

СЕНСОРНАЯ ДИАГНОСТИКА ИОНОСФЕРНЫХ КВ РАДИОЛИНИЙ И СЕТЕВЫЕ ПОДХОДЫ К ПЕРЕДАЧЕ ПОЛУЧЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-11-15-22

Иванов Дмитрий Владимирович,
Поволжский государственный технологический университет.
г. Йошкар-Ола, Россия, IvanovDV@volgatech.net

Иванов Владимир Алексеевич,
Поволжский государственный технологический университет.
г. Йошкар-Ола, Россия, IvanovVA@volgatech.net

Рябова Наталья Владимировна,
Поволжский государственный технологический университет.
г. Йошкар-Ола, Россия, RyabovaNV@volgatech.net

Конкин Никита Александрович,
Поволжский государственный технологический университет.
г. Йошкар-Ола, Россия, KonkinNA@volgatech.net

Чернов Андрей Алексеевич,
Поволжский государственный технологический университет.
г. Йошкар-Ола, Россия, ChernovAA@volgatech.net

Manuscript received 12 August 2025;
Accepted 17 October 2025

Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда, грант № 23-19-00145.

Ключевые слова: КВ радиоканал, диагностика, ионосфера, сенсорная сеть, передача информации, алгоритм маршрутизации, протокол обмена данными, имитационное моделирование, OMNeT++

В работе получили развитие методы и средства сенсорной диагностики ионосферных КВ радиоканалов и одновременной высоконадежной передачи полученной информации. Для анализа функционирования распределенных сенсорных сетей проведено имитационное моделирование в среде OMNeT++ с использованием фреймворка INET, реализована модель ad-hoc сети на протоколе AODV с пятью диагностическими пунктами и различной протяженностью радиотрасс. Моделирование подтвердило эффективность разработанных алгоритмов маршрутизации и параметров канального уровня для высоконадежной передачи данных в условиях помех и изменчивости КВ каналов. Представлены разработанные для этих целей в ПГТУ устройства диагностики и высоконадежной передачи информации с использованием программно-конфигурируемых технологий. Экспериментально реализован фрагмент сети для радиолинии протяженностью 80 км.

Информация об авторах:

Иванов Дмитрий Владимирович, Доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, проректор по научной работе, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола, Россия. ORCID: 0000-0002-3609-1157. Область научных интересов – моделирование технических систем, широкополосные сигналы, распространение радиоволн.

Иванов Владимир Алексеевич, Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола, Россия. ORCID: 0000-0002-9860-4771. Область научных интересов – ионосфера, распространение радиоволн, моделирование, широкополосные сигналы.

Рябова Наталья Владимировна, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники и связи, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола, Россия. ORCID: 0000-0002-3515-4750. Область научных интересов – информационно-телекоммуникационные системы, ионосфера, распространение радиоволн, прогнозирование, моделирование, адаптивные системы.

Конкин Никита Александрович, Старший преподаватель кафедры радиотехники и связи, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола, Россия. ORCID: 0000-0001-7052-748X. Область научных интересов – анализ данных дистанционного зондирования ионосферы, машинное обучение, нейронные сети.

Чернов Андрей Алексеевич, Кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и связи, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола, Россия. Область научных интересов – синхронизация систем связи и зондирования, машинное обучение.

Для цитирования:

Иванов В. А., Иванов Д. А., Рябова Н.В., Конкин Н.А., Чернов А.А. Сенсорная диагностика ионосферных КВ радиолиний и сетевые подходы к передаче полученной информации // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. № 11. С. 15-22.

For citation:

V. A. Ivanov, D. A. Ivanov, N. V. Ryabova, N. A. Konkin, A. A. Chernov. "Sensor diagnostics of ionospheric short-wave radio lines and network approaches to transmitting received information," T-Comm, 2025, vol. 19, no.11, pp. 15-22. (in Russian)

Введение

В настоящее время развитие беспроводных инфокоммуникационных технологий обуславливает постановку новых задач, предполагающих использование сложных сигналов различного типа и современных методов их обработки, что влечет за собой модернизацию радиосистем. В частности, внедрение многоэлементных беспроводных сенсорных сетей (БСС) требует разработки специализированных алгоритмов и протоколов с последующей их программно-аппаратной реализацией [1-2], а также создания алгоритмов, обеспечивающих функции самоконфигурации, самосборки, самодиагностики и самовосстановления в условиях изменения внешней среды или отказа отдельных сетевых узлов.

Данные задачи обладают существенной сложностью, т.к. на КВ радиоканал оказывает существенное влияние частотно-временная изменчивость условий распространения в среде (ионосфере) и изменчивость внутриканальных помех различной природы, особенно сосредоточенных помех. Хорошо известно, что КВ сигналы распространяются от передатчика к приемнику скачковыми модами – лучами отражающимися последовательно от слоя ионосферы и земли. Для скачкового распространения принципиальное значение имеют ионосферные слои: E, F1, F2. В системах цифровой связи информация передается достаточно длинными импульсами, которые на приемной антенне интерферируют. В результате проявляется негативный эффект межмодовой частотно-временной дисперсии (рассеяния импульсов по доплеровской частоте и задержке), приводящий к замираниям сигнала. Модовый состав сигнала зависит от протяженности трассы и меняется от геофизических условий среды. Например, длина скачка моды 1E не превышает 2000км, 1F1 – 3000 км и 1F2 – 4000 км.

Для повышения в таких условиях надежности и качества связи необходима работа в оптимальном режиме, который из-за изменчивости канала и канальных помех должен быть адаптивным. Последнее требует использования средств сенсорной диагностики параметров дисперсии и помех. Зависимость условий распространения от географического положения трассы ставит задачу разработки сетевых подходов диагностики и передачи информации потребителям. В свою очередь, сетевой подход в КВ связи обуславливает дальнейшее развитие принципов построения соответствующих задаче сетей с применением технологий искусственного интеллекта (ИИ).

Интенсивное развитие средств сенсорной диагностики всей совокупности каналов из полосы прозрачности КВ радиолонии [4, 6-7] обусловило необходимость использования сложных сигналов и усовершенствования методов их обработки. Таким образом, актуальной является проблема развития методов и средства сенсорной диагностики ионосферных КВ радиоканалов на множестве дальних радиотрасс, а также методов и средств высоконадежной передачи на большие расстояния полученной информации.

Цель работы заключается в совершенствовании методов и средств сенсорной диагностики ионосферных коротковолновых радиолонии, а также в формировании сетевых подходов для передачи данных, направленных на повышение надежности и устойчивости каналов связи в изменяющихся условиях ионосферной среды.

Для достижения поставленной цели используется современное программно-конфигурируемое оборудование, обеспечивающее совмещение функций диагностики радиоканала и высоконадежной передачи информации. Эффективность и применимость предложенного подхода подтверждаются результатами экспериментальной верификации в реальных условиях работы ионосферных радиолонии.

1 Подходы к построению диагностических беспроводных сетей КВ радиолонии

Одним из вопросов при построении диагностической сети является протяженность радиолонии и плотность охвата территории. Как известно, для диагностики КВ радиолонии могут быть использованы вертикальные или наклонные ионозонды. Развертывание на территории России плотной сети станций вертикального зондирования ионосферы сопряжено со значительными трудностями, обусловленными обширной площадью страны и ее существенной протяженностью в долготном и широтном направлениях. В сложившейся ситуации наиболее рациональным представляется создание сети для вертикально-наклонного зондирования, которое способно обеспечить повышенную плотность охвата наблюдаемых территорий. При этом диагностическая область, формируемая одной станцией, должна иметь радиус, не превышающий 2000 км, что соответствует предельной длине луча, отраженного от слоя E ионосферы.

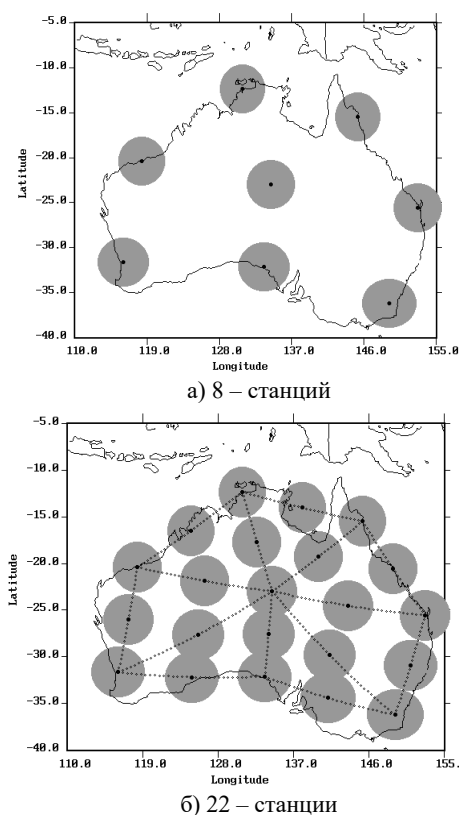


Рис. 1. а – сеть вертикальных сенсоров; б – сеть вертикально-наклонных сенсоров

Иллюстрацией эффективности данной методики служит австралийская сеть ЛЧМ-мониторинга ионосферы.

На рисунке 1а показаны точки размещения станций вертикального зондирования и контролируемые ионосферные области. Очевидно, что восемь станций вертикального зондирования не обеспечивают требуемой пространственной плотности ионосферного контроля. Та же самая сеть ионозондов, представленная на рисунке 1б, но функционирующая в режиме вертикально-наклонного зондирования, по эффективности соответствует работе 22 станций вертикального зондирования. Следовательно, финансовые расходы на формирование сети в значительной степени определяются выбранной методикой.

Благодаря описанной методике достигается требуемая плотность контроля ионосферного состояния. Доказательством служат пространственные распределения MUF(2000) (МПЧ) (рис. 2), полученные при радиомониторинге ионосферы над Австралией в различные периоды суток: а – 06.00UT, б – 12.00UT. По вертикальной оси представлены величины MUF(2000) для радиотрасс длиной 2000 км.

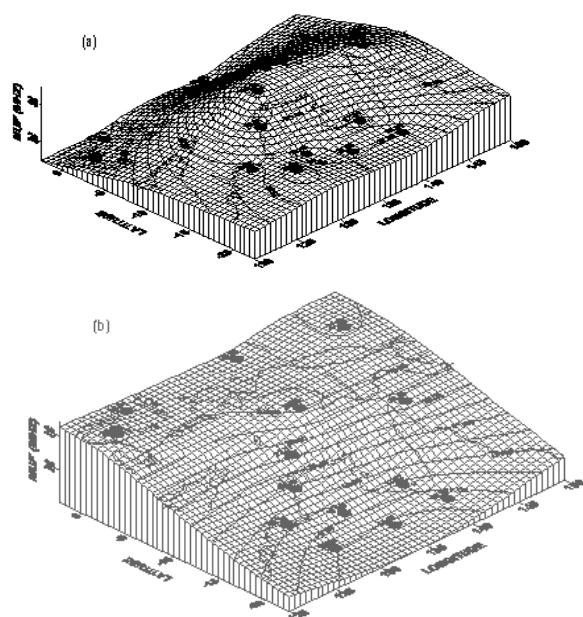


Рис. 2. Пространственные структуры MUF(2000) (МПЧ)

Применительно к российским реалиям, принимая во внимание территориальные масштабы, наиболее целесообразным представляется зональный принцип построения сети. При таком решении 3-4 зоны способны разделить территорию России по широте. Структура сети в границах отдельной зоны может формироваться по аналогии с австралийской моделью. Принцип построения имеет иерархический характер. Информация из зональных центров аккумулируется в центральном узле сети. В зональный центр поступают данные от ионозондов, размещенных в соответствующей зоне.

2 Исследование применимости методологии беспроводных сенсорных сетей для передачи диагностической информации по КВ радиолиниям

При разработке сети коротковолновых радиолиний ключевое значение имеет выбор её топологической конфигурации, от которой зависят основные параметры функционирования

и надежность связи между узлами. В качестве концептуальной основы проведенных исследований была использована модель беспроводных сенсорных сетей, разработанная и реализованная в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН [1-2].

Экспериментальное моделирование выполнялось на испытательной платформе данной беспроводной сенсорной сети с учетом особенностей поставленной задачи. В ходе исследований проводился анализ различных вариантов топологий и сценариев функционирования сети, включая оценку эффективности альтернативных схем маршрутизации и распределения каналов. Такой подход позволил выявить наиболее устойчивые и рациональные решения для организации связи в условиях коротковолнового диапазона.

Принималось во внимание, что в сетевой структуре с промежуточной ретрансляцией данных, когда диагностическая информация от источника не может быть передана непосредственно адресату вследствие существенной дистанции между ними или по причине перегруженности канала трансляции, для гарантирования доставки информации может использоваться алгоритм промежуточной ретрансляции (рис. 3).

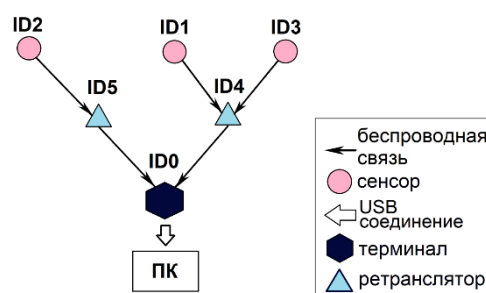


Рис. 3. Топология моделируемой сенсорной сети с ретранслятором

Функцию ретранслятора выполняет приемопередающее устройство (полнофункциональный узел). Оно принимает информационный пакет от абонентского устройства-источника и производит его повторную передачу, если отправитель присутствует в списке доступа данного узла. Этот алгоритм последовательно воспроизводится каждым последующим полнофункциональным узлом, принявшим пакет, до его доставки целевому получателю.

Результаты модельного эксперимента показали, что в условиях ограниченного количества устройств и невысокой интенсивности трафика вероятность синхронной передачи пакетов от различных источников становится пренебрежимо малой. При этом ни сенсорные узлы, ни ретрансляторы не задействуют механизмы предотвращения коллизий, осуществляя передачу данных в строго отведенные временные интервалы.

Организация связи в прямохаотической сети соответствует принципам ad-hoc модели – децентрализованной беспроводной структуры без фиксированной архитектуры. В рамках данной модели сетевое взаимодействие реализуется за счет динамического установления соединений между устройствами, которые самостоятельно формируют сетевую топологию.

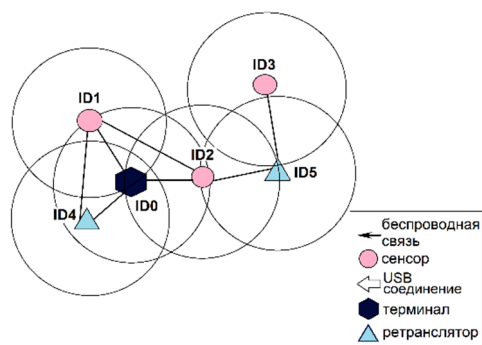


Рис. 4. Структура прямохаотической беспроводной сенсорной сети в режиме ad-hoc

Основополагающий принцип построения ad-hoc сети состоит в условии, согласно которому каждый узел беспроводной сенсорной сети направлен на передачу данных, адресованных прочим узлам. При этом выбор узла производится динамически, опираясь на топологию связности сети (рис.4). Основополагающая идея, лежащая в фундаменте прямохаотической беспроводной сенсорной сети, заключается в том, что при конфигурировании приёмопередатчика на работу в режиме ретранслятора и подключении к нему сенсорного узла, он будет реализовывать одновременно две функции: ретранслировать данные от внешних приёмопередатчиков и транслировать в эфир информацию, поступающую от собственного сенсорного узла.

При выборе алгоритма управления сетью в качестве основных критериев были выбраны: простота реализации и гарантированное обнаружение всех узлов. Для исследования сенсорной сети КВ радиолоний использовалась платформа OMNeT++. Модель представляла ad-hoc сеть по протоколу AODV с пятью узлами, расположенными в г. Москве, г. Йошкар-Оле, о. Кипр, пгт. Диксон и г. Иркутске, с максимальной дальностью до 4500 км. OMNeT++ позволял моделировать передачу сигналов с учетом помех и потерь, а также работу сетевых и прикладных приложений. Сеть должна функционировать по принципу динамического построения маршрутов на основе протокола AODV. Каждый узел периодически обменивается информацией о доступных маршрутах и по необходимости инициирует поиск пути к целевому узлу. Передача данных осуществляется только тогда, когда эфир свободен, что предотвращает коллизии и обеспечивает корректную доставку пакетов. Узлы поддерживают актуальность маршрутов за счет регулярной проверки их доступности и обновления информации о потерях связи. Взаимодействие между сенсорами строится на посылке пакетов с командами и данными. Исследования показали, что в такой сети обеспечивается эффективное распределение ресурсов сети и стабильное функционирование даже при больших расстояниях между узлами.

3 Имитационное моделирование беспроводной сенсорной сети КВ радиолоний передачи диагностической информации в среде OMNET++

Для исследования функционирования распределенной в пространстве сенсорной сети ионосферных КВ радиолоний передачи диагностической информации использовалась платформа OMNeT++ [8] с фреймворком INET [9]. Модель представляет ad-hoc сеть по протоколу AODV (Ad hoc On-Demand

Distance Vector) и состоит из пяти приемо-передающих сенсоров, размещенных в г. Москве (центральный хаб), г. Йошкар-Оле (региональный ретранслятор), о. Кипр (граничный узел), пгт. Диксон (арктическая станция) и г. Иркутск (сибирская станция) (рис. 5). Максимальная дальность между узлами соответствует реальным масштабам региональных сетей диагностики и мониторинга ионосферы.

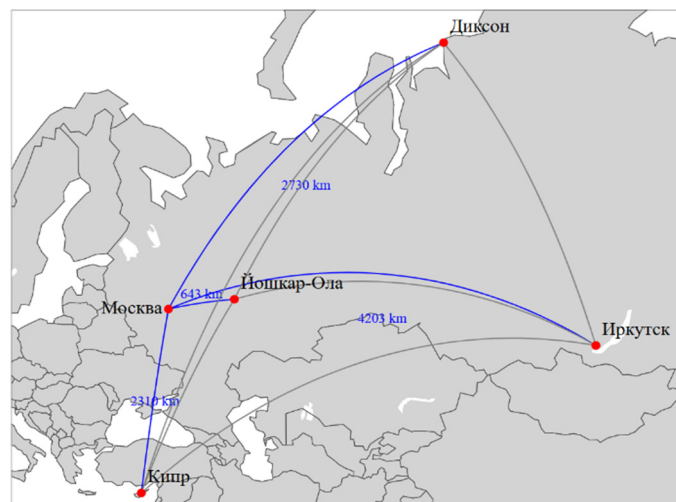


Рис. 5. Структура сенсорной КВ сети в режиме ad-hoc (AODV) для задачи симуляции в OMNeT++

OMNeT++ обеспечивает симуляцию сенсорных сетей ионосферных КВ радиолоний диагностики и передачи информации, моделируя сигналы с помехами, дисперсией и изменчивостью каналов через INET. Ключевые настройки: мобильность для стационарных узлов с координатами; радио-конфигурация с интерфейсом и задание необходимых режимов работы (частота, полоса, мощность, дальность для multi hop, битрейт, преамбула, заголовок), чувствительность приемника, пороговые значения отношения сигнал/шум, модель ошибок принятого сообщения; MAC (Medium Access Control) с АСК (механизм подтверждений), режим полудуплекса, задание таймаутов и слотов против коллизий; очереди пакетов с заданной емкостью; потери в ионосфере, скорость передачи информации, маршрутизация с интервалами приветствий, потерями, диаметром и повторами для ad-hoc; реализация программ уровня приложения для генерации и обработки данных с заданными параметрами: целевые узлы, порты, длина пакетов, интервалы отправки и время старта для моделирования многоцелевого трафика. Сбор и анализ статистики метрик, включая количество пакетов, задержки, количество hop, маршруты, параметры MAC-уровня и сетевого уровня, с логированием данных для последующего анализа.

Задавалась следующая конфигурация модели. Центральная частота 14,1 МГц с полосой пропускания 3 кГц; модель распространения радиосигнала LogNormalShadowing с параметром затухания $\alpha = 1,81$ и стандартным отклонением $\sigma = 4,1$ дБ учитывала флуктуации сигнала, характерные для средневозмущённых ионосферных каналов. Скорость распространения 3×10^8 м/с, фоновый шум -150 дБм при полосе 3 кГц. Мощность передатчиков варьировалась от 1,7 кВт (г. Йошкар-Ола) до 3,9 кВт (о. Кипр), дальность связи – от 1700 км (г. Москва) до 4500 км (о. Кипр). Чувствительность приемников от -106 дБм (о.Кипр) до -134 дБм (пгт.Диксон), пороги SNIR – от 1 до 6 дБ.

Методика эксперимента в рамках исследования сенсорной диагностики ионосферных КВ радиолоний была выстроена с учетом специфики распространения коротковолновых сигналов на больших дистанциях и высокой изменчивости среды. Центральным элементом моделирования стал протокол AODV, адаптированный под особенности КВ-диапазона. В отличие от традиционных реализаций, ориентированных на мобильные и локальные беспроводные сети, в данной конфигурации были заданы увеличенные интервалы обмена служебными сообщениями и более устойчивые параметры маршрутизации. Так, интервал между HELLO-сообщениями составлял 45 секунд – на порядок больше, чем в стандартных реализациях, что позволило снизить нагрузку на канал при сохранении достоверности топологии сети. Диаметр сети был установлен на уровне десяти узлов, а время обхода маршрутов – десять секунд. Для компенсации замираний сигнала и периодов отсутствия связи количество повторных запросов маршрутов (RREQ) увеличено до шести, при ограничении скорости их генерации десятью запросами в единицу времени.

Особое внимание в исследованиях уделялось каналному уровню, где был реализован протокол CSMA/CA с параметрами, адаптированными под условия ионосферной связи. Для различных географических пунктов использовались индивидуальные настройки временных интервалов: SIFS (Short Interframe Space) варьировался от 25 мс для центрального узла (г. Москва) до 55 мс для дальних пунктов (г. Иркутск), DIFS (Distributed Interframe Space) – от 70 до 110 мс, а длительность временного слота – от 15 до 35 мс. Таймауты подтверждения приёма (ACK) изменялись в диапазоне от 1500 до 3500 мс, что отражало реальные задержки распространения сигналов по трассам протяжённостью до нескольких тысяч километров. Емкость очередей передачи также зависела от роли узла в сети: от 100 пакетов для периферийных станций (о Кипр) до 200 пакетов для центрального узла (г. Москва), что обеспечивало баланс между буферизацией и скоростью реакции сети на изменения трафика.

На прикладном уровне использовались средства протокола UDP, реализованные через приложения UdpBasicApp и UdpSink, обеспечивавшие передачу диагностических сообщений различного размера – от 40 до 100 байт – с интервалами от 50 до 250 секунд в зависимости от географического положения узлов. IP-адресация выполнялась в пределах подсети 10.0.1.0/16, что обеспечило гибкое моделирование структуры сети и взаимодействия между пунктами.

Имитационное моделирование, проведённое в среде OMNeT++ с использованием фреймворка INET, охватывало временной интервал 5000 секунд, в течение которого было обработано более 370 тысяч событий. За это время выполнено свыше десяти тысяч передач и около сорока тысяч приёмов

сигналов, а также проведены десятки тысяч вычислений помех и решений о приёме, отражающих взаимодействие сигналов и шумов в радиосреде. Высокая эффективность кэширования – 85,4% для решений о приёме и 66,7% для расчётов помех – подтвердила оптимизацию вычислительных процессов и адекватность модели.

Размер пакетов маршрутизации RREQ на сетевом уровне составил 52 байта (IPv4 – 20 байт, UDP – 8 байт, AODV – 24 байта), а с учётом заголовков MAC и PHY (Physical Layer) – 83 байта. Время распространения запросов маршрутов варьировалось от 376 до 690 миллисекунд в зависимости от расстояния между узлами, что соответствует задержкам, характерным для КВ-связи при дальностях в тысячи километров. Среднее значение hop count не превышало единицы в фазе обнаружения маршрутов, что указывает на эффективность широковещательной рассылки и стабильность прямых каналов между большинством узлов.

Распределение успешной доставки пакетов продемонстрировало закономерную неравномерность, отражающую зависимость качества связи от протяжённости трассы и характеристик среды. Центральный узел (г. Москва) принимал до восьми пакетов, региональный ретранслятор (г. Йошкар-Ола) – до пятнадцати, в то время как для удалённых станций (пгт. Диксон, г. Иркутск) наблюдалось снижение доставляемости, обусловленное значительными потерями на трассе и замираниями. Диапазон идентификаторов маршрутов (reqId) от 4 до 20) и порядковых номеров пакетов (от 2 до 15) подтвердил стабильность функционирования сети и отсутствие избыточной сигнализации, что указывает на адекватность выбранных параметров повторных попыток маршрутизации и канального взаимодействия.

Показано, что предложенная методика моделирования позволила комплексно оценить взаимодействие уровней сетевой архитектуры при передаче диагностической информации в условиях ионосферных КВ-каналов, выявить ключевые зависимости между параметрами AODV и CSMA/CA и подтвердить эффективность разработанных алгоритмов маршрутизации для распределённых сенсорных систем диагностики.

4 Натурное экспериментальное исследование фрагмента сети с реализацией одновременной диагностики и безошибочной передачи информации активным сенсором ПГТУ

Полевые испытания сегмента сети с функцией параллельной диагностики и передачи данных выполнены на коротковолновой ионосферной радиолонии протяжённостью 80 км. Предварительные итоги проведенных исследований были представлены в работах [10, 11]. В ходе эксперимента планировалось задействовать все частотные каналы, входящие в



Рис. 6. Структурная схема эксперимента и используемого оборудования

спектр, выделенный для зондирования ионосферного радиоканала. Использование циклически передаваемого сообщения дало возможность на основании полученных экспериментальных данных сформировать битовую матрицу, в которой каждая строка соответствовала номеру переданного сообщения и его рабочей частоте. В то же время столбцы матрицы содержали оценочные значения битов, теоретически совпадающие между собой. Однако влияние канальных помех вызывало искажения, устранение которых осуществлялось с применением методов математической статистики, в частности, мажоритарного принципа.

Анализ данных выявил, что для частотных компонент, не несущих полезный сигнал либо характеризующихся недостаточным уровнем интенсивности, регистрируются ошибочные битовые значения, что определило актуальность исследования методов повышения достоверности передачи информации. Результаты описанных полевых испытаний [3, 5], подтверждают эффективность данного подхода.

Структурная схема экспериментальной установки показана на рисунке 6. Проведение сеансов передачи данных осуществлялось в сентябре 2023 года по NVIS-трассе, проложенной по маршруту г. Йошкар-Ола – озеро Яльчик, его протяженность составляет порядка 80 км.

В качестве антенного блока в передающем пункте (г. Йошкар-Ола) использовался широкополосный горизонтальный диполь АН-710. В пункте приема (озеро Яльчик) была установлена аналогичная антенная система. Комплекс сенсорной диагностики линии связи и передачи телеграфных сообщений посредством сигнала FMCW-FSK [5] был реализован на основе программно-конфигурируемой платформы USRP (Universal Software Radio Peripheral) [3, 7].

Формирование передаваемых сигналов, а также обработка поступающих данных выполнялись с применением специализированного программного обеспечения и ЭВМ. В основе научной новизны работы лежит разработка оригинальных алгоритмов и соответствующего программного обеспечения для синтеза сигналов и их цифровой обработки.

Эти алгоритмы реализованы в среде GNU Radio версии 3.10.1.1, работающей под управлением Ubuntu 22.04.3 LTS, что обеспечивает гибкость конфигурации, адаптацию параметров сигналов к различным режимам работы и возможность проведения экспериментальных исследований с высокой точностью.

Как уже отмечалось, аппаратная часть экспериментального стенда включала универсальный радиомодуль USRP-N210, обеспечивавший выполнение цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразований, а также функций цифрового преобразования частоты (DUC и DDC). Для реализации этих операций применялась ЭВМ, оснащенная гигабитным сетевым интерфейсом.

Передаваемый сигнал проходил усиление при помощи усилителя LZY-22+, обеспечивающего выходную мощность до 10 Вт. Изменение частоты LFMCW-сигнала происходило со скоростью 50 кГц/с при установленной битовой скорости 50 бит/с, что обеспечивало стабильность модуляции и высокую точность передачи данных.

Результаты зондирования, полученные в ходе эксперимента, упорядочивались по частоте для смежных каналов с полосой 20 кГц, после чего для каждого из них вычислялось

отношение сигнал/шум (в дБ). Визуализация параметров зондирования (ПЗМ) позволила получить наглядное представление о частотных зависимостях и временных задержках принимаемых мод, что дало возможность более детально оценить характеристики исследуемого радиоканала [7].

Ширина полосы, приходящаяся на один информационный бит, составляла 1 кГц. Один символ передаваемого сообщения содержал 8 бит и занимал полосу 8 кГц. Таким образом, сообщение длиной 16 символов охватывало в частотной области диапазон 128 кГц. Начальная и конечная частоты несущего ЛЧМ-сигнала составляли соответственно 2 и 10 МГц. Продолжительность одного сообщения, циклически повторяемого 62 раза в диапазоне 2-10 МГц, достигала 160 с.

В ходе экспериментов было передано и принято телеграфное сообщение "test message!!!" и сохранено в памяти ЭВМ, при этом декодированные символы сохранялись для последующего анализа достоверности передачи.

Обработка экспериментальных данных показала, что реализованный метод, использующий частотно-временное разнесение сигнала в сочетании с текущей диагностикой канала, позволяет достигать безошибочной передачи малых объемов данных в условиях загруженности помехами NVIS-каналов ионосферной КВ связи. Установлено, что метод частотно-временного разнесения без диагностики канала демонстрирует существенно меньшую эффективность. Предложенный подход рекомендуется для применения в беспроводных сенсорных сетях для обеспечения безошибочной передачи коротких телеграфных сообщений.

4 Выводы

В ходе исследований разработаны методы и средства сенсорной диагностики ионосферных КВ радиоканалов с возможностью параллельной высоконадежной передачи данных. Обосновано использование методологии сенсорных сетей в качестве базовой при определении сценариев маршрутизации, протоколов обмена диагностической информацией и управления сетью.

Имитационным моделированием в OMNeT++ подтверждена эффективность предложенных алгоритмов маршрутизации (модифицированный AODV) и адаптированных параметров канального уровня (CSMA/CA) для обеспечения высокой надежности передачи данных в условиях длинных радиолиний, комплекса помех и изменчивости КВ радиоканала из-за частотно-временной межмодовой дисперсии.

В результате моделирования выявлены ключевые ограничения по дальности и чувствительности узлов, показана эффективность кэширования и широкой передачи RREQ-пакетов. Экспериментально показана возможность реализации фрагмента сети с одновременной диагностикой и безошибочной передачей информации на ионосферной КВ радиолинии протяженностью 80 км.

Источник финансирования. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-19-00145.

Литература

1. *Дмитриев А.С., Кузьмин Л.В., Юркин В.Ю.* Сверхширокополосные беспроводные сенсорные сети на основе хаотических радиоимпульсов // Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17. №4. С. 90-104.
2. *Дмитриев А.С., Мохсени Т.И., Петросян М.М.* Экспериментальная реализация относительной схемы беспроводной передачи информации на хаотических радиоимпульсах // Письма в Журнал технической физики. 2022. Т. 48. № 18. С. 10-13.
3. *Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Лацевский А.Р.* Повышение достоверности приема коротких сообщений путем одновременного использования частотно-временного разнесения и сенсорной диагностики // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29. № 6. С. 54-63.
4. *Иванов Д.В., Иванов В.А., Елсуков А.А., Рябова Н.В., Овчинников В.В., Исаев Н.Р.* Метод и алгоритмы автоматического обнаружения сигнала в задаче сенсорной диагностики КВ-радиоканала // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 12. С. 158-170.
5. *Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Ведерникова Ю.А., Чернов А.А.* Метод синхронизации систем низкоскоростной передачи телеграфных сообщений малого объема на КВ-трассах большой протяженности // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 12. С. 6-16.
6. *Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Кислицын А.А.* Обеспечение предельной широкополосности систем спутниковой радиосвязи в условиях внутримодовой дисперсии транссионосферных радиоканалов // Радиотехника и электроника. 2023. Т. 68. № 6. С. 571-578.
7. *Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Елсуков А.А.* Активный и пассивный сенсоры для диагностики квазизенитных ионосферных каналов КВ-связи // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26. № 4. С. 60-67.
8. *Varga A., Hornig B.* Обзор среды моделирования OMNeT++ // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 2008. Т. 38, № 1. С. 60-67. DOI: 10.1145/1416222.1416290.
9. *Varga, A., Hornig, B.* INET Framework Documentation. Version 4.5.4. OMNeT++ Community. Доступно на: <https://inet.omnetpp.org/docs/index.html>. (Дата обращения: 01.10.2025).
10. *Иванов Д.В., Иванов В.А., Елсуков А.А., Рябова Н.В.* Методология и макет программно-конфигурируемой системы для низкоскоростной передачи информации по ионосферному радиоканалу с высокой надёжностью // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2023. № 3(59). С. 45-57. DOI 10.25686/2306-2819.2023.3.45. EDN ZWKIGO.
11. *Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Лацевский А.Р.* Повышение достоверности приема коротких сообщений путем одновременного использования частотно-временного разнесения и сенсорной диагностики // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29, № 6. С. 54-63. DOI 10.18127/j5604128-202406-07. EDN GZTMUX.

SENSOR DIAGNOSTICS OF IONOSPHERIC SHORT-WAVE RADIO LINES AND NETWORK APPROACHES TO TRANSMITTING RECEIVED INFORMATION

Dmitry V. Ivanov, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia, IvanovDV@volgatech.net
Vladimir A. Ivanov, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia, IvanovVA@volgatech.net
Natalia V. Ryabova, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia, RyabovaNV@volgatech.net
Nikita A. Konkin, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia, KonkinNA@volgatech.net
Andrey A. Chernov, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia, ChrenovAA@volgatech.net

Abstract

This paper develops methods and tools for sensor diagnostics of ionospheric HF radio channels and the simultaneous, highly reliable transmission of the acquired information. To analyze the operation of distributed sensor networks, simulation modeling was conducted in the OMNeT++ environment using the INET framework. An ad-hoc network model was implemented using the AODV protocol with five diagnostic points and varying radio path lengths. The simulation confirmed the effectiveness of the developed routing algorithms and channel-layer parameters for highly reliable data transmission in the presence of interference and variability of HF channels. Devices for diagnostics and highly reliable data transmission developed at VSTU for these purposes using software-defined technologies are presented. A network fragment for an 80-km radio link was experimentally implemented.

Keywords: HF radio channel, diagnostic, ionosphere, sensor network, information transfer, routing algorithm, data exchange protocol, simulation modeling, OMNeT++

References

- [1] A. S. Dmitriev, L. V. Kuzmin, and V. Yu. Yurkin, "Ultra-wideband wireless sensor networks based on chaotic radio pulses," *Applied Nonlinear Dynamics*, vol. 17, no. 4, pp. 90-104, 2009.
- [2] A. S. Dmitriev, T. I. Mokhseni, and M. M. Petrosyan, "Experimental implementation of differentially coherent wireless communication scheme based on chaotic radio pulses," *Technical Physics Letters*, vol. 48, no. 18, pp. 10-13, 2022.
- [3] D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, and A. R. Lashchevskii, "Enhancing the reliability of short message reception by simultaneously using frequency-time spreading and sensor diagnostics," *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, vol. 29, no. 6, pp. 54-63, 2024.
- [4] D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, A. A. Elsukov, V. V. Ovchinnikov, and N. R. Isaev, "Method and adaptive algorithms for narrow-band interferences mitigation and automatic signal detection in the problem of sensor diagnosis of multiple hf radio channels," *Radiotekhnika (Radioengineering)*, vol. 87, no. 12, pp. 158-170, 2023.
- [5] D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, Yu. A. Vedernikova, and A. A. Chernov, "Synchronization of radio engineering communication systems and sounding of ionospheric high-frequency radio channels," *Radiotekhnika (Radioengineering)*, vol. 87, no. 12, pp. 6-16, 2023.
- [6] D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, and A. A. Kislitsyn, "Ensuring maximum bandwidth of satellite radio communication systems under intra-mode dispersion of transionospheric radio channels," *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 68, no. 6, pp. 571-578, 2023.
- [7] D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, and A. A. Elsukov, "Active and passive sensors for diagnostics quasi-zenith ionospheric hf communication channels," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 26, no. 4, pp. 60-67, 2023.
- [8] A. Varga and B. Hornig, "An overview of the OMNeT++ simulation environment," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 38, no. 1, pp. 60-67, 2008, doi: 10.1145/1416222.1416290.
- [9] A. Varga and B. Hornig, INET Framework Documentation, Version 4.5.4, OMNeT++ Community, 2025. [Online]. Available: <https://inet.omnetpp.org/docs/index.html>. [Accessed: Oct. 1, 2025].
- [10] D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, A. A. Elsukov, and N. V. Ryabova, "Methodology and prototype of a software-defined system for low-rate data transmission over ionospheric radio channels," *Bulletin of the Volga State University of Technology. Series: Radio Engineering and Infocommunication Systems*, no. 3(59), pp. 45-57, 2023, doi: 10.25686/2306-2819.2023.3.45.
- [11] D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, and A. R. Lashchevskii, "Enhancing the reliability of short message reception by simultaneously using frequency-time spreading and sensor diagnostics," *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, vol. 29, no. 6, pp. 54-63, 2024, doi: 10.18127/j5604128-202406-07.

Information about authors:

Dmitry V. Ivanov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Vice-Rector for Research, research interests – modeling of technical systems, broadband signals, radio wave propagation, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia. ORCID: 0000-0002-3609-1157

Vladimir A. Ivanov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Higher Mathematics, research interests – ionosphere, radio wave propagation, modeling, broadband signals, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia. ORCID: 0000-0002-9860-4771

Natalia V. Ryabova, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Radio Engineering and Communications, research interests – information and telecommunication systems, ionosphere, radio wave propagation, forecasting, modeling, adaptive systems, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia. ORCID: 0000-0002-3515-4750

Nikita A. Konkin, Senior Lecturer, Department of Radio Engineering and Communications, research interests – analysis of ionospheric remote sensing data, machine learning, neural networks, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia. ORCID: 0000-0001-7052-748X

Andrey A. Chernov, Candidate of Technical Sciences, Department of Radio Engineering and Communications, research interests – synchronization of communication and sensing systems, machine learning, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia