

Том I, с. 49–57

УДК: 537.87

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВЫСОКИХ ЧАСТОТ В ВОЗМУЩЁННОЙ ИОНОСФЕРЕ

Н. Н. Зернов, В. Э. Герм, Н. Ю. Заалов

*Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9
E-mail: zernov@spbu.ru*

Аннотация. Представляются результаты исследований по распространению радиоволн высоких частот в сильно возмущенной ионосфере, проводимых в настоящее время на кафедре радиофизики Санкт-Петербургского государственного университета. Под сильно возмущенной ионосферой понимается ионосфера в присутствии выраженных среднemasштабных неоднородностей электронной плотности (как в полярной или экваториальной ионосфере), а также ионосфера с сильно выраженными флуктуациями электронной плотности, приводящими к режиму сильных флуктуаций высокочастотного поля. Обсуждаются задачи распространения высокочастотных полей в ионосферном отражательном и трансionoсферном радиоканалах.

Ключевые слова: распространение радиоволн; высокочастотные поля; ионосфера; ионосферные возмущения; ионосферный и трансionoсферный каналы распространения; сцинтилляции поля

HIGH-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELD PROPAGATION IN THE DISTURBED IONOSPHERE

N. N. Zernov, V. E. Gherm, N. Yu. Zaalov

Abstract. The results of investigations into the high-frequency radio wave propagation in the disturbed ionosphere being performed at the Department of Radio Physics of St.Petersburg State University are presented. The disturbed ionosphere is treated as the ionosphere containing reasonably expressed medium scale inhomogeneities (as in the polar or equatorial ionosphere), as well as strong enough fluctuations of the electron density, which may result in the regime of the high-frequency field strong scintillation when propagating through the ionosphere. Propagation in the ionospheric reflection and transionoсpheric channels are discussed.

Keywords: radio wave propagation; high frequency fields; ionosphere; ionospheric disturbances; ionospheric and transionoсpheric channel of propagation; field scintillations

Введение

В течение десятилетий исследования в области распространения радиоволн высоких частот в околоземном пространстве были одним из основных направлений научных исследований, проводимых на кафедре радиофизики ЛГУ/СПбГУ. Изначально это были исследования в области распространения радиоволн КВ диапазона, сосредоточенные на изучении воздействия детерминированных и квазидетерминированных неоднородностей ионосферы различной природы на КВ - радиоканал. Начиная с 80-х годов прошлого века, наряду с продолжением традиционных исследований в области распространения радиоволн КВ-диапазона в детерминированном радиоканале, на кафедре стали также развиваться исследования в области распространения высокочастотных полей (КВ, УКВ, СВЧ диапазонов) в стохастических ионосферном отражательном и трансionoсферном каналах.

На современном этапе исследования сосредоточены на изучении эффектов, связанных с сильно возмущенными условиями распространения. К их числу относятся задачи распространения высокочастотных полей в ионосфере с квази - детерминированными среднemasштабными

неоднородностями (полярные и экваториальная ионосфера), а также задачи распространения высокочастотных полей в условиях сильных флуктуаций амплитуды поля, вызванных сильными флуктуациями электронной плотности ионосферы.

Исследования эффектов флуктуаций электронной плотности ионосферы было начато обобщением классического метода плавных возмущений на случай неоднородной плоскостростной фоновой среды [1–3], в том числе, для поля точечного источника [4]. На базе этих обобщений исследовалось распространение импульсных сигналов КВ-диапазона в неоднородной фоновой среде с флуктуациями электронной плотности [5, 8, 9], эффект френелевской фильтрации [6], функции рассеяния КВ-радиоканала [10, 12]. В работах [4, 7] с помощью интегрального представления поля точечного источника в неоднородной среде по парциальным волнам дифракционного типа исследовались эффекты рассеяния КВ поля локальными неоднородностями и неоднородностями типа волновых перемещающихся неоднородностей электронной плотности. Здесь, в частности, были описаны эффекты образования локальных каустик КВ поля, обусловленные присутствием среднemasштабных неоднородностей ионосферы (сингулярная теория возмущений). Наконец, метод плавных возмущений был обобщён на случай произвольной трехмерно-неоднородной фоновой среды распространения [13]. Это обобщение стало основой симулятора стохастических сигналов КВ диапазона, распространяющихся в стохастическом ионосферном отражательном радиоканале [14].

Для описания стохастического трансionoсферного радиоканала распространения были разработаны две модели, способные описывать режим сильных флуктуаций высокочастотных полей в таком канале. Модель, представленная в [15], названа гибридной моделью, поскольку представляет собой комбинацию метода комплексной фазы (одна из форм теории возмущений) для неоднородной фоновой среды [11, 13] и классической техники стохастического экрана. Она описывает ситуации, когда режим сильных сцинтилляций поля не формируется внутри неоднородного ионосферного слоя, но может быть сформирован при распространении от нижней кромки ионосферы к поверхности Земли. С помощью этой модели был решен целый ряд задач распространения высокочастотных полей в стохастическом трансionoсферном радиоканале [16–21]. Следует специально отметить работу [16], где описаны сильные флуктуации трансionoсферного сигнала на высокоширотной трассе в присутствии среднemasштабных неоднородностей высокоширотной ионосферы, и работу [17], в которой подобные эффекты описаны для экваториальной трассы в присутствии «пузырей» экваториальной ионосферы.

Наконец, в работах [22–25] развиты методы решения Марковских параболических уравнений для моментов стохастического поля для случая существенно неоднородной фоновой среды. С их помощью оказалось возможным построить модель распространения поля в стохастическом трансionoсферном радиоканале и создать на её базе симулятор случайных сигналов [26, 27] для того случая, когда режим сильных флуктуаций поля формируется уже внутри неоднородного ионосферного слоя.

Завершая краткое описание исследований в области распространения высокочастотных полей в трансionoсферном радиоканале отметим, что недавно [28] была разработана альтернативная традиционной техника учета ионосферных ошибок в фазе зондирующего сигнала. Была введена эффективная сферически-симметричная ионосфера, учитывающая большую часть эффектов, определяемых горизонтальными градиентами фоновой (без флуктуаций) ионосферы. Эта техника позволяет суммировать в явном виде бесконечную подпоследовательность традиционного ряда по обратным степеням рабочей частоты, и оказывается тем более эффективной, чем меньше рабочая частота сигнала.

Для описания КВ радиоканала была создана эффективная модель высокоширотной ионосферы, включающая в себя её характерные особенности (полярные патчи, арки, неоднородности в области аврорального овала и главный ионосферный провал). К настоящему времени для расчёта радиоканала используется пакет программ NIM-RT (Northern Ionosphere Model & Ray Tracing) [30], первоначальная версия которого была разработана на кафедре радиофизики в сотрудничестве с Radio System Laboratory университета г. Лестера, Великобритания. В этом пакете

для расчёта параметров фоновой ионосферы была применена адаптивная феноменологическая модель фоновой ионосферы основанная как на анализе данных вертикального зондирования, так и на базе модели IRI. Создан алгоритм адаптации параметров стандартной модели ионосферы IRI к реальным условиям. Пример реализации этого подхода можно найти в [30].

Мониторинг высокоширотной ионосферы показывает, что процесс образования и эволюции F -слоя пятен (патчей) и арок повышенной электронной концентрации в F -слое имеет не регулярный, а стохастический характер. Для того чтобы учесть это, в модели NIM-RT использован квази-статистический подход. Создано программное обеспечение для моделирования высокоширотной ионосферы при наличии упомянутых крупномасштабных неоднородностей электронной плотности и эффектов распространения КВ поля в полярной ионосфере, которое позволило адекватным образом моделировать ионограммы вертикального и наклонного зондирования с учётом поглощения [31–35]. Пакет программ NIM-RT также позволяет моделировать эффекты распространения КВ радиоволн вне дуги большого круга в области главного ионосферного провала [36], авроральной области и в области полярной шапки [31–35, 37–39].

Одной из особенностей ионосферы, является нерегулярное появление тонкого плазменного слоя с повышенной электронной концентрацией (спорадический E -слой E_s). Существует большое количество работ, связанных с исследованием морфологии и динамики среднеширотного E_s слоя. Однако результаты, представленные в них, носят противоречивый характер. Кроме того, практически не существуют работы, в которых рассчитывается КВ радиоканал с учётом E_s слоя. Нами был проведён статистический анализ распределения критической частоты E_s слоя для различных сезонов, геофизических параметров и показателей солнечной активности. Результаты были применены для разработки модели КВ радиоканала при наличии E_s слоя.

Содержание доклада

В докладе обсуждаются новые результаты исследований, описанных в кратком обзоре, представленном во Введении:

1. Получил дальнейшее развитие гибридный метод описания и симулятор (имитатор) сигналов в высокочастотном трансionoсферном стохастическом радиоканале, представленный в работах [12, 15–17, 19, 20]. Модернизированный в [21] гибридный метод позволяет рассчитывать корреляционные функции поля (и генерировать случайные реализации поля) на выходе из неоднородного ионосферного слоя для случая неоднородностей, сильно вытянутых в направлении магнитного поля Земли и описывать, в том числе, распространение высокочастотных полей вдоль магнитного поля Земли. На рис. 1 (из работы [21]) приведены расчёты спектров флуктуаций фазы и уровня монохроматического поля, полученные с помощью обобщённой техники для сильно анизотропных флуктуаций электронной плотности ионосферы, задаваемых степенной моделью спектра с единственным показателем степени. Как видно из рисунка, отклонение спектров флуктуаций уровня и фазы трансionoсферного сигнала от степенного закона увеличивается по мере уменьшения угла между направлением распространения поля и направлением магнитного поля Земли.

2. Получила дальнейшее развитие техника и метод описания режима сильных флуктуаций поля в высокочастотном трансionoсферном стохастическом радиоканале, которые базируются на решениях марковских параболических уравнений для статистических моментов поля при наличии неоднородной фоновой ионосферы, представленных в работах [22–25, 27]. Было построено аналитическое решение для пространственно-частотной функции когерентности случайного поля, которое учитывает как неоднородную фоновую среду, так и анизотропную форму случайных неоднородностей электронной плотности ионосферы. Детали построения такого решения и результаты расчетов, полученные с его использованием, представлены в настоящем Сборнике в докладе А. В. Дрюка и Н. Н. Зернова «Когерентные свойства высокочастотных полей, распространяющихся в трансionoсферном стохастическом радиоканале» на Секции 1 Конференции.

Здесь продемонстрируем лишь эффект анизотропии случайных неоднородностей электронной плотности в неоднородной фоновой ионосфере на пространственную и частотную когерентность поля. Пространственная и частотная функции когерентности получены как предельные

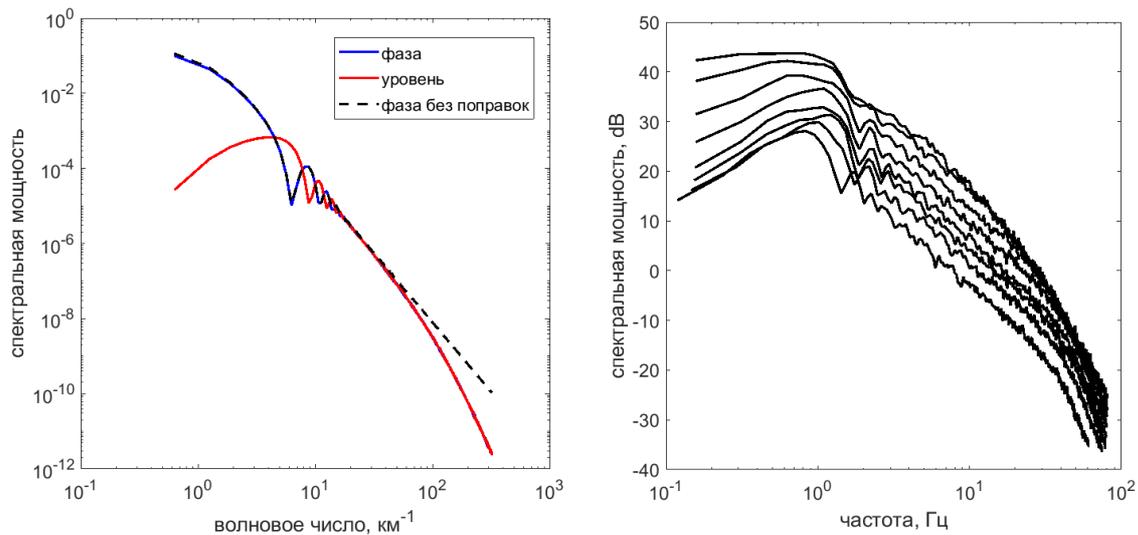


Рис. 1. Слева: одномерное сечение пространственных спектров фазы и уровня на выходе из ионосферного слоя, пунктир – спектр фазы, рассчитанный без учёта сильной анизотропии неоднородностей. Справа: серия частотных спектров уровня поля для различных углов между магнитным полем и направлением распространения, снизу-вверх от 0° до 42° .

случаи аналитического решения общего вида для пространственно-частотной функции когерентности (см. рис. 2). Вычисления проведены для трассы распространения, ориентированной под углом 86° к направлению магнитного поля Земли в точке максимума электронной плотности неоднородной фоновой ионосферы. Распределение вдоль трассы было сгенерировано моделью NeQuick и имеет полное электронное содержание 50,76 ПЭС единиц. Чисто пространственная функция когерентности является вещественной. Частотная функция когерентности – комплекснозначная. Для нее на Рис. 2 приведены только значения модуля.

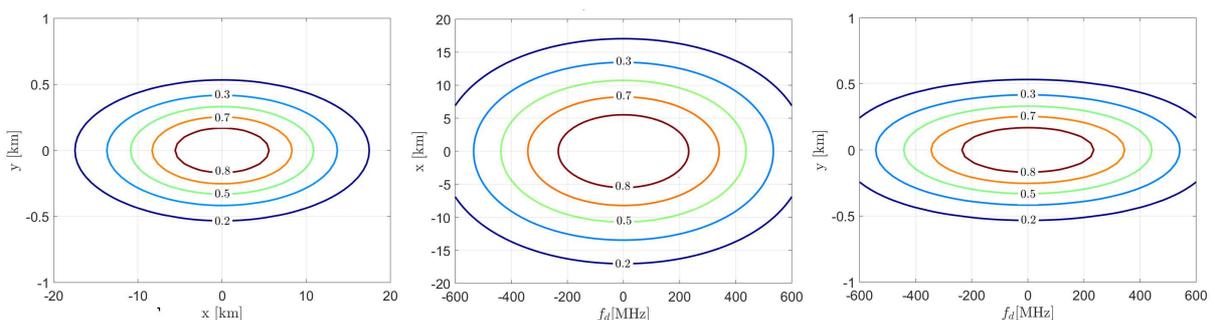


Рис. 2. Пространственная и частотная функции когерентности поля. Оси x, y – в плоскости, ортогональной направлению распространения поля (ось z). Левая панель – вещественная пространственная функция когерентности; две правые панели – модуль частотной функции когерентности в переменных (x, f_d) и (x, f_d) , где f_d – разностная частота.

3. В заключение обсуждения задач трансionoсферного распространения высокочастотных полей укажем, что альтернативная техника расчета набега фазы на трансionoсферной трассе [28] далее модифицирована для расчетов эффектов двухчастотного режима и включения в нее эффектов, обусловленных вкладом тропосферы. На Рис. 3 приведены ошибки расчетов ПЭС, полученных с помощью альтернативной техники, использующей эффективную сферически-

симметричную ионосферы (левая панель), с результатами, полученными с использованием локальной сферически-симметричной ионосферы и ее локальных горизонтальных градиентов, взятых в точке максимума электронной плотности вдоль трассы распространения.

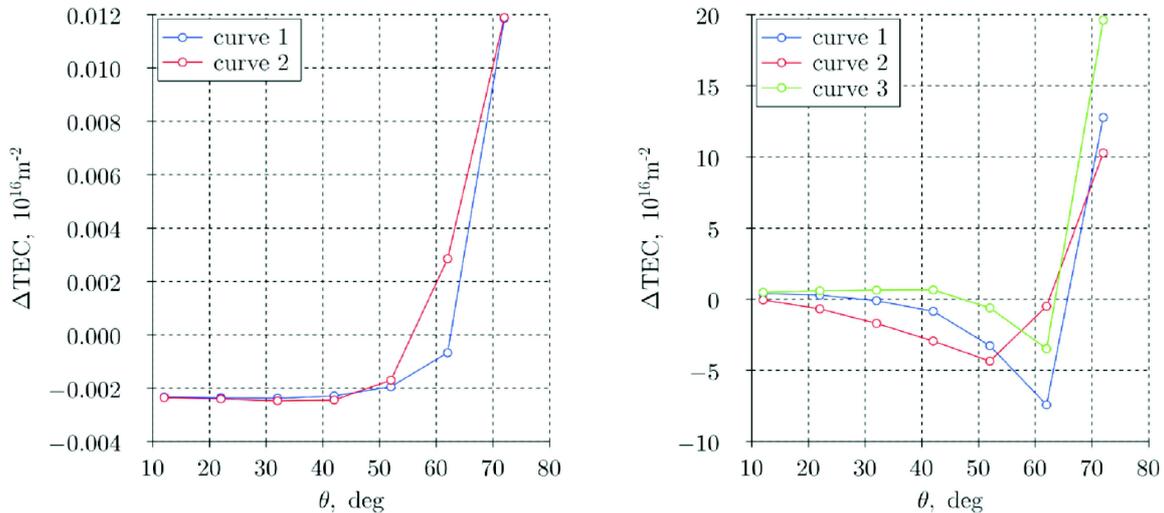


Рис. 3. Ошибки расчёта полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы как функция зенитного угла (из презентации на BSS2016, Триест, Италия).

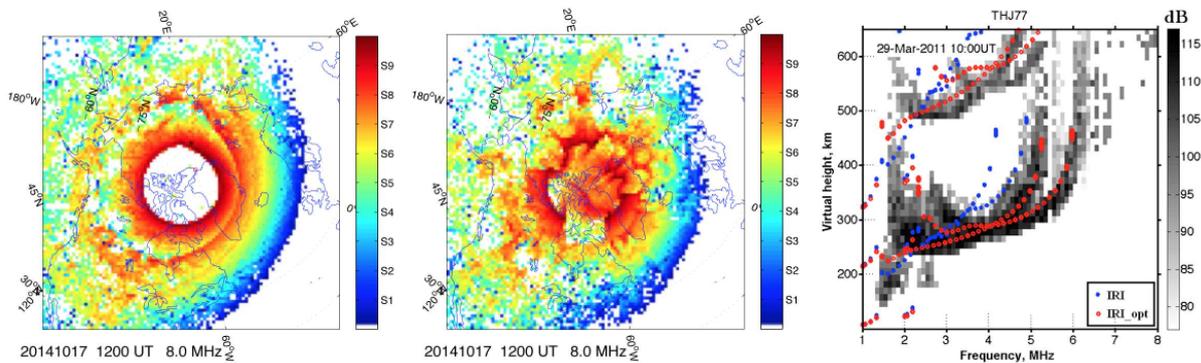


Рис. 4. Карты распределения интенсивности КВ сигнала (левая и средняя панели) и ионограммы. Левая панель: для случая фоновой ионосферы; средняя панель: для модели ионосферы с учётом пятен повышенной электронной плотности (передатчик расположен в Qaanaaq). Правая панель: иллюстрация применения алгоритма адаптации модели IRI к реальным условиям распространения, экспериментальная ионограмма (полутонное изображение), модель IRI (синие точки), адаптированная модель IRI (красные точки).

4. В части исследования распространения радиоволн КВ-диапазона была создана эффективная модель высокоширотной ионосферы, включающая в себя её характерные особенности (полярные патчи, арки, неоднородности в области аврорального овала и главный ионосферный провал). При этом для расчёта параметров фоновой ионосферы была применена адаптивная феноменологическая модель фоновой ионосферы, основанная на анализе данных вертикального зондирования. Однако использование ионозондов не всегда представляется возможным в связи с недостатком данных. В этих случаях представляет несомненный интерес использование

эмпирических моделей ионосферы, адаптированных для описания конкретных событий в высокоширотной ионосфере.

Примеры пространственных распределений интенсивности принимаемого сигнала, рассчитанные с учётом указанных особенностей, приведены на Рис. 4 (левая и средняя панели).

5. Создано программное обеспечение для моделирования эффектов распространения КВ поля в полярной ионосфере, описываемой эффективной моделью, упомянутой выше, которое позволило адекватным образом моделировать ионограммы вертикального и наклонного зондирования при наличии характерных особенностей высокоширотной ионосферы, с учётом поглощения обусловленного ультрафиолетовым и рентгеновским излучением Солнца, а также высыпаниями высокоэнергетических протонов (Рис. 5).

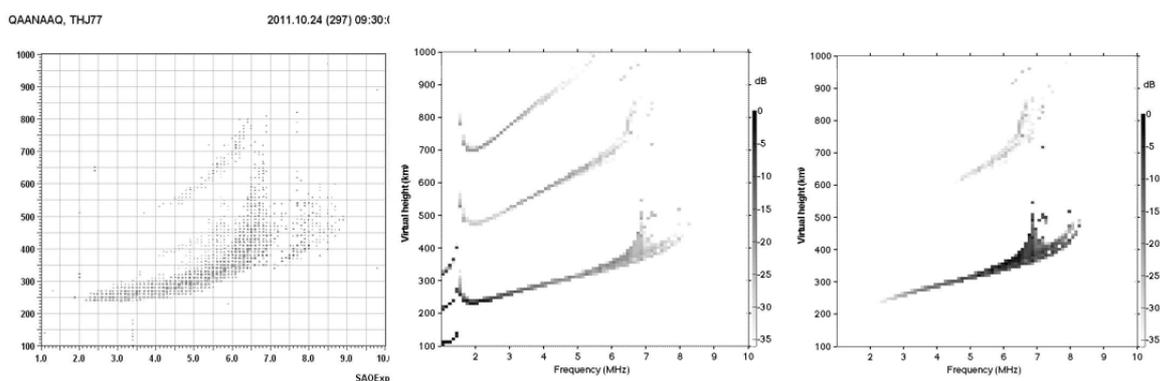


Рис. 5. Ионограммы (иозонд Qaanaaq 24 октября 2011). Левая панель: экспериментальная ионограмма. Средняя панель: модельная ионограмма рассчитанная без учета поглощения. Правая панель: модельная ионограмма рассчитанная с учётом поглощения.

Как видно из рисунка, учёт эффектов поглощения существенным образом изменяет структуру модельной ионограммы приводя её в соответствие с экспериментальной.

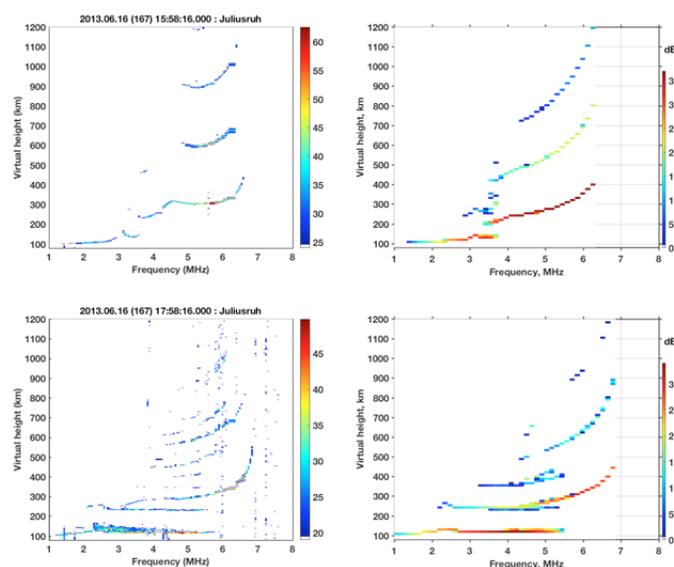


Рис. 6. Измеренные (левый ряд) и модельные (правый ряд) ионограммы вертикального зондирования; 16 июня 2013 15.58 UT (верхний ряд), 17.58 UT (нижний ряд); иозонд Juliusruh. Цветовая шкала справа от каждой панели показывает уровень сигнала (в dB).

6. Была разработана модель КВ радиоканала при наличии спорадического слоя E (E_s) ионосферы. Результаты расчётов ионограмм вертикального зондирования ионосферы при наличии E_s с учётом эффектов поглощения представлены в настоящем Сборнике в докладе Н. Ю. Заалова и Е. В. Москалёвой «Морфология и динамика спорадического слоя E в средних широтах Земли» на Секции 1 Конференции. На рис. 6 приведён пример расчёта ионограмм вертикального зондирования.

Заключение

В работе был представлен краткий обзор научной активности кафедры радиофизики СПбГУ в области исследований распространения высокочастотных полей в возмущённой ионосфере.

Благодарности

В течение долгих лет описанные выше исследования финансировались и продолжают финансироваться из различных источников. В настоящее время исследования поддерживаются, в том числе, Грантом РФФИ (проект РФФИ № 19-02-00274).

Список литературы

1. Зернов Н. Н. Рассеяние волн КВ диапазона при наклонном распространении в ионосфере // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. — 1980. — Т. 23, № 2. — С. 151–158.
2. Зернов Н. Н. Обобщение метода плавных возмущений на случай поля сосредоточенного излучателя в неоднородной среде // Радиотехника и электроника. — 1990. — Т. 35, № 8. — С. 1590–1595.
3. Zernov N. N., Gherm V. E., Zaalov N. Yu, Nikitin A. V. The generalization of Rytov's method to the case of inhomogeneous media and HF propagation and scattering in the ionosphere // Radio Science. — 1992. — Vol. 27. — P. 235–244.
4. Зернов Н. Н. Метод комплексной фазы для поля точечного источника в неоднородной ионосфере с флуктуациями диэлектрической проницаемости // Радиотехника и электроника. — 1994. — Т. 39, № 2. — С. 241–252.
5. Zernov N. N., Lundborg B. The influence of the ionospheric electron density fluctuations on HF pulse propagation // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. — 1995. — Vol. 57. — P. 65–73.
6. Gherm V. E., Zernov N. N. Fresnel filtering in HF ionospheric reflection channel // Radio Science. — 1995. — Vol. 30. — P. 127–134.
7. Zernov N. N., Lundborg B. An integral representation of the wave field in inhomogeneous media in terms of diffracting component waves // Radio Science. — 1995. — Vol. 31. — P. 67–80.
8. Gherm V. E., Zernov N. N., Lundborg B., Vastberg A. The two-frequency coherence function for the fluctuating ionosphere; narrowband pulse propagation // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 1997. — Vol. 59. — P. 1831–1841.
9. Gherm V. E., Zernov N. N., Lundborg B. The two-frequency, two-time coherence function for the fluctuating ionosphere; wideband pulse propagation // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 1997. — Vol. 59. — P. 1843–1854.
10. Gherm V. E., Zernov N. N. Scattering function of the fluctuating ionosphere in the HF band // Radio Science. — 1998. — Vol. 33. — P. 1019–1033.
11. Gherm V. E., Zernov N. N., Radicella S. M., Strangeways H. J. Propagation model for signal fluctuations on transionospheric radiolinks // Radio Science. — 2000. — Vol. 35. — P. 1221–1232.
12. Gherm V. E., Zernov N. N., Lundborg B., Darnell M., Strangeways H. J. Wideband scattering functions for HF ionospheric propagation channels // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2001. — Vol. 63. — P. 1489–1497.
13. Герм В. Э., Гогин Ю. А., Зернов Н. Н. Дифракция волнового поля на слабых неоднородностях диэлектрической проницаемости в трехмерной плавно-неоднородной среде // Вестник СПбГУ. — 2001. — Серия 4, № 12, — С. 32–38.

14. Gherm V. E., Zernov N. N., Strangeways H. J. HF Propagation in a Wideband Ionospheric Fluctuating Reflection Channel: Physically Based Software Simulator of the Channel // *Radio Science*. — 2005. — Vol. 40. — RS1001, doi:10.1029/2004RS003093.
15. Gherm V. E., Zernov N. N., Strangeways H. J. Propagation Model for Transionospheric Fluctuational Paths of Propagation: Simulator of the Transionospheric Channel // *Radio Science*. — 2005. — Vol. 40. — RS1003, doi:10.1029/2004RS003097.
16. Maurits S. A., Gherm V. E., Zernov N. N., Strangeways H. J. Modeling of scintillation effects on high-latitude transionospheric paths using ionospheric model (UAF EPPIM) for background electron density specifications // *Radio Science*. — 2008. — Vol. 43. — RS4001, doi:10.1029/2006RS003539.
17. Zernov N. N., Gherm V. E., Strangeways H. J. On the effects of scintillation of low-latitude bubbles on transionospheric paths of propagation // *Radio Science*. — 2009. — Vol. 44. — RS0A14, doi:10.1029/2008RS004074.
18. Gherm V. E., Zernov N. N., Strangeways H. J. Effects of diffraction by ionospheric electron density irregularities on the range error in GNSS dual-frequency positioning and phase decorrelation // *Radio Science*. — 2011. — Vol. 46. — RS3002, doi:10.1029/2010RS004624.
19. Zernov N. N., Gherm V. E., Strangeways H. J. Further determinations of strong scintillation effects on GNSS signals using the Hybrid Scintillation Propagation Model // *Radio Science*. — 2012. — Vol. 47. — RS0L06, 2011RS004935R, doi:10.1029/2011RS004935.
20. Strangeways H. J., Zernov N. N., Gherm V. E. Comparison of four methods for transionospheric scintillation evaluation // *Radio Science*. — 2014. — Vol. 49. — P. 899–909, doi:10.1002/2014RS005408.
21. Gherm V. E., Zernov N. N. Extension of Hybrid Scintillation Propagation Model to the case of field propagation in the ionosphere with highly anisotropic irregularities // *Radio Science*. — 2017. — Vol. 52. — P. 874–883, 2017, doi:10.1002/2017RS006264.
22. Bitjukov A. A., Gherm V. E., Zernov N. N. On the solution of Markov's parabolic equation for the second order spaced frequency and position coherence function // *Radio Science*. — 2002. — Vol. 37. — RS1066, doi:10.1029/2001RS002491.
23. Bitjukov A. A., Gherm V. E., Zernov N. N. Quasi-classic approximation in Markov's parabolic equation for spaced position and frequency coherency // *Radio Science*. — 2003. — Vol. 38. — doi:10.1029/2002RS002714.
24. Битюков А. А., Герм В. Э., Зернов Н. Н. Двухчастотная двухпозиционная функция когерентности случайного поля. Разделение переменных в параболическом уравнении // *Радиотехника и электроника*. — 2005. — Т. 50, № 7. — С. 821–827.
25. Битюков А. А., Герм В. Э., Зернов Н. Н. Двухчастотная двухпозиционная функция когерентности случайного поля. Модельные задачи // *Радиотехника и электроника*. — 2005. — Т. 50, № 7. — С. 828–833.
26. Zernov N. N., Gherm V. E. Strong Scintillation of GNSS Signals in the Inhomogeneous Ionosphere. 1: Theoretical Background // *Radio Science*. — 2015. — Vol. 50. — P. 153–167, doi: 10.1002/2014RS005603.
27. Gherm V. E., Zernov N. N. Strong Scintillation of GNSS Signals in the Inhomogeneous Ionosphere. 2: Simulator of Transionospheric Channel // *Radio Science*. — 2015. — Vol. 50. — P. 168–176, doi: 10.1002/2014RS005604.
28. Danilogorskaya E. A., Zernov N. N., Gherm V. E., Strangeways H. J. On the determination of the effect of horizontal ionospheric gradients on ranging errors in GNSS positioning // *Journal of Geodesy*. — 2017. — Vol. 91. — P. 503–517, doi: 10.1007/s00190-016-0978-6. 2017-04-22.
29. Zaalov N. Y., Warrington E. M., Stocker A. J. A ray-tracing model to account for off-great circle HF propagation over northerly paths // *Radio Science*. — 2005. — Vol. 40, doi: 10.1029/2004RS003183.
30. Zaalov N. Y., Moskaleva E. V., Burmakina T. S. Application of the IRI model to the HF propagation model with optimization of the ionosphere parameters to day-to-day variation // *Advances in Space Research*. — 2017. — Vol. 60. — P. 2252–2267, doi:10.1016/j.asr.201708.018.

31. Moskaleva E. V., Zaalov N. Y. Signature of polar cap inhomogeneities in vertical sounding data // *Radio Science*. — 2013. — Vol. 48. — P. 547–563, doi: 10.1002/rds.20060.
32. Moskaleva E. V., Zaalov N. Y. Multi-beam sounding ionograms in the polar cap region: Absorption induced by proton precipitations // *Advances in Space Research*. — 2014. — Vol. 54. — P. 1743–1750.
33. Zaalov N. Y., Moskaleva E. V. A polar cap absorption model optimization based on the vertical ionograms analysis // *Advances in Space Research*. — 2016, doi: 10.1016/j.asr.2016.07.024.
34. Rogov D. D., Moskaleva E. V., Zaalov N. Y. Modeling of high frequency radio wave absorption on oblique sounding during a solar X-ray flare // *Advances in Space Research*. — 2015. — Vol. 55. — P. 597–604 doi: 10.1016/j.asr.2014.11.001.
35. Zaalov N. Y., Moskaleva E. V., Rogov D. D., Zernov N. N. Influence of X-ray and polar cap absorptions on vertical and oblique sounding ionograms on different latitudes // *Advances in Space Research*. — 2015. — Vol. 56. — P. 2527–2541, doi: 10.1016/j.asr.2015.09.008.
36. Zaalov N. Y., Rothkaehl H., Stocker A. J., Warrington E. M. Comparison between HF propagation and DEMETER satellite measurements within the mid-latitude trough // *Advances in Space Research*. — 2013. — Vol. 52. — P. 781–790, doi:10.1016/j.asr.2013.05.023.
37. Siddle D. R., Stocker A. J., Warrington E. M., Zaalov N. Y., Homam M. J. Simultaneous observations of trans-ionospheric and HF ionospheric propagation within the polar cap // *Radio Science*. — 2013. — doi: 10.1002/rds.20062.
38. Warrington E. M., Stocker A. J., Siddle D. R., Hallam J., Al-Behadili H. A. H., Zaalov N. Y., Honary F., Rogers N. C, Boteler D. H., Danskin D. W. Near real-time input to a propagation model for nowcasting of HF communications with aircraft on polar routes // *Radio Science*. — 2015. — Vol. 51. — P. 1048–1059.
39. Zaalov N. Y., Moskaleva E. V., Shekhovtsov F. V. Method of the HF wave absorption evaluation based on GIRO network data // *Advances in Space Research*. — 2019. — Vol. 63. — P. 2075–2087.