

**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**

Диссертационная работа Чэнь Чуаньфу посвящена актуальной проблеме использования данных современных операционных моделей глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и новых сверхширокополосных навигационных сигналов AltBOC, для исследования и более точного описания среды распространения данных сигналов, в частности ионосферы. Для этого в ходе диссертационного исследования последовательно решаются такие задачи как, использование операционных моделей ионосферы для возможности параметризации более сложных моделей, разработка метода оценки вертикального абсолютного полного электронного содержания (ПЭС) над одиночной приемной станцией, по данным одночастотных наблюдений навигационных сигналов с модуляцией двоичной смещенной несущей AltBOC, исследование особенностей распределения ПЭС в рамках операционных моделей в различных регионах мира и сравнение их с распределением ПЭС по данным глобальных ионосферных карт. В завершении работы проанализированы экспериментальные шумовые характеристики оценок наклонного ПЭС при использовании одночастотных, и двухчастотных комбинаций с различными типами кодирования сигналов, а также выполнена верификация разработанного метода оценки абсолютного вертикального ПЭС по данным одночастотных AltBOC сигналов Galileo E5 и Beidou B2 по экспериментальным данным.

Цель диссертационной работы была сформулирована автором, как исследование эффективности операционных моделей ионосферы BDGIM и NeQuickG в задачах оценки полного (ПЭС) и глобального электронного содержания (ГЭС), возможность использования этих оценок для

параметризации более сложных моделей, изучение характеристик сверхширокополосных навигационных сигналов в кодировке AltBOC и оценка абсолютного вертикального ПЭС на отдельной станций по данным одночастотной комбинации фазовых и пседодальномерных измерений в данной кодировке. Для достижения поставленной цели автором решался следующий комплекс задач, а именно, на длительном временном интервале и при различных гелиогеофизических условиях проведено исследование особенностей оценки ПЭС и ГЭС в операционных моделях BDGIM и NeQuickG, для которых также разработан и протестирован метод оценки ГЭС, воспроизводящий данные экспериментальных наблюдений CODG; оценка шумовых характеристик относительного наклонного ПЭС по данным приема сверхширокополосных навигационных сигналов в кодировке AltBOC Galileo E5 и Beidou B2 и разработка алгоритма оценки абсолютного вертикального ПЭС на основе данных сигналов и его тестирование.

Научная новизна работы определяется тем, что в рамках диссертационного исследования впервые показано, что модель BDGIM недооценивает до 2х раз амплитуды 27-дневных, полугодовых и годовых гармоник ГЭС по сравнению с экспериментальными данными CODG, а оценки ГЭС по модели NeQuickG можно использовать для параметризации более сложных ионосферных моделей вместо оценок ГЭС CODG, применяя простейшую регрессионную зависимость между ними. Впервые показано значительное (до 5 раз) уменьшение уровня шумов наклонного ПЭС по одночастотной фазово-кодовой комбинации при использовании сверхширокополосных навигационных сигналов в кодировке AltBOC Galileo E5 и Beidou B2 по сравнению с фазово-кодовой комбинацией сигналов в кодировках BPSK/QPSK, а на высоких углах возвышения данная одночастотная комбинация в среднем обеспечивает такой же уровень шума ПЭС, как и двухчастотные фазовые комбинации сигналов BPSK и QPSK для ГНСС Galileo и Beidou. Разработанный метод оценки абсолютного вертикального ПЭС на одиночной станции по данным одночастотной фазово-

кодовой комбинации сигналов в кодировке AltBOC Galileo E5 и Beidou B2 обеспечивает отклонения менее 1 TECu от методов, использующих двухчастотные фазовые наблюдения не менее чем в 95% случаев.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования определяется высокой вероятностью их использования в сфере технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды в рамках стратегии научно-технического развития России в направлении освоения и использования космического пространства.

В целом, всё вышеизложенное определяет **актуальность, новизну**, а также высокую **научную и практическую значимость** диссертационного исследования **Чэнь Чуаньфу**.

Положения, выносимые на защиту, отражают суть полученных результатов, соответствуют поставленной цели и задачам. К наиболее значимым **научным результатам** можно отнести то, что автором показано, что оценки ГЭС по модели NeQuickG можно использовать для параметризации более сложных ионосферных моделей вместо оценок ГЭС CODG имеющих значительную временную задержку опубликования, улучшая тем самым оперативность высокоточных оценок ГЭС и предлагая метод его экспресс-оценки, а также то, что одночастотная фазово-кодовая комбинация сверхширокополосных навигационных сигналов в кодировке AltBOC Galileo E5 и Beidou B2 впервые позволяет обеспечивать высокоточную оценку наклонного и вертикального ПЭС и уровень шумов на высоких углах сопоставимые с данными двухчастотных фазовых комбинаций сигналов с типами кодирования BPSK и QPSK.

Характеристика структуры и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списков рисунков, таблиц и литературы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, основные задачи и защищаемые положения работы,

научная новизна и практическая значимость, определён личный вклад автора в представленную работу, а также указаны научные мероприятия, где докладывались основные результаты диссертационного исследования и список публикаций по теме диссертации.

Первая глава посвящена описанию морфологии пространственного распределения электронной концентрации в ионосфере, интегральным параметрам, используемым для описания её состояния – ПЭС и ГЭС, а также операционным ионосферным моделям, используемым в системах GPS, Galileo и Beidou и результатам их сопоставления.

Во второй главе описана процедура восстановления интегральных параметров ионосферы по данным радиопросвечивания сигналами ГНСС, рассмотрены особенности различных типов кодирования данных сигналов в ионосферных исследованиях и представлен разработанный алгоритм оценки абсолютного вертикального ПЭС по одночастотной фазово-кодовой комбинации сверхширокополосных навигационных сигналов в кодировке AltBOC Galileo E5 и Beidou B2.

Третья глава содержит результаты тестирования операционных ионосферных моделей по данным полного и глобального электронного содержания, в которых показано, что вне зависимости от фазы солнечной активности модели BDGIM и NeQuickG имеют тенденцию в среднем недооценивать значения ГЭС по сравнению с экспериментальными данными глобальных ионосферных карт CODG, а модель Клобучара имеет максимальные значения СКО оценок ГЭС. Автор отмечает, что для оценки ГЭС в настоящей работе использовались не вещаемые в навигационном сообщении параметры модели NeQuickG, а оценённые оптимальным образом. Здесь же показаны возможные пути усовершенствования модели BDGIM.

Четвертая глава посвящена исследованию сверхширокополосных сигналов Beidou B2 и Galileo E5 в задачах зондирования ионосферы, в частности сравнению оценок шумов измерений по экспериментальным

данным, полученным по одночастотной фазово-кодовой комбинации сигналов в кодировке AltBOC с оценками шумов полученным по одночастотным и двухчастотным комбинациям кодовых и фазовых измерений сигналов ГНСС с типами кодирования BPSK и QPSK. Здесь же подтверждена работоспособность разработанного алгоритма оценки абсолютного вертикального ПЭС по одночастотной фазово-кодовой комбинации сверхширокополосных навигационных сигналов в кодировке AltBOC Galileo E5 и Beidou B2 и показано, что данный способ оценки наклонного и вертикально ПЭС может эффективно использоваться в задачах исследования ионосферы, наряду с двухчастотными фазовыми наблюдениями. Весьма интересным является представленный автором в данной главе результат о том, что ГНСС сигналы в кодировке AltBOC могут быть более подвержены воздействию естественных радиозумов, по сравнению с сигналами BPSK и QPSK, что, однако компенсируется изначально более высоким уровнем отношения сигнал/шум для сигналов AltBOC по сравнению с сигналами BPSK и QPSK.

Разработанный алгоритм оценки абсолютного вертикального ПЭС по одночастотной фазово-кодовой комбинации сверхширокополосных навигационных сигналов в кодировке AltBOC Galileo E5 и Beidou B2, представленный в Главе 2 и полученные на его основе результаты оценки абсолютного вертикального ПЭС на отдельной станции, представленные в Главе 4 с точки зрения оппонента являются определяющим для данной работы.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Апробация работы, публикации

Материалы диссертационного исследования докладывались на центральных научных мероприятиях на территории РФ, таких как конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2022 г.), Второй семинар «Физические основы прогноза

солнечно-земных процессов и событий» (Троицк, 2024 г.), 48-й ежегодный Апатитский семинар «Физика авроральных явлений» (Апатиты, 2025 г.) и др.

Основные результаты диссертационной работы Чэнь Чуаньфу достаточно полно обоснованы и опубликованы в рецензируемых научных изданиях и позволяют сделать вывод, что представленная диссертационная работа является завершенным и значимым научным исследованием. По теме диссертации автором опубликованы 9 работ, в том числе 3 статьи в научных изданиях, включенных в действующий перечень ВАК или в международные базы данных Web of Science, Scopus и RSCI/РИНЦ. Две статьи опубликованы в журнале Sensors, входящем в первый квартиль Q1.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования определяется использованием физически и математически обоснованных методов и подходов, значимой выборкой экспериментальных данных используемой для проверки работоспособности разработанных методов, хорошим количественным и качественным соответствием с результатами опубликованными другими авторами.

Замечания по диссертации

К диссертационной работе Чэнь Чуаньфу имеется ряд замечаний и вопросов:

1. Не описано что значит ϵ в формуле 2.2.
2. В п. 2.3.2 вводятся понятия каналы данных и пилотные каналов и было бы весьма полезно дать их краткое описание в тексте диссертации.
3. На стр. 36-37 не указан первоисточник приведенных теоретических зависимостей (формулы 2.11-2.16) используемых для расчета автокорреляционных функций и СКО измерений псевдодальности для типов модуляций ГНСС сигналов, исследуемых автором далее.

4. Рис. 3.3-3.4 достаточно сложны для восприятия и интерпретации. Автору можно было ограничиться одной панелью для всех представленных данных или цветом на верхней панели выделить интервал времени, соответствующий времени на нижней панели и сделать шаг по времени на нижней панели равный одним суткам.
5. Представленные на рис. 3.7 вариации ошибок ПЭС по различным моделям для России не так явно относительно других рассмотренных регионов Земного шара показывают ярко выраженный сезонный ход с максимумами в периоды равноденствий и минимумами в периоды солнцестояний. Связано ли это с малым, относительно других рассмотренных регионов, количеством базовых ГНСС станций на территории России входящих в сеть IGS являющейся опорной для карт CODG, и соответственно меньшим значением вариаций ошибок, не позволяющим в рамках выбранного диапазона оценок ПЭС явно увидеть данный сезонный ход?
6. На стр. 74 автор пишет, что использование сигналов AltBOC значительно влияет на обеспеченность ионосферных наблюдений при использовании одночастотной приёмной аппаратуры. И здесь возникает вопрос, а есть ли сейчас на коммерческом рынке одночастотные приемники, способные принимать ГНСС сигналы AltBOC Galileo E5 и/или Beidou B2 и при этом не имеющие возможности регистрации других сигнальных компонент, в том числе двухчастотных фазовых? Ведь при регистрации приемником основной части сигнальных компонент, в качестве базовой при расчете ПЭС всё равно будут использоваться двухчастотные фазовые комбинации.
7. На стр. 79-80 автор отмечает, что параметры ковариационной матрицы шумов наблюдений, используемой в алгоритме и отвечающей за веса наблюдений на различных углах возвышения

спутников, задавались на основе экспериментальных оценок шумов относительного наклонного ПЭС по данным приёма сигналов AltBOC, полученных в 3 параграфе настоящей главы. Означает ли это, что для каждой новой станции необходимо будет проводить такую же, так скажем предварительную работу, чтобы получать сопоставимые с двухчастотными фазовыми измерениями оценки абсолютного вертикального ПЭС?

8. Весьма уместным было бы внести в работу «Список основных сокращений и условных обозначений», тем более учитывая большое количество используемых англоязычных аббревиатур.
9. Несмотря на то, что диссертация написана профессиональным, грамотным языком, в тексте работы встречаются орфографические ошибки и опечатки.
10. Замечание по оформлению автореферата сводится к тому, что автор регулярно пренебрегает использованием отступов при выделении абзацев.

Вместе с тем, указанные замечания и поднятые вопросы не являются принципиальными и не влияют на положительную оценку результатов диссертационного исследования. По своей актуальности, новизне, научно-практической значимости диссертационная работа **Чэнь Чуаньфу** на тему: **«Модели BDGIM и NeQuickG и сверхширокополосные GNSS сигналы в задаче оценки ионосферных параметров»** отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М. В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.6.18. Науки об атмосфере и климате (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на

соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель **Чэнь Чуаньфу** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.18. Науки об атмосфере и климате.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,
Доцент кафедры радиоэлектроники
Института Физики ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) Федеральный университет»
КОГОГИН Денис Александрович

26.05.2025

Контактные данные:

тел.: 7(965)5954239, e-mail: dkogogin@kpfu.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:
01.04.03 – Радиофизика

Адрес места работы:

420008, Республика Татарстан г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18,
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»,
Институт физики
Тел.: 8(843) 233-71-19; e-mail: dkogogin@kpfu.ru



ВЕДУЩИЙ
СПЕЦИАЛИСТ
ПО ПЕРСОНАЛУ

