

Данильчук Екатерина Игоревна

**МЕТОД ИНДИКАЦИИ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПО
СПЕКТРУ ВАРИАЦИЙ ФАЗЫ ТРАНСИОНОСФЕРНЫХ СИГНАЛОВ С
ВЫСОКОЙ ЧАСТОТОЙ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ**

Специальность 1.3.4 – Радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ИГУ»).

Научный руководитель: **Демьянов Владислав Владимирович**,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Мальцева Ольга Алексеевна**,
доктор физико-математических наук, доцент,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет» (ФГАОУ ВО «ЮФУ»),
ведущий научный сотрудник отдела радиофизики и космических исследований Научно-исследовательского института физики ЮФУ

Когогин Денис Александрович,
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (ФГАОУ ВО КФУ),
доцент кафедры радиоэлектроники Института физики КФУ

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Защита диссертации состоится «24» декабря 2024 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 24.2.306.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет» по адресу: 664003, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет» и на сайте <https://isu.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор

Ю.В. Аграфонов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Ионосфера Земли на протяжении многих десятилетий была и остается актуальным объектом исследований. Большое внимание к изучению ионосферы обусловлено как чисто теоретическим интересом, так и прикладными вопросами. Ионосферные неоднородности различного масштаба являются причиной возникновения сбоев и искажений рабочих характеристик систем радиолокации, радионавигации и космической связи [1, 2]. Начиная с конца 1990-х годов, активно развиваются методы радиозондирования ионосферы на основе обработки и анализа измерений параметров сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [3].

В настоящее время сигналы ГНСС активно используются в различных системах мониторинга ионосферы как для изучения ее структуры, так для обнаружения различных событий по ионосферному отклику. Такими событиями могут быть как природные явления (землетрясения, цунами, извержения вулканов и т.д.), так и мощные техногенные воздействия (запуски ракет, мощные промышленные взрывы и т.д.).

В качестве основного параметра системы мониторинга ионосферы используют ряды полного электронного содержания (ПЭС) [4]. Недостатками измерений ПЭС и ионосферных индексов, основанных на нем (*ROTI*, *DROTI*, *AATR* и др.), являются:

1) недостаточная чувствительность. Так, в работе [5] было установлено, что доступные для обнаружения вариации ПЭС, вызванные землетрясениями, наблюдаются только при сильных землетрясениях с магнитудой более 6,5.

2) критическое влияние времени интегрирования, частоты дискретизации входных данных, процедуры удаления трендов и фильтрации временных рядов измерений [6], а также настроек навигационного приемника [7] на точность расчетов ионосферных индексов [8, 9].

В настоящее время становятся более доступными измерения параметров сигналов ГНСС с высокой частотой регистрации от 10 Гц и выше [10, 11]. Кроме того, современные возможности ГНСС позволяют использовать большой набор частот и сигнальных компонент для мониторинга ионосферы. Так, навигационные спутники нового поколения транслируют сигналы в трех частотных диапазонах: $L1 \approx 1575$ МГц, $L2 \approx 1227$ МГц, $L5 \approx 1176$ МГц. Кроме того, в каждом частотном диапазоне передаются квадратурные компоненты несущей, каждая из которых образует отдельную сигнальную компоненту, корреляционные свойства которой могут существенно различаться в сравнении с другими сигнальными компонентами [12, 13].

Таким образом, можно констатировать, что современный уровень развития ГНСС как инструмента ионосферного мониторинга значительно вырос. Однако эти технические возможности для исследования ионосферы, используются далеко не в полном объеме. Это связано, во-первых, с необходимостью обработки и хранения больших объемов измерений, во-

вторых, с недостаточным развитием методов и технологий обработки измерений параметров сигнала ГНСС с высокой частотой регистрации и с учетом обработки различных сигнальных компонент. Требуется и соответствующая модернизация общепринятой системы индексов состояния ионосферы с учетом новых технических возможностей аппаратуры ГНСС [14, 15].

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

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 параметров процедур фильтрации измерений; 3) корректно учитывать шумовые характеристики и параметры настроек навигационного приемника, как средства мониторинга ионосферы.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования в диссертации являются ионосферные неоднородности естественного и искусственного происхождения, а предметом исследования – методы обнаружения ионосферных неоднородностей на основе анализа измерений компонент фазы несущей сигналов навигационных спутников с высокой частотой регистрации.

Цель и задачи работы. Целью работы является 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 решались следующие **задачи**:

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.

Методы исследования. Исследования, выполненные в диссертации, получены на основе анализа измерений фазы несущей сигналов навигационных спутников GPS, ГЛОНАСС, Galileo

и BeiDou. При моделировании фазы несущей трансionoсферных сигналов использовались теория возмущений и приближение геометрической оптики. Анализ экспериментальных данных включает в себя удаление тренда с помощью фильтра Баттерворта и полиномиальной аппроксимации, использование быстрого преобразования Фурье для построения спектров вариаций фазы несущей.

Научная новизна:

1) Впервые предложен метод индикации ионосферных неоднородностей на границе уровня шумов измерений на основе анализа спектра вариаций фазы несущей сигналов навигационных спутников с высокой частотой регистрации;

2) Впервые показано, что граница между наклонной частью спектра вариаций фазы трансionoсферного сигнала и его шумовой частью – частота девиации – смещается в сторону более высоких частот, вплоть до частоты Найквиста, в условиях геомагнитных возмущений. Это говорит о возможности использовать частоту девиации, как индикатор присутствия в ионосфере неоднородностей на границе уровня шумов.

Практическая значимость. 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.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новый метод индикации ионосферных неоднородностей на границе уровня шумов измерений, основанный на наблюдаемом смещении частоты девиации в спектре вариаций фазы сигналов навигационных спутников;

2. Методика мониторинга мелкомасштабных (в т.ч. френелевских) ионосферных неоднородностей на границе уровня шумов на основе анализа фазы несущей сигналов навигационных спутников с высокой частотой регистрации измерений;

3. Модель фазы несущей сигнала навигационного спутника, которая позволяет выполнить отдельный анализ эффектов вариаций фазы, возникающих вследствие влияния перемещающихся ионосферных возмущений различного масштаба, мелкомасштабных (в т.ч. френелевских) неоднородностей и шумов измерений в приемнике;

4. Результаты экспериментальной оценки поведения частоты девиации, как индикатора мелкомасштабных ионосферных неоднородностей на границе уровня шумов, которые показывают, что наблюдается устойчивый сдвиг частоты девиации в область более высоких частот, вплоть до частоты Найквиста, в условиях геомагнитной бури.

Достоверность полученных результатов. Достоверность результатов, полученных в диссертации, обусловлена использованием обоснованных методов моделирования и статистикой экспериментальных данных. Полученные результаты моделирования не противоречат работам других авторов и согласуются с экспериментальными результатами.

Личный вклад автора. Основные результаты работы получены либо самим автором, либо при его участии. Автор принимал участие в разработке модели фазы несущей трансферных сигналов и ее тестировании. Автору принадлежит обработка экспериментальных оценок, подтверждающих работоспособность предложенного метода. Анализ и интерпретация полученных результатов осуществлялись совместно с научным руководителем.

Апробация работы. Основные результаты и выводы, приведенные в диссертационной работе, докладывались на следующих научных мероприятиях: XXVII Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн», 28 июня – 03 июля 2021 г., г. Калининград; XIX международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 15-19 ноября 2021 г., г. Москва; XVII ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», 07-11 февраля 2022 г., г. Москва; Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде» и XVII Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», 05-10 сентября 2022 г., г. Иркутск; XX международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 14-18 ноября 2022 г., г. Москва; XXVIII Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн», 16-19 мая 2023 г., г. Йошкар-Ола; XXI международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 13-17 ноября 2023 г., г. Москва; AGU Fall Meeting, AGU2023, 11-15 December 2023, San Francisco, USA; AOGS2024, 21st Annual Meeting, 23-28 June 2024, Pyeongchang, South Korea; XXX Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», 01-05 июля 2024 г., г. Санкт-Петербург; Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде» и XVIII Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», 01-07 сентября 2024 г., г. Иркутск; Научные семинары кафедры радиофизики и радиоэлектроники физического факультета Иркутского государственного университета, а также Ежегодные научные семинары «Радиозондирование ионосферы», посвященные памяти профессора Э.Л. Афраймовича (Институт солнечно-земной физики СО РАН).

Публикации. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 16 работах, 3 из которых в научных изданиях, включенных в список ВАК или в международные реферативные базы данных Scopus и Web of Science (в том числе 2 статьи в журнале, входящем в первый

квартиль Q1), 12 – в сборниках трудов конференций; получено одно свидетельство государственной регистрации программы ЭВМ.

Структура и объем диссертации. 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.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **главе 1** описано современное техническое состояние глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и проанализированы их новейшие возможности, как инструмента прямого радиозондирования ионосферы. В **разделе 1.1** дано краткое описание ионосферы как среды распространения радиосигналов. Приведена классификация перемещающихся ионосферных возмущений на основе их пространственно-временного масштаба. Дан краткий обзор основных классических радиофизических методов исследования ионосферы. В **разделе 1.2** рассматривается трансionoсферное зондирование как один из перспективных способов диагностики ионосферы. В частности, приведены возможности использования трансionoсферного зондирования для мониторинга ионосферы с использованием сигналов искусственных спутников Земли. В **разделе 1.3** описаны возможности применения измерений параметров сигналов ГНСС с высокой частотой регистрации для мониторинга ионосферы. В **подразделе 1.3.1** даны основные характеристики современных ГНСС: GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou. В **подразделе 1.3.2** представлены основные индикаторы для диагностики ионосферы с использованием измерений навигационных спутников: полное электронное содержание (ПЭС) [4], индексы, основанные на ПЭС [14], и специальные индексы ионосферных мерцаний [16, 17]. Индикаторами состояния ионосферы также могут служить области или характерные точки на спектре вариаций фазы несущей. Одной из таких характеристик является *частота девиации* (fd) [10], которая обозначает границу разделения информативной части спектра, в которой можно выделить ионосферные возмущения, и области неинформативных шумов измерений. Значение частоты девиации определяется как точка на спектрах вариаций фазы несущей сигнала навигационного спутника, в которой спектральный наклон изменяется от отрицательного наклона до практически нулевого. Порог чувствительности ГНСС-зондирования в данном случае соответствует началу шумовой части спектра, где не может быть обнаружено

ионосферных возмущений. Данный порог соответствует конкретному значению частоты девиации (рисунок 1).

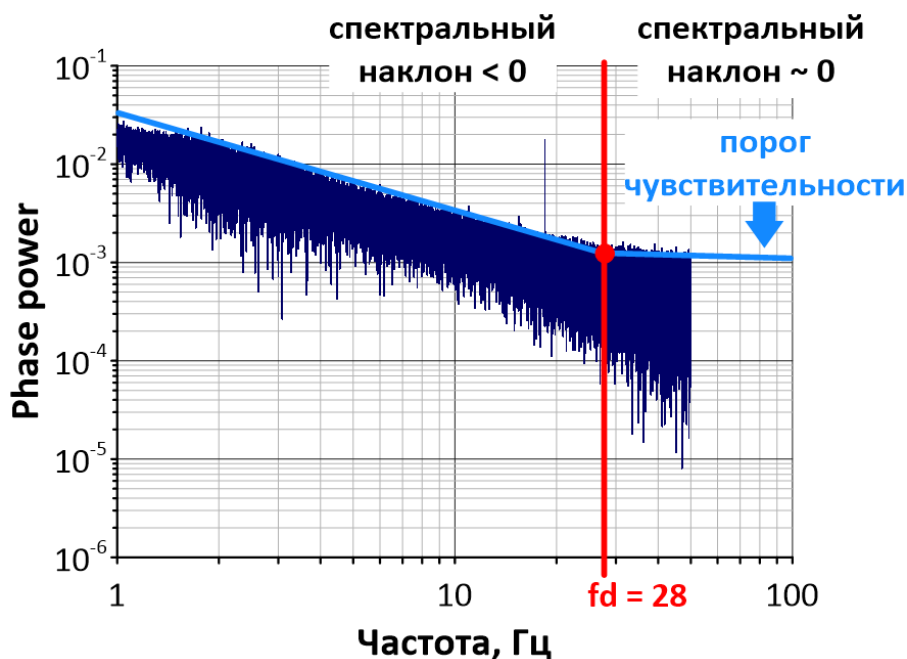


Рисунок 1 – Частота девиации на спектре вариаций фазы несущей

В подразделе 1.3.3 описаны современные возможности диагностики ионосферы по сигналам ГНСС, такие как измерения параметров навигационных сигналов с высокой частотой регистрации измерений [10, 11] и большой набор частот и сигнальных компонент [12, 13].

В Главе 2 представлена методика исследований ионосферных возмущений на границе уровня шумов по данным измерений фазы несущей сигналов навигационных спутников с высокой частотой регистрации, а также разработанная многокомпонентная модель фазы несущей трансionoсферного сигнала.

В разделе 2.1 проанализирован полный состав измерений фазы несущей, выделены факторы, влияющие на поведение фазы несущей навигационного сигнала. В общем виде фазу несущей можно представить следующим выражением [18]

$$\begin{aligned} \Phi_i^k(t) = \lambda \cdot \varphi_i^k(t) = \rho_i^k(t, t - \tau_i^k) - I_i^k + T_i^k + \delta m_i^k + c \left(dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k) \right) + \\ + c \left(\delta_i(t) + \delta^k(t - \tau_i^k) \right) + \lambda \left(\varphi_i(t_0) - \varphi^k(t_0) \right) + \lambda N_i^k + \varepsilon_i^k, \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ_i^k – геометрическое расстояние между передающей антенной на спутнике и антенной в пункте приема; T_i^k – тропосферная задержка; I_i^k – задержка при распространении сигнала в ионосфере; δm_i^k – ошибки, возникающие из-за влияния многолучевости; $c \left(dt_i(t) + dt^k(t - \tau_i^k) \right)$

– поправки часов спутника и приемника; $c \left(\delta_i(t) + \delta^k(t - \tau_i^k) \right)$ – запаздывание в спутниковой и приемной аппаратуре; λN_i^k – фазовая неоднозначность; ε_i^k – фазовый шум измерений.

Выражение (1) послужило методической основой для построения многокомпонентная модель фазы несущей трансionoсферного сигнала.

В разделе 2.2 описаны ограничения, возникающие при использовании фазы несущей сигнала навигационного спутника при мониторинге ионосферы. К ограничениям можно отнести частоту регистрации параметров навигационных сигналов, шумы измерений фазы несущей в зависимости от приемного оборудования и рабочей частоты, а также выбор процедур и параметров фильтрации при обработке фазовых измерений с высокой частотой регистрации.

В разделе 2.3 приведен алгоритм обработки фазовых измерений с высокой частотой регистрации. Приведенный алгоритм может использоваться для оценки характеристик ионосферных мерцаний при расчетах индексов мерцаний и для выделения характерных точек и областей на спектрах вариаций фазы несущей навигационного сигнала. Для корректной работы алгоритма необходимо предварительно подготовить измерения фазы несущей сигналов навигационных спутников с заданной частотой регистрации $f_{\text{рег}}$:

1. разбить ряды измерений фазы несущей навигационного спутника на интервалы длительностью 1 час.
2. исключить данные тех спутников, углы возвышения которых менее 30 градусов, а также данные тех спутников, которые транслировали сигнал менее часа.
3. исключить аномальные измерения, которые соответствуют выбросам и срывам сопровождения фазы.

После предварительной обработки данных:

- 1) рассчитывается вторая производная фазы [17], которая используется для выделения шумов измерений фазы несущей – ε_i^k (блок оценки шумов измерений);
- 2) данные фильтруются для анализа спектров вариаций фазы и расчета ионосферных индексов мерцаний (блок оценки ионосферных параметров). В алгоритме для фильтрации фазовых измерений предлагается использовать фильтр Баттерворта 6-го порядка [15], для построения спектров вариаций фазы – быстрое преобразование Фурье.

В разделе 2.4 представлена разработанная модель фазы несущей трансionoсферного сигнала с заданной частотой регистрации измерений. В процессе моделирования полную фазу несущей сигнала φ , диэлектрическую проницаемость среды распространения сигнала ε и траекторию распространения сигнала S можно представить в виде суммы регулярной (невозмущенной) составляющей и возмущений малой интенсивности: $\varepsilon = \varepsilon_0 + \tilde{\varepsilon}_1$; $\varphi = \varphi_0 + \varphi_{FR}$; $S = S_0 + \tilde{S}_1$, где $\varepsilon_0, \varphi_0, S_0$ – регулярные медленно меняющиеся

составляющие диэлектрической проницаемости, фазы несущей и траектории распространения сигнала; $\tilde{\varepsilon}_1, \varphi_{FR}, \tilde{S}_1$ – малые возмущения этих параметров, для которых справедливо $|\tilde{\varepsilon}_1| \ll \varepsilon_0, |\varphi_{FR}| \ll \varphi_0, |\tilde{S}_1| \ll S_0$. Часть полной модели фазы, обеспечивающая формирование мерцаний фазы в неоднородном ионосферном слое, основана на теории возмущений [19].

В общем виде выражение для модели фазы несущей сигнала навигационного спутника может быть представлено в виде суммы нескольких компонент:

$$\varphi = \varphi_{SAT} + \varphi_{IONO} + \varphi_{LS} + \varphi_{MS} + \varphi_{ITD} + \varphi_{FR} + \varphi_N, \quad (2)$$

где φ_{SAT} – регулярный набег фазы за счет движения спутника; φ_{IONO} – рефракционное приращение фазы в регулярном ионосферном слое; $\varphi_{LS}, \varphi_{MS}$ и φ_{ITD} – волновые рефракционные вариации фазы, вызванные перемещающимися ионосферными возмущениями (ПИВ) крупного (КМ ПИВ), среднего (СМ ПИВ) и промежуточного (ПМ ПИВ) масштабов; φ_{FR} – вариации фазы, вызванные мелкомасштабными (в т.ч. френелевскими) неоднородностями; φ_N – шумовые флуктуации фазы в приемнике.

При моделировании используется приближение геометрической оптики, согласно которому размеры неоднородностей ограничены выражением $\sqrt{\lambda z} \ll l_\varepsilon$, где λ – длина волны на рабочей частоте; z – эффективное расстояние до слоя, содержащего неоднородности; l_ε – пространственный размер неоднородностей [19]. Таким образом, минимальный пространственный масштаб неоднородностей ограничен масштабом первой зоны Френеля, который равен 300-400 м для частот навигационных спутников.

Регулярный набег фазы несущей связан с видимым движением спутника и может быть рассчитан как [20]:

$$\varphi_{SAT} = 2\pi f \frac{R}{c}, \quad (3)$$

где f – несущая частота сигнала; $R = \sqrt{(R_z + r_s)^2 - R_z^2 \cos^2(el)} - R_z \sin(el)$, – радиус-вектор от приемника до спутника на орбите; $R_z = 6,371 * 10^6$ м – радиус Земли; r_s – высота спутника над поверхностью Земли; el – угол возвышения спутника в точке наблюдения.

Фазовое приращение в регулярном ионосферном слое без учета ПИВ и мелкомасштабных (в т.ч. френелевских) неоднородностей можно рассчитать с помощью моделей ионосферной коррекции, которые позволяют реконструировать величину ПЭС вдоль траектории сигнала с учетом локального времени, геомагнитных координат и фоновых геомагнитных условий. При моделировании в настоящей работе использовалась модель Клобучара [21]. Приращение фазы несущей в регулярном ионосферном слое определяется следующей формулой:

$$\varphi_{IONO} = 2\pi f T_{ion}, \quad (4)$$

где T_{ion} – временная ионосферная задержка распространения сигнала в ионосферном слое, рассчитанная по модели Клобучара [21].

Компоненты φ_{LS} , φ_{MS} , φ_{ITD} в составе многокомпонентной модели (2) пропорциональны возмущениям ПЭС крупного, среднего и промежуточного масштабов. Рефракционные волновые вариации фазы, вызванные КМ ПИВ, можно представить, как суперпозицию нескольких гармонических колебаний с близкими частотами, амплитудами и фазами следующего вида:

$$\varphi_{LS,k} = -\frac{\pi \cdot 80.8}{c \cdot f_k} \cdot \Delta I_{LS} = -\frac{\pi \cdot 80.8}{c \cdot f_k} \cdot \sum_{i=1}^3 A_i \cos(\omega_i \cdot t - \varphi_i), \quad (5)$$

где $F = 1,0 + 16,0 \times (0,53 - el)^3$ – фактор наклона лучевой траектории в ионосферном слое; el – угол возвышения спутника (в полуциклах); A_i – относительная амплитуда волны возмущения ПЭС; $\omega_i = 2\pi \cdot f_i = 2\pi \cdot V_i/\lambda_i$ – циклическая частота волны возмущения ПЭС; V_i – радиальная скорость распространения волны; λ_i – длина волны; φ_i – начальная фаза волны.

Рефракционные волновые вариации фазы, вызванные СМ ПИВ и ПМ ПИВ, моделируются аналогичным образом, но характерный формо-временной вид ПИВ данных классов имеет форму затухающего радиоимпульса, который наилучшим образом описывается суммой функций вида $\cos x/x$ с близкими значениями амплитуды, частоты и начальной фазы

$$\varphi_{MS(ITD),k} = -\frac{\pi \cdot 80.8}{c \cdot f_k} \cdot \Delta I_{MS(ITD)} = -\frac{\pi \cdot 80.8}{c \cdot f_k} \cdot \sum_{i=1}^3 A_i \frac{\cos(\omega_i \cdot t - \varphi_i)}{(\omega_i \cdot t - \varphi_i)} \quad (6)$$

При моделировании рефракционных вариаций фазы, вызванных мелкомасштабными неоднородностями, ионосфера представляется в виде плоского слоя определенной толщиной l_m , зафиксированного в интервале высот z_H и z_B . В общем случае выражение для расчета вариаций фазы сигнала, прошедшего через слой неоднородностей, имеет вид

$$\varphi_{FR} = \frac{k}{2} \int_0^{x_{исз}} \tilde{\varepsilon}_1 \frac{dx}{\cos(el)}. \quad (7)$$

где $x_{исз}$ – проекция месторасположения спутника на ось x ; el – угол возвышения спутника.

Модель флуктуации диэлектрической проницаемости $\tilde{\varepsilon}_1$ можно представить как поле гауссовых неоднородностей, случайно расположенных во всем ионосферном слое и движущихся с постоянной скоростью [22]:

$$\tilde{\varepsilon}_1 = -(1 - \varepsilon_0) \sum_i \sigma_i \exp\left\{-\left(\frac{x - x_{0i}}{l_{x_i}}\right)^2\right\} \exp\left\{-\left(\frac{z - z_{0i}}{l_{z_i}}\right)^2\right\}, \quad (8)$$

где $\varepsilon_0 = 1 - \frac{f_{кр}^2}{f^2} \exp\left\{-\left(\frac{z - z_m}{l_m}\right)^2\right\}$ – диэлектрическая проницаемость невозмущенной среды; $f_{кр}$ – критическая частота ионосферного слоя F2; z_m – высота максимума электронной концентрации в ионосферном слое F2; l_m – толщина слоя F2; σ_i – относительная интенсивность i -ой неоднородности; l_{x_i}, l_{z_i} – масштабы i -ой неоднородности по осям x и z ; x_{0i}, z_{0i} – координаты центра i -ой неоднородности.

Пределы интегрирования в выражении (7) с учетом того, что неоднородности расположены только в ионосферном слое, можно сократить до границ ионосферного слоя $[x_H, x_B]$, где x_H и x_B – проекции нижней и верхней границ ионосферы на ось x . В выражении для ε_0 функция $\exp\left\{-\left(\frac{z-z_m}{l_m}\right)^2\right\}$ является медленной по сравнению с другими функциями выражения (8) на интересующем нас интервале наблюдения, поэтому согласно теореме о среднем, может быть вынесена за знак интеграла в точке z_{0i} , что дает

$$\varphi_{FR} = -\frac{k}{2 \cos(el)} \frac{f_{кр}^2}{f^2} \sum_i \sigma_i \exp\left\{-\left(\frac{z_{0i} - z_m}{l_m}\right)^2\right\} * \int_{x_H}^{x_B} \exp\left\{-\left(\frac{x - x_{0i}}{l_{x_i}}\right)^2\right\} \exp\left\{-\left(\frac{xtg(el) - z_{0i}}{l_{z_i}}\right)^2\right\} dx. \quad (9)$$

При моделировании учитываются только те ионосферные неоднородности, которые оказывают влияние на вариации фазы несущей трансionoсферного сигнала. Поскольку мелкомасштабные неоднородности действуют в течение ограниченных интервалов времени, в модели предусмотрена возможность задания времени «включения» и «выключения» неоднородностей, периодичности и продолжительности их действия. Таким образом, общий вид модели рефракционных вариаций фазы с учетом функции «включения» примет вид

$$\varphi_{FR}(t) = \varphi_{FR} \cdot VKL(t), \quad (10)$$

где $VKL(t) = \sin\left(\frac{\omega t}{180}\right) - \frac{1}{9} \sin\left(3 \frac{\omega t}{180}\right) + \frac{1}{25} \sin\left(5 \frac{\omega t}{180}\right) - \frac{1}{49} \sin\left(7 \frac{\omega t}{180}\right) + \frac{1}{81} \sin\left(9 \frac{\omega t}{180}\right)$ – периодическая треугольная функция; ω – образующая частота функции включений.

Шумы измерений приемника φ_N включены в модель фазы (2), как центрированный белый гауссовский шум, СКО которого определяется следующим образом [23]:

$$\sigma_{PLL} = \sqrt{\sigma_{tn}^2 + \sigma_v^2 + \theta_a^2} = \sqrt{\frac{B_n}{C/N_0} \cdot \left(1 + \frac{1}{2 \cdot dT \cdot C/N_0}\right) + (f \cdot S_v)^2 \frac{2\pi P_{int}}{4,8B_n} + \left(\frac{160}{180} \cdot \pi \cdot \frac{\sigma_\tau \cdot f}{B_n}\right)^2}, \quad (11)$$

где σ_{tn} – СКО теплового шума; σ_v – СКО шумов, вызванных механическими вибрациями; θ_a – дисперсия Аллана, обусловленная кратковременной нестабильностью частоты опорного генератора приемника; B_n – полоса пропускания сглаживающего фильтра следящего измерителя фазы; C/N_0 – отношение сигнал/шум на входе измерителя на соответствующей несущей частоте сигнала f ; dT – время накопления в корреляторе следящего измерителя фазы; S_v – параметр чувствительности опорного генератора приемника к вибрации; P_{int} – интегральная мощность вибраций приемника; σ_τ – СКО кратковременной нестабильности частоты опорного генератора приемника.

СКО в выражении (11) определяется тепловыми шумами радиотракта приемника через отношение сигнал/шум [24]:

$$C/N_0 = P_{rec} + G_A - N_T - L_{tr} - L_{dg}, \quad (12)$$

где P_{rec} – мощность сигнала в точке приема; G_A – коэффициент усиления антенны; N_T – спектральная плотность мощности тепловых шумов приемника; L_{tr} – потери мощности в кабеле и поляризационные потери; L_{dg} – потери на квантование сигнала.

Используя выражения (11) и (12) в модели (2) можно задавать необходимые шумовые параметры радиотракта приемника и контура слежения за фазой несущей.

В разделе 2.5 на основе модели фазы (2) представлены результаты предварительной настройки процедур обработки измерений фазы и расчёта индексов ионосферных мерцаний, а также расчетов процедур выделения характерных точек и областей на спектре вариаций фазы несущей трансionoсферного сигнала. В частности, рассмотрено влияние настроек параметров процедур обработки фазовых измерений, таких как частота среза фильтра Баттерворта, степень полинома при удалении фазовой неоднозначности и тренда измерений, время усреднения при вычислении скинтилляционных индексов, а также зависимость частоты девиации от параметров мелкомасштабных неоднородностей. Установлено, что некорректно выбранные параметры процедур обработки измерений фазы несущей сигнала навигационного спутника могут привести к искажению результатов.

В Главе 3 описан метод индикации (присутствия) ионосферных неоднородностей на границе уровня шумов измерений, основанный на анализе спектров вариаций фазы несущей навигационного сигнала, приведены экспериментальные результаты работоспособности метода, а также результаты моделирования. Для описания метода индикации ионосферных неоднородностей на основе поведения частоты девиации на спектре вариаций фазы несущей рассмотрено два случая:

1) спектр вариаций фазы состоит только из неоднородностей, частоты которых не превышают 10 Гц (рисунок 2а), при этом более высокочастотные неоднородности отсутствуют. В таком случае частота девиации не изменяется или меняется незначительно, однозначно определяется и ограничена частотой этих неоднородностей;

2) спектр вариаций фазы, кроме неоднородностей с частотами менее 10 Гц, содержит также неоднородности с более высокими частотами, причем такие неоднородности могут быть как соизмеримы с уровнем шумов измерений, так и меньше уровня шума (рисунок 2б).

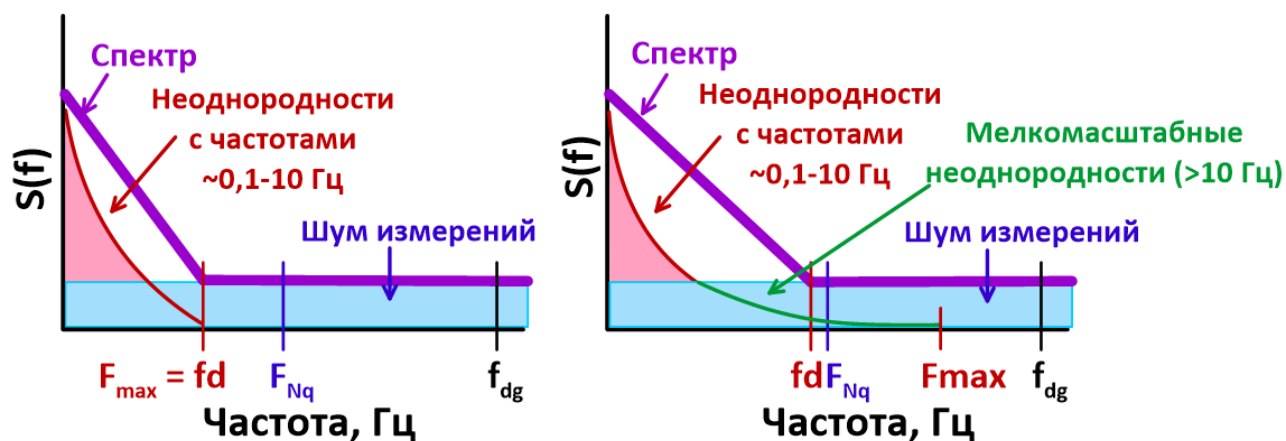


Рисунок 2 – Схематическое описание метода индикации ионосферных неоднородностей по спектру вариаций фазы несущей

Мелкомасштабные неоднородности во втором случае (рисунок 2б) могут приводить к дифракции, а также рассеянию радиоволн. Оба этих явления вносят свой вклад в результирующий спектр вариаций фазы несущей трансionoсферного сигнала. Кроме того, такие мелкомасштабные неоднородности могут вызывать эффект наложения спектров, так как частоты регистрации параметров навигационного сигнала может быть недостаточно для надежного разделения всех ионосферных неоднородностей. В свою очередь эффект наложения влияет на поведение частоты девиации на спектрах вариации фазы, сдвигая ее значение ближе к частоте Найквиста. Следовательно, если на спектрах вариаций фазы несущей навигационного сигнала наблюдаются вариации значений частоты девиации вблизи частоты Найквиста, то по такому поведению частоты девиации можно судить о том, что в измерениях, а значит и в самой ионосфере, присутствуют мелкомасштабные неоднородности на границе уровня шумов и даже ниже. Таким образом, смещение частоты девиации на спектрах вариаций фазы несущей в область более высоких частот можно рассматривать как индикатор присутствия ионосферных неоднородностей, которые соизмеримы с уровнем шумов измерений и которые по прямым измерениям параметров сигнала и с применением известных индексов состояния ионосферы обнаружить не всегда возможно [25].

В разделах 3.1 и 3.2 приведена апробация предложенного метода индикации ионосферных неоднородностей по измерениям реальных спутников и по данным моделирования. Результаты апробации подтверждают работоспособность предложенного способа.

В Главе 4 представлены экспериментальные оценки частоты девиации на основе измерений фазы несущей сигналов навигационных спутников GPS, ГЛОНАСС, Galileo. Измерения фазы несущей проводились с помощью навигационных приемников двух типов: Javad Delta-G3T и Septentrio PollaRx5, которые расположены в г. Иркутск (52,24 с.ш., 104,26 в.д.) и является частью сети SibNet [26]. Оба приемника подключены через антенный переключатель к

одной антенне RingAnt-G3T и позволяют принимать и обрабатывать различные компоненты сигналов ГНСС в трех частотных диапазонах: L1, L2 и L5. При этом Javad Delta-G3T позволяет записывать измерения параметров навигационных сигналов с частотой регистрации 50 Гц, а приемник Septentrio PollaRx5 – с частотами 50 и 100 Гц.

Для оценки зависимости поведения частоты девиации в различных геомагнитных условиях были выбраны три слабые геомагнитные бури, которые произошли 16 апреля 2021 года, 10 апреля 2022 года и 4 сентября 2022 года. В качестве опорных (фоновых) дней были выбраны 13 апреля 2021 года, 8 апреля 2022 года и 2 сентября 2022 года, соответственно. Интенсивность рассмотренных при исследовании геомагнитных бурь была слабой, что предполагает появление слабых ионосферных возмущений, регистрируемых на границе уровня шумов. Полученные результаты обобщены в виде гистограмм распределения частоты девиации, обобщенных за весь исследуемый день.

В разделе 4.1 на основе обработки большого объема измерений продемонстрированы факты влияния частоты регистрации измерений на поведение частоты девиации. Установлено, что увеличение частоты регистрации, в связи с увеличением частоты Найквиста, расширяет и доступный диапазон вариаций частоты девиации. Кроме того, независимо от созвездия спутников ГНСС для измерений с частотой регистрации 100 Гц наблюдается три диапазона доминирующих значений частоты девиации: 16-20 Гц, 24-28 Гц и 34-42 Гц (рисунок 3б). При этом вероятность наблюдения частоты девиации в диапазоне 34-42 Гц выше. По данным с частотой регистрации 50 Гц наблюдается узкий диапазон доминирующих частот 17-23 Гц (рисунок 3а). Это означает, что более высокая частота регистрации параметров сигнала навигационного спутника позволяет обнаружить более слабые мелкомасштабные ионосферные неоднородности на спектрах вариации фазы несущей сигнала навигационного спутника.

В разделе 4.2 приведены результаты распределения частоты девиации в зависимости от геомагнитных условий наблюдений. Вне зависимости от частоты регистрации параметров сигналов навигационных спутников наблюдаются более высокие значения частоты девиации во время геомагнитной бури. При анализе данных с частотой регистрации 100 Гц максимальные значения частоты девиации равны ~40-41 Гц (рисунок 3б) в спокойных условиях и ~41-47 Гц (рисунок 3г) во время слабой геомагнитной бури. Одной из особенностей поведения частоты девиации во время геомагнитной бури является практически полное отсутствие значений в диапазоне ~18-22 Гц (рисунок 3г). Таким образом, во время слабой геомагнитной бури диапазон наблюдаемых значений частоты девиации смещается в область более высоких частот вплоть до частоты Найквиста.

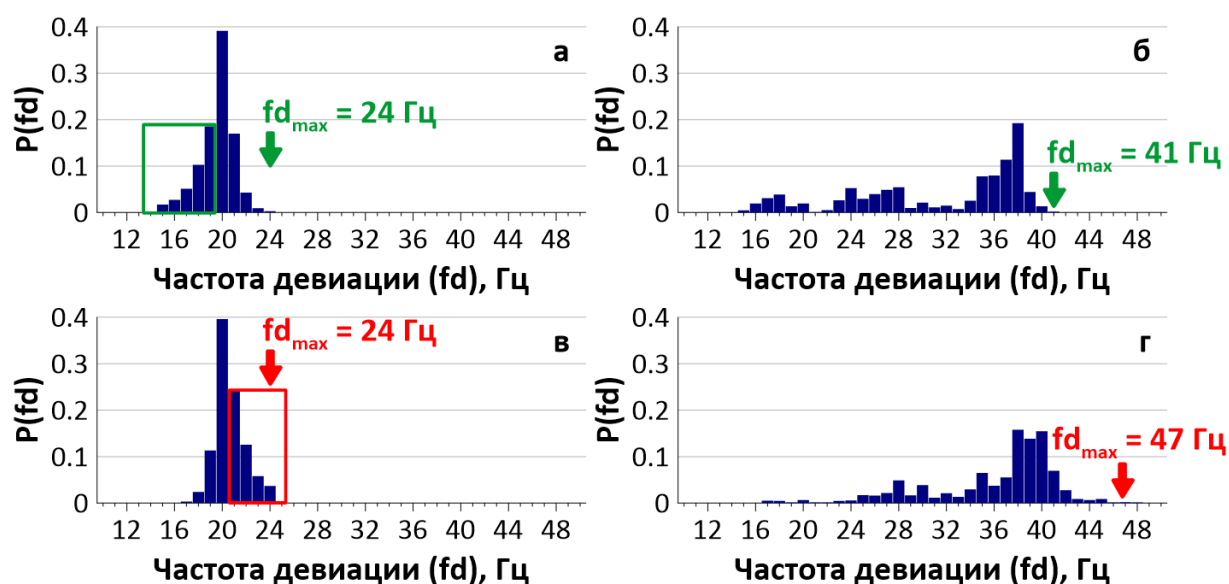


Рисунок 3 – Распределение частоты девиации по измерениям с частотой регистрации 50 Гц (а, в) и 100 Гц (б, г) в спокойных условиях (а, б) и во время геомагнитной бури (в, г)

Аналогичная, но менее выраженная реакция на геомагнитное возмущение наблюдается при анализе данных с частотой регистрации 50 Гц. При этом максимально возможное наблюдаемое значение частоты девиации, равное 24 Гц, не зависит от геомагнитных условий. По данным с частотой регистрации 50 Гц можно выделить наиболее вероятное значение частоты девиации 20 Гц, которое наблюдается как в спокойных условиях (рисунок 3а), так и в условиях слабого геомагнитного возмущения (рисунок 3в). При этом во время геомагнитного возмущения меняется форма гистограммы распределения: вероятность наблюдения значений частоты девиации в диапазоне 21-24 Гц возрастает.

Оба рассмотренных случая позволяют сделать вывод, что значения частоты девиации вне зависимости от частоты регистрации измерений реагируют на геомагнитную бурю. При этом во время геомагнитной бури наблюдается смещение значений частоты девиации в сторону более высоких частот независимо от частоты регистрации измерений. Данный факт позволяет рассматривать увеличение значений частоты девиации как индикатор обнаружения ионосферных возмущений на границе уровня шумов при анализе измерений с высокой частотой регистрации.

В разделе 4.3 приведен анализ вариаций частоты девиации для отдельных сигнальных компонент ГНСС. Установлено, 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.

Компоненты сигнала по-разному реагируют на геомагнитную бурю. Данное различие более выражено для данных с частотой регистрации 100 Гц. На рисунке 4 представлен пример

существенной разницы в максимальных значениях частоты девиации для двух сигнальных компонент системы GPS при одинаковых условиях. В частотности, максимально наблюдаемые значения частоты девиации могут меняться как не существенно в разных условиях (для сигнальной компоненты L5Q $fd = 41$ Гц в спокойных условиях и $fd = 42$ Гц во время геомагнитной бури), так и существенно (для сигнальной компоненты L2L $fd = 40$ Гц в спокойных условиях и $fd = 47$ Гц во время возмущения).

Таким образом, во время геомагнитного возмущения максимально наблюдаемые значения частоты девиации увеличиваются независимо от характеристик сигнальных компонент. Наблюдается более высокая чувствительность обнаружения ионосферных неоднородностей для отдельных сигнальных компонент.

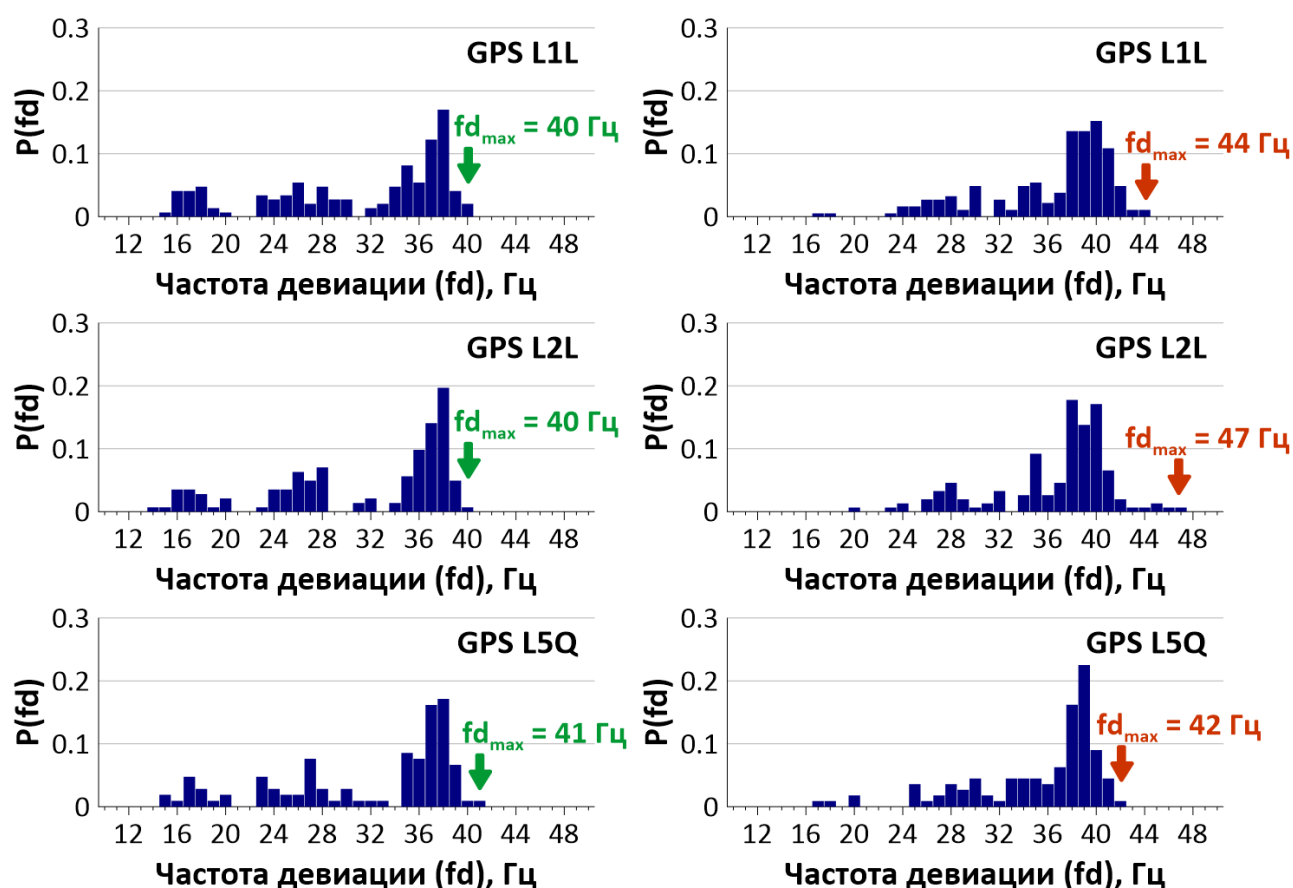


Рисунок 4 – Распределение частоты девиации для сигнальных компонент системы GPS по данным приемника Septentrio с частотой регистрации 100 Гц

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационного исследования:

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 шумов измерений в навигационном приемнике, а также для предварительной настройки параметров процедур

фильтрации измерений и удаления трендов измерений фазы на выходе навигационного приемника и для анализа спектров вариаций фазы несущей сигнала навигационного спутника.

2. Предложен метод индикации ионосферных неоднородностей на границе уровня шумов измерений, основанный на анализе поведения частоты девиации в спектре мерцаний фазы трансionoсферного сигнала. Продемонстрировано, что при достаточной частоте регистрации измерений (50 Гц и выше) обнаруживается сдвиг частоты девиации в область высоких частот, что позволяет говорить о наличии в спектре ионосферных мелкомасштабных (в т.ч. френелевских) неоднородностей и использовать поведение частоты девиации как индикатора присутствия ионосферных неоднородностей в измерениях.

3. Получены результаты экспериментальной оценки поведения частоты девиации, как индикатора мелкомасштабных ионосферных неоднородностей на границе уровня шумов, которые показывают, что наблюдается устойчивый сдвиг частоты девиации в область более высоких частот, вплоть до частоты Найквиста, в условиях геомагнитной бури. Для измерений фазы несущей сигнала навигационного спутника с частотой регистрации 100 Гц наиболее вероятные значения частоты девиации сгруппированы в пределах 35-41 Гц в спокойных условиях и в пределах 38-47 Гц в возмущенных условиях.

4. Измерения параметров навигационного сигнала с более высокой частотой регистрации позволяют более детально исследовать ионосферные неоднородности. Увеличение частоты регистрации параметров сигнала навигационного спутника существенно расширяет диапазон изменения частоты девиации: для измерений фазы несущей с частотой регистрации 50 Гц значения частоты девиации находятся в пределах 15-24 Гц, а для измерений с частотой регистрации 100 Гц – в пределах 18-47 Гц.

5. 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. Во время геомагнитной бури максимальное значение частоты девиации равно 47 Гц для сигнальной компоненты L2L спутника GPS, а для сигнальной компоненты L5Q – 42 Гц.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах Q1, индексируемых Web of Science или Scopus:

1. Demyanov V. Experimental Estimation of Deviation Frequency within the Spectrum of Scintillations of the Carrier Phase of GNSS Signals / V. Demyanov, E. Danilchuk, Y. Yasyukevich, M. Sergeeva // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13. – P. 5017. – DOI: 10.3390/rs13245017.

2. Demyanov V. An Increase of GNSS Data Time Rate and Analysis of the Carrier Phase Spectrum / V. Demyanov, E. Danilchuk, M. Sergeeva, Y. Yasyukevich // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15. – P. 792. – DOI: 10.3390/rs15030792.

Статьи в журналах из списка ВАК:

3. Данильчук Е.И. Частота девиации в спектре мерцаний фазы несущей трансферных сигналов / Е.И. Данильчук, В.В. Демьянов // Известия вузов. Радиофизика. – 2021. – Т. LXIV, №8-9. – С. 635-643. – DOI: 10.52452/00213462_2021_64_08_635.

Иные публикации, в том числе в сборниках трудов конференций:

4. Данильчук Е.И. Эмпирическая модель фазы несущей сигнала навигационного спутника для методических исследований процедур обработки фазовых измерений / Е.И. Данильчук, В.В. Демьянов // System Analysis & Mathematical Modeling. – 2021. – Т. 3, № 1. – С. 26–37.

5. Данильчук Е.И. Оценка частоты девиации в спектре мерцаний фазы с помощью аналитической модели / Е.И. Данильчук, В.В. Демьянов // Климатические риски и космическая погода: материалы международной конференции. – 2021. – С. 247-253.

6. Данильчук Е.И. Оценка частоты девиации в спектре мерцаний фазы несущей трансферных сигналов / Е.И. Данильчук, В.В. Демьянов // Распространение радиоволн: труды XXVII Всероссийской научной конференции [Электронный ресурс]. – 2021. – С. 654-659.

7. Данильчук Е.И. Аналитическая оценка частоты девиации в спектре мерцаний фазы несущей навигационных сигналов и ее экспериментальная верификация / Е.И. Данильчук, В.В. Демьянов // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН. – 2021. – С. 402.

8. Данильчук Е.И. Сравнение экспериментальных оценок частоты девиации в различных условиях наблюдений / Е.И. Данильчук, В.В. Демьянов, Ю.В. Ясюкевич, М.А. Сергеева // Материалы семнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе». – 2022. – С. 174.

9. Данильчук Е.И. Экспериментальная оценка вклада шумов приемника на точность определения частоты девиации в спектре мерцаний фазы несущей трансферного сигнала навигационного спутника / Е.И. Данильчук, В.В. Демьянов // Труды XVII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», Иркутск, издательский отдел ИСЗФ СО РАН. – 2022. – С. 171-173.

10. Данильчук Е.И. Факторы, влияющие на точность определения частоты девиации в спектре мерцаний фазы трансферного сигнала / Е.И. Данильчук, В.В. Демьянов // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН. – 2022. – С. 362.

11. Данильчук Е.И. Частота девиации как инструмент обнаружения слабых ионосферных неоднородностей на фоне шумов / Е.И. Данильчук, В.В. Демьянов, Ю.В. Ясюкевич, М.А. Сергеева // Распространение радиоволн: сборник докладов XXVIII Всероссийской открытой научной конференции (Йошкар-Ола, 16–19 мая 2023 года) [Электронный ресурс]. – 2023. – С. 104-107.

12. Данильчук Е.И. Использование данных с высоким разрешением для более детального изучения ионосферы / Е.И. Данильчук, В.В. Демьянов, Ю.В. Ясюкевич, М.А. Сергеева // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН. – 2023. – С. 310.

13. Demyanov V. An enhancement of GNSS data time rate: the way to unfold the weakest ionospheric turbulences under the noise floor / V. Demyanov, E. Danilchuk // AGU Abstracts. – 2023. – Vol. 2023. – P. A13O-2378.

14. Demyanov V. GNSS Data of High Time Rate: New Opportunities to Look Deeper Inside the Ionosphere / V. Demyanov, E. Danilchuk // AOGS Abstracts. – 2024. – Vol. 2024. – P. IG11-A012.

15. Данильчук Е.И. Модель фазы несущей трансionoсферного сигнала для тестирования процедур фильтрации и расчетов индексов мерцаний / Е.И. Данильчук, В.В. Демьянов // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы [Электронный ресурс] : Материалы XXX Международного симпозиума, г. Санкт-Петербург, 1-5 июля 2024 г. – 2024. – С. E78-E81.

16. Данильчук Е.И. Тестирование процедур удаления тренда измерений фазы несущей и расчета индексов ионосферных мерцаний / Е.И. Данильчук, В.В. Демьянов // Труды XVIII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», Иркутск, издательский отдел ИСЗФ СО РАН. – 2024. – С. 253-255.

Программы ЭВМ:

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024618071 Российская Федерация. Расчет вариаций фазы несущей трансionoсферного сигнала, вызванных многомасштабными возмущениями электронной концентрации в ионосфере и шумами измерений в приемнике : № 2024618071 : дата поступления 25.03.2024 : дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 09.04.2024 / Е.И. Данильчук, В.В. Демьянов. – 1 с.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Goodman J. Ionospheric Effects on Modern Electronic System / J. Goodman, J. Aarons // Proceedings of the IEEE. – 1990. – V. 78. – P. 512–528. – DOI: 10.1109/5.52228.

2. Распространение радиоволн: учебное пособие / О.И. Яковлев, В.П. Якубов, В.П. Урядов, А.Г. Павельев. – Москва : Ленанд, 2019. – 496 с.

3. Afraimovich E.L. GPS direct and inverse radiointerferometry - new methods of investigating Travelling Ionospheric Disturbances / E.L. Afraimovich, K.S. Palamartchouk, N.P. Perevalova // *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* – 1997. – Vol. 32, N. 3-4. – P. 469-479.
4. Hofmann-Wellenhof B. GNSS – Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo and more / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Walse. – Wien : Springer-Verlag, 2008. – 516 p.
5. Threshold magnitude for Ionospheric TEC response to earthquakes / N.P. Perevalova, V.A. Sankov, E.I. Astafyeva, A.S. Zhupityaeva // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2014. – Vol. 108. – P. 77–90. – DOI: 10.1016/j.jastp.2013.12.014.
6. Ghoddousi-Fard R. Impact of receiver and constellation on high rate GNSS phase rate measurements to monitor ionospheric irregularities / R. Ghoddousi-Fard // *Advances in Space Research*. – 2017. Vol. 60, N. 9. – P. 1968-1977. – DOI: 10.1016/j.asr.2017.07.039.
7. Multipath interference mitigation in GNSS via WRELAX / J. Qiongqiong, W. Renbiao, W. Wenyi et al. // *GPS Solutions*. – 2017. – Vol. 21. – P. 487-498. – DOI: 10.1007/s10291-016-0538-9.
8. Assessment of Morelian Meteoroid Impact on Mexican Environment / M.A. Sergeeva, V.V. Demyanov, O.A. Maltseva et al. // *Atmosphere*. – 2021. Vol. 12. – P. 185. – DOI: 10.3390/atmos12020185.
9. Афраймович Э.Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э.Л. Афраймович, Н.П. Перевалова. – Иркутск : Изд-во ГУ НЦ РБХ ВНИЦ СО РАН, 2006. – 479 с.
10. McCaffrey A.M. Spectral characteristics of auroral region scintillation using 100 Hz sampling / A.M. McCaffrey, P.T. Jayachandran // *GPS Solutions*. – 2017. – Vol. 21. – P. 1883-1894. – DOI: 10.1007/s10291-017-0664-z.
11. Zhang Q. Assessment of the effect of GNSS sampling rate on GNSS/INS relative accuracy on different time scales for precision measurements / Q. Zhang, X. Niu, C. Shi // *Measurement*. – 2019. – Vol. 145. – P. 583-593. – DOI: 10.1016/j.measurement.2019.05.104.
12. Bolla P. Performance analysis of dual-frequency receiver using combinations of GPS L1, L5, and L2 civil signals / P. Bolla, K. Borre // *Journal of Geodesy*. – 2018. – Vol. 93. – P. 437–447. – DOI: 10.1007/s00190-018-1172-9.
13. On the accuracy of the GPS L2 observable for ionospheric monitoring / A.M. McCaffrey, P.T. Jayachandran, R.B. Langley, J.M. Sleewaegen // *GPS Solutions*. – 2018. – Vol. 22. – P. 2233–2341. – DOI: 10.1007/s10291-017-0688-4.
14. Monitoring of global ionospheric irregularities using the Worldwide GPS Network / X. Pi, A. J. Mannucci, U. J. Lindqwister, C. M. Ho. // *Geophysical Research Letters*. – 1997. – Vol. 24, N. 18. – P. 2283–2286. – DOI: 10.1029/97gl02273.

15. Van Dierendonck A.J. Ionospheric Scintillation Monitoring Using Commercial Single Frequency C/A Code Receivers / A.J. Van Dierendonck, J. Klobuchar, Q. Hua // Proceedings of the 6th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. – 1993. – P. 1333-1342.
16. Yeh K. Radio wave scintillations in the ionosphere / K. Yeh, C. Liu // Proceedings of the IEEE. 1982. – Vol. 70, N. 4. – P. 324–360. – DOI: 10.1109/proc.1982.10313.
17. The Second-Order Derivative of GPS Carrier Phase as a Promising Means for Ionospheric Scintillation Research / V.V. Demyanov, Y.V. Yasyukevich, S. Jin, M. A. Sergeeva // Pure and Applied Geophysics. – 2019. – Vol. 176. – P. 4555–4573. – DOI: 10.1007/s00024-019-02281-6.
18. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Монография / К.М. Антонович; ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия». – Москва : ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – Т.1: - 344 с.; Т.2: - 360 с.
19. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. Случайные поля / С.М. Рытов, Ю.А. Кравцов, В.И. Татарский. – Москва : Наука, 1978. – 464 с.
20. Бабич О.А. Обработка информации в навигационных комплексах / О.А. Бабич. – Москва : Машиностроеник, 1991. – 512 с.
21. Klobuchar J. Ionosphere time-delay algorithm for single-frequency GPS users / J. Klobuchar // IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System (AES). – 1986. – Vol. 23, N. 3. – P. 325–331. - DOI: 10.1109/TAES.1987.310829.
22. Афанасьев Н.Т. Спутниковое декаметровое радиозондирование ионосферных неоднородностей : монография / Н.Т. Афанасьев, В.П. Марков. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2015. – 127 с.
23. Kaplan E.D. Understanding GPS: principles and applications / E.D. Kaplan. – London : Artech House, 2006. – 707 p.
24. Demyanov V.V. GNSS High-Rate Data and the Efficiency of Ionospheric Scintillation Indices. Satellites Missions and Technologies for Geosciences (chapter in book Ionospheric and Atmospheric Threats for GNSS and Satellite Telecommunications / V.V. Demyanov, M.A. Sergeeva, A.S. Yasyukevich. – London : InTech Open, 2020. –DOI: 10.5772/intechopen.90078.
25. Demyanov V. An Increase of GNSS Data Time Rate and Analysis of the Carrier Phase Spectrum / V. Demyanov, E. Danilchuk, M. Sergeeva, Y. Yasyukevich // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15. – P. 792. – DOI: 10.3390/rs15030792.
26. Yasyukevich Y.V. SibNet – Siberian Global Navigation Satellite System Network: Current state / Y.V. Yasyukevich, A.M. Vesnin, N.P. Perevalova // Solar-Terrestrial Physics. – 2018. – Vol. 4, N. 4. – P. 63–72. – DOI: 10.12737/stp-44201809.