

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Чэнь Чуаньфу на тему:

**«Модели BDGIM и NeQuickG и сверхширокополосные GNSS сигналы в задаче оценки ионосферных параметров»
по специальности 1.6.18. Науки об атмосфере и климате**

Данные глобальных навигационных спутниковых систем получают все большее применение во всевозможных сферах человеческой деятельности, некоторые из которых имеют критическое значение с точки зрения безопасности. Навигация, распространение радиоволн, военные приложения предъявляют все более высокие требования к точности определения координат, оперативности и помехоустойчивости. В настоящей работе предлагаются решения, повышающие точность и помехоустойчивость данных, получаемых с помощью различных систем ГНСС, в частности, с помощью широкополосных сигналов, а поэтому следует признать данную работу весьма актуальной.

Прежде, чем предлагать свои решения, автор обстоятельно анализирует в первой главе достоинства и недостатки моделей, использующих данные систем ГНСС, таких как Модель Klobuchar (первую, из появившихся моделей на основе данных ГНСС), модель BDGIM для коррекции ионосферной задержки, и модель NeQuickG, используемую Европейским космическим агентством ESA. Был обнаружен большой разброс в оценках эффективности операционных ионосферных моделей, в связи с чем был предложен новый метод оценки точности моделей – по ошибке оценивания глобального электронного содержания GEC.

Вторая глава фактически представляет собой отдельное фундаментальное исследование: восстановление интегральных характеристик ионосферы по данным радиопросвечивания сигналами GNSS. Начиная от рассмотрения распространения радиоволн диапазона частот ГНСС в атмосфере и ионосфере, оценок помех и задержек сигналов до технических вопросов кодировки сигналов и выбора оптимальных условий с точки зрения уменьшения шумов. С этой целью подробно рассматриваются различные кодировки сигналов с двоичной и квадратурной фазовой манипуляцией (BPSK и QPSK). Но самым

интересным и, на мой взгляд, существенным в данной работе явилось рассмотрение и оценка точности модуляции двоичной смещенной несущей AltBOC. Теоретические оценки шумов измерений псевдодальностей для кодировок сигналов BPSK, QPSK и AltBOC, рассмотренные в параграфе 2.3.3, привели к исключительно важному результату, показывающему, что кодировка AltBOC превосходит, как сигналы BPSK, так и QPSK. Мало того, использование кодировки AltBOC позволяет использовать одночастотный канал для измерения ТЕС, причем при этом шум в два раза меньше, чем при использовании других кодировок. Внедрение данной кодировки осуществлено в системах Beidou B2 и Galileo E5, что позволяет использовать данные системы для высокоточных сервисов.

Автор идет дальше и представляет систему аналитических уравнений, позволяющих оценить абсолютный вертикальный ТЕС ($vTEC$). Для этого используется модель тонкого слоя и представления $vTEC$ вблизи станции в виде усеченного разложения в ряд Тейлора до второго порядка в пространстве и времени. Для оценки качества предложенного метода требуется провести отдельное исследование шумовых характеристик одночастотных оценок ТЕС для кодировки AltBOC с использованием данных расчетов вертикального ТЕС, полученных по данным двухчастотных наблюдений, что будет сделано в главе 4.

Таким образом, в главе 2 показано, что что шумы псевдодальности при использовании сигналов AltBOC могут быть на порядок меньше шумов псевдодальности при использовании сигналов BPSK, что в свою очередь должно приводить к уменьшению шумов оценок ТЕС для методов, использующих кодовые измерения сигналов AltBOC.

Также разработан оригинальный метод оценки абсолютного вертикального ТЕС над одиночной станцией с использованием данных приёма сигналов AltBOC на одной частоте, но при этом формулируется задача необходимости дополнительной проверки метода на данных реальных двухчастотных наблюдений.

В третьей главе делается попытка оценки точности операционных моделей ионосферы BDGIM и NeQuickG. Честно говоря, смущает предлагаемая

методика оценки ошибок моделей путем сравнения с данными глобальных ионосферных карт CODG (Университет Берна). То, что эти карты «хорошо зарекомендовали себя в предыдущих исследованиях» трудно принять за критерий надежности получаемых оценок, потому что любые глобальные карты в независимости от метода их построения являются результатом эмпирического моделирования и математической экстраполяции на регионы, где отсутствуют приемники систем ГНСС, в первую очередь, океаны. Поэтому будем относиться к получаемым оценкам не как к ошибкам моделей. А как к степени их отклонения от карт CODG. Кроме того, ошибки определения TEC, по крайней мере, в авроральных и полярных областях будут присутствовать в любых картах, в том числе, и в CODG. И эти ошибки связаны не с точностью моделей, а с низким наклоном орбит спутников ГНСС, в связи с чем точно оценить вертикальный TEC в полярных областях не представляется возможным.

Тем не менее, представленные в главе 3 результаты сравнения различных моделей для различных гелиогеофизических условий, в том числе суточные вариации, вариации во время геомагнитных бурь, зависимости отклонений от индекса солнечной активности F10.7, сезонные изменения, представляют большой интерес и позволяют сделать некоторые выводы по поводу адекватности используемых моделей, а также и валидности опорной карты CODG. Наихудший результат модели Klobuchar очевиден и без особенного анализа в силу ее примитивности. В то же время стоит отметить, что модель NeQuickG во многих случаях демонстрирует наименьшие отклонения. Наиболее показательным это при сравнении ошибок моделей BDGIM и NeQuickG для разных полушарий. Возможно, сам автор не осознает причину этого различия. А связано это с тем, что при создании модели NeQuickG использовались данные внешнего зондирования (т.е. абсолютные измерения электронной концентрации во внешней ионосфере) как американских спутников ISIS, так и советских Интеркосмос-19 и Космос 1809, в том числе и над областями, где отсутствуют приемники систем ГНСС. В этом смысле можно говорить не об отклонении модели NeQuickG от CODG, а наоборот.

Во второй части третьей главы предлагается метод тестирования

операционных моделей на основе индекса глобального электронного содержания GEC. Обычно глобальное электронное содержание рассматривается как индикатор солнечной активности, выражаемый индексом F10.7. Скорее, можно говорить о тренде, поскольку не существует взаимно-однозначного соответствия между этими параметрами, что хорошо видно на Рис. 3.10. Не вдаваясь в описание довольно подробного анализа сравнения различных моделей с индексом GEC, проводимого в данном разделе, отметим полученный результат, который тоже можно считать существенным достижением. Как было показано автором, предложенные модели позволяют существенно улучшить оперативность высокоточных оценок GEC. Не дожидаясь создания глобальных карт, процесс создания которых иногда занимает двое суток, появляется возможность экспресс-оценки GEC по ограниченному набору ГНСС наблюдений.

Четвертая глава работы посвящена исследованию сверхширокополосных сигналов Beidou B2 и Galileo E5 с точки зрения задач, направленных на исследования ионосферы. Основной задачей являлось определение возможностей использования одночастотного приема для измерения TEC. Автору пришлось преодолевать трудности, связанные с наличием малого числа приемников, способных принимать сигналы AltBOC путем использования длительных интервалов наблюдений для доступных станций. Приемники расположены в разных широтных и долготных регионах, что позволяет проводить исследования в разных геофизических условиях. Измерения проводились как в спокойных условиях, так и периоды интенсивных солнечных радиовсплесков, т.е. в условиях сильных естественных радиопомех.

Измерения, проведенные для разных углов возвышения спутников, различных комбинаций частот, показали, что уровень шумов при одночастотном приеме сигнала AltBOC в 4-5 раз меньше, чем в случае использования аналогичной одночастотной комбинации и модуляций BPSK и QPSK. А на больших углах возвышения одночастотная комбинация фазы и псевдодальности AltBOC сигналов в среднем обеспечивает такой же уровень шума TEC, как и двухчастотные фазовые комбинации сигналов BPSK и QPSK для обеих систем.

Для сильных солнечных радиовсплесков результаты сравнения с сигналами не показывают преимущества по сравнению с сигналами с модуляцией BPSK и QPSK. Это, по всей видимости, связано с широкополосностью сигнала AltBOC, что увеличивает суммарные шумы.

Тем не менее, сравнение одночастотных измерений TEC с двухчастотными измерениями сигналов с модуляцией BPSK и QPSK показывают, что одночастотные измерения с помощью сигнала AltBOC не уступают двухчастотным измерениям, что показывают примеры, представленные на Рис. 4.7 и 4.8, где кривые вариаций TEC неразличимы и практически сливаются.

В заключении подведены итоги проведенных исследований и сформулированы их основные выводы, в основном, повторяющие содержание работы. Поэтому хотелось бы выделить основные результаты.

В работе показано, что оперативные модели недооценивают 27-дневные, полугодовые и годовые вариации TEC по сравнению с экспериментальными измерениями, причем разница достигает 2 раз, что свидетельствует о необходимости усовершенствования существующих моделей ионосферы.

Предложен метод экспресс оценки глобального содержания электронов в ионосфере по данным модели NeQuickG. При этом погрешность модельных оценок не превышает данные экспериментальных измерений на 0.02 GECu.

На самым важными представляются два последних результата выносимые на защиту и обосновывающие возможность использовать одночастотные измерения на базе широкополосного сигнала в кодировке AltBOC как для оценки как наклонного, так и вертикального TEC.

В целом хотелось бы отметить инновационный характер работы, когда новая прогрессивная кодировка еще не применяется на всех космических аппаратах различных систем ГНСС, а уже разработаны методы ее практического применения.

Диссертация написана хорошим и доступным языком, хорошо оформлена, результаты и выводы сформулированы убедительно, что не оставляет сомнений в их обоснованности.

Диссертация была представлена на 6 научных конференциях и симпозиумах, результаты работы опубликованы в 3 научных работах в индексируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of

Science, Scopus и RSCI/РИНЦ.

Замечания относятся только к оформлению рисунков. Так, на Рис. 3.3 и 3.4 на нижней панели правильнее было бы указать даты, для которых проводились измерения, а не заставлять читателя отсчитывать по 24 часа в непрерывном ряде часов, при этом не зная даты.

На Рис. 4.7 и 4.8 на верхней панели оранжевая и синяя кривые практически не видны, т.к. сливаются с зеленой. По-видимому, нужно было как-то по-другому сконструировать рисунок, чтобы были видны кривые всех видов измерений.

В тексте следовало бы сделать акцент на том, что представляемы ошибки – это интеграл по площади, на которой проводились измерения, а не индивидуальные измерения, поскольку поначалу при чтении значения отклонений в 200 ТЕСи шокируют.

Тем не менее, приведенные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования, которое без сомнения заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует заявленной специальности 1.1.9-пунктам 1 и 4 паспорта специальности 1.6.18. Науки об атмосфере и климате» Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Работа оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук по специальности 01.02.03, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт космических исследований» Российской академии наук, Отдел космической геофизики

Пулинец Сергей Александрович



« 30 » мая 2025 г.

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.02.03 – «Радиофизика»

Адрес места работы: 117997 Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

Подпись главного научного сотрудника ИКИ РАН
С.А. Пулинца удостоверяю: 

Ученый секретарь
к. ф.-м. н.

Садовский А.М.

