



СИБИРСКИЙ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

SIBERIAN
FEDERAL
UNIVERSITY

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский федеральный университет»

660041, Красноярский край,
г. Красноярск, проспект Свободный, д. 79
телефон: (391) 244-82-13, тел./факс: (391) 244-86-22
http://www.sfu-kras.ru, e-mail: office@sfu-kras.ru

ОКПО 02067876; ОГРН 1022402137460;
ИНН/КПП 2463011853/246301001



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

Ф.А.ОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»

Денис Сергеевич Гуц

№ _____
от _____

«18» _____ 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Данильчук Екатерины Игоревны «Метод индикации ионосферных неоднородностей по спектру вариаций фазы трансionoсферных сигналов с высокой частотой регистрации измерений», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика

Актуальность для науки и практики

Представленная к защите диссертационная работа Данильчук Е.И. посвящена важной научной задаче обнаружения ионосферных неоднородностей естественного и искусственного происхождения малой интенсивности на основе анализа измерений фазы несущей по всему доступному для наблюдений набору сигнальных компонент глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) с высоким темпом регистрации измерений.

Актуальность темы настоящей работы состоит в том, что:

1) постоянно возрастают требования к точности и разрешающей способности систем мониторинга состояния ионосферы с целью развития методов и средств обнаружения и прогнозирования опасных природных явлений по их ионосферному отклику;

2) ГНСС как средство навигационно-временных измерений, слабо используются для развития методов геофизического, в том числе ионосферного, мониторинга природных сред.

В настоящее время для мировой научной общественности становятся более доступными измерения фазы несущей сигналов ГНСС с высокой частотой регистрации. Новейшее поколение орбитальных аппаратов ГНСС транслируют сигналы в трех частотных диапазонах от 1176 до 1600 МГц, при том, что, в каждом частотном диапазоне одновременно передаются квадратурные компоненты несущей, модулированные дальномерными кодами, корреляционные свойства которых могут существенно различаться друг от друга. Таким образом, сегодня для мониторинга и исследований ионосферы по сигналам ГНСС предоставляется возможность использования большого набора частот и сигнальных компонент. Такая техническая возможность ГНСС, как инструмента для глобальных и локальных наблюдений ионосферы, открывает перспективы заглянуть в исследуемую среду намного глубже, обнаружить слабые ионосферные события на границе уровня шумов измерений, лучше понять, как физические механизмы ионосферных процессов, так и значительно повысить чувствительность и разрешающую способность систем ионосферного мониторинга.

Необходимо констатировать, что современный уровень развития ГНСС технологий в задачах исследования ионосферы используется далеко не в полном объеме. Это связано с недостаточным развитием методов и технологий обработки измерений параметров сигнала ГНСС с высоким темпом регистрации и необходимостью использования различных сигнальных компонент. Новые технические возможности требуют модернизации общепринятой системы индексов состояния ионосферы.

Разработка новых методов и индикаторов состояния ионосферы и совершенствование имеющейся системы индексов состояния ионосферы с учетом новых технических возможностей позволяет:

1) повысить чувствительность и разрешающую способность методов дистанционного мониторинга ионосферы;

2) уменьшить неопределенность при выборе процедур фильтрации первичных измерений трансionoсферных сигналов;

3) корректно учитывать шумовые характеристики и параметры настроек навигационного приемника как средства мониторинга ионосферы.

Таким образом, исследования, направленные на внедрение новых средств и методов мониторинга ионосферы на основе анализа измерений параметров навигационных сигналов с высокой частотой регистрации и с привлечением новых частот и сигнальных компонент ГНСС несомненно являются **актуальными**.

1. Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка основных сокращений и условных обозначений и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 139 страниц, включая 48 рисунков, 8 таблиц. Список цитируемой литературы состоит из 113 наименований.

Во введении представлена актуальность, цель и задачи работы, положения, выносимые на защиту. Приведена научная новизна и практическая значимость исследования, методы, позволяющие решить поставленные задачи. Представлены сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации.

В **Главе 1** описано современное техническое состояние глобальных навигационных спутниковых систем и проанализированы их новейшие возможности, как инструмента прямого радиозондирования ионосферы. Дано краткое описание ионосферы как среды распространения радиосигналов. Приведена классификация перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) на основе их пространственно-временного масштаба. Дан краткий обзор основных классических радиофизических методов исследования ионосферы. Описаны возможности применения измерений параметров

сигналов ГНСС с высокой частотой регистрации для мониторинга ионосферы. Сделан обзор основных индикаторов для диагностики ионосферы. Описаны современные возможности диагностики ионосферы по сигналам ГНСС, такие как измерения параметров навигационных сигналов с высоким темпом регистрации измерений и большим набором частот и сигнальных компонент.

В **Главе 2** представлена методика исследований ионосферных возмущений на границе уровня шумов по данным измерений фазы несущей частоты сигналов навигационных спутников с высоким темпом регистрации, а также разработанная многокомпонентная модель фазы несущей трансionoсферного сигнала. Определены ограничения, возникающие при использовании фазы несущей частоты сигнала навигационного спутника при мониторинге ионосферы. Представлен алгоритм обработки фазовых измерений с высоким темпом регистрации для оценки характеристик ионосферных мерцаний при расчетах индексов мерцаний и для выделения характерных точек и областей на спектрах вариаций фазы несущей навигационного сигнала. На основе модели фазы получены результаты предварительной настройки процедур обработки измерений фазы и расчёта индексов ионосферных мерцаний, а также отработки процедур выделения характерных точек и областей на спектре вариаций фазы несущей трансionoсферного сигнала. Установлено, что некорректно выбранные параметры процедур обработки измерений фазы несущей сигнала навигационного спутника могут привести к искажению результатов.

В **Главе 3** описан метод обнаружения ионосферных неоднородностей на основе анализа поведения частоты девиации в спектре вариаций фазы несущей навигационного сигнала. Приведены экспериментальные результаты работоспособности метода, а также результаты моделирования. Дано описание разработанного метода индикации ионосферных неоднородностей на границе уровня шумов измерений, основанного на анализе спектров вариаций фазы сигналов навигационных спутников. Представлены результаты апробации предложенного метода индикации ионосферных неоднородностей по

измерениям реальных спутников и по данным моделирования, которые подтверждают работоспособность предложенного метода.

В Главе 4 представлены экспериментальные оценки частоты девиации на основе измерений фазы несущей сигналов навигационных спутников GPS, ГЛОНАСС, Galileo. Установлено, что увеличение темпа регистрации, в связи с увеличением частоты Найквиста, расширяет и доступный диапазон вариаций частоты девиации. Показано, что независимо от системы ГНСС и ее сигнальной компоненты, частота девиации реагирует на геомагнитную бурю. В большинстве случаев это проявляется в сдвиге значений частоты девиации в сторону более высоких частот и увеличении вероятности наблюдения более высоких значений частот девиации.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

2. Новизна исследований и полученных результатов, выводов и рекомендаций

Автор достаточно удачно сформулировал цель своей работы, которая заключается в повышении чувствительности и разрешающей способности методов дистанционного мониторинга ионосферы, основанных на обработке и анализе сигналов навигационных спутников с высокой частотой регистрации измерений. Научная новизна исследований, направленных на достижение указанной цели состоит в том, что:

1. Впервые предложен метод обнаружения ионосферных неоднородностей малой интенсивности на основе анализа спектра вариаций фазы несущей сигналов навигационных спутников с высоким темпом регистрации;

2. Впервые показано, что граница между наклонной частью спектра вариаций фазы трансionoсферного сигнала и его шумовой частью – частота девиации – в условиях геомагнитных возмущений увеличивается вплоть до

частоты Найквиста. Это позволяет использовать частоту девиации как индикатор присутствия в ионосфере неоднородностей малой интенсивности.

В соответствии с поставленной целью корректно сформулированы задачи исследования, которые успешно решены, результаты решения задач несомненно, являются достоверными, поскольку подтверждены большим объемом реальных измерений параметров трансionoсферных сигналов ГНСС в разнообразных геофизических условиях и с использованием разного типа навигационной аппаратуры пользователей.

В результате проделанной работы, автором достигнуты следующие новые научные и прикладные результаты

1. Разработана многокомпонентная модель фазы несущей трансionoсферного сигнала, которая может быть использована для отдельного анализа эффектов вариаций фазы, возникающих из-за влияния ионосферных неоднородностей на границе уровня его шумов и шумов измерений в навигационном приемнике, а также для предварительной настройки параметров процедур фильтрации измерений и удаления трендов фазы на выходе навигационного приемника и для анализа спектров вариаций фазы несущей сигнала навигационного спутника.

2. Предложен метод детектирования (индикации) ионосферных неоднородностей на границе уровня шумов измерений, основанный на анализе поведения частоты девиации в спектре мерцаний фазы трансionoсферного сигнала. Путем моделирования, а также анализа статистически значимого объема реальных измерений продемонстрирована его работоспособность.

3. Доказано, что измерения параметров навигационного сигнала с более высокой частотой регистрации позволяют более детально исследовать ионосферные неоднородности. Увеличение частоты (темпа) регистрации параметров сигнала навигационного спутника существенно расширяет диапазон изменения частоты девиации.

4. Установлено, что характеристики сигнала конкретного навигационного спутника влияют на значения частоты девиации: наблюдается

существенная разница в максимальных значениях частоты девиации, полученных по измерениям навигационных спутников при анализе разных сигнальных компонент.

Все основные результаты диссертации достаточно полно отражены в научных публикациях, а также прошли успешную апробацию на Всероссийских и Международных профильных научных конференциях.

3. Значимость полученных результатов для науки и производства

Теоретическая значимость полученных результатов заключается в том, что предложен новый метод обнаружения ионосферных неоднородностей малой интенсивности и масштабов вплоть до размеров первой зоны Френеля на границе уровня шумов измерений. Подобные неоднородности не всегда могут быть обнаружены традиционными методами и средствами ионосферного мониторинга. Данный теоретически значимый результат, основанный на использовании новейших достижений в технологиях ГНСС, как средства ионосферного мониторинга, открывает дополнительные возможности для повышения чувствительности и разрешающей способности методов и средств обнаружения опасных природных явлений (землетрясения, цунами) или несанкционированных мощных техногенных событий (взрывов, запусков ракет и пр.) по их ионосферному отклику.

Предложенная гибридная модель фазы несущей трансionoсферного сигнала может стать принципиально важным инструментом для обучения алгоритмов искусственного интеллекта с целью целевого поиска определенных классов ионосферных возмущений или ионосферных откликов на определенные типы воздействий.

Практическая ценность достигнутых результатов заключается в том, что разработанный метод может быть использован для повышения чувствительности и разрешающей способности систем мониторинга опасных природных явлений (землетрясений, цунами и т.д.) и мощных искусственных воздействий (запусков ракет, промышленных взрывов и т.д.), работающих на

основе анализа ионосферного отклика на указанные события.

4. Степень обоснованности и достоверности научных положений; выводов и заключения соискателя, сформулированных в диссертации

Достоверность результатов, полученных в диссертации, обусловлена использованием обоснованно выбранных методов теоретической радиофизики, хорошим согласованием между результатами моделирования и статистически значимым объемом экспериментальных данных. Полученные теоретические и экспериментальные результаты не противоречат известным положениям теории, результатам работ других авторов в аналогичных областях исследований.

Основное содержание положений диссертации, выносимых на защиту опубликовано в 16 работах, 3 из которых в научных издания, включенных в список ВАК или в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science (в том числе 2 статьи в журнале, входящем в квартиль Q1); 12 – в сборниках трудов конференций; получено одно свидетельство государственной регистрации программы ЭВМ.

5. Соответствие работы требованиям, предъявляемым к диссертациям

Рассмотренная диссертация Данильчук Е.И. представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Из приведенного выше следует, что тема диссертационной работы актуальна, полученные результаты обладают необходимой новизной, налицо их значимость для науки и практики. Сформулированные положения, выводы и заключения обоснованы и достоверны. Полученные результаты соответствуют поставленной цели.

Основное содержание диссертации, а также научные положения, вынесенные на защиту, достаточно полно отражены в опубликованных работах, известно научной общественности по соответствующим профилям исследований в России и за рубежом. Основные результаты работы

неоднократно обсуждались специалистами в рамках Всероссийских и Международных научных конференций и получили положительную оценку. Диссертация соответствует специальности 1.3.4 – Радиофизика (пункты 2, 4, 5 паспорта научной специальности).

7. Основные достоинства и недостатки по содержанию диссертации

Диссертационная работа Данильчук Е.И. выполнена на высоком профессиональном уровне. Полученные результаты обладают новизной и имеют теоретическое и практическое значение. Работа продолжает цикл исследований в области разработки методов теоретической радиофизики и прикладных экспериментальных методов для ионосферного мониторинга на основе радиозондирования с использованием сигналов космических аппаратов. Это научное направление успешно и уже много лет развивается на базе Иркутского государственного университета в сотрудничестве с Институтом солнечно-земной физики СО РАН (г. Иркутск).

Замечания и рекомендации. В целом диссертация выглядит и воспринимается как вполне законченное исследование, имеющее теоретическое и прикладное значение. Некоторые замечания, возникающие при обращении к диссертации, приведены ниже.

1. Обращает на себя внимание произвольное (т.е. не отвечающее сложившейся многолетней практике) использование терминологии. В частности, термин «девиация частоты» понимается в научном и практическом мирах как мера перестройки частоты в процессе угловой модуляции. Автор использует этот термин (с. 8, 88 и далее) для определения границы разделения информационной и шумовой части вариаций фазы несущего сигнала.

2. Использован термин «увеличение частоты регистрации» (с. 8). В информатике, радиотехнике и радиофизике этот параметр называют «частота выборки сигнала». К тому же увеличение частоты выборки с целью повышения точности измерения является обычным приемом, поэтому высокую частоту (темп) выборки трудно отнести к новизне.

повышения точности измерения является обычным приемом, поэтому высокую частоту (темп) выборок трудно отнести к новизне.

3. В диссертации ключевым моментом является применение сигналов ГНСС, что, в целом, не оригинально. Было бы интересно и продуктивно провести подобные исследования в каналах спутниковой связи с выработкой соответствующих рекомендаций пользователям. Тем более что автор в разделе 1.2 упоминает об этом.

8. Заключение

Отмеченные недостатки не имеют характера принципиальных возражений против основных положений работы, не снижают теоретической и практической значимости рассмотренной диссертации. Полученные результаты соответствуют поставленной цели. Основная роль в обработке экспериментальных данных и в разработке гибридной модели фазы трансionoсферного сигнала, а также в анализе и обобщении результатов принадлежит лично автору работы. Обсуждение и интерпретация полученных результатов проведена совместно с научным руководителем и соавторами публикаций. Автореферат отражает содержание диссертации. Диссертация соответствует научной специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Диссертационная работа Данильчук Екатерины Игоревны на тему «Метод индикации ионосферных неоднородностей по спектру вариаций фазы трансionoсферных сигналов с высокой частотой регистрации измерений» является законченной научно-квалификационной работой, обладающей признаками актуальности, научной новизны и значимости для теории и практики.

Представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а её автор Данильчук Екатерина Игоревна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Отзыв на диссертацию обсужден на заседании кафедры «Радиотехника» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет» (ФГАОУ ВО «СФУ»), протокол № 4 от 5 ноября 2024 г.

Саломатов Юрий Петрович, кандидат
технических наук
(специальность 2.2.14 – Антенны, СВЧ-
устройства и их технологии),
профессор, заведующий кафедрой
«Радиотехника»

e-mail: ysalomatov@sfu-kras.ru

тел. 8(391)291-29-67

Сержантов Алексей Михайлович,
доктор технических наук

(специальность 1.3.4 – Радиофизика),
профессор кафедры «Радиотехника»

e-mail: A.serzhantov@sfu-kras.ru

тел. 8(391)249-45-91

Ю.П. Саломатов

А.М. Сержантов

Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»; «СФУ».

Адрес: 656031, г. Красноярск, просп. Свободный, 79.

Тел. +7(931)244-86-25.

Адрес электронной почты: office@sfu-kras.ru