

УДК 621.396.24

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ РАДИОКАНАЛАМИ В ИНТЕРЕСАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОЙ И БЕСПЕРЕБОЙНОЙ СВЯЗИ НА ТРАНСПОРТЕ

Шиндин Алексей Владимирович^{1,2}, кандидат физико-математических наук, директор
e-mail: shindin@rf.unn.ru

Выборнов Федор Иванович^{2,3}, доктор физико-математических наук, ведущий научный
сотрудник, заведующий кафедрой физики
e-mail: vybornov@nirfi.unn.ru

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

² Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ), Нижний Новгород, Россия

³ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Рассматриваются вопросы развития методов диагностики регулярной и возмущенной ионосферы, краткосрочного прогнозирования и моделирования параметров коротковолновых радиоканалов, управления их состоянием. Представлены результаты экспериментов, где средством управления радиоканалами является стенд СУРА. Приводятся технические характеристики современных средств диагностики радиоканалов, разработанных и изготовленных в НИРФИ.

Ключевые слова: коротковолновая радиосвязь, диагностика ионосферы, моделирование радиоканалов, нагревный стенд СУРА, ионозонд.

DEVELOPMENT OF METHODS AND MEANS OF RADIO CHANNELS MANAGEMENT IN THE INTERESTS OF ENSURING RELIABLE AND UNINTERRUPTED COMMUNICATION ON TRANSPORT

Shindin Aleksei Vladimirovich^{1,2}, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Director
e-mail: shindin@rf.unn.ru

Vybornov Fedor Ivanovich^{2,3}, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading
Researcher, Head of the Department of Physics
e-mail: vybornov@nirfi.unn.ru

¹ Lobachevsky State University, Nizhny Novgorod, Russia

² Radiophysical Research Institute, Nizhny Novgorod, Russia

³ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The issues of developing methods for diagnosing the regular and disturbed ionosphere, short-term forecasting and modeling of the parameters of short-wave radio channels, and controlling their state are considered. The results of experiments where the control tool for radio

channels is the SURA facility are presented. The technical characteristics of modern radio channel diagnostic tools developed and manufactured at the Radiophysical institute are given.

Keywords: shortwave radio communications, ionosphere diagnostics, radio channel modeling, SURA heating facility, ionosonde.

В последние несколько лет наблюдается повышенный интерес к коротковолновой (КВ) радиосвязи. Это обусловлено, во-первых, безальтернативностью КВ радиосвязи в высокоширотных арктических и антарктических районах в условиях недоступности спутниковой и мобильной инфраструктуры, а во-вторых, развитием в последние годы аппаратных приемо-передающих и программных средств КВ радиосвязи. Распространение радиоволн КВ диапазона практически полностью определяется состоянием ионосферы Земли, которая отличается нестационарностью на временных масштабах от единиц минут (например, из-за перемещающихся ионосферных неоднородностей) до десятков лет (из-за вариаций солнечной активности между 11-тилетними циклами). В радиотехническом смысле подобная нестационарность приводит к проявлению в принятом сигнале таких паразитных явлений как замирания сигнала, многолучевость и существенная чувствительность радиоканалов к времени суток. Между тем, КВ радиосвязь – единственный вид дальней связи, не зависящий от канальной инфраструктуры (ретрансляторов, базовых станций и т.д.). За счет применения современных способов модуляции, кодирования сигналов, объединения частотных каналов связи современными радиостанциями КВ диапазона достигаются скорости цифровой передачи данных вплоть до 0,5 – 0,7 Мб/с в идеальных условиях. Вместе с тем крайне актуальными задачами остаются повышение надежности, защищенности, устойчивости КВ радиосвязи и дальнейшее увеличение пропускной способности КВ каналов связи. В нашей стране особенно остро эти задачи стоят при обеспечении связи для судов северного морского пути и дальней авиации. Одним из решений этих задач является адаптация КВ каналов к непрерывно изменяющимся ионосферным условиям (пассивная адаптация). Другим решением является активная адаптация среды распространения радиоволн (ионосферы) под конкретную существующую радиотрассу (активная адаптация).

В настоящее время в научно-исследовательском радиофизическом институте (НИРФИ) ионосферные исследования являются ведущим научным направлением, так или иначе задействующим сразу несколько научно-исследовательских отделов. НИРФИ располагает уникальной научной установкой (Многоцелевой стенд для исследования околоземного и космического пространства, сокр. стенд СУРА, расположенный на экспериментально-опытной базе (ЭОБ) «Васильсурск» в 150 км к востоку от Нижнего Новгорода вблизи р.п. Васильсурск Нижегородской обл., см. Рисунок 1), являющейся по своей сути лабораторией под открытым небом для исследования многих вопросов, связанных с околоземным космическим пространством. Стенд СУРА представляет собой комбинацию из нагревного стенда и комплекса диагностической аппаратуры. Нагревный стенд состоит из трех широкоэмиттерных передатчиков ПКВ-250 номинальной мощностью 250 кВт, трехсекционной фазированной антенной решетки (ФАР) размером 300×300 м² и системы управления. Паспортная эффективная излучаемая мощность стенда составляет порядка 280 МВт на частоте 6 МГц. Комплекс диагностической аппаратуры включает в себя: канадский импульсный ионозонд вертикального зондирования, ионозонд наклонного зондирования, использующий линейно-частотно модулированный (ЛЧМ) сигнал (производство Йошкар-Ола), быстрый универсальный ионозонд собственной разработки ИОН-ФАСТ [1] на базе технологии программно-определяемого радио (SDR) с минимальным временем регистрации ионограмм 1 с, несколько приемников сигналов глобальных навигационных



спутниковых систем, два комплекта оптического оборудования, набор универсальных широкополосных приемников КВ диапазона. На стенде СУРА на регулярной основе проводятся активные эксперименты по исследованию взаимодействия мощного КВ радиоизлучения с ионосферной плазмой, разрабатываются и развиваются методы и методики диагностики ионосферы, исследуются вопросы распространения радиоволн в ионосфере (в том числе возмущенной), проводятся испытания разрабатываемых в НИРФИ приборов для диагностики ионосферы.



Рисунок 1 – Обзорный вид на ФАР стенда СУРА и р. Волга с БПЛА

В 30 – 170 км окрестности от стенда СУРА на территории Нижегородской обл. располагаются еще несколько радиофизически полигонов НИРФИ, на которых размещена унифицированная КВ приемная техника, составляющая сеть геофизического мониторинга ННГУ. Кроме того, в распоряжении НИРФИ имеется два удаленных полигона: на юге в Республике Крым (горный массив Карадаг) и на севере в Республике Карелия (побережье Ладожского озера). Карта расположения всех полигонов НИРФИ, а также пунктов приема КВ сигнала в здании НИРФИ и в учебном корпусе ННГУ представлена на Рисунке 2.

На полигонах решаются задачи мониторинга состояния ионосферы и различных КВ радиотрасс, происходит отработка методик быстрого зондирования ионосферы импульсным и ЛЧМ сигналом, испытание создаваемой приемо-передающей техники. Анализ данных мониторинга ионосферы на сети пунктов позволяет осуществлять краткосрочный (на 1 – 2 часа) прогноз доступности КВ радиоканалов [2], а также непрерывную корректировку традиционно используемых ионосферных моделей (таких как International Reference Ionosphere (IRI) и Voice of America Coverage Analysis Program (VOACAP)). В случае работы пункта мониторинга в режиме вертикального ионозонда, мы получаем высотнo-частотные характеристики ионосферы (ионограммы, см. пример на Рисунке 3). В результате обработки ионограмм могут быть получены профили электронной концентрации в диапазоне высот от 0 до 600 км. В случае работы в режиме ЛЧМ ионозонда наклонного зондирования, мы получаем дистанционно-частотные характеристики (ДЧХ), выбранных КВ каналов распространения радиоволн. Пример зарегистрированной ДЧХ представлен на Рисунке 4. Из анализа ДЧХ могут быть получены такие основные характеристики радиотрассы как наименьшая применимая частота (НПЧ) и максимальная применимая частота (МПЧ). Таким образом, весь массив собираемых данных служит для решения задачи пассивной адаптации КВ канала к ионосферным условиям и в ряде случаев может обеспечить сокращение времени установления связи с 1 – 2 минут до единиц секунд.

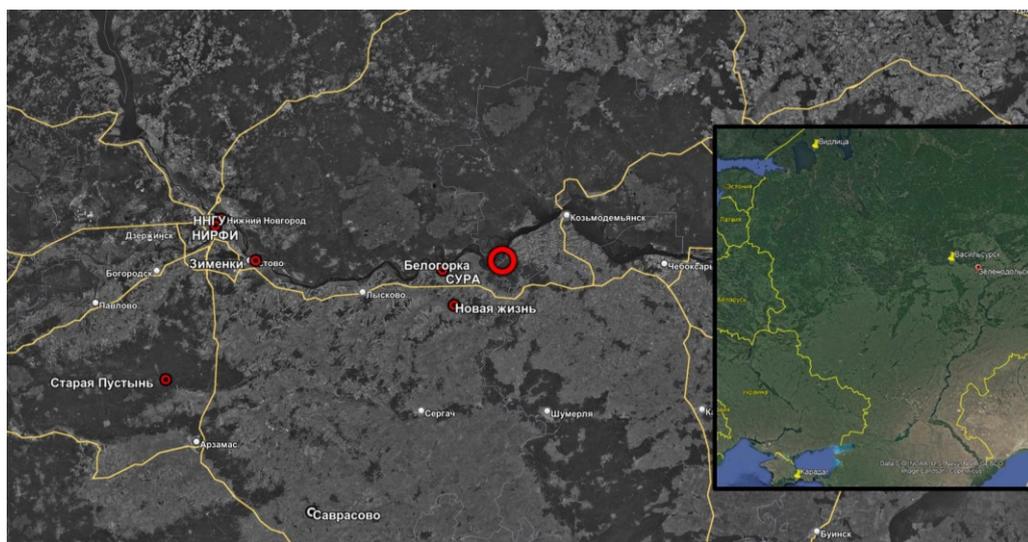


Рисунок 2 – Карта расположения узлов геофизического мониторинга ННГУ

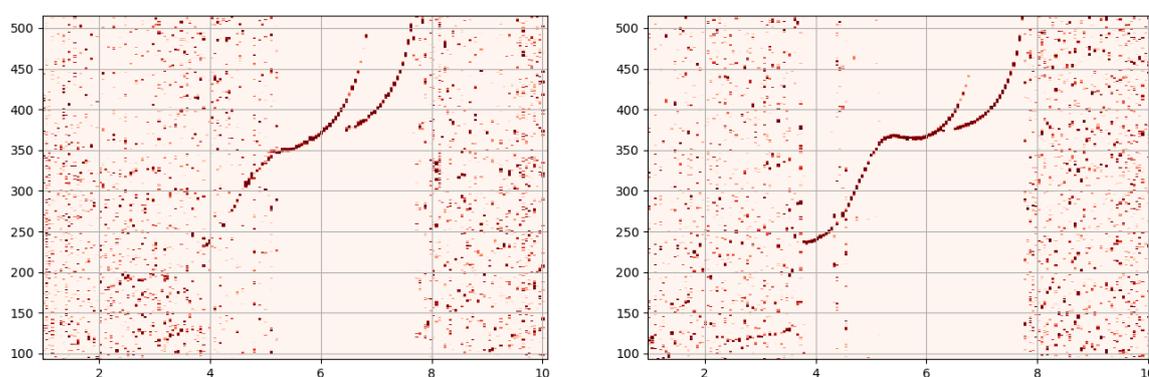


Рисунок 3 – Пример ионограмм, регистрируемых ионозондом ИОН-ФАСТ в течение 1 минуты. Горизонтальная ось – частота в МГц. Вертикальная ось – высота в км. Панель слева – приемный пункт в пункте ЭОБ «Васильсурск». Панель справа – приемный пункт на полигоне «Зименки». Временная метка – 06.05.2024 12:09 UT

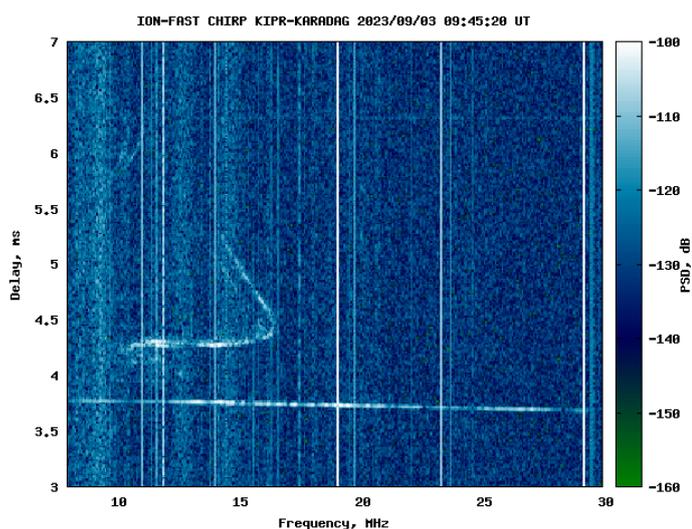


Рисунок 4 – Пример ДЧХ трассы Кипр-Карадаг, зарегистрированной ионозондом ИОН-ФАСТ

Задача активной адаптации ионосферы к КВ радиотрассе может эффективно решаться с помощью стенда СУРА с использованием эффекта ракурсного рассеяния радиоволн на

вытянутых вдоль геомагнитного поля неоднородностях электронной концентрации [3], создаваемых мощным воздействием стенда. Область, занимаемая такими неоднородностями, представляет собой цилиндр диаметром около 100 км и типичной высотой порядка 30 км. Рассеяние радиоволн от данной области происходит строго вдоль ракурсного конуса, что обеспечивает возможность численного моделирования этого эффекта и последующей подстройки параметров воздействия (за счет наклона луча диаграммы направленности ФАР) под конкретную радиотрассу. Пример моделирования ракурсного канала в ПО, разработанном в НИРФИ представлен на Рисунке 5. Так как высота области неоднородностей достаточно небольшая, у рассеянного сигнала не наблюдается замираний при амплитуде сигнала сравнимой с сигналом, отраженным от регулярной ионосферы. В то же время дисперсия рассеянного сигнала по времени определяет необходимость создания специальных сигнально-кодовых конструкций для использования ракурсного канала для передачи полезной информации. Диапазон частот занимаемых ракурсным каналом может достигать 3 МГц и в ряде случаев этот диапазон располагается выше МПЧ для данной радиотрассы. Время создания ракурсного канала составляет единицы секунд после включения мощного воздействия, аналогичное время занимает уничтожение канала после выключения воздействия. Исследование эффекта ракурсного воздействия и отработка методики активной адаптации ионосферы к радиотрассам ведутся с использованием удаленных приемных пунктов, оснащенных ЛЧМ-иозондами наклонного зондирования. Пример ДЧХ, зарегистрированной в удаленном приемном пункте при воздействии на ионосферу мощным КВ излучением стенда СУРА, приведен на Рисунке 6. В настоящий момент ведется подготовка к старту масштабных работ по набору статистики проявлений эффекта ракурсного рассеяния на различных трассах в различных ионосферных условиях.

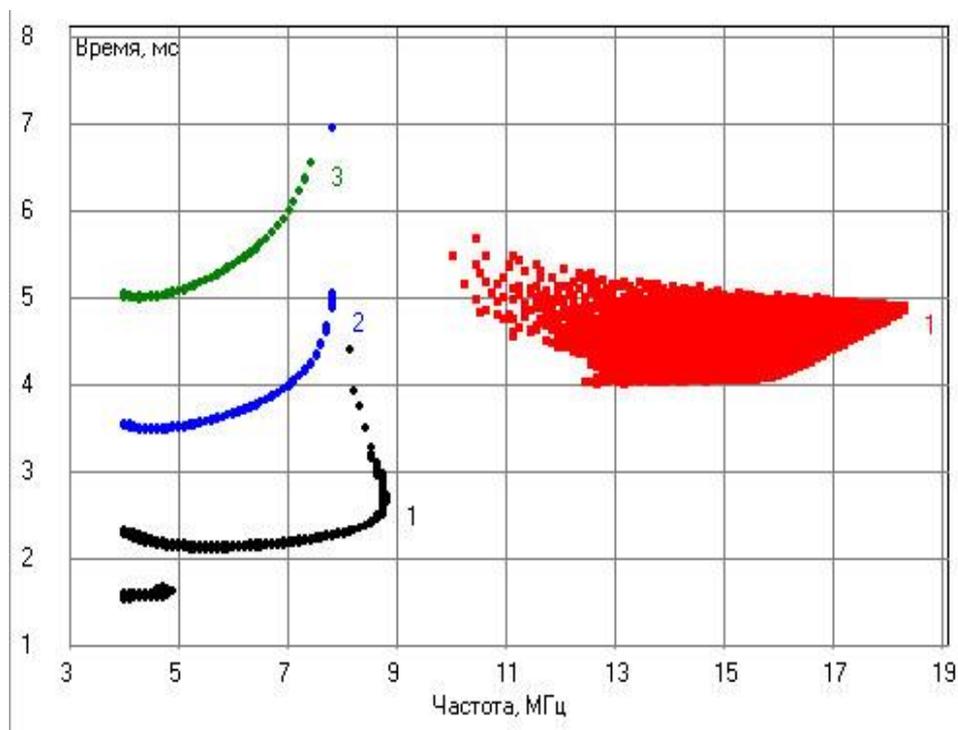


Рисунок 5 – Пример модельной ДЧХ трассы Москва-Воронеж (430 км) на момент времени 22.03.2022 14:00 UT. Красная область – ракурсный канал

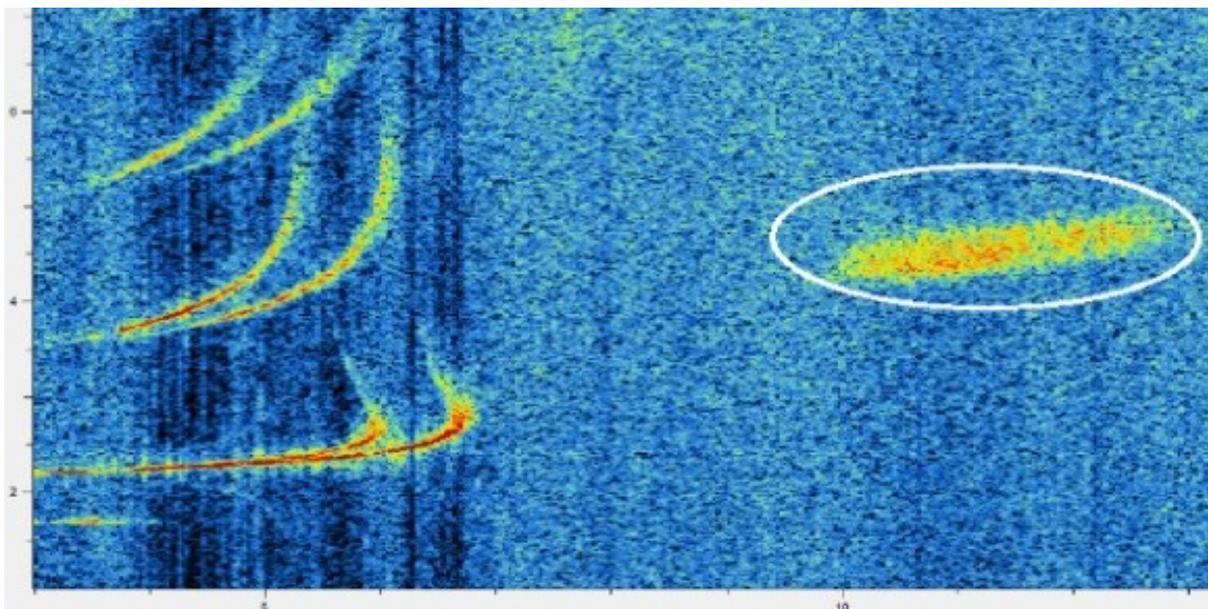


Рисунок 6 – Пример зарегистрированной ДЧХ трассы Москва-Воронеж (430 км) во время работы стенда СУРА. Временная метка – 18.11.2022 14:41 UT. Вертикальная ось – задержка сигнала в мс. Горизонтальная ось – частота в МГц. Область внутри белого эллипса – ракурсный канал

Рассмотренные в статье способы пассивной адаптации КВ радиоканала к состоянию ионосферы и активной адаптации ионосферы к конкретной радиотрассе с помощью стенда СУРА сейчас проходят апробацию на полигонах НИРФИ и партнеров. Разработанные методики могут быть естественным образом перенесены на заполярные регионы РФ путем соответствующего расширения сети геофизического мониторинга и разработки мобильных и компактных установок воздействия на ионосферу.

А.В. Шиндин выражает благодарность Министерству науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта FSWR-2023-0038 базовой части Государственного задания за доступ к контрольно-измерительной аппаратуре НИРФИ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках соглашения №21-72-10131.

Список литературы:

1. Moiseev S.P.; Shindin A.V.; Grekhneva K.K.; Pavlova V.A.; Timukin N.S. ION-FAST as the NIRFI's Ionospheric Diagnostic Platform // *Atmosphere*. – 2024. – V. 15. – №. 2. – С. 188.
2. Урядов В.П., Выборнов Ф.И., Першин А.В. Экстраполяция максимальной применимой частоты путем адаптации ионосферной модели IRI-2007 по данным наклонного зондирования в Евроазиатском регионе // *Известия вузов. Радиофизика*. 2018. Т. 61. № 12. С. 975 – 990.
3. *Radio Science. Special issue: Ionospheric modification by high power transmitters*. – 1974. – V. 9. – № 11.