

ОТЗЫВ
официального оппонента
Крюковского Андрея Сергеевича
на диссертацию на соискание учёной 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 исследованию особенностей описания полного и глобального электронного содержания ионосферы Земли в операционных моделях BDGIM и NeQuickG, применяемых в глобальных навигационных спутниковых системах Beidou и Galileo, а также возможности использования сверхширокополосных навигационных сигналов в кодировке AltBOC для одностотной оценки полного электронного содержания. Актуальность темы работы определяется необходимостью повышения точности работы глобальных спутниковых навигационных систем, что во многом связано с адекватным учетом ионосферы Земли, а также с совершенствованием свойства навигационных сигналов для уменьшения шумов измерений.

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

Во введении обосновывается актуальность, цель работы, новизна, научная и практическая значимость работы, личный вклад автора. К настоящему моменту развитие операционных моделей ионосферы, применяемых в глобальных спутниковых навигационных системах, привело к возможности их использования не только по основному назначению — оценке ионосферной задержки распространения навигационных сигналов в задаче одностотного позиционирования, но и для определения распределения ионосферных параметров, электронной концентрации и полного электронного содержания. При этом такие модели достаточно просты, что обеспечивает их максимальную вычислительную эффективность, и имеют возможность адаптации к реальным гелиогеофизическим условиям за счёт поправок, вводимых в навигационных

сообщениях и определяемых по данным специальных сетей наземных приёмников. Вместе с тем остаётся не до конца изученным вопрос о точности описания распределения электронной концентрации в операционных моделях. Опубликованные к настоящему моменту исследования дают весьма широкий и иногда противоречивый диапазон оценок. Остаётся открытым вопрос, можно ли использовать оценки интегральных ионосферных параметров, таких как полное или глобальное электронное содержание, полученные в операционных моделях, для параметризации более сложных ионосферных моделей. В диссертации последовательно решается задача определения точностей оценок глобального электронного содержания по данным двух наиболее современных операционных моделей ионосферы BDGIM и NeQuickG. Также рассмотрена модель Klobuchar. Отдельно исследовано влияние новых схем кодирования навигационных сигналов, таких как AltBOC, на шумы оценки полного электронного содержания одночастотным методом, что в перспективе может устранить возникающие в двухчастотных методах ошибки второго порядка, связанные с различиями траекторий распространения навигационных сигналов в ионосфере для двух рабочих частот. Задачи, решаемые автором в работе, представляются актуальными и важными, как с научной, так и с прикладной точки зрения.

Первая глава диссертации посвящена описанию основных крупномасштабных морфологических особенностей ионосферы Земли и их представления в операционных моделях Klobuchar, BDGIM и NeQuickG. Обсуждаются основные отличия моделей, ключевым из которых является возможность NeQuickG описывать трехмерное пространственное распределение электронной плотности, в то время как BDGIM может описать лишь двумерные распределения полного электронного содержания.

Вторая глава диссертации посвящена описанию методов кодирования сигналов глобальных спутниковых навигационных систем и их влияния на шумовые характеристики оценок полного электронного содержания (TEC) ионосферы, получаемых с их помощью. Рассмотрены сигналы с двоичной и квадратурной фазовой манипуляцией BPSK и QPSK, а также сигналы с

модуляцией двоичной смещенной несущей AltBOC. Описаны физические и математические основы метода оценки абсолютного полного электронного содержания над одиночным приёмным пунктом по данным одночастотных фазовых и кодовых измерений сигналов AltBOC, предлагаемых в работе. Данный метод основан на представлении ионосферы в виде тонкого слоя, распределение полного электронного содержания в котором в окрестности приемного пункта представляется в виде ряда Тейлора. Для перевода наклонного полного электронного содержания в вертикальное используется картирующая функция, а для устранения неопределенности начальной фазы — фазоразностный подход. Получаемая система линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов разложения в ряд Тейлора решается методом наименьших квадратов с ограничением на положительность полного электронного содержания. Показано, что с учетом низких уровней шума в одночастотных оценках наклонного полного электронного содержания при использовании сигналов AltBOC, предложенный метод позволяет проводить высокоточные оценки абсолютного вертикального TEC по одночастотным измерениям сигналов глобальных навигационных спутниковых систем.

Третья глава диссертации посвящена исследованию особенностей представления глобального и полного электронного содержания в моделях NeQuickG и BDGIM в 24 цикле солнечной активности. Здесь автором получен важный результат, касающийся недооценки амплитуд 27-дневных, полугодовых и годовых гармоник глобального электронного содержания ионосферы Земли в модели BDGIM по сравнению с экспериментальными данными глобальных ионосферных карт центра CODG, а также модели NeQuickG. Автором предлагается метод экспресс-оценки глобального электронного содержания с использованием модели NeQuickG, позволяющий с высокой точностью и небольшим временным лагом оценивать данный параметр, не дожидаясь финальных данных CODG, имеющих задержку порядка 3–5 дней. Это важно с практической точки зрения, так как глобальное электронное содержание часто используется как входной параметр в более сложных ионосферных моделях.

Четвёртая глава диссертации посвящена экспериментальному исследованию шумов оценок полного электронного содержания ионосферы по данным просвечивания сигналами глобальных спутниковых навигационных систем при использовании различных кодировок этих сигналов. Автором показано, что использование навигационных сигналов Galileo и Beidou в кодировке AltBOC позволяет оценивать относительное наклонное полное электронное содержание ионосферы по одночастотным данным с тем же уровнем шума, что и при использовании двухчастотных фазовых данных. Относительно BPSK/QPSK сигналов уровень шумов оценок полного электронного содержания по одночастотным данным для AltBOC сигналов уменьшается до пяти раз. Этот результат впервые экспериментально подтверждает возможность использования одночастотных данных для высокоточной оценки полного электронного содержания, что в перспективе может существенно улучшить обеспеченность данными ионосферных наблюдений. Вместе с тем автор на примере ряда событий показывает, что сигналы в кодировке AltBOC могут быть более подвержены влиянию естественных радиозумов, например солнечных радиовсплесков, что также необходимо учитывать при анализе наблюдений.

В заключении представлены основные результаты работы.

В работе:

1. Показано, что модель BDGIM существенно недооценивает амплитуды 27-дневных, полугодовых и годовых гармоник глобального электронного содержания (GEC) по сравнению с экспериментальными данными глобальных ионосферных карт.
2. Показано, что оценки GEC по модели NeQuickG можно использовать для параметризации более сложных ионосферных моделей вместо оценок GEC CODG, применяя простейшую регрессионную зависимость между ними.
3. Показано значительное уменьшение уровня шумов оценки наклонного TEC по одночастотной фазово-кодовой комбинации при использовании навигационных сигналов Galileo и Beidou в кодировке AltBOC по сравнению с сигналами в кодировках BPSK/QPSK.

4. Разработанный метод оценки абсолютного вертикального ТЕС над одиночной станцией позволяет использовать для этого одночастотные данные наблюдений сигналов системы CODG в кодировке AltBOC.

Эти результаты являются новыми и представляются достоверными. Основные положения, научные выводы и рекомендации, выносимые на защиту, подробно обоснованы в диссертации.

Результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в трёх журнальных статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ, включая две публикации в журналах первого квартиля по WoS/Scopus, а также доложены на 6 конференциях и семинарах.

Диссертация написана ясным, литературным языком, несмотря на то что русский язык не является родным языком автора. Работа оставляет впечатление законченного исследования по рассматриваемой проблематике, основные задачи решены на достаточно высоком физическом и математическом уровне. Автореферат полностью соответствует тексту диссертации.

Однако работа не лишена ряда недостатков, к которым можно отнести следующие:

1. Автор фокусируется на шумах оценки полного электронного содержания, получаемого одночастотным методом. Вместе с тем улучшение шумовых характеристик сигнала на одной из частот очевидно должно улучшить результаты и двухчастотного метода оценки полного электронного содержания.

2. Помимо исследования шумов полного электронного содержания имело бы смысл экспериментально проверить теоретические оценки для шумов псевдодальностей при использовании сигналов AltBOC, представленные в работе на рис. 2.3 и формулой (2.16)

3. Метод экспресс-оценки глобального электронного содержания на основе модели NeQuickG разработан и протестирован на данных 24-го цикла солнечной активности, который как известно не был очень интенсивным (F10.7 кроме редких событий не превышал 200 s.f.u.). Вместе с тем из работ профессора Э.Л. Афраймовича известно, что в зависимости глобального

электронного содержания от солнечного радиоизлучения присутствует эффект насыщения при значениях F10.7 более 250 s.f.u. Не ясно, насколько работоспособным будет предложенный метод, например в текущем 25-м цикле солнечной активности, который оказывается более интенсивным.

4. В работе не дано обоснование причины, по которой не учитывается влияние магнитного поля Земли на показатель преломления (стр. 29, формула (2.1)).

5. В работе проводится сравнение с глобальными ионосферными картами CODG (Университет Берна) (стр. 46). Не ясно, какая ошибка этих глобальных ионосферных карт?

6. В работе анализируется уменьшение абсолютных ошибок (стр. 53). Возможно, следовало бы проанализировать и относительные ошибки оценок TEC, а также применить для данных на рис. 3.6-3.9 Фурье-анализ или вейвлет анализ.

7. Работа перегружена сокращениями. Следовало бы составить список сокращений, используемых в диссертации.

8. В работе есть орфографические, синтаксические и стилистические ошибки. Для примера можно указать стр.35, 36, 57, 67, 74.

9. Неясно, где синяя линия на верхней панели рис. 4.7, 4.8.

Указанные замечания не снижают значимости диссертационного исследования. Диссертация 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 учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертация оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

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

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор
Заведующий кафедрой информационных технологий и естественнонаучных дисциплин Института информационных систем и инженерно-компьютерных технологий, Автономная некоммерческая организация высшего образования «Российский новый университет» (АНО ВО «РосНОУ»)

Крюковский Андрей Сергеевич

27.05.2025

Контактные данные:

тел.: 7(903) _____, e-mail: k_____@yandex.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защита диссертация:
01.04.03 – Радиофизика

Адрес места работы:

105005, г. Москва, ул. Радио, д. 22,
АНО ВО «РосНОУ», Институт информационных систем и инженерно-
компьютерных технологий, кафедра информационных технологий и
естественнонаучных дисциплин
Тел.: 8 (495) 925-03-73; e-mail: isct@rosnou.ru

Подпись сотрудника АНО ВО «РосНОУ»

А.С. Крюковского удостоверяю:

Начальник отдела кадров

В.В. Бехтина

