

Активный и пассивный сенсоры для диагностики квазизенитных ионосферных каналов КВ-связи

Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Н.В. Рябова, А.А. Елсуков

Поволжский государственный технологический университет
424000, Россия, г. Йошкар-Ола,
пл. Ленина, 3

Аннотация – Обоснование. Необходимость активной сенсорной диагностики парциальных КВ-каналов с целью частотного обеспечения квазизенитных КВ-радиолиний в изменчивых условиях распространения сигнала требует повышения эффективности алгоритмов функционирования активных сенсоров за счет сокращения времени излучения. Преодолению данной проблемы способствует переход от последовательной к параллельной (одновременной) диагностике. Другой важной проблемой КВ-связи являются сосредоточенные помехи. Решение этой проблемы возможно методом пассивной сенсорной диагностики, которая позволяет оценить доступность парциальных каналов по уровню спектральной плотности мощности помех в них. **Цель.** Развитие алгоритмов и программных средств, реализующих спектральный мониторинг и параллельное зондирование парциальных каналов для сенсорной диагностики ионосферных каналов квазизенитной КВ-связи. **Методы.** Предлагаемый подход основан на комплексировании методов динамической диагностики при создании интеллектуальных сенсоров ионосферных КВ-радиолиний и развитии методов анализа данных. Используется созданное для решения сформулированных задач специальное программное обеспечение для ЭВМ. Экспериментальные исследования проводятся на основе созданных устройств интеллектуальных активного и пассивного радиосенсоров КВ-радиолиний и загруженности каналов КВ-связи. **Результаты.** Создан сенсор ортогональных квазизенитных ионосферных радиоканалов, для этого развиты алгоритмы синтеза группового импульса, состоящего из ортогональных поднесущих с учетом минимизации пик фактора, алгоритмы разделения поднесущих и вычисление корреляционной функции на приеме. В сенсоре реализован метод модуляции сигнала OFDM-BPSK, позволяющий работать в режиме одновременно-последовательного зондирования в возможном для связи диапазоне рабочих частот, что позволило в 8 раз сократить общее время излучения сигнала. **Заключение.** Полученные научные результаты имеют широкий спектр практических применений, в том числе для повышения эффективности работы систем широкополосной КВ-связи сигналами с расширенным спектром.

Ключевые слова – сенсор; коротковолновая радиосвязь; многомерный широкополосный радиоканал; спектральный мониторинг; оценка доступности; OFDM; ФКМ.

Введение

Полоса прозрачности, параметры частотно-временной дисперсии и спектральная плотность помех квазизенитной линии КВ-радиосвязи (NVIS) испытывают значительные вариации в геофизическом времени. Эту полосу можно разделить на множество парциальных каналов с заданной системой связи полосой пропускания из диапазона от 3 до 24 кГц [1]. Работа систем КВ-связи должна осуществляться в доступных парциальных каналах. Доступность определяется параметрами дисперсии и уровнем антропогенных сосредоточенных помех [2].

В настоящее время для оценки доступности стали применять активные и пассивные сенсоры. Известные активные сенсоры используют принцип последовательной диагностики парциальных каналов из полосы прозрачности (МПЧ-НПЧ) ионосферной линии связи. Последовательная диагностика требует существенных затрат времени, которое вычитается из времени, отведенного на

передачу информации. Преодолению данной проблемы способствует переход от последовательной к параллельной (одновременной) диагностике. В работе [3] предлагается применение одновременного зондирования в 4 диапазонах возможных рабочих частот сигналами с ЛЧМ. В работе [4] представлен алгоритм быстрого измерения ионограмм дискретно-частотным сигналом, состоящим из радиоимпульсов на разных несущих частотах. Альтернативным вариантом может быть применение нескольких параллельных BPSK-сигналов с расширенным спектром (СРС), расположенных на близких ортогональных поднесущих, обеспечивающих частотное разделение парциальных каналов на приеме. Переход от последовательного зондирования к параллельному требует развития алгоритмов синтеза и обработки многочастотного зондирующего сигнала. Пассивные сенсоры позволяют оценивать доступность парциальных каналов по уровню спектральной плотности мощности (СПМ) помех в них. Работа активных senso-

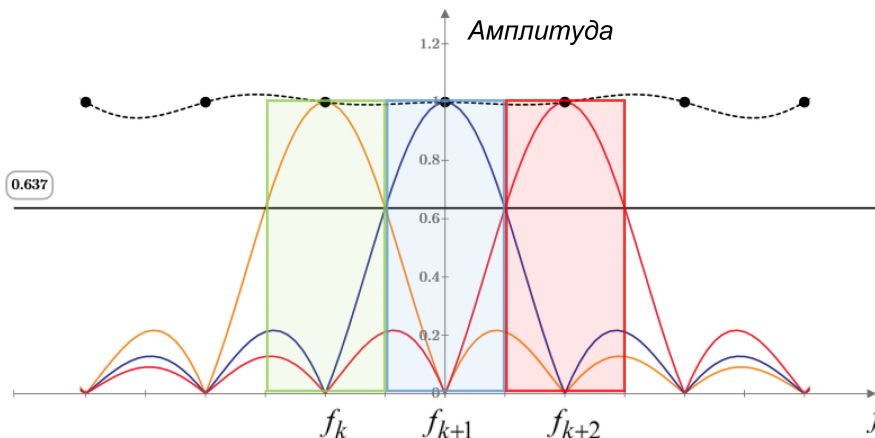


Рис. 1. Фрагмент амплитудного спектра чипов трех ортогональных парциалов со спектрами, описываемыми синусами Котельникова, и их кусочно-постоянная модель
 Fig. 1. Fragment of the amplitude spectrum of chips of three orthogonal partials with spectra described by Kotelnikov sines, and their piecewise constant model

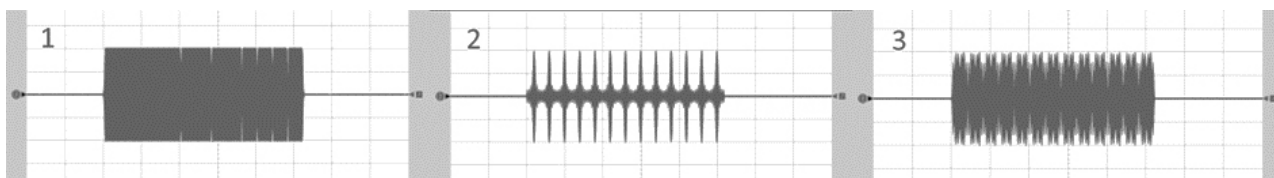


Рис. 2. Импульсный сигнал: 1 – одиночный фазо-кодированный; 2 – многочастотный из 8 ортогональных фазо-кодированных парциалов с шагом 24 кГц; 3 – тот же что в 2, но с фазовым окном Ньюмана
 Fig. 2. Pulse signal: 1 – single phase-coded; 2 – multi-part of 8 orthogonal phase-code partials with a step of 24 kHz; 3 – the same as in 2, but with a Newman phase window

ров в доступных по уровню помех каналах позволяет существенно увеличить энергетику СРС.

Цель работы: развитие алгоритмов и программных средств, реализующих спектральный мониторинг и параллельное зондирование парциальных каналов для сенсорной диагностики ионосферных каналов квазизенитной СВ-связи.

Для реализации поставленной цели необходимо было развить алгоритмы оценки доступности каналов на основе обнаружения сосредоточенных помех, синтеза группового импульса, состоящего из ортогональных поднесущих с учетом минимизации пик-фактора, алгоритмы разделения поднесущих и вычисление корреляционной функции на приеме. Для верификации предлагаемого подхода были проведены натурные эксперименты.

1. Синтез группового импульса, состоящего из ортогональных парциалов с учетом минимизации пик-фактора

Рассмотрим многочастотный импульс, включающий N ортогональных парциалов на поднесущих с индексами $k \in [0, N-1]$, содержащий M чипов длительностью T_{ch} с индексами $m \in [1, M]$. Из теории сигналов известно, что амплитудный спектр

прямоугольного импульса определяется синусом Котельникова и носит лепестковый характер (рис. 1) [5].

Пересечение графиков синуса Котельникова происходит на уровне $2/\pi = 0,64 \approx 0,7$. При этом полоса частот элемента многочастотного сигнала длительностью T_{ch} равна $B_s = N/T_{ch}$. Таким образом многочастотный импульс с ортогональными поднесущими можно рассматривать как альтернативу одночастотному импульсу с последовательной перестройкой с шагом $1/T_{ch}$. Задача синтеза многочастотного сигнала может быть решена путем применения обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ) к N дискретным комплексным отсчетам, задающим начальную амплитуду и фазу соответствующей поднесущей.

Для чипа многочастотного сигнала результатом интерференции парциалов с одинаковой фазой является короткий импульс длительностью T_{ch}/N , пик-фактор при этом равен N . Поскольку средняя мощность, а также энергия сигнала на длительности чипа кодовой последовательности T_{ch} определяются пик-фактором, то на чип будет приходиться в N^2 раз меньшая энергия, чем у одночастотного. Проблема частично решается изменением начальных фаз поднесущих фазовым

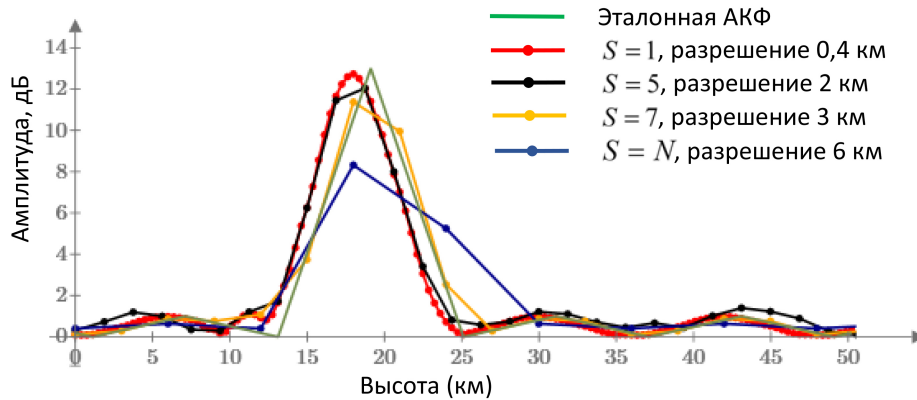


Рис. 3. Вид модельных АКФ при разделении поднесущих методом скользящего спектра с разным шагом скольжения
 Fig. 3. View of model ACFs when separating subcarriers using the sliding spectrum method with different sliding steps

окном [6; 7]. На рис. 2 применение окна Ньюмана позволило уменьшить пик-фактор до 1,8. Энергетические потери чипа парциала при ограниченной мощности передатчика будут составлять примерно $2N$.

2. Разделение поднесущих и вычисление корреляционной функции на приеме

В приемнике реализовано разделение и сжатие фазо-кодированных парциалов а также их когерентное накопление. Каждый парциал позволяет оценить функцию рассеяния соответствующего подканала, параметры рассеяния по задержке и доплеровской частоте, а также отношение сигнал/шум. Для разделения парциалов используется дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Для обеспечения достаточного разрешения по дальности и точности отображения корреляционной функции использовался метод скользящего спектра. Если шаг скольжения составляет один отсчет $S = 1$, то в каждом парциале будет N отсчетов на один чип. Обозначим через индексы z дискретные отсчеты по времени, их количество определяется длительностью накопления $z \in [0, Z - 1]$. Тогда скользящий спектр будет вычисляться по формуле

$$v_{k,z} = \frac{1}{N} \sum_{n=zS}^{zS+N-1} \hat{U}_z \exp \left[-j \frac{2\pi}{N} kn \right]. \quad (1)$$

Чтобы получить правильный порядок частот с нулевой частотой в центре, используется циклический сдвиг на $N/2$. Перед сжатием требуется выделить огибающую для всех поднесущих, т. е. перенести каждый парциал с поднесущей на нулевую частоту, что достигается перемножением на соответствующую опорную частоту, взятую с противоположным знаком. Сетка опорных частот для переноса задается формулой

$$y_{k,z} = v_{k,z} \exp \left[-j2\pi \left(k - \frac{N}{2} \right) \frac{zS}{N} \right]. \quad (2)$$

Результаты исследований при скольжении с разным шагом представлены на рис. 3. В данном случае рассматривался многочастотный импульс с $N = 8$ и кодовой манипуляцией чипов последовательностью Баркер-13. Из полученных результатов следует вывод, что разделение поднесущих методом скользящего спектра с шагом скольжения, равным одному отсчету, позволяет получить минимальную погрешность при оценке задержки. Однако для экономии вычислений можно использовать и больший шаг.

После разделения поднесущих и сжатия импульсов для увеличения отношения сигнал/шум можно использовать когерентное накопление, осуществляя повторное зондирование этим сигналом. Данный алгоритм применяется, например, при одночастотном последовательном зондировании фазо-кодированным сигналом и подробно описан в [8]. В работе показано, что при зондировании парциалом АКФ определяется импульсной характеристикой канала с полосой частот, равной полосе данного парциала, а квадрат ее модуля равен текущему профилю задержки мощности (ПЗМ) канала. Оценка ПЗМ при диагностике позволяет определить рассеяние по задержке и отношение сигнал/шум.

3. Спектральный мониторинг и обнаружение сосредоточенных помех в КВ-диапазоне

Спектральный мониторинг квазивертикальных ионосферных каналов основан на пороговом обнаружении сосредоточенных помех в упорядоченном многомерном широкополосном радиоканале.

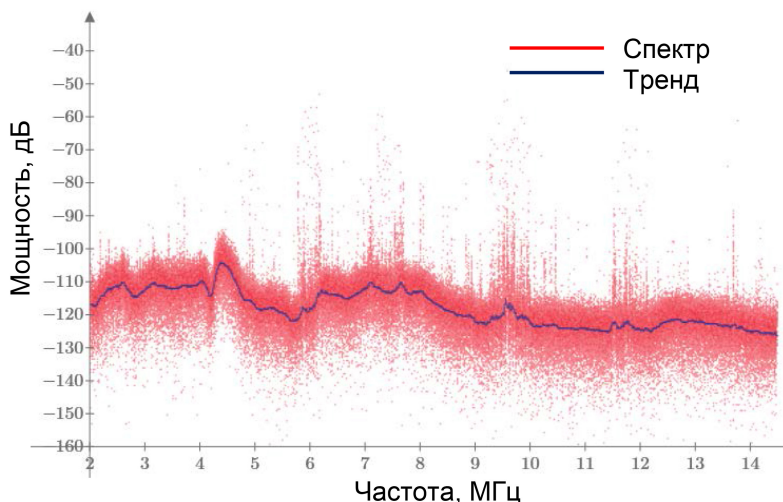


Рис. 4. Спектр смеси шума и антропогенных помех и его тренд
Fig. 4. Spectrum of a mixture of noise and anthropogenic interference and its trend

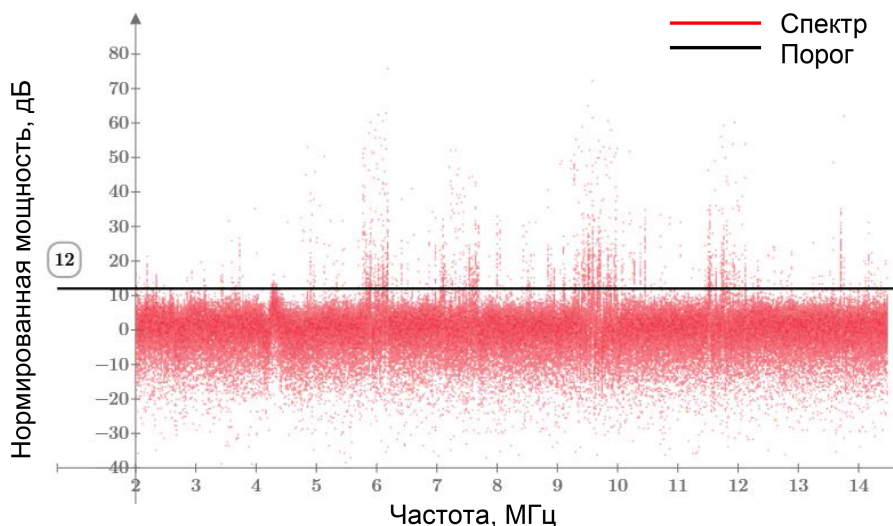


Рис. 5. Спектр шумов и помех после удаления непрерывного тренда и единый уровень порога
Fig. 5. Spectrum of noise and interference after removing a continuous trend and a single threshold level

Большинство помех в КВ-диапазоне имеет полосу 3 кГц (SSB-станции). Широкие полосы около 20 кГц соответствуют вещательным DRM-станциям, но больше всего помех дают вещательные станции с АМ-модуляцией, создающие помеху в полосе 9–10 кГц. Стандартами связи [6] предусмотрены максимальные полосы каналов до 24 кГц. Исходными данными спектрального мониторинга является рассчитываемый с использованием FFT спектр мощности с разрешением 100 Гц. Количество отсчетов в спектре 125 000. Полоса составляет 12,5 МГц (от 2 до 14,5 МГц). Спектральные комплексные отсчеты усредняются по 100 последовательным спектрам и пересчитываются в отсчеты мощности так, что в результате получается усредненный за 1 с спектр мощности шума и помех. Пример спектра, полученный в г. Йошкар-Оле (ПГТУ) с использованием универсальной ап-

паратной платформы типа USRP N210, показан на рис. 4. В качестве антенны использовался широкополосный (рабочий диапазон 1,9...30 МГц) диполь типа АН-710, установленный на крыше пятиэтажного здания.

Особенностью спектра является то, что уровень шума на разных частотах значительно отличается, при этом разница в уровнях достигает 20 дБ. Частотные вариации спектра можно рассматривать с позиций наличия в уровне помех случайного тренда, который для повышения качества анализа можно удалить и получить спектр с удаленным трендом. Для обнаружения сосредоточенных помех пороговым методом необходимо решить задачу оценки порога и уровня, от которого он должен отсчитываться. Тренд выделялся методом медианной фильтрации. Полоса фильтрации 100 кГц была выбрана на основе приведенного выше ана-

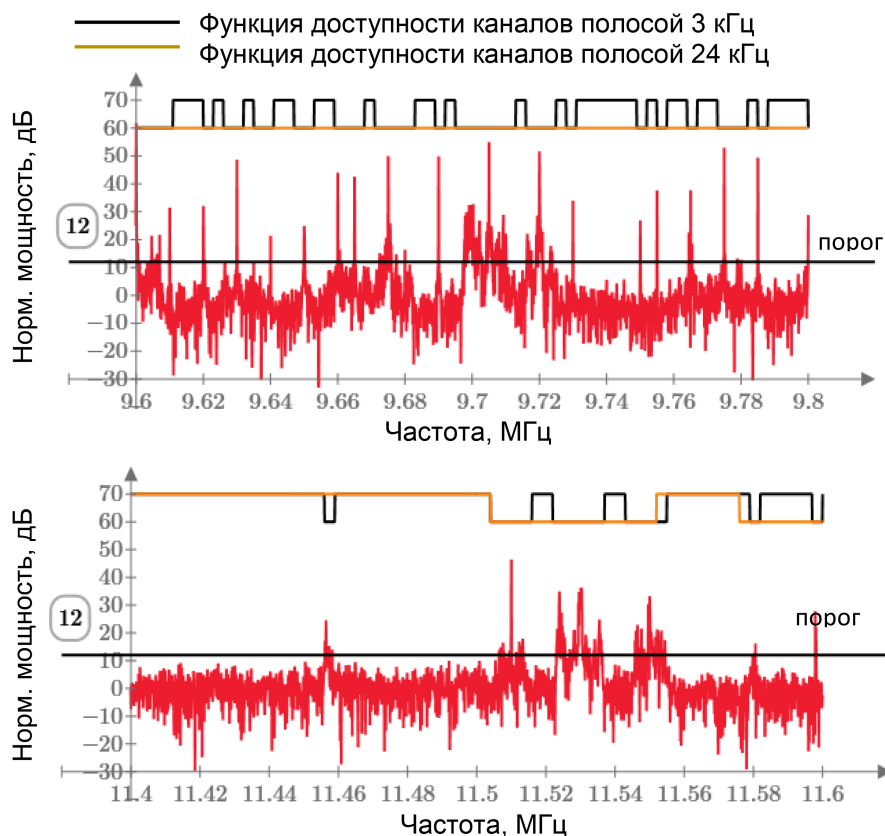


Рис. 6. Фрагменты спектра с функциями доступности
 Fig. 6. Spectrum slices with accessibility features

лиза полосы помех. При этом количество отсчетов с шагом 100 Гц для определения медианы составит 1000. Поэтому такая выборка для вариационного ряда является состоятельной. Удаление тренда реализуется путем нормирования отсчетов спектра на соответствующие им значения медианы. В результате спектры приводятся к единому началу отсчета, соответствующему значениям частотной зависимости медианы. Это позволяет использовать на всей полосе прозрачности единый порог обнаружения сосредоточенных помех. Результат фильтрации показан на рис. 5

Помехи имеют мощность, значительно превышающую шумовой фон, поэтому они все сосредоточены в конце вариационного ряда. Количество помех в каждом поддиапазоне отличается, есть более загруженные помехами поддиапазоны, однако большую часть отсчетов в вариационном ряду составляет шум. При выборе порога будем иметь в виду, что необходимо минимизировать ложные срабатывания, когда высокий уровень шума может быть принят за помеху. Для задания порога обнаружения воспользуемся критерием Неймана – Пирсона, при котором вероятность обнаружения сигнала (сосредоточенной помехи) в 95 % при

вероятности ложной тревоги 0,01 %, выполняется при отношении (сигнал сосредоточенной помехи)/шум, равном 12 дБ. Поэтому уровень порога обнаружения сосредоточенной помехи был выбран равным этой величине, а за начало его отсчета принято значение медианы.

Методика оценки доступности каналов основана на сравнении спектральных отсчетов, попадающих в полосу канала с порогом. Для оценки примыкающих каналов с полосой 3 кГц в каждом канале будет по 30 спектральных отсчетов, полученных с шагом 100 Гц. Канал с полосой 3 кГц считается доступным, если все отсчеты ниже уровня порога. В результате для каналов 3 кГц вычисляется дискретная бинарная функция. Высокий уровень «1» показывает, что канал доступен, низкий «0» – канал занят. Данная функция может быть использована для бланкирования помех. СРС-сигналы более помехоустойчивы. Широкополосный канал с полосой 24 кГц можно разделить на 8 образующих его примыкающих узкополосных подканалов по 3 кГц. В работе [9], исходя из оценки энергетических потерь показано, что для ФКМ-сигнала с полосой 24 кГц, используемого для вертикального зондирования, канал считается доступным если

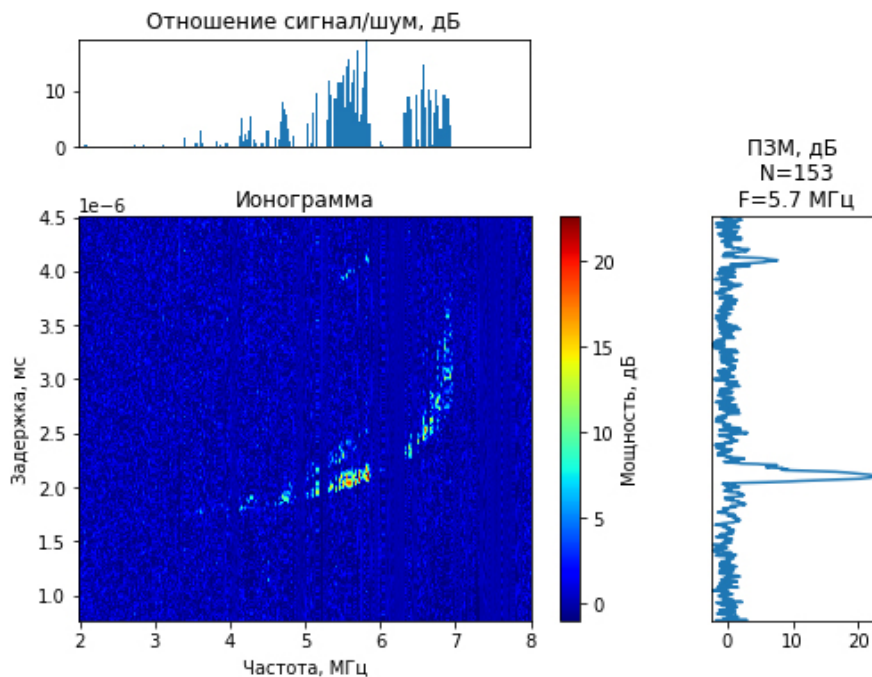


Рис. 7. Данные одновременной диагностики ионосферных радиоканалов СРС типа OFDM-BPSK 8-частотными парциалами с полосой 24,4 кГц каждый
 Fig. 7. Data from simultaneous diagnostics of ionospheric radio channels SRS type OFDM-BPSK with 8 frequency partials with a bandwidth of 24,4 kHz each

7 из 8 образующих его подканалов доступны. Пример работы алгоритма показан на рис. 6.

Очевидно, что диагностика загруженных помехами каналов будет приводить к негативным эффектам при анализе экспериментальных данных с целью оценки параметров частотно-временной дисперсии, а также к энергетическим потерям излучаемого СРС. Для преодоления таких эффектов в работе предусмотрено использование данных пассивного сенсора. В этом случае диапазон прозрачности разбивается на примыкающие полосы величиной 100 кГц, в который укладывается несколько спектров парциальных СРС. В итоге поиска для каждой полосы 100 кГц выбирается полоса парциала с минимальным уровнем помех.

Параметры поиска:

- Количество шагов: 5;
- Шаг по частоте: 10,15, 20, 25 кГц.

Работа на частотах с минимальным уровнем помех, когерентное накопление, согласованная обработка позволяют достичь чрезвычайно высокого отношения сигнал/шум для парциала сенсора.

4. Экспериментальная апробация сенсорной диагностики квазизенитных ионосферных каналов КВ-связи

Для реализации предложенного подхода в эксперименте использован многопарциальный им-

пульс, представляющий собой сумму восьми ортогональных парциалов с двоичной фазовой манипуляцией каждого частотного парциала кодовой последовательностью Баркер-13. Полоса каждого частотного парциала составляла 24,4 кГц, длительность парциала – 520 мкс, а его период повторения ~ 5,1 мс.

Алгоритмы были реализованы на универсальной SDR-платформе USRP N210. В результате NVIS-эксперимента, проведенного 13.03.2023 в 20:49 в г. Йошкар-Ола (ПГТУ), получена информация о состоянии радиоканалов в диапазоне 2–8 МГц (рис. 7). На верхнем графике отражена частотная зависимость отношения сигнал/шум, по которой можно определить, что наилучшим каналом с максимальным отношением сигнал/шум является канал номер 153 с частотой 5,7 МГц. Это же подтверждает пассивная диагностика СПМ. Профиль задержки мощности (ПЗМ) для этого канала показан на рисунке слева. Вертикальная ось соответствует задержке при распространении от передатчика к приемнику. На горизонтальной оси отложена мощность ПЗМ и помех в канале на частоте 5,7 МГц. Видно, что временная дисперсия в данном канале (рассеяние по задержке) не превышает 0,3 мс. Провалы до нуля на графике отношения сигнал/шум соответствуют бланкированным парциальным каналам из-за их значительной загруженности. Как видно на этом

примере, из 245 частотных каналов для связи доступны только около двадцати.

Заключение

Создан сенсор ортогональных квазизенитных ионосферных радиоканалов с применением методов модуляции сигнала OFDM-BPSK, позволяющий работать в режиме одновременно-последовательного зондирования в возможном для связи диапазоне рабочих частот, что позволило в 8 раз сократить общее время излучения сигнала. Представленные алгоритмы реализованы по техноло-

гии программно-конфигурируемых радиосистем и верифицированы в натуральных экспериментах. Полученные научные результаты имеют широкий спектр практических применений, в том числе для повышения эффективности работы систем широкополосной КВ-связи сигналами с расширенным спектром.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-19-00145.

Список литературы

1. Многомерный ионосферный радиоканал и связанные с ним проблемы работы модемов высокочастотной связи / Д.В. Иванов [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2014. № 4 (23). С. 6–22. URL: <https://www.elibrary.ru/tewkpe>
2. Развитие и верификация методов автоматической обработки спектра помех в КВ-диапазоне с применением технологии программно-конфигурируемых радиосистем в задаче оценки доступности радиоканалов / Д.В. Иванов [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2023. № 2 (58). С. 6–17. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2023.2.6>
3. Исследование возможности уменьшения времени зондирования четырехканальным ЛЧМ-ионозондом / Ю.К. Свешников [и др.] // Техника радиосвязи. 2014. № 3 (23). С. 51–60.
4. ВЧ-зондирование ионосферы широкополосными сигналами / А.В. Браницкий [и др.] // Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике: мат. V Всероссийской науч. конф., Муром, 29 июня 2015 г. Муром: Муромский институт Владимирского государственного университета, 2015. С. 73–76.
5. Метод одновременного многочастотного тестирования ионосферных КВ-радиоканалов при дистанционном управлении обработкой и анализом данных / Д.В. Иванов [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 4 (52). С. 6–23. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.4.6>
6. Проблемы вертикального зондирования ионосферы сложными сигналами минимальной мощности / Д.В. Иванов [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 2 (50). С. 6–20. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.2.6>
7. Newman D.J. An L^1 external problem for polynomials // Proceedings of the American Mathematical Society. 1965. Vol. 16, no. 6. P. 1287–1290. DOI: <https://doi.org/10.1090/S0002-9939-1965-0185119-4>
8. Иванов Д.В., Иванов В.А., Елсуков А.А. Разработка и испытание аппаратно-программного комплекса для наземного мониторинга ионосферы с применением SDR-технологии, сложных зондирующих фазо-кодо-манипулированных сигналов и квадратурной обработки // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2019. № 2 (42). С. 71–85. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2019.2.71>
9. Преодоление влияния сосредоточенных помех для уменьшения мощности активного сенсора NVIS-каналов / Д.В. Иванов [и др.] // Распространение радиоволн: сб. док. XXVIII Всероссийской открытой научной конференции, г. Йошкар-Ола, 16–19 мая 2023 г. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2023. С. 220–223. URL: <https://www.elibrary.ru/onxwti>

Physics of Wave Processes and Radio Systems

2023, vol. 26, no. 4, pp. 60–67

DOI [10.18469/1810-3189.2023.26.4.60-67](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.4.60-67)

UDC 621.391.83

Original Research

Received 19 November 2023

Accepted 30 November 2023

Published 29 December 2023

Active and passive sensors for diagnostics quasi-zenith ionospheric HF communication channels

Dmitry V. Ivanov, Vladimir A. Ivanov, Natalia V. Ryabova, Alexey A. Elsuikov

Volga State University of Technology
3, Lenin Square,
Yoshkar-Ola, 424000, Russia

Abstract – Background. There is a growing need for active sensory diagnostics of partial HF channels to provide frequency support to quasi-zenith HF radio links in varying signal propagation conditions. Enhancing the efficiency of active sensor algorithms, particularly by reducing emission time, is topical. To address this, a transition from sequential to parallel (simultaneous) diagnostics is proposed. Another significant challenge in HF communication is narrowband interference, and overcoming this issue involves the method of passive sensory diagnostics. This method assesses the availability of partial channels by analyzing the spectral density of interference power within them. **Aim.** The goal of this study is to develop algorithms and software tools that implement spectral monitoring and parallel sensing of partial channels for sensory diagnostics of ionospheric channels in quasi-zenith HF communication. **Methods.** The proposed approach involves integrating dynamic diagnostic methods into the development of intelligent sensors for ionospheric HF radio links, along with the creation of data analysis methods. Specialized computer software is employed to address the defined tasks. Experimental studies are conducted using the developed devices, which include intelligent active and passive radio sensors for HF radio links, to assess the load on HF communication channels. **Results.** A sensor for orthogonal quasi-zenith ionospheric radio channels has been created, incorporating algorithms for synthesizing a group pulse with orthogonal subcarriers while minimizing the peak factor. Additionally, algorithms for separating subcarriers and calculating the correlation function at the reception have been developed. The sensor employs the OFDM-BPSK signal modulation method, enabling operation in simultaneous-sequential sounding mode across the potential frequency range for communication. This led to an 8-fold reduction in the total signal emission time. **Conclusion.** The scientific results obtained have broad practical applications, particularly in enhancing the efficiency of wideband HF communication systems using spread spectrum signals.

Keywords – sensor; shortwave radio communication; multidimensional broadband radio channel; spectral monitoring; availability assessment; OFDM; BPSK.

✉ IvanovDV@volgatech.net (Dmitry V. Ivanov)

 © Dmitry V. Ivanov, 2023

References

1. D. V. Ivanov et al., “Multidimensional ionospheric radio channel and related problems of operation of high-frequency communication modems,” *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy*, no. 4 (23), pp. 6–22, 2014, url: <https://www.elibrary.ru/tewkep>. (In Russ.)
2. D. V. Ivanov et al., “Development and verification of methods for automatic processing of the interference spectrum in the HF range using the technology of software-defined radio systems in the problem of assessing the availability of radio channels,” *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy*, no. 2 (58), pp. 6–17, 2023, doi: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2023.2.6>. (In Russ.)
3. Yu. K. Sveshnikov et al., “Study of the possibility of reducing the probing time with a four-channel chirp ionosonde,” *Tekhnika radiosvyazi*, no. 3 (23), pp. 51–60, 2014. (In Russ.)
4. A. V. Branitskiy et al., “HF sounding of the ionosphere with broadband signals,” *Sverkhshirokopolosnye signaly v radiolokatsii, svyazi i akustike: mat. V Sserossiyskoy nauch. konf., Murom, 29 iyunya 2015 g. Murom: Muromskiy institut Vladimirskogo gosudarstvennogo universiteta*, pp. 73–76, 2015. (In Russ.)
5. D. V. Ivanov et al., “Method for simultaneous multi-frequency testing of ionospheric HF radio channels with remote control of data processing and analysis,” *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy*, no. 4 (52), pp. 6–23, 2021, doi: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.4.6>. (In Russ.)
6. D. V. Ivanov et al., “Problems of vertical sounding of the ionosphere with complex signals of minimum power,” *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy*, no. 2 (50), pp. 6–20, 2021, doi: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.2.6>. (In Russ.)
7. D. J. Newman, “An L1 external problem for polynomials,” *Proceedings of the American Mathematical Society*, vol. 16, no. 6, pp. 1287–1290, 1965, doi: <https://doi.org/10.1090/S0002-9939-1965-0185119-4>.
8. D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, and A. A. Elsukov, “Development and testing of a hardware and software complex for ground-based monitoring of the ionosphere using SDR technology, complex sounding phase-code-keyed signals and quadrature processing,” *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy*, no. 2 (42), pp. 71–85, 2019, doi: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2019.2.71>. (In Russ.)
9. D. V. Ivanov et al., “Overcoming the influence of concentrated interference to reduce the power of the active sensor of NVIS channels,” *Rasprostraneniye radiovoln: sb. dok. XXVIII Vserossiyskoy otkrytoy nauchnoy konferentsii, g. Yoshkar-Ola, 16–19 maya 2023 g. Yoshkar-Ola: Povolzhskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiiy universitet*, pp. 220–223, 2023, url: <https://www.elibrary.ru/onxwti>. (In Russ.)