

УДК: 621.39

DOI: 10.26907/rwp29.2025.51-56

СЕНСОРНАЯ ДИАГНОСТИКА ИОНОСФЕРНЫХ КВ РАДИОЛИНИЙ. СЕТЕВЫЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ПОЛУЧЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Н.В. Рябова

Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола, Россия

E-mail: RyabovaNV@volgatech.net

Аннотация. В работе получили развитие методы и средства сенсорной диагностики ионосферных КВ радиоканалов и одновременной высоконадежной передачи информации с применением программно-конфигурируемых устройств разработки ПГТУ. Экспериментально реализована безошибочная передача информации на трассе протяженностью 80 км. Создан сетевой подход и предложена методология его использования для передачи потребителям полученной при сенсорной диагностике КВ радиолиний информации. Обоснована возможность использования в качестве базового разработанного в ИРЭ РАН метода для определения сценариев маршрутизации, протокола обмена диагностической информацией и управления сетью.

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

SENSORY DIAGNOSTICS OF IONOSPHERIC HF RADIO LINES. NETWORK APPROACHES FOR TRANSMITTING THE OBTAINED INFORMATION

D.V. Ivanov, V.A. Ivanov, N.V. Ryabova

Abstract. In this work, methods and tools for sensory diagnostics of ionospheric HF radio channels were developed. These methods also enable simultaneous and highly reliable information transmission using programmable devices designed at VSUT. An experiment was conducted, during which information was transmitted without errors over a distance of 80 km. A network approach was developed, and a methodology for its application was proposed to transmit information obtained from the diagnostics of HF radio channels to consumers. The possibility of using the method developed at IRE RAS as a foundation for determining routing scenarios, a protocol for exchanging diagnostic information, and network management was substantiated.

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

Введение

Бурное развитие беспроводных инфокоммуникационных технологий ставит новые задачи, включающие создание, исследование и использование новых типов сигналов и методов их обработки, разработку и развитие радиосистем, исследования в области многоэлементных беспроводных сетей, в том числе беспроводных сенсорных сетей (БСС) [1–2]. Кроме исследований, связанных с созданием аппаратной части радиосредств и беспроводных сетей, важнейшее значение приобретают программные средства, обеспечивающие устойчивое автономное функционирование многоэлементных беспроводных (сенсорных) сетей, включая вопросы их самоконфигурации, самосборки, самодиагностики и самовосстановления при изменении внешних условий или выходе из строя отдельных узлов сети.

В части задач ионосферной КВ связи актуальным является повышение достоверности передачи сообщений. Для их решения предлагается использовать метод частотно-временного разнесения передаваемых с повторением сигналов. Одновременно требуется сенсорная диагностика всего множества каналов из полосы прозрачности радиолинии [4, 6–7] для одновременной диагностики и передачи информации. Дело в том, что ионосферный канал распространения КВ создает значительные межмодовые и внутримодовые дисперсионные искажения, а также помехи приему передаваемого сообщения, кроме того, его характеристики изменяются как во временной, так и в частотной областях. Для повышения надежности и качества связи в таких условиях необходима разработка средств сенсорной диагностики радиоканалов и сетевых подходов передачи информации потребителям. Сетевой подход в КВ связи предполагает создание принципов построения соответствующих задаче диагностических сетей, методов и средств сенсорной диагностики и передачи информации потребителям. В этом случае требуется разработка алгоритмов маршрутизации потоков данных, передаваемых в сети

сенсоров и протоколов обмена диагностической информацией. В последнее время в связи с работами, направленными на создание когнитивных систем связи, и достижениями в области ионосферного распространения КВ, решение обозначенных задач является актуальным.

Целью является развитие методов и средств сенсорной диагностики ионосферных КВ радиоканалов, создание сетевых подходов для передачи полученной информации, в частности, принципов построения сети, оценки расположения диагностических пунктов, зонового размещения приемо-передающих сенсоров, определение алгоритмов маршрутизации и протоколов обмена данными.

Вертикально-наклонный сенсор КВ радиолинии разработки ПГТУ и возможности одновременной передачи диагностической информации (натурный эксперимент)

В данной задаче предполагалось использование для связи всех частотных каналов из диапазона зондирования ионосферной радиолинии. Повторяющееся сообщение позволяло в результате полученных экспериментальных данных построить битовую матрицу, где каждая строка соответствует номеру переданного сообщения и его рабочей частоте. В столбцах матрицы содержатся оценки значений битов сообщения, которые в идеале должны быть одинаковыми. Однако из-за помех в канале возникают ошибки, поэтому для оценки значений битов использовались методы математической статистики, в частности, мажоритарный метод. Его эффективность была подтверждена в представленных ниже данных натурных экспериментов [3,5]. Из общих соображений следует, что анализ частотных элементов, не содержащих сигнала, или содержащих сигнал недостаточной мощности будет приводить к ошибочным значениям битов. Поэтому нами исследовалась гипотеза повышения достоверности при учете этих обстоятельств.

Эксперименты по передаче информации проводились (19–21).09.2023 на NVIS трассе г. Йошкар-Ола – оз. Яльчик, протяженностью около 80 км. Структурная схема эксперимента приведена на рисунке 1.

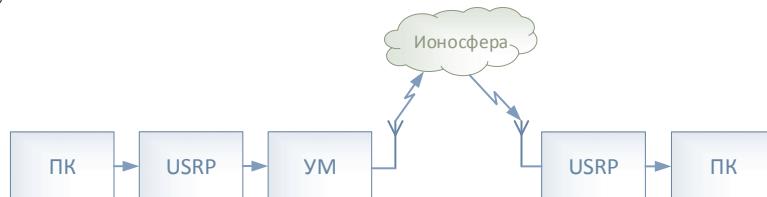


Рис. 1. Структурная схема эксперимента и используемого оборудования

В качестве передающей антенны в г. Йошкар-Ола использовался широкополосный горизонтальный диполь типа АН-710. В пункте приема (оз. Яльчик) использовалась аналогичная антенна, установленная под углом 15 градусов к поверхности земли. Система сенсорной диагностики линии и каналов связи, а также передачи телеграфных сообщений FMCW–FSK сигналом [5] реализована с использованием программно-конфигурируемой универсальной платформы USRP (Universal Software Radio Peripheral) [3, 7]. Процесс формирования передаваемых сигналов и обработки принимаемых сигналов осуществляется с использованием персонального компьютера (ПК). Оригинальными являются применяемые алгоритмы и созданное программное обеспечение для синтеза и цифровой обработки сигналов на основе пакета GNU Radio версии 3.10.1.1 (операционная система Ubuntu версии 22.04.3 LTS). Аппаратная часть на устройстве USRP-N210 выполняла функции цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразований, а также DUC (Digital Up Conversion) и DDC (Digital Down Conversion). В этой части решаемой задачи использовался ПК, оборудованный сетевым интерфейсом GB Ethernet. Передаваемый сигнал усиливается по мощности оборудованием LZY-22+. Мощность излучаемого сигнала составляла 10 Вт. Скорость изменения частоты LFMCW сигнала составляла 50 кГц/с. Битовая скорость 50 бит/с. Упорядоченное по частоте множество ПЗМ определялись для примыкающих каналов с полосами 20 кГц. Для каждого оценивалось в дБ отношение сигнал-шум. Визуальное представление всех ПЗМ показывало частотные зависимости задержек принимаемых мод [7].

Полоса, занимаемая одним битом информации, была равна 1 кГц. Знак передаваемого сообщения состоял из 8 бит, поэтому занимаемая им полоса была равна 8 кГц. Сообщение состояло из 16 знаков и занимало в частотной области полосу 128 кГц. Начальная частота несущего ЛЧМ сигнала была равна 2 МГц, а конечная – 10 МГц. Время доставки одного повторяющегося 62 раза в полосе 2–10 МГц сообщения составляло 160 с. Длительность бита составляла 20 мс, а всего сообщения из 128 бит – 2,56 с. Таким образом реальная битовая скорость с учетом повторения составляла 0,8 бит/с.

В экспериментах передавалось телеграфное сообщение с текстом «test message!!!». Оно записывалось в текстовый файл (15 текстовых знаков и знак переноса строки \n). В приемнике декодированные знаки записывались в текстовый файл для последующего анализа достоверности передачи.

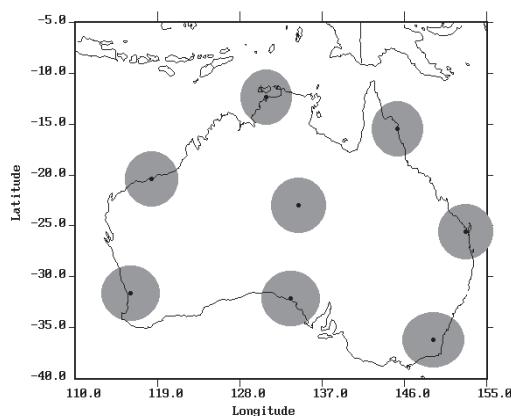
В результате обработки данных, полученных в эксперименте установлено, что развитый метод, использующий кроме частотно-временного разнесения связного сигнала, данные текущей диагностики, позволяет в условиях учета загруженности помехами NVIS каналов ионосферной КВ связи достигать безошибочной передачи малых объемов информации. Без применения одновременной диагностики канала метод частотно-временного разнесения не обладает столь высокой эффективностью.

Развитый подход предполагается использовать для передачи коротких телеграфных сообщений в сети данных. Он применим для радиосвязи, как со стационарными, так и с подвижными объектами.

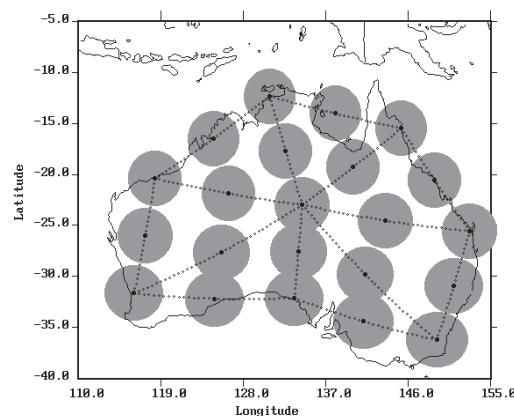
Условно считается, что в режиме тактической связи (дальность до 500 км) используют частоты 3–8 МГц, в режиме стратегической связи (500–3000 км) – частоты 9–30 МГц. Пространственная изменчивость электронной концентрации (изменчивость в зависимости от точки на поверхности Земли) требует создания диагностических сетей региона. Известно, что пространственный радиус корреляции вариаций профиля электронной концентрации составляет ~ 300 км. Поэтому можно считать, что при наклонном зондировании среды за счет односкачковых мод контролируется состояние ионосферы в средней точке трассы, называемой контрольной точкой зондирования (КТЗ), а также в круговой области радиусом 300 км с центром в ней. Отметим, что по ионограмме наклонного зондирования восстановить профиль электронной концентрации в КТЗ, связанный с модами 1E, 1F1 и 1F2, можно только в случае, когда протяженность трассы не превышает 2000 км. Это обстоятельство следует учитывать при создании сети зондирования ионосферы и каналов КВ связи в регионе.

Вопросы построения диагностических сетей КВ радиолиний

Создание плотной сети вертикальных ионозондов на территории России практически невозможно из-за ее большого масштаба, протяженности в широтном и долготном направлениях. В этой связи предпочтение следует отдать созданию сети вертикально-наклонных ионозондов, покрывающих поверхность. Диаметр покрытия одной диагностической зоны должен составлять менее 2000 км (максимальная длина скачка при отражении от слоя E).



8 – станций



22 – станции

Рис. 2: а – сеть вертикальных сенсоров; б – сеть вертикально-наклонных сенсоров

В качестве примера применения такого подхода можно привести сеть ЛЧМ зондирования ионосфера над Австралией. На рис. 2а обозначены пункты вертикального зондирования ионосферы и контролируемые участки ионосферы. Видно, что 8 вертикальных ионозондов не обеспечивают необходимой пространственной плотностью контроля за ионосферой. Представленная на рис. 2б сеть тех же ионозондов, но работающих в режиме вертикально–наклонного зондирования, эквивалентна работе 22 вертикальных ионозондов. Поэтому финансовые затраты на организацию сети существенно зависят от применяемых подходов.

За счет данного подхода обеспечивается необходимая плотность контроля за состоянием ионосферы. Подтверждением этому являются пространственные структуры MUF(2000) (МПЧ) (рис. 3), полученные в результате радиомониторинга ионосферы над Австралией, относящиеся к различному времени суток: а – 06.00UT, б – 12.00UT. По вертикали отложены значения MUF(2000) для трасс протяженностью 2000км.

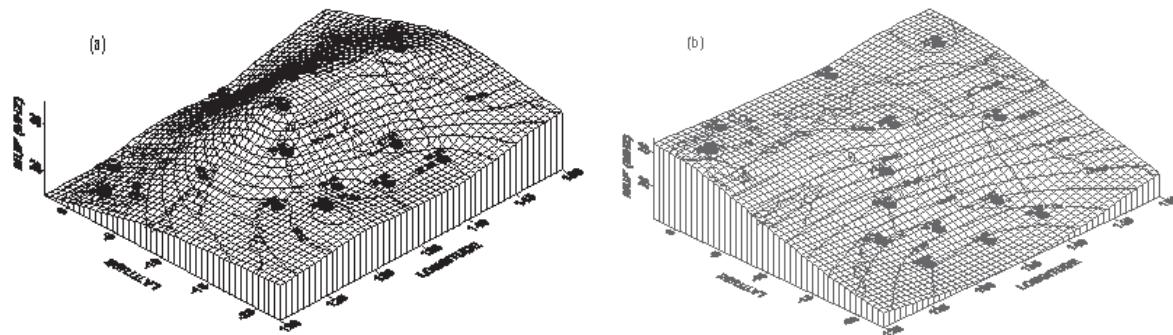


Рис. 3. Пространственные структуры MUF(2000) (МПЧ)

Для России больше подходит зоновое построение сети. В этом случае 3–4 зоны могут разделять территорию России по широте. Внутри зоны сеть может строиться аналогично австралийской. Принцип построения иерархический. В центр сети стекаются данные из зоновых центров. В зоновый центр передаются данные от ионозондов, расположенных в данной зоне.

Исследование применимости методологии беспроводных сенсорных сетей разработки ИРЭ РАН к передаче диагностической информации КВ радиолиний (модельный эксперимент)

Модельный эксперимент проведен на научном стенде беспроводной сенсорной сети, созданном в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН [1–2]. Изучалось несколько режимов работы сети и сценариев маршрутизации.

Сеть с ретрансляцией данных, когда результаты диагностики с передающего устройства не могут быть получены непосредственно адресатом, вследствие его удаленности от передающего устройства, либо из-за занятости канала связи, тогда для доставки данных может быть применен алгоритм их ретрансляции (рис.4).

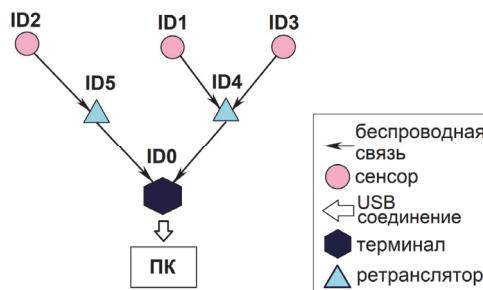


Рис. 4. Топология моделируемой сенсорной сети с ретранслятором

В качестве ретранслятора может работать приемо-передатчик (полнофункциональное устройство), который принимает пакет данных от передающего устройства абонента и, если передающее устройство значится в таблице доступа данного полнофункционального устройства, происходит переизлучение пакета данных в эфир. Процедура повторяется в следующем полнофункциональном устройстве, получившем данный пакет, пока не доходит до необходимого адресата.

Модельный эксперимент показал, что при небольшом количестве устройств и низкой скорости передачи информации вероятность одновременного излучения пакетов от различных устройств небольшая, в этом случае ни сенсоры, ни ретрансляторы не предпринимают меры по предотвращению «столкновений» в эфире, а просто передают информацию в назначенный момент времени.

Сценарий взаимодействия по принципу ad-hoc сети. В модельной беспроводной сенсорной сети, коммуникационные функции могут осуществляться по принципам ad-hoc сети – децентрализованных беспроводных сетей, не имеющих постоянной структуры, устройства соединяются «на лету», образуя собой сеть.

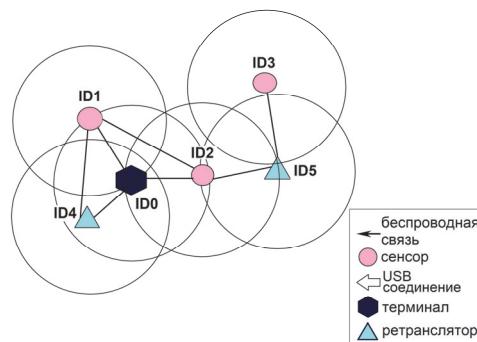


Рис. 5. Структура прямых беспроводной сенсорной сети в режиме ad-hoc

Принцип, являющийся основным для построения ad-hoc сети, это условие, когда каждый узел беспроводной сенсорной сети пытается переслать данные, предназначенные другим узлам. При этом определение того, какому узлу пересылать данные, производится динамически, на основании связности сети (рис. 5).

Главный принцип, заложенный в прямых беспроводной сенсорной сети состоит в том, что, если приёмопередатчик запрограммирован на работу в режиме ретранслятора и подключить к нему сенсорный узел, то он будет выполнять одновременно две функции: ретранслировать данные от сторонних приёмопередатчиков и транслировать в эфир данные, снимаемые со своего сенсорного узла.

Управление сетью. Протокол SPIN. При выборе алгоритма управления сетью (маршрутизации) основным принципом являлась простота реализации, гарантированное обнаружение всех узлов сети. В качестве главного алгоритма маршрутизации в эксперименте на модельной беспроводной сенсорной сети использовался алгоритм SPIN. Простота реализации достигается посредством того, что основная масса вычислений и обработки данных осуществляется на вычислительном устройстве стока. Гарантированное обнаружение всех узлов сети обеспечивается за счет отсутствия коллизий в радиоканале: в каждый момент времени радиоэфир занимает не более чем одно устройство. Для этого используется разделение ресурсов беспроводной среды передачи по времени: временная ось делится на равные промежутки времени – «слоты». За каждым приемопередатчиком закрепляется свой слот, в течение которого он может передавать информацию в эфир. Таким образом, каждый сенсор (приемо-передатчик) «знает» когда эфир пуст, и он может излучать данные. Тем самым удается избегать коллизий: на один приемник никогда не придут сразу несколько пакетов с данными от различных источников. Взаимодействие между узлами сети осуществляется посредством посылки в эфир пакетов, содержащих в себе в общем случае команды, ответы на команды и данные.

Заключение

Развиты методы и средства сенсорной диагностики ионосферных КВ радиоканалов и одновременной высоконадежной передачи информации с применением программно-конфигурируемых устройств разработки ПГТУ. Экспериментально реализована безошибочная передача информации на радиолинии протяженностью 80 км. Проведенный анализ подходов к построению сети для передачи полученной диагностической информации показал возможную ее структуру. Предложено в качестве базового использовать развитый в ИРЭ РАН метод для определения сценариев маршрутизации, протоколов обмена диагностической информацией и управления сетью. Таким образом, создан сетевой подход и предложена методология его использования для передачи потребителям полученной при сенсорной диагностике КВ радиолиний информации.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 23-19-00145.

Список литературы

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., Лашевский 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 трансионосферных 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.