

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертацию Данильчук Екатерины Игоревны

«Метод индикации ионосферных неоднородностей по спектру вариаций фазы  
трансионосферных сигналов с высокой частотой регистрации измерений»

по специальности 1.3.4 – Радиоп физика

### **Актуальность темы диссертации**

Одной из фундаментальных задач физики верхней атмосферы (высоты от ~80 до 1000 км) является изучение процессов генерации и распространения ионосферных возмущений различных масштабов. Данные возмущения могут оказывать существенное влияние на работу средств радиосвязи и спутниковой навигации. Диагностика таких возмущений может эффективно проводиться с помощью двухчастотного радиозондирования сигналами Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), таких как ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou. Метод дистанционного зондирования ионосферы сигналами ГНСС нашел широкое применение для изучения различных явлений, возникающих в ионосфере, например, в исследованиях ионосферных эффектов экстремальных гелиогеофизических событий, таких как магнитные бури, солнечные вспышки, затмения, а также регулярных событий, например, прохождение солнечного терминатора (СТ). Решаются и обратные задачи, а именно исследование влияния ионосферной и магнитосферной возмущенности на сбои в работе ГНСС в периоды различных гелиогеофизических событий.

В тоже время стоит отметить, что существенный прогресс в области вычислительной техники и проектирования радиоэлектронных устройств, в настоящее время позволяет создавать новое измерительное оборудование сочетающее в себе мобильное исполнение, высокую частоту регистрации параметров зондирующих сигналов, широкий частотный диапазон и обработку в режиме реального времени. Это уже сделало доступным измерения параметров сигналов ГНСС с высокой частотой регистрации до 100 Гц синхронно на нескольких частотах. Однако методы обработки данных и

индексы оценки ионосферной возмущенности, разработанные к настоящему моменту, показали свою эффективность и достоверность при частотах зондирования до 1 Гц и требуют адаптации к высокочастотным измерениям, или разработки новых методов и индексов, что в целом должно преследовать цель повысить чувствительность и разрешающую способность метода радиозондирования ионосферы сигналами ГНСС, снизить зависимость конечного результата от выбранного способа удаления тренда и фильтрации.

В целом, всё вышеизложенное определяет актуальность, а также высокую научную и практическую значимость диссертационного исследования Данильчук Е.И.

**Цель диссертационной работы** была сформулирована автором, как повышение чувствительности и разрешающей способности методов дистанционного мониторинга ионосферы, основанных на обработке и анализе сигналов навигационных спутников с высокой частотой регистрации измерений. Для достижения поставленной цели автором решался комплекс **задач**, а именно:

1. Разработка методики исследований ионосферных неоднородностей на границе уровня шумов на основе обработки данных с высокой частотой регистрации измерений и с учетом характеристик шума измерений фазы в навигационных приемниках различного типа;
2. Создание и верификация модели фазы несущей сигнала навигационного спутника с учетом параметров мелкомасштабных (в т.ч. френелевских) ионосферных неоднородностей и шумов измерений в навигационном приемнике;
3. Разработка метода индикации ионосферных неоднородностей на границе уровня шумов по спектру вариаций фазы несущей сигналов навигационных спутников;
4. Экспериментальная оценка работоспособности и достигнутых характеристик разработанного метода индикации ионосферных неоднородностей на границе уровня шумов.

**Научная новизна** работы определяется тем, что в рамках диссертационного исследования впервые был предложен метод детектирования ионосферных неоднородностей на основе анализа спектра вариаций фазы несущей сигналов ГНСС по высокочастотным измерениям и показано что частоту девиации, для которой в условиях геомагнитных возмущений происходит смещение в сторону более высоких частот, можно использовать как индикатор ионосферных неоднородностей на границе уровня шумов.

**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.

**Положения, выносимые на защиту**, отражают суть полученных результатов, соответствуют поставленной цели и задачам. К наиболее значимым **научным результатам** можно отнести разработку модели фазы несущей сигнала навигационного спутника и индикатора ионосферных неоднородностей на границе уровня шумов, основанном на наблюдаемом смещении частоты девиации в спектре вариаций фазы несущей навигационных спутников с высокой частотой регистрации измерений. К достоинствам работы по мнению оппонента, несомненно, стоит отнести внимательное рассмотрение автором вопроса использования высокочастотных ГНСС измерений в ионосферных исследованиях, индексов оценки ионосферной возмущенности, полученных по данным ГНСС с высокой частотой регистрации, в частности на границе уровня шумов.

### **Характеристика структуры и содержание диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, основные задачи и защищаемые положения работы, научная новизна и практическая значимость, а также определён личный вклад автора в представленную работу и указаны научные мероприятия, где докладывались основные результаты диссертационного исследования.

Первая глава посвящена описанию метода трансionoсферного зондирования ионосферы как одному из широко применяемых в настоящий момент методов диагностики околоземного космического пространства, и, в частности, ионосферы. Даны краткие характеристики действующих ГНСС, таких как ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou. Описаны общепринятые научным сообществом индексы оценки ионосферной возмущенности и современные возможности метода радиозондирования сигналами ГНСС в задаче мониторинга ионосферы.

Вторая глава являющаяся определяющей в этой работе посвящена достаточно подробному изложению методики исследований ионосферных неоднородностей различных масштабов на границе уровня шумов. Описаны ограничения, возникающие при использовании сигналов ГНСС в диагностике состояния ионосферы, включающие в себя частоту регистрации измерений,

шумы измерений фазы несущей в навигационном приемнике, а также вопросы фильтрации и обработки данных в целом, и всё это в контексте преимущественно высокочастотных измерений на частотах регистрации измерений фазы несущей навигационного сигнала 50 и 100 Гц. Подробно описана защищаемая автором модель фазы несущей сигнала навигационного спутника, позволяющая осуществлять отдельный анализ эффектов вариаций фазы, возникающих в результате влияния различных факторов и проведено тестирование процедур обработки фазовых измерений на основе данных этой модели.

В третьей главе представлен метод обнаружения ионосферных неоднородностей на границе уровня шумов измерений, основанный на анализе поведения частоты девиации спектра вариаций фазы несущей сигналов ГНСС и его апробация как по измерениям реальных спутников, так и по данным моделирования. Частота девиации в данном случае выступает как граница разделения информативной и шумовой частей спектра и её можно использовать в качестве индикатора обнаружения ионосферных неоднородностей на спектре вариаций фазы несущей сигнала ГНСС, в условиях недоступных для других методов.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальной оценки поведения частоты девиации в условиях геомагнитной бури, показывающие устойчивый сдвиг частоты девиации в область более высоких частот, вплоть до частоты Найквиста. Описаны преимущества высокочастотных измерений параметров навигационного сигнала. Также показана взаимосвязь между сигнальными компонентами навигационных спутников и частотой девиации, что необходимо учитывать при интерпретации результатов, так как максимальные значения частоты девиации для разных сигнальных компонент могут существенно отличаться для одних и тех же условий.

В заключении сделаны общие выводы по работе.

### **Апробация работы, публикации**

Материалы диссертационного исследования докладывались на центральных научных мероприятиях на территории РФ и на Международных научных конференциях, таких как Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн» (2021, 2023 г.), ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (2022 г.), конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (2021, 2022 г.), Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде» (2022, 2024 г.), AGU Fall Meeting (2023 г.), AOGS2024 (2024 г.) и др.

Основные результаты диссертационной работы Данильчук Екатерины Игоревны достаточно полно обоснованы и опубликованы в реферируемых научных изданиях и позволяют сделать вывод, что представленная диссертационная работа является завершённым и значимым научным исследованием. По теме диссертации автором опубликованы 16 работ, в том числе 3 статьи в научных изданиях, включенных в действующий перечень ВАК или в международные базы данных Scopus и Web of Science. Две статьи опубликованы в журнале, входящем в первый квартиль Q1.

**Достоверность и обоснованность** результатов диссертационного исследования определяется использованием физически обоснованных методов и подходов математического моделирования, значимой выборкой экспериментальных данных, согласованием с экспериментальными результатами и результатами опубликованными другими авторами.

### **Замечания по диссертации**

К диссертационной работе Данильчук Е.И. имеется ряд замечаний и рекомендаций:

1. При сокращении пределов интегрирования в выражении 2.33 до границ ионосферного слоя, необходимо учитывать, что есть исследования, в которых показано, что вклад в полное электронное содержание плазмосферы может варьироваться в диапазоне 30÷70% измеренного ПЭС в зависимости от времени измерения и состояния космической погоды.
2. Выводы из анализа данных приведенных в таблицах 4.2-4.4 и в целом результаты главы 4 выглядят не полными без ГНСС Beidou.
3. Часть рисунков в работе (см. рис. 2.16, 3.3, 4.2-4.4. и др.), особенно состоящих из нескольких панелей не имеют качественной подрисуночной подписи, что существенно затрудняет восприятие материала. Причем автору работы стоило всего лишь продублировать в подрисуночной подписи описание панелей из текста работы.
4. В главе 2 при описании модели фазы несущей и её компонент автор в качестве примера использует для дальнейшего описания данные двух спутников системы GPS. На взгляд оппонента лучше было использовать по одному спутнику каждого созвездия ГНСС. Это бы позволило понять, насколько представленные результаты репрезентативны для всех ГНСС систем, а не только для GPS.
5. При описании выражения 2.23 вводится понятие фактора наклона лучевой траектории в ионосферном слое. Однако, это, по всей видимости, эмпирическое выражение, описывающее данный параметр

- приведено без возможности проверки его вывода или ссылки на первоисточник.
6. При описании алгоритма обработки фазовых измерений с высокой частотой регистрации, в первом пункте указана необходимость разбиения измерений фазы на интервалы длительностью 1 ч. Остается неясным, важно ли для работы алгоритма иметь длительную непрерывную запись фазовых измерений, делящихся в дальнейшем на часовые реализации, или же изначально, если поддерживает прошивка навигационного устройства можно пользоваться часовыми измерениями.
  7. На стр. 70-71 сообщается, что тип навигационного приемника существенно влияет на уровень шумов измерений фазы и должен как можно точнее учитываться в полной модели фазы. Однако из текста непонятно как убедиться в этом влиянии. Предполагаю, что по данным, представленным на рис. 2.4 демонстрирующим зависимость СКО фазовых шумов от угла возвышения спутника для различных производителей навигационного оборудования?
  8. Автор нигде в тексте работы не отмечает какое влияние на фазовые шумы или другие параметры может оказывать используемый тип и класс приемной ГНСС антенны?
  9. В работе не приведены оценки скорости работы алгоритма и параметры необходимых для его работы вычислительных ресурсов. Однако учитывая тот факт, что автором получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, думаю такие оценки имеются.
  10. При описании отличительных особенностей ГНСС на стр. 24 стоило добавить, что для системы ГЛОНАСС таковым является множественный доступ с частотным разделением (FDMA) для большинства действующих спутников.
  11. Автором нигде не отмечено, использовались ли результаты, представленные в диссертационной работе при выполнении каких-либо научных проектов.
  12. Следует отметить некоторую неаккуратность автора в обращении с используемыми терминами. При описании выражения 2.32 и далее, а также в списке сокращений и условных обозначений, используются не общепринятые определения критической частоты  $f_oF2$  и высоты максимума электронной концентрации в  $F2$  слое ионосферы  $h_mF2$ .
  13. Несмотря на то, что диссертация написана профессиональным, грамотным языком, в тексте работы встречаются неточности и опечатки.

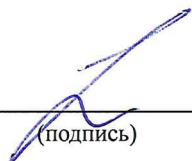
Указанные недостатки и замечания, являются частными и не влияют на общую положительную оценку работы. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Данильчук Екатерины Игоревны «Метод индикации ионосферных неоднородностей по спектру вариаций фазы трансionoсферных сигналов с высокой частотой регистрации измерений» является законченной квалификационной работой, соответствующей всем требованиям Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» (с изменениями и дополнениями), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Данильчук Екатерина Игоревна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика».

Официальный оппонент:

Доцент кафедры радиоэлектроники Института Физики  
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»  
420008, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18  
Тел. 8(965)595-42-39; e-mail: dkogogin@kpfu.ru  
кандидат физико-математических наук, 01.04.03 – Радиофизика

Когогин Денис Александрович

  
\_\_\_\_\_ (подпись)

