менее существует способ, позволяющий повысить точность

определения абсолютного ПЭС, рассматривается в работе (Романов 2009) и заключается в определении абсолютного ПЭС по многочастотным измерениям немодулированных сигналов.

В общем виде задача искомой величины по оценкам её интегралов вдоль множества прямых была решена Радоном в 1917 г. Радоновский образ $[Rf](l, \theta)$ функции f соответствует линейному интегралу от f по пути интегрирования L .

Алгоритмы компьютерной томографии, основанные на вычислении обратной к $[Rf](l, \theta)$ функции $[R^{-1}p](r, \varphi)$, называются алгоритмами основанными на использовании преобразований типа Радона. Алгоритмы данной группы приводят к эффективной реконструкции при сравнительно небольших вычислительных затратах, но они предполагают, что известно точное значение $[Rf](l, \theta)$ для всех l и θ . При реконструкции функции распределения по исходным данным, когда измерение интегральных характеристик производится на параллельных прямых, из этой группы алгоритмов наиболее широкое применение получил алгоритм свёртки.

Другая группа алгоритмов основана на разложении функции в ряд. В этом случае задача сводится к решению системы линейных уравнений (СЛУ) $\hat{R}x = m$, где \hat{R} – матрицы проекционного оператора, x – вектор столбец неизвестных и m – вектор-столбец данных измерений. Главное достоинство методов данной группы, заключается в том, что их можно непосредственно применять к более общим схемам получения экспериментальных данных, часто неполным.

Задача РТ ионосферы с помощью спутников характеризуется малым количеством ракурсов получения интегральной характеристики. Несмотря на широту диапазона различных позиций приёмопередающих систем, будь то использование цепочки наземных приёмных станций, или предложения по использованию приёмников и передатчиков космического базирования, получаемых ракурсов всё равно недостаточно для выполнения условия единственности решения, и обратная задача томографии является некорректной.

Для решения задачи РТ, как правило используются методы реконструкции, основанные на разложении функции в ряд, к которым можно отнести большую группу алгебраических методов реконструкции, подробно рассмотренных в (Куницын, 2007). Преимущество этих методов заключается в том, что они применимы к более общим схемам регистрации данных, как раз, когда количество ракурсов получения линейных интегралов мало. Главным недостатком этих методов является продолжительное время формирования матрицы проекционного оператора \hat{R} в СЛУ. Точность решения задачи томографии увеличивается только за счёт увеличения сложности аппроксимации \hat{R} , что увеличивает продолжительность решения задачи. Использование доплеровских (фазоразностных) измерений в задаче РТ требует большего порядка аппроксимации проекционного оператора и влечёт к ещё большему увеличению времени его формирования и соответственно времени реконструкции. Кроме того, точность решения задачи алгебраическими методами реконструкции сильно зависит от начального приближения в алгоритме, так в работах (Raumund 1990, Heaton 1996, Mitchell 1997, Терещенко 2003, Romanov 2008, Романов 2009) рассматриваются различные подходы по выбору начального приближения для итерационного решения СЛУ и их влияние точность решения задачи.

Таким образом, в связи с развитием спутниковых технологий, становится возможным осуществлять оперативное исследование ионосферы, используя группировки спутников, но при этом алгебраические методы реконструкции не могут быть использованы на спутниковой группировке, в виду своей вычислительной сложности и продолжительности вычислений. Требуется разработка новых методов, решающих задачу томографии ионосферы в реальном времени непосредственно на орбите.

Цель диссертационной работы – разработка и исследование комплекса методов оценки вертикального профиля электронной концентрации ионосферы и выявления ионосферных возмущений, решая задачу оперативной томографии ионосферы группировкой спутников, используя косвенные межспутниковые измерения абсолютного полного электронного содержания ионосферы, определяемые из характеристик принимаемых многочастотных сигналов приёмной аппаратурой спутников.

В соответствии с поставленной целью определены основные **задачи диссертации**:

1. Разработка и исследование метода оперативной двумерной томографии орбитального профиля электронной концентрации ионосферы, основанного на алгоритме свёртки, используя межспутниковые измерения полного электронного содержания, определяемые из характеристик принимаемых многочастотных сигналов приёмной аппаратурой спутников. В рамках метода требуется решить две вспомогательные задачи: сформировать начальное приближение вертикального профиля электронной концентрации и доопределить недостающие проекционные данные в радоновском образе.

2. Разработка и исследование метода оперативного формирования начального приближения вертикального профиля электронной концентрации ионосферы, используя измерения полного электронного содержания, определяемые из характеристик принимаемых многочастотных сигналов приёмной аппаратурой спутников.

3. Разработка и исследование метода доопределения недостающих проекционных данных в радоновском образе вертикального профиля электронной концентрации ионосферы, используя начальное приближение.

4. Численное исследование качества восстановления локальных ионосферных возмущений в орбитальном ионосферном профиле, используя разработанный метод оперативной двумерной томографии орбитального профиля электронной концентрации ионосферы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан метод оперативной двумерной томографии ионосферы, основанный на алгоритме свёртки, использующий косвенные измерения полного электронного содержания, получаемые на спутниках низкоорбитальной группировки, который может быть реализован на программно-аппаратном комплексе группировки спутников. Метод позволяет путём использования начального приближения и доопределения недостающих проекционных данных в радоновском образе, свести задачу к известному томографическому алгоритму свёртки, который ранее не использовался в задаче томографии ионосферы. Метод обладает большим быстродействием по сравнению с существующими подходами.

2. Разработан метод оперативного формирования начального приближения профиля электронной концентрации по измерениям абсолютного полного электронного содержания в плоскости орбит спутников низкоорбитальной группировки на основе распределения Чепмена, представленного в виде произведения широтного и высотного профиля ионосферы, где широтный профиль определяется из обратной свёртки функции абсолютного полного электронного содержания ионосферы с выраженным аналитически ядром свёртки. Метод использует меньше входных данных по сравнению с существующими подходами, формируя начальное приближение с точностью достаточной для последующего решения задачи томографии.

3. Разработан метод доопределения недостающих проекционных данных в радоновском образе вертикального профиля электронной концентрации ионосферы, использующий начальное приближение вертикального профиля электронной концентрации ионосферы. Метод позволяет подготовить радоновский образ, содержащий оценки полного электронного содержания, к последующему решению томографической задачи методом, основанным на использовании преобразований типа Радона.

4. Исследована возможность выявления ионосферных возмущений в орбитальном ионосферном профиле по оценке отклонения текущего оценённого ионосферного профиля от скользящего среднего оцениваемых ионосферных профилей.

Теоретическая значимость. Разработан метод оперативной двумерной томографии ионосферы, основанный на алгоритме свёртки. Метод позволяет путём использования начального приближения, сформированного с использованием измерений ПЭС и априорной информации о форме радоновского образа, свести задачу к известному томографическому алгоритму свёртки, который ранее не использовался в задаче томографии ионосферы.

Практическая значимость. Разработанный метод может быть применён в радиотомографической космической системе оперативного мониторинга электронной концентрации ионосферы для выявления возмущений природного или антропогенного характера в ионосфере, решая задачу томографии группировкой спутников.

Методы исследования. Методы компьютерной томографии, основанные на использовании преобразований типа Радона, методы аппроксимации, методы теории случайных величин.

На защиту выносятся:

1. Метод оперативной двумерной томографии ионосферы, основанный на алгоритме свёртки, обрабатывающем измерения абсолютного полного электронного содержания ионосферы, определяемые из характеристик принимаемых многочастотных сигналов приёмной аппаратурой спутников. Метод может быть реализован на программно-аппаратном комплексе группировки спутников и состоит из последовательного решения следующих задач: формирование начального приближения профиля электронной концентрации в плоскости орбит спутников группировки, используя измерения полного электронного содержания; доопределение недостающих данных в радоновском образе с использованием априорной информации о виде радоновского образа; восстановление электронной концентрации алгоритмом свёртки. Результаты статистического моделирования работы метода, которое заключалось в последовательном решении прямой задачи (моделирование измерений полного электронного содержания) и обратной задачи (оценка

распределения электронной концентрации), показали, что ошибки оценки профиля электронной концентрации ионосферы в метрике l^2 лежат в диапазоне от 8% до 20% в широком диапазоне вариаций параметров модели ионосферы NeQuick.

2. Метод оперативного формирования начального приближения вертикального профиля электронной концентрации по измерениям абсолютного полного электронного содержания в плоскости орбит спутников группировки, базирующийся на распределении, близком к распределению Чепмена и представляется в виде произведения широтного и высотного распределений. Широтное распределение находится численно из обратной свёртки функции абсолютного полного электронного содержания ионосферы с ядром свёртки, выражение для которого получено аналитически. Результаты статистического моделирования работы метода, которое заключалось в последовательном решении прямой задачи (моделирование измерений полного электронного содержания) и обратной задачи (формирование начального приближения), показали, что начальные приближения в метрике l^2 формируются с ошибкой лежащей в диапазоне от 20% до 55%, что сравнимо с ошибками формирования начального приближения по известным моделям ионосферы, используя при этом меньше входных параметров.

3. Метод доопределения недостающих проекционных данных орбитального вертикального ионосферного профиля, использующий начальное приближение вертикального профиля электронной концентрации ионосферы. Метод позволяет подготовить радоновский образ, содержащий оценки полного электронного содержания, к последующему решению томографической задачи методом, основанным на использовании преобразований типа Радона. Результаты статистического моделирования работы метода, которое заключалось в доопределении недостающих проекционных данных, используя сформированное начальное приближение по оценкам полного электронного содержания, показали, что ошибки несоответствия доопределённого радоновского образа идеальному (задан во всей области определения) в метрике l^2 лежат в диапазоне от 8% до 20%, что позволяет применять метод свёртки к этому образу.

4. Результаты численных экспериментов по выявлению ионосферных возмущений, полученные с помощью разработанных методов, которые показали, что искомые возмущения могут быть выявлены даже при большом значении максимальной ошибки формирования начального приближения (до 65% в метрике l^∞).

Достоверность результатов обеспечивается обоснованностью принятых допущений в математических моделях; применение известных численных методов обладающих высокой точностью, при проведении численных экспериментов с математическими моделями.

Публикации и апробация результатов. Основные положения работы докладывались на всероссийских и международных конференциях, в том числе на Третьем Российском симпозиуме по наноспутникам с международным участием «RusNanoSat-2019» (г. Самара, 2019 г.), на III и IV Международной конференции «Научные и технологические эксперименты на автоматических космических аппаратах и малых спутниках» (г. Самара, 2014 г. и 2018 г.), на XV Конференции молодых учёных посвящённой дню космонавтики «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (г. Москва, 2018 г.), на Втором Российском симпозиуме по наноспутникам с международным участием «RusNanoSat-2017» (г. Самара, 2017 г.), на II и III Международной конференции и молодежной школе «Информационные технологии и нанотехнологии» (г. Самара, 2016 г. и 2017 г.), на XXV Международной научно-технической конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» (г. Алушта, 2016 г.), на XXXIX и XL академических чтениях по космонавтике школе «Королёвские чтения» (г. Москва, 2015 г. и 2016 г.), на Первом Российском симпозиуме по наноспутникам с международным участием «RusNanoSat-2015» (г. Самара, 2015 г.), на XVII Конференции молодых учёных «Навигация и управления движением» (г. Санкт-Петербург, 2015 г.), на Восемнадцатом всероссийском семинаре по управлению движением и навигации космических аппаратов (г. Самара, 2015 г.), на XIII Международной молодёжной научной конференции «Королёвские чтения» (г. Самара, 2015 г.), на 12-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2014» (г. Москва, 2014 г.), на Молодежной научной школе-конференции при 40-й Ассамблее COSPAR (г. Москва, 2014 г.).

Результаты исследований опубликованы в 17 печатных работах: четыре статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, две статьи в рецензируемых изданиях, входящих в систему цитирования Scopus и 11 публикаций в других изданиях.

Реализация результатов работы. Теоретические и практические результаты диссертационной работы использованы в НИР, выполненном по гранту РНФ № 17-79-20215 «Разработка комплекса управления, навигации и связи космического аппарата нанокласса для оперативного выявления признаков природных катастроф», а также в рамках государственного

задания Минобрнауки РФ № 9.1421.2014/К и государственного задания Минобрнауки РФ 3.1158.2017/4.6.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 90 наименований и трёх приложений. Общий объём диссертации составляет 161 страница.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные результаты работы и их научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору литературы, анализу состояния проблемы РТ ионосферы и постановке задачи томографии электронного профиля ионосферы группировкой спутников, рассмотрению физики рефракции радиоволн при их прохождении через ионосферу, влияния ионосферы на амплитуду, частоту и фазу радиоволн.

Показано, что закономерности распространения волн в ионосфере определяются в основном высотной зависимостью коэффициента преломления $n(r) = 1 - \chi N_e f^{-2}$, где $\chi = 40,4 \text{ м}^3 \text{ Гц}^{-2}$, N_e – электронная концентрация, м^{-3} , f частота радиосигнала, Гц. Изменения в коэффициенте преломления оказывают два эффекта на радиоволны. Во-первых, поскольку волны распространяются медленнее, путь распространения становится более длинным. Размер этого эффекта пропорционален интегралу n по пути распространения луча. Во-вторых, поскольку плотность электронной концентрации ионосферы изменяется с высотой, существует вертикальный градиент показателя преломления, перпендикулярный траектории:

$$\frac{dn}{dh} = -\chi f^{-2} \frac{dN_e}{dh}.$$

Это образует изгиб траектории луча на небольшой угол рефракции ξ , который пропорционален интегралу от dn/dh по траектории луча. Таким образом, при распространении радиоволн от спутника к спутнику лучи проходят по изогнутой траектории, которая длиннее траектории в вакууме (рисунок 1). Угол рефракции выражается, как

$$\xi(p) = -2p \int_p^\infty \frac{1}{n(r)} \frac{dn(r)}{dr} \frac{1}{\sqrt{r^2 n^2(r) - p^2}} dr.$$

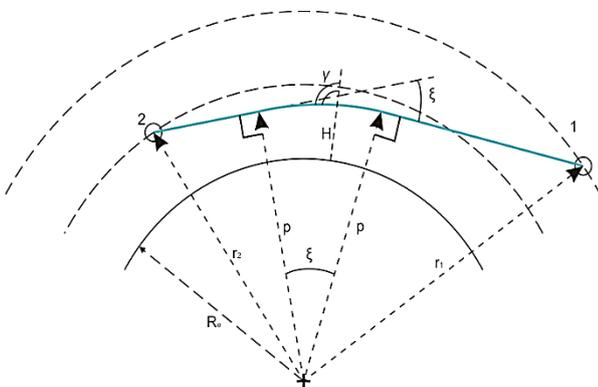


Рисунок 1 – К задаче радиозондирования ионосферы

Оценена максимальная разрешающая способность томографической системы регистрации, обусловленная рефракцией радиоволн, для случая зондирования ионосферы высокочастотными сигналами. Показано что лучевые линии можно считать прямыми и производить зондирование с шагом 50 км.

Описаны принципы расчёта ПЭС из набора радиосигналов. Рассмотрены подходы по нахождению ПЭС по набору двухчастотных фазовых измерений; по набору двухчастотных кодовых измерений; по комбинации одночастотных фазовых и кодовых измерений; по трёхчастотной комбинации; по четырёхчастотной комбинации.

Четырёхчастотная комбинация немодулированных радиосигналов с частотами 150, 400, 1067 и 2844 МГц позволяет определить ПЭС однозначно (Романов, 2011):

$$\text{ПЭС} = \frac{c f_0}{\chi} \frac{n_1^2 n_2^6}{(n_2^2 - n_1^2)} \cdot \frac{1}{M_{ijkl}} \left[(\Delta \varphi_{kl} x_{ij} + \Delta \varphi_{ij} x_{kl})_{\text{mod } 1} + k \right],$$

где $f_0 = 5, (5) \text{ МГц}$ – основная частота; k – целое число, характеризующее шаги неоднозначности ПЭС; $\frac{c f_0}{\chi} \frac{n_1^2 n_2^6}{(n_2^2 - n_1^2)} \cdot \frac{1}{M_{ijkl}}$ – величина неоднозначности ПЭС; x_{ij} и x_{kl} – минимальные по модулю решения целочисленного уравнения $x_{ij} N_{kl} - x_{kl} N_{ij} = 1$; N_{ij} , N_{kl} , M_{ijkl} – натуральные числа, являющиеся комбинациями n_1 и n_2 . Точность определения ПЭС при использовании такого подхода не хуже 0,01 TECU (менее 1% шума).

Приведён обзор литературы, посвящённый подходам к РТ ионосферы, и использованию томографических методов в задаче реконструкции профиля электронной концентрации в ионосфере. Из приведённого обзора следует, что в настоящее время можно выделить несколько основных подходов радиотомографии ионосферы: локальная РТ с использованием линеек

приёмных станций, глобальная РТ с использованием группировки спутников. Первый подход является доминирующим на сегодняшний день, но он обеспечивает только локальную реконструкцию электронной концентрации. Второй подход позволяет обеспечить глобальную двумерную реконструкцию электронной концентрации в плоскости орбит спутников группировки. Этот подход представляется весьма перспективным, но пока что не был реализован на практике. Следует отметить систему региональной трёхмерной томографии, развёрнутую институтом прикладной геофизики Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Построение трёхмерной модели ионосферы осуществляется методом высокоорбитальной радиотомографии по данным наземных приёмников сигналов ГНСС.

Традиционно задачу РТ ионосферы в первых двух подходах решают группой алгоритмов реконструкции, основанными на разложении функции в ряд, которые не требуют полного набора ракурсов измерений. Задача томографии здесь разделяется на задачи формирования начального приближения, формирования матрицы проекционного оператора и решения СЛУ.

Сформулирована задача двумерной РТ ионосферы в плоскости орбит спутников группировки: по измерениям линейных интегралов для серии лучей, пересекающих область ионосферы в диапазоне высот от 200 до 500 км, необходимо реконструировать структуру этой области. Спутниковая группировка является совокупностью приборов, производящих косвенные измерения ПЭС из характеристик принимаемых многочастотных сигналов приёмной аппаратурой спутников и осуществляющих решение РТ задачи. Эффекты рефракции пренебрегаются и принимается предположение об измерении абсолютного ПЭС. Для шага измерений в 50 км требуется не менее шести радиотрасс (лучей). Рассмотрены две схемы получения данных.

При первой схеме используются радиосигналы ГНСС (ГЛОНАСС и GPS), регистрируемые на борту спутников НО группировки. Спутники располагаются на круговой орбите, плоскость которой совпадает с рассмотренной плоскостью орбиты ГНСС спутников. В случае ГЛОНАСС выбрана высота орбиты $h_{orb} = 590$ км для разрешения по полярному углу $\Delta u = 7,5^\circ$ и в случае GPS выбрана высота орбиты $h_{orb} = 890$ км для разрешения по полярному углу $\Delta u = 10^\circ$. Сформулированы рекомендации к угловому разнесению спутников на орбите. К недостаткам данной схемы можно отнести взаимное прецессирование орбит НО и ГНСС спутников, что требует постоянную смену плоскостей, углы между которыми в зависимости от группировки ГНСС составляют 120° или 60° ; невозможность оценить локальные возмущения с точностью лучше чем $2\Delta u$; для решения РТ задачи на борту необходимо обеспечить межспутниковую радиосвязь для передачи всех измерений ПЭС на главный спутник группировки для оценки электронной концентрации.

Вторая схема регистрации ПЭС лишена данных недостатков. При этой схеме используются радиосигналы, распространяющиеся между спутниками, находящимися в одной группировке. Расположение спутников и схема зондирования показаны на рисунке 2 (а): для формирования шести радиотрасс выбрана конфигурация группировки, состоящая из трёх спутников с передатчиками и двух с приёмниками, размещённых на круговых полярных орбитах с высотой $h_{orb} = 1000$ км. Сформулированы рекомендации к угловому разнесению спутников на орбите, для обеспечения покрытия выбранного диапазона высот от 200 до 500 км с шагом получения измерений 50 км. Требуется обеспечить радиосвязь между двумя спутниками с приёмниками, чтобы сконцентрировать измерения ПЭС на одном спутнике для решения задачи РТ.

Точность реконструкции профиля электронной концентрации ионосферы определяется на основе численного моделирования. Для оценки качества реконструкции последовательно решают прямую и обратную задачи. Прямая задача состоит в получении ПЭС для заданного распределения электронной концентрации в плоскости орбиты и имеющегося набора радиотрасс зондирующих сигналов в этой области. Обратная задача состоит в реконструкции распределения электронной концентрации в узлах сетки по имеющемуся набору измерений ПЭС.

Во второй главе анализируется точность решения задачи томографии электронной концентрации по идеальным данным (радоновский образ задан во всей области определения), обосновывается необходимость начального приближения профиля электронной концентрации и доопределения недостающих данных ПЭС. Рассмотрено распределение электронной концентрации, сформированное по модели NeQuick, параметрами которой являются индекс солнечной активности или количество солнечных пятен, географические долгота и широта, высота, месяц и время по Гринвичу.

Рассмотрены методы сравнения двух функций. Представлены меры δ в метриках l^1, l^2, l^∞ ($\delta(l^1), \delta(l^2), \delta(l^\infty)$), как правило используемые в томографии. Обсуждаются вопросы численного решения прямой задачи получения ПЭС по известному модельному распределению электронной концентрации в плоскости орбит спутников группировки. Для решения прямой задачи применяется модель NeQuick. ПЭС рассчитываются посредством численного решения

криволинейного интеграла в полярной системе координат. Показана целесообразность выбора в модели NeQuick шага по высоте $\Delta h = 12,5$ км, что позволяет уменьшить вклад методической ошибки решения прямой задачи в ошибку решения обратной задачи.

Представлены результаты решения обратной задачи реконструкции профиля электронной концентрации ионосферы алгоритмом свёртки по идеальным данным (данные определены для всей требуемой области задания l в радоновском образе: $-E < l < E$, где $E = R_{Earth} + h_{orb}$). Приведены результаты численного эксперимента для выявления качества реконструкции для различного числа положения передатчиков и расстояния между интегралами. Показана целесообразность использования интерполяции кубическим сплайном для снижения методической ошибки решения обратной задачи при расстоянии между интегралами равном $\Delta h = 50$ км.

Схема регистрации данных абсолютного ПЭС группировкой спутников (рисунок 2 (а)) не позволяет получить радоновский образ профиля электронной концентрации во всей области его определения, так как координата l радоновского образа определена только в диапазонах $-E_{top} < l < -E_{down}$ и $E_{down} < l < E_{top}$, где $E_{down} = R_{Earth} + 200$ км, $E_{top} = R_{Earth} + 500$ км (рисунок 2 (б)), $R_{Earth} = 6371,136$ км – средний радиус Земли. В этой ситуации невозможно напрямую использовать алгоритм свёртки и требуется привлечение дополнительной априорной информации в виде начального приближения.

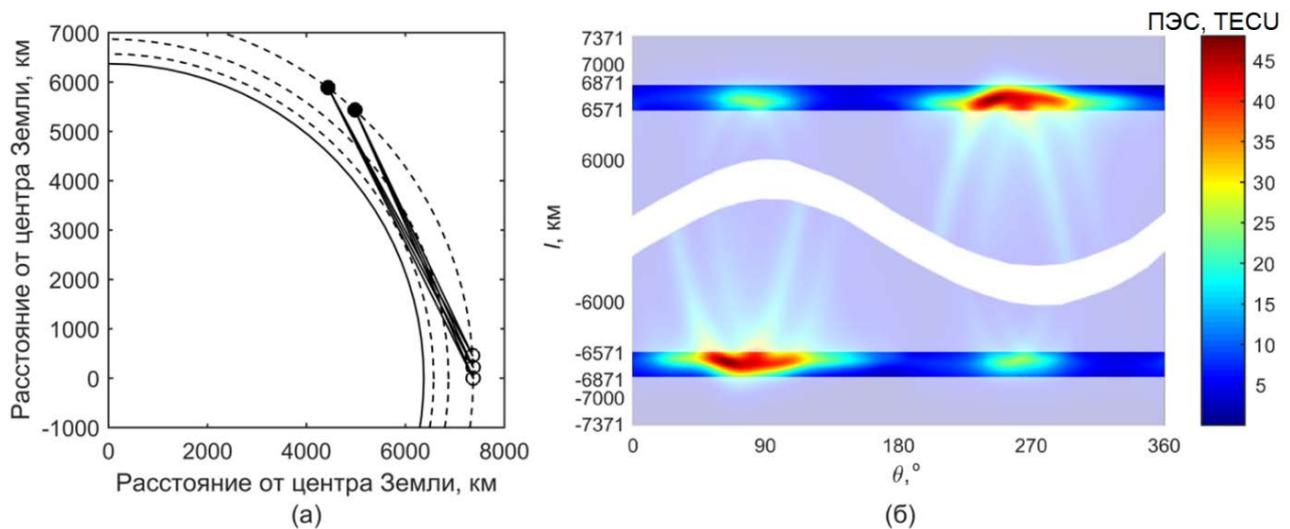


Рисунок 2 – (а) Расположение радиотрасс для группировки, состоящей из 5 спутников; (б)

Область определения функции $p(l, \theta) = [\mathcal{R}f](l, \theta)$

В **третьей главе** предложен новый метод двумерной томографии ионосферы, основанный на алгоритме свёртки, состоящий из последовательного решения следующих задач: формирование начального приближения профиля электронной концентрации в плоскости орбит спутников группировки, используя измерения ПЭС; доопределение недостающих данных в радоновском образе с использованием априорной информации о виде радоновского образа; восстановление электронной концентрации алгоритмом свёртки, который является наиболее эффективным среди методов основанных на использовании преобразований типа Радона, как по вычислительным затратам, так и по времени работы. Показана возможность интерполяции измерений ПЭС в случае геометрии зондирования сигналами ГНСС.

Изложен метод формирования начального приближения профиля электронной концентрации по измерениям ПЭС в плоскости орбит спутников группировки. Приведена модель распределения, близкого к распределению Чепмена, используемая для моделирования начального приближения:

$$N_{e,0}(h, \varphi, N_m, H_m) = N_m(\varphi) \cdot \exp\left(1 - \frac{h-H_m}{\sigma} - \exp\left(-\frac{h-H_m}{\sigma}\right)\right), \quad (1)$$

где N_m – максимальное значение электронной концентрации N_e в высотном профиле; h – высота; H_m – высота максимума электронной концентрации над уровнем моря; σ – параметр масштаба. Распределение представляется в виде произведения двух множителей, отвечающих за широтное и высотное распределения, широтное распределение вносит наибольший вклад в итоговый результат оценки электронной концентрации.

Показано, что при допущении $H_m = \text{const}$ и $\sigma = \text{const}$ в плоскости орбит спутников группировки, математическую операцию получения ПЭС на трассе спутник-спутник можно аппроксимировать операцией свёртки:

$$p(l, \theta) = (N_m * g)(\theta), \quad (2)$$

где ядро свёртки имеет вид (рисунок 3)

$$g(\theta) = l(1 + \theta^2) \exp\left(1 - \frac{1}{\sigma}(l - R_m) - \frac{l}{2\sigma}\theta^2 - \exp\left(-\frac{1}{\sigma}(l - R_m) - \frac{l}{2\sigma}\theta^2\right)\right),$$

где $R_m = H_m + R_{Earth}$; $l = R_{Earth} + h_{tr}$ – длина перпендикуляра, опущенного на прямую радиотрассы из начала координат; h_{tr} – высота перигея радиотрассы. Соответственно широтный профиль $N_m(\varphi)$ можно оценить, как обратную свёртку:

$$\hat{N}_m(\varphi) = \text{deconv}(p, g)(\varphi).$$

Метод представлен в двух вариантах, различающихся способом формирования высотного профиля ($H_m = \text{const}$ и H_m априорно известен), соответственно требуемой для них априорной информацией и точностью формирования начального приближения. Конечная формула для моделирования начального приближения принимает вид:

$$N_{e,0}(h, \varphi) = \hat{N}_m(\varphi) \cdot \exp\left(1 - \frac{h - H_m}{\sigma} - \exp\left(-\frac{h - H_m}{\sigma}\right)\right). \quad (3)$$

Обсуждаются вопросы деконволюции широтного профиля электронной концентрации $N_m(\varphi)$ из выражения (2). Выбран метод деконволюции с регуляризацией по Тихонову: $\hat{N}_m(\varphi) = (h * p)(\varphi)$, где h – ядро фильтра, Фурье образ которого выражается, как $H(f) = \frac{G^*(f)}{|G(f)|^2 + \lambda(|G(f)|^2)}$, где $G(f)$ – Фурье образ g ; λ – параметр регуляризации.

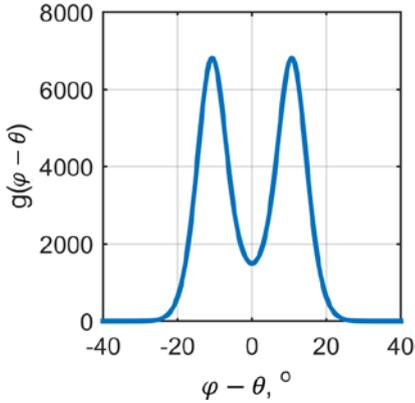


Рисунок 3 – Вид ядра свёртки $g(\varphi - \theta)$, ($h_{tr} = 225$ км)

Проведено статистическое исследование ошибки формирования начального приближения в двух вариантах по формуле (3). Гистограммы распределения ошибки в метриках l^2 и l^∞ при постоянной высоте $H_m = \text{const}$ показаны на рисунке 4. Соответствующие гистограммы распределения ошибки формирования начального приближения с использованием априорной информации о высотах максимума электронной концентрации H_m в метриках l^2 и l^∞ показаны на рисунке 5.

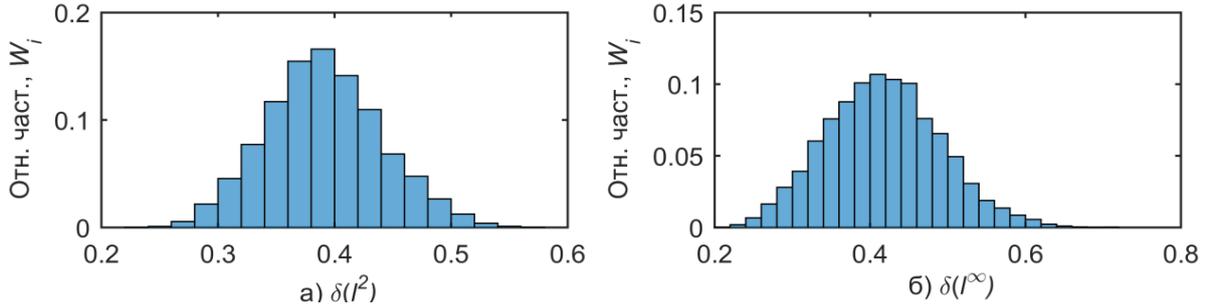


Рисунок 4 – Гистограммы распределения ошибок формирования начального приближения для $H_m = \text{const}$: (а) относительная частота ошибки $\delta(l^2)$; (б) относительная частота ошибки $\delta(l^\infty)$

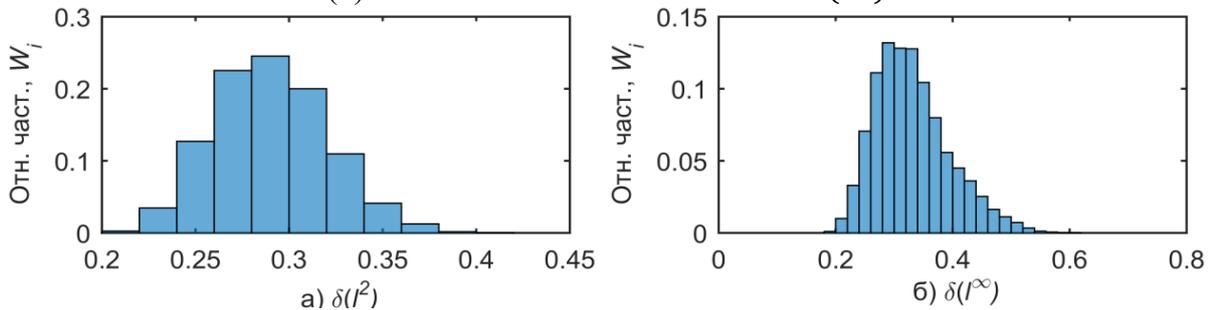
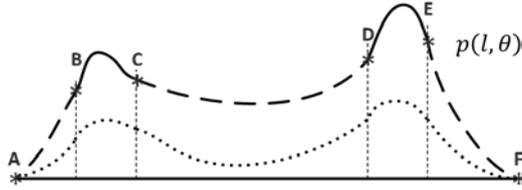


Рисунок 5 – Гистограммы распределения ошибок формирования начального приближения для априорно заданного H_m : (а) относительная частота ошибки $\delta(l^2)$; (б) относительная частота ошибки $\delta(l^\infty)$

Вариант с априорно заданной высотой H_m близок по точности к сформированному по модели IRI-2007 в (Романов 2011) начальному приближению, где ошибки формирования начального приближения достигают 30%, при этом ошибки формирования начального приближения, когда оно задаётся постоянной величиной, соответствующей среднему уровню электронной концентрации, достигают 90%. Оба предложенных варианта метода формирования начального приближения обладают более простой математической реализацией чем непосредственное использование известных моделей ионосферы NeQuick и IRI-2007,

применяемых в формировании начального приближения, и требует меньшего объёма входных данных, передаваемых на спутники.

Предлагается метод доопределения недостающих проекционных данных в радоновском образе. Показана возможность доопределения недостающих проекционных данных используя измерения ПЭС и априорную информацию о форме радоновского образа. Метод состоит из двух шагов: на первом шаге вычисляется радоновский образ от начального приближения профиля электронной концентрации $p_{apr}(l, \theta) = R(N_{e,0}(x, y))$; на втором шаге недостающие участки AB , CD , EF каждой томографической проекции экстраполируются (рисунок 6), используя значения в точках B , C , D , E и априорную информацию о форме радоновского образа: площадь под графиком томографической проекции, производные в точках A и F , форму участка априорной проекции CD :



$$\begin{cases} p_{AB}(l) = a_{AB} \cdot l^2 + b_{AB} \cdot l + c_{AB} \\ p_{EF}(l) = a_{EF} \cdot l^2 + b_{EF} \cdot l + c_{EF} \\ p_{CD}(l) = p_{apr_{CD}}(l) \cdot (a_{CD} \cdot l^2 + b_{CD} \cdot l + c_{CD}) \end{cases} \quad (4)$$

Рисунок 6 – Схема томографической проекции

Получены системы линейных алгебраических уравнений, позволяющие вычислить коэффициенты полиномов, необходимые для аппроксимации недостающих участков в системе (4):

$$\begin{cases} 2a_{AB} \cdot l_A + b_{AB} = \dot{p}_{apr_A} \\ a_{AB} \cdot l_A^2 + b_{AB} \cdot l_A + c_{AB} = p_{apr_A} \\ a_{AB} \cdot l_B^2 + b_{AB} \cdot l_B + c_{AB} = p_B \end{cases} \quad \begin{cases} 2a_{EF} \cdot l_F + b_{EF} = \dot{p}_{apr_F} \\ a_{EF} \cdot l_E^2 + b_{EF} \cdot l_E + c_{EF} = p_E \\ a_{EF} \cdot l_F^2 + b_{EF} \cdot l_F + c_{EF} = p_{apr_F} \end{cases} ,$$

$$S_{CD}^* = \frac{(S_{AF} - S_{BC} - S_{DE} - S_{AB} - S_{EF})}{h} - \frac{1}{2}(p_C + p_D),$$

$$\begin{cases} a_{CD} \sum p_{apr_i} l_i^2 + b_{CD} \sum p_{apr_i} l_i + c_{CD} \sum p_{apr_i} = S_{CD}^* \\ p_{apr_C} (a_{CD} \cdot l_C^2 + b_{CD} \cdot l_C + c_{CD}) = p_C \\ p_{apr_D} (a_{CD} \cdot l_D^2 + b_{CD} \cdot l_D + c_{CD}) = p_D \end{cases} ,$$

где (a_{AB}, b_{AB}, c_{AB}) , (a_{EF}, b_{EF}, c_{EF}) , (a_{CD}, b_{CD}, c_{CD}) – коэффициенты полиномов второй степени для участков AB , EF и CD соответственно; p_{apr_A} и p_{apr_F} – значение априорной функции проекции $p_{apr}(l, \theta)$ в точках A и F соответственно; p_B , p_C , p_D , p_E – измерение $p(l, \theta)$ в точках B , C , D , E соответственно; \dot{p}_{apr_A} и \dot{p}_{apr_F} – производная априорной функции проекции $p_{apr}(l, \theta)$ по l в точках A и F соответственно; l_i – номер отсчёта в пределах участка $CD \forall i \in [2, N - 1]$, p_{apr_i} – значение априорной функции проекции $p_{apr}(l, \theta)$ в точке l_i ; l_A , l_B , $l_C = l_1$, $l_D = l_N$, l_E , l_F – номера отсчётов в точках A , B , C , D , E , F соответственно; S_{AF} – априорное значение площади томографической проекции; S_{BC} , S_{DE} , S_{AB} , S_{EF} – площади под участками графика BC , DE , AB , EF соответственно; h – шаг между отсчётами.

Приведены результаты моделирования влияния ошибок в начальном приближении на качество доопределения недостающих проекционных данных в радоновском образе. Проведённое численное моделирование показало достаточную точность доопределения радоновского образа, из чего следует, что к этим данным возможно применять на следующем шаге метод свёртки. На рисунке 7 приведены оценки относительной ошибки доопределения в метриках.

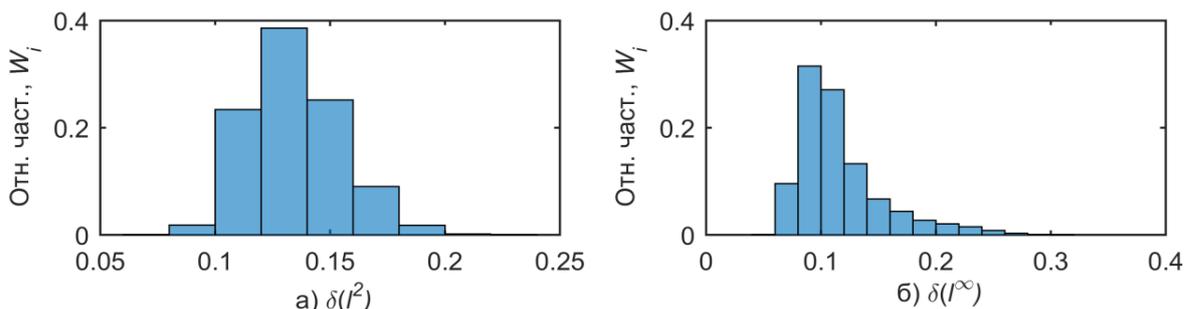


Рисунок 7 – Гистограммы распределения ошибок формирования радоновского образа

Описан томографический алгоритм свёртки для реконструкции изображения по набору плоскопараллельных проекций:

$$f^*(x, y) = \mathcal{B}((p_\theta * w)(l)),$$

где p_θ – плоскопараллельная проекция; w – ядро свёртки; $[\mathcal{B}t](r, \varphi) = \int_0^\pi t(r \cos(\theta - \varphi), \theta) d\theta$ – оператор обратного проецирования. Обоснован выбор ядра свёртки в алгоритме свёртки.

$$w(l) = 2 \int_0^{A/2} \omega \cdot F_A(\omega) \cdot \cos(2\pi\omega l) d\omega,$$

где $F_A(\omega)$ – функция окна; A – ширина полосы пропускания. В качестве ядра свёртки $w(l)$ использовалось ядро Рамачандрана-Лакшминараянана (прямоугольное окно):

$$w(l) = 0,5A^2 \text{sinc}(\pi Al) - 0,25A^2 \text{sinc}^2(\pi Al).$$

Приведена алгоритмическая реализация алгоритма свёртки. Метод используемый для численной реализации алгоритма свёртки состоит из двух этапов: расчёт линейной свёртки каждой проекции с ядром; вычисление суммы Римана для операции обратного проецирования. Разработанный метод увеличивает быстродействие восстановления профиля электронной концентрации ионосферы и позволяет решать задачу непосредственно на программно-аппаратном комплексе группировки спутников. Время работы метода составляет от 3 до 5 минут на персональном компьютере, где наиболее затратной по времени операцией является операция обратного проецирования (размерность сетки реконструкции 1201x1201 элементов, размерность сетки радоновского образа 1201x720 элементов). При этом время работы известных алгебраических методов реконструкции составляет от 40 до 250 минут на персональном компьютере и обусловлено прежде всего трудоёмкой операцией аппроксимации проекционного оператора (формирование матрицы в системе линейных алгебраических уравнений, содержащей более 10^7 элементов).

Приведены результаты моделирования влияния ошибок в начальном приближении на качество реконструкции профиля электронной концентрации. Проведённое численное моделирование показало устойчивость решения к ошибкам в начальном приближении, даны оценки относительной ошибки реконструкции в метриках l^2 и l^∞ (рисунок 8). На рисунке 9 (б), (в) представлен результат решения задачи томографии по предложенному методу для модельного распределения рисунок 9 (а). Полученная точность решения задачи томографии позволяет сделать вывод о том, что рассматриваемый подход может быть использован для выявления локальных возмущений в ионосфере.

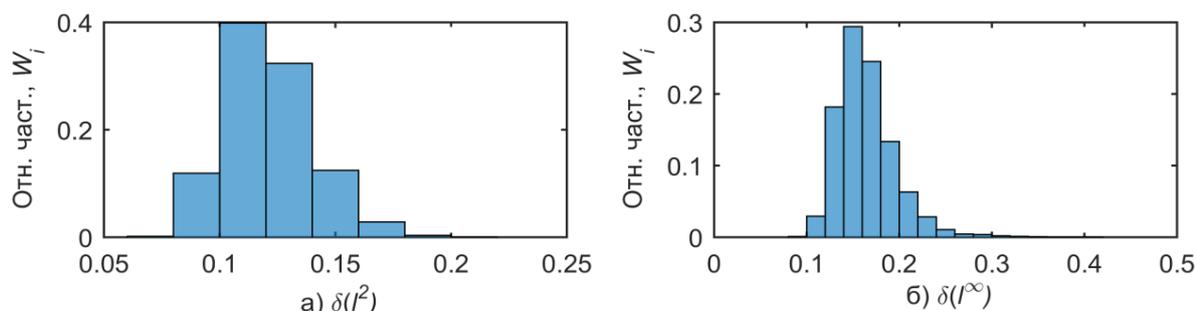


Рисунок 8 – Гистограммы распределения ошибок решения задачи томографии

В **четвёртой главе** представлены результаты численного моделирования задачи выявления возмущений в ионосферном профиле. Рассмотрена задача выявления ионосферных возмущений, оценивая отклонения текущего реконструированного ионосферного профиля $f^*(x, y)$ от скользящего 15-ти дневного реконструированного фонового значения $f_{cp}^*(x, y)$: на первом этапе работы которой начальное приближение было рассчитано с ошибками 25% и 65% в метрике l^∞ для двух крайних случаев. Целесообразно отыскивать ионосферные возмущения оценивая отклонения по формуле

$$df^*(x, y) = \left(f^*(x, y) - f_{cp}^*(x, y) \right) \cdot \|f^*(x, y)\|^{-1} \cdot 100\%.$$

Приведены результаты моделирования влияния ошибок в начальном приближении на выявление ионосферных возмущений. На рисунке 10 (б) показан результат реконструкции профиля электронной концентрации для модельного распределения (рисунок 10 (а)) с несколькими внесёнными возмущениями с амплитудой соответствующей добавке в 50% к среднему уровню полного электронного содержания, что отражает возмущения в ионосферном профиле вызванные различной природой. На рисунке 10 (в) представлен результат определения отклонения $df^*(x, y)$, значения превышающие уровень в 100% соответствуют искомым возмущениям (несоответствие начального приближения составляет $\delta(l^\infty) = 65\%$). Возмущения находящиеся ниже уровня 100% вызваны ошибкой метода.

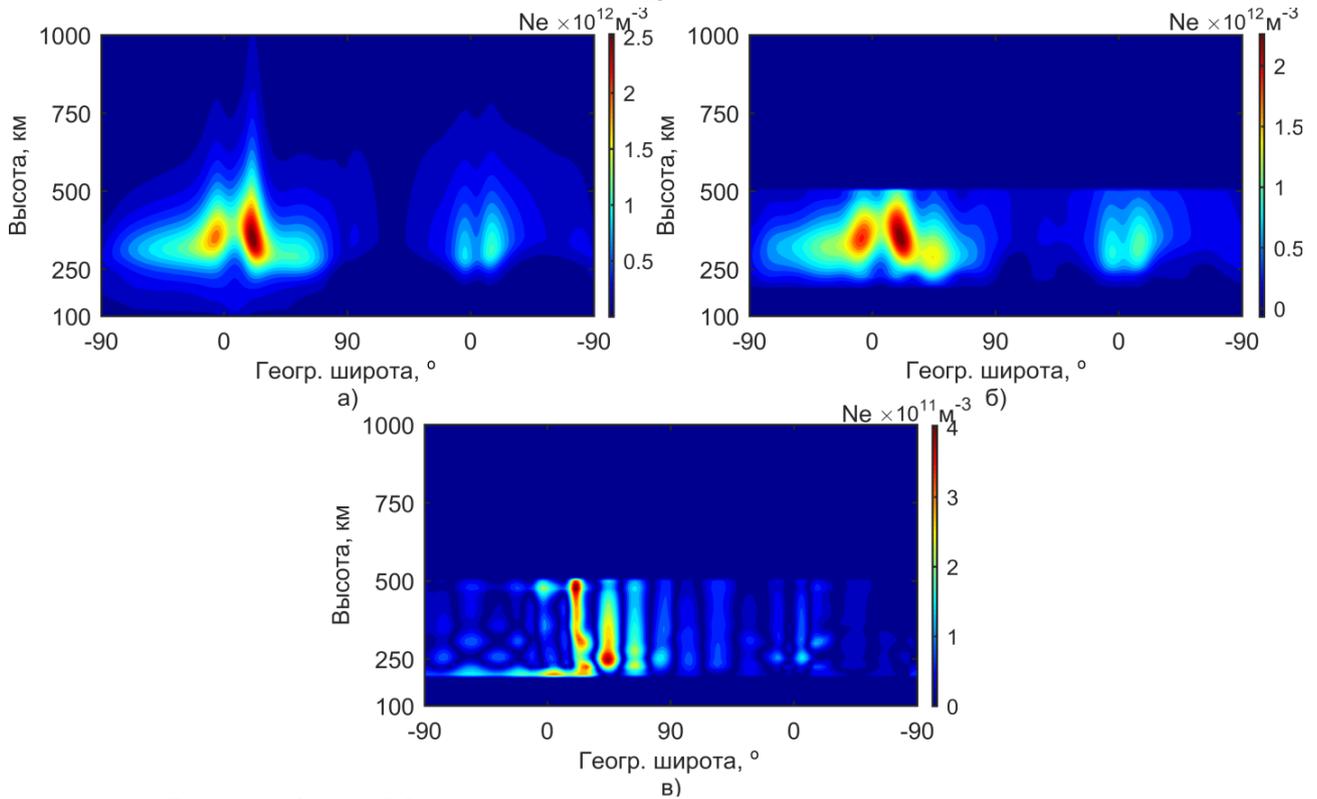


Рисунок 9 – (а) Модельное распределение электронной концентрации; (б) Реконструированное распределение электронной концентрации; (в) Невязка между модельным распределением и восстановленным

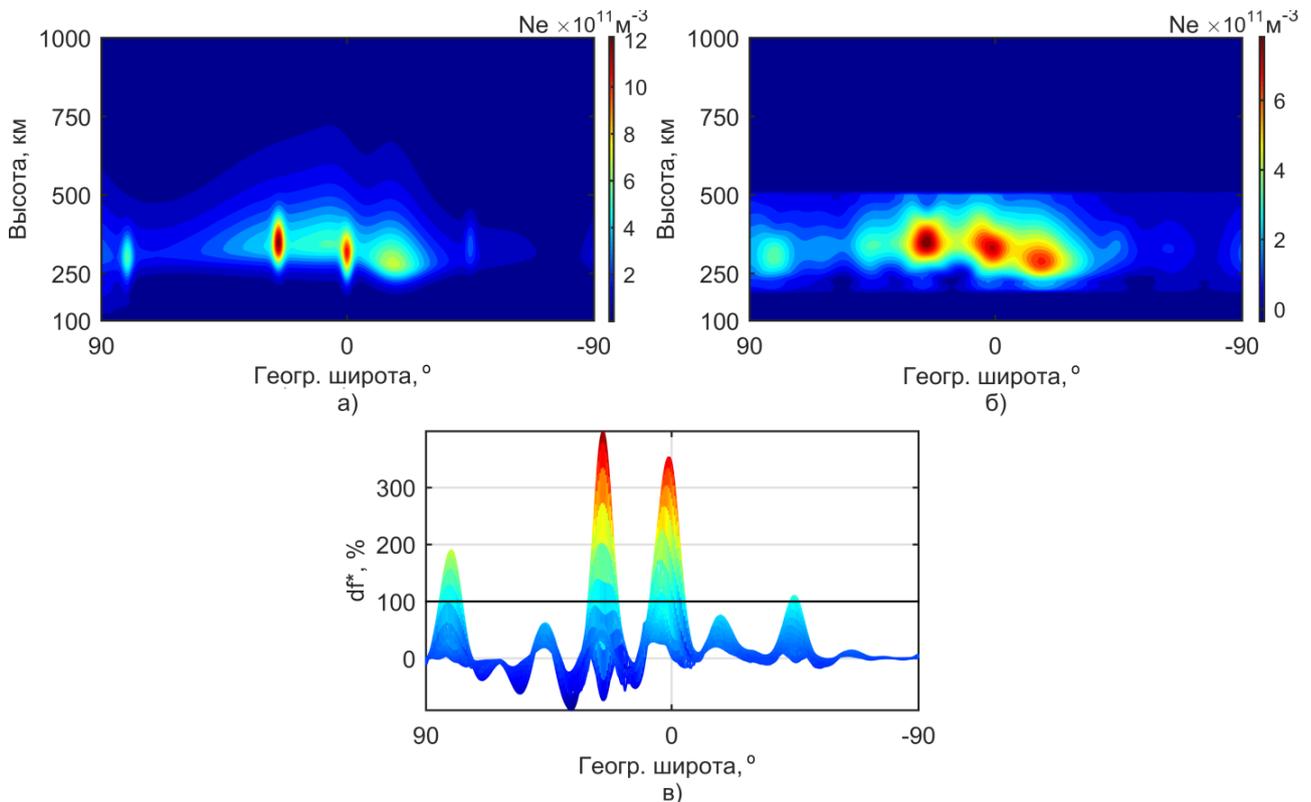


Рисунок 10 – (а) Модельное распределение электронной концентрации; (б) Реконструированное распределение электронной концентрации; (в) Отклонение реконструированного распределения от 15-ти дневного скользящего среднего

В заключении сформулированы основные результаты проведённых исследований:

1. Разработан метод оперативной оценки распределения электронной концентрации ионосферы в плоскости орбит низкоорбитальной группировки спутников на борту спутника, обрабатывающий измерения абсолютного полного электронного содержания ионосферы,

получаемые программно-аппаратными средствами спутников группировки. Метод состоит из последовательного решения следующих задач: формирование начального приближения профиля электронной концентрации в плоскости орбит спутников группировки, используя измерения полного электронного содержания; доопределение недостающих данных в радоновском образе с использованием априорной информации о виде радоновского образа; восстановление электронной концентрации алгоритмом свёртки, который является наиболее эффективным среди томографических методов основанных на использовании преобразований, как по вычислительным затратам, так и по времени работы. Разработанный метод увеличивает быстроту восстановления профиля электронной концентрации ионосферы и позволяет решать задачу непосредственно на программно-аппаратном комплексе группировки спутников. Время работы метода составляет от 3 до 5 минут на персональном компьютере, где наиболее затратной по времени операцией является операция обратного проецирования, размерность сетки реконструкции составляет 1201×1201 элементов и размерность сетки радоновского образа составляет 1201×720 элементов. При этом время работы известных алгебраических методов реконструкции составляет от 40 до 250 минут на персональном компьютере и обусловлено прежде всего трудоёмкой операцией аппроксимации проекционного оператора (формирование матрицы в системе линейных алгебраических уравнений, содержащей более 10^7 элементов). Произведено статистическое моделирование, при котором варьировались входные параметры модели NeQuick на этапе решения прямой задачи, заключавшейся в моделировании измерений полного электронного содержания. Для разных модельных профилей электронной концентрации получалась разная точность их оценки, так ошибки оценки профиля электронной концентрации ионосферы в метрике l^2 лежат в диапазоне от 8% до 20%.

2. Разработан метод оперативного формирования начального приближения профиля электронной концентрации, использующийся в задаче радиотомографии ионосферы низкоорбитальной спутниковой группировкой. Начальное приближение, формирующееся в методе, базируется на распределении Чепмена и представляется в виде произведения двух множителей, отвечающих за широтное и высотное распределения. Показано, что широтное распределение вносит наибольший вклад в итоговый результат оценки электронной концентрации. Главным преимуществом метода перед использованием известных моделей является обработка реальных измерений, что позволяет учесть краткосрочные возмущения в ионосфере не учитываемые моделью. Метод использует измерения абсолютного полного электронного содержания ионосферы, получаемые спутниками низкоорбитальной группировки и позволяет с высокой точностью оценить широтное распределение численно из обратной свёртки функции абсолютного полного электронного содержания ионосферы с ядром, приближенное выражение для которого выражено аналитически. Метод обладает более простой математической реализацией чем непосредственное использование известных моделей ионосферы NeQuick и IRI-2007, применяемых в формировании начального приближения, и требует меньшего объёма входных данных, передаваемых на спутники. Произведено статистическое моделирование, которое показало, что ошибки формирования начального приближения орбитального профиля электронной концентрации ионосферы, используя измерения полного электронного содержания, в метрике l^2 лежат в диапазоне от 20% до 55%, в то время как ошибки формирования начального приближения моделями NeQuick и IRI-2007 достигают 30%, а ошибки формирования начального приближения, когда оно задаётся постоянной величиной, соответствующей среднему уровню электронной концентрации, достигают 90%.

3. Разработан метод доопределения недостающих проекционных данных орбитального вертикального ионосферного профиля, использующий начальное приближение вертикального профиля электронной концентрации ионосферы. Метод позволяет подготовить радоновский образ, содержащий оценки полного электронного содержания, к последующему решению томографической задачи методом, основанным на использовании преобразований типа Радона. Томографическая проекция (сечение радоновского образа при фиксированном угле) состоит из двух участков с известными значениями и трёх участков с неизвестными. Неизвестные участки томографической проекции аппроксимируются с помощью полиномов второго порядка, коэффициенты для которых находятся из решения системы алгебраических уравнений для каждого участка с привлечением априорной информации о виде радоновского образа начального приближения вертикального профиля электронной концентрации ионосферы. Произведено статистическое моделирование, которое показало, что ошибки несоответствия доопределённого радоновского образа идеальному (задан во всей области определения) в метрике l^2 лежат в диапазоне от 8% до 20%, что позволяет применять метод свёртки к данным доопределённого радоновского образа.

4. Произведены численные эксперименты, целью которых была оценка возможности выявления локальных возмущений. Рассмотрены крайние случаи модельных распределений, для которых на первом этапе работы предложенного метода начальное приближение было рассчитано с ошибками 25% и 65% в метрике l^∞ для первого и второго случая соответственно. В обоих случаях к используемой модели ионосферы NeQuick дополнительно прибавлялись двумерные функции Гаусса с амплитудой возмущения соответствующей добавке в 50% к среднему уровню полного электронного содержания, что отражает возмущения в ионосферном профиле вызванные различной природой. Оценивалось отклонение текущего оцененного ионосферного профиля от скользящего среднего оцениваемых профилей. Численные эксперименты показали, что искомые ионосферные возмущения могут быть выявлены используя разработанный метод оценки двумерного распределения электронной концентрации ионосферы, даже в случае, в котором максимальная ошибка формирования начального приближения составляла 65% в метрике l^∞ .

В **приложение А** предложена возможная реализация прибора, производящего производить косвенные измерения ПЭС по характеристикам принимаемых сигналов на частотах 150, 400, 1067, 2844 МГц. Прибор состоит из двух плат AD-FMCOMMS3-EBZ для двухканального приёмопередающего трансивера AD9362 и платы MYD-C7Z015 для вычислителя Zynq-7015. Разработанный метод оперативной оценки распределения электронной концентрации, обрабатывающий косвенные измерения абсолютного ПЭС может быть реализован на вычислителе данного прибора.

В **приложение Б** предложен малый спутник формата CubeSat для зондирования F слоя ионосферы. Расположение на таком спутнике импульсного малогабаритного лидара позволяет дополнительно комплексировать оценённый с помощью РТ методов вертикальный профиль электронной концентрации.

В **приложение В** приведены иллюстрации работы разработанного метода оценки распределения электронной концентрации ионосферы в плоскости орбит группировки спутников.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Филонин, О.В. Мониторинг состояния ионосферы земли группировкой малых спутников / О.В. Филонин, **П.Н. Николаев** // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2016. – Т. 15. – № 1. – С. 132-138.

2. Филонин, О.В. Исследование возможностей лидар-томографии для анализа планетарных атмосфер с помощью малых космических аппаратов / О.В. Филонин., И.В. Белоконов, **П.Н. Николаев** // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18. – № 4(6). – С. 1159-1167.

3. Филонин, О.В. Лидарное зондирование верхних слоев атмосферы и F-слоя ионосферы с помощью группировок наноспутников / О.В. Филонин, И.В. Белоконов, **П.Н. Николаев**, К.С. Насонов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2018. – Т. 61. – № 5. – С. 387-397.

4. Филонин, О.В. Алгоритм свертки как метод восстановления двумерного распределения электронной концентрации ионосферы в плоскости орбиты группировки спутников [Текст] / О.В. Филонин, **П.Н. Николаев** // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2019. – Т. 62. – № 5. – С. 462-469.

Статьи в рецензируемых изданиях, входящих в систему цитирования Scopus:

5. Phylonin, O. Mathematical modeling of radio tomographic ionospheres monitoring via satellite constellation / O. Phylonin, I. Belokonov, P. Nikolayev // Scientific and Technological Experiments on Automatic Space Vehicles and Small Satellites. Procedia Engineering. – 2015. – V. 104. – P. 131-138.

6. Phylonin, O.V. Mathematical modeling radio tomographic ionospheric parameters reconstruction via nanosatellites constellation for conditions of incomplete source data / O.V. Phylonin, **P.N. Nikolaev** // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – V. 1904. – P. 158-167.

Другие издания:

7. Филонин О.В. Математическое моделирование поведения группировок наноспутников на планетарных орбитах, решающих задачи томографической реконструкции параметров атмосфер / О.В. Филонин, Ю.Б. Талызин, **П.Н. Николаев** // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 11-1 (18). – С. 31-33.

8. **Николаев, П.Н.** Математическое моделирование радиотомографических методов исследования распределений электронной плотности в ионосфере с помощью группировки малых спутников / **П.Н. Николаев** // Сборник тезисов докладов Молодёжной научной школы-конф. при 40-й Ассамблее COSPAR, 2-10 августа 2014 г. – М.: Типография МГУ, 2014. – С. 114-115.

9. Филонин, О.В. Мониторинг полного электронного содержания ионосферы спутниковыми группировками на основе радиотомографических методов / О.В. Филонин, **П.Н. Николаев** // Материалы XVII конференции молодых ученых Навигация и управление движением. Науч. редактор д.т.н. проф. О.А. Степанов; Под общ. ред. академика РАН В. Г. Пешехонова. Санкт-Петербург, 17-20 марта 2015 г. – СПб.: Изд-во ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2015. – С. 374-381.

10. **Николаев, П.Н.** Математическое моделирование радиотомографических методов зондирования ионосферы Земли / П.Н. Николаев, О.В. Филонин // Сборник трудов XVIII Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. Самара, 15-17 июня 2015 г. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2015. – С. 37-41.

11. **Николаев, П.Н.** Томографический подход к задаче восстановления профиля электронной плотности ионосферы посредством спутниковой группировки / П.Н. Николаев, О.В. Филонин // Сборник трудов Международной молодёжной научной конференции XIII Королёвские чтения. Самара, 6-8 октября 2015 г. – Самара: Изд-во СГАУ, 2015. - С. 136.

12. **Николаев, П.Н.** Сравнение методов томографической реконструкции широтно-высотного профиля электронной концентрации ионосферы: метод фильтрации свёрткой и метод ро-фильтрации / П.Н. Николаев, О.В. Филонин // Труды XI академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства. Москва, 26-29 января 2016 г. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.- С. 267.

13. Филонин, О.В. Лидар-томографическое исследование планетарных атмосфер с помощью автоматических аппаратов / О.В. Филонин, **П.Н. Николаев** // Материалы Международной конференции и молодёжной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2016). Самара, 17-19 мая 2016 г. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2016. – С. 482-488.

14. Филонин, О.В. Исследование возможностей радиотомографического анализа планетарных атмосфер с помощью спутниковых группировок / О.В. Филонин, **П.Н. Николаев** // Материалы Международной конференции и молодёжной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2016). Самара, 17-19 мая 2016 г. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2016. – С. 475-481.

15. **Николаев, П.Н.** Малоракурная томография профиля электронной концентрации ионосферы с помощью спутниковых технологий / П.Н. Николаев // Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации», Алушта, 14-20 сентября 2016 г. – М.: Изд-во МАИ, 2016. - С.182.

16. Филонин, О.В. Математическое моделирование процедур радиотомографической реконструкции параметров ионосферы с помощью группировки наноспутников для условий неполных исходных данных / О.В. Филонин, **П.Н. Николаев** // Материалы Международной конференции и молодёжной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2017). Самара, 25-27 апреля 2017 г. – Самара: Изд-во Новая техника. – 2017. – С. 1330-1342.

17. **Николаев, П.Н.** Метод реконструкции электронной концентрации в ионосфере по схеме регистрации данных спутник – спутник / П.Н. Николаев // Сборник трудов 15-й Конференции молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования» под ред. А.М. Садовского. Сер. «Механика, управление и информатика», Москва, 11-13 апреля 2018 г. – М.: ИКИ РАН, 2018. – С. 73-80.