

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСПЕРГИРУЮЩЕГО ШИРОКОПОЛОСНОГО КАНАЛА СВЯЗИ И СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В КОГНИТИВНОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-10-13-20

**Иванов Дмитрий Владимирович,**  
Поволжский государственный технологический университет,  
Йошкар-Ола, Россия, [ivanovdv@volgatech.net](mailto:ivanovdv@volgatech.net)

**Иванов Владимир Алексеевич,**  
Поволжский государственный технологический университет,  
Йошкар-Ола, Россия, [ivanovva@volgatech.net](mailto:ivanovva@volgatech.net)

**Овчинников Владимир Викторович,**  
Поволжский государственный технологический университет,  
Йошкар-Ола, Россия, [ovchinnikovvv@volgatech.net](mailto:ovchinnikovvv@volgatech.net)

**Рябова Наталья Владимировна,**  
Поволжский государственный технологический университет,  
Йошкар-Ола, Россия, [ryabovanv@volgatech.net](mailto:ryabovanv@volgatech.net)

**Manuscript received** 24 July 2025;  
**Accepted** 28 September 2025

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

**Ключевые слова:** ионосфера, КВ-связь, диспергирующий широкополосный канал, внутримодовая дисперсия, когнитивная диагностика, адаптивная инверсная фильтрация, SDR, NVIS

В работе исследованы энергетические характеристики диспергирующих широкополосных коротковолновых (КВ) радиоканалов и влияние адаптивной коррекции внутримодовой дисперсии на эффективность передачи информации в когнитивных беспроводных сенсорных сетях. В качестве основного критерия оценки энергетических параметров использовано отношение сигнал/шум (SNR) после согласованной обработки. Разработан подход к когнитивной сенсорной диагностике, который реализует зондирование радиоканала с использованием непрерывного сигнала, имеющего линейно изменяющуюся частоту (LFMCW). Последующая адаптивная обработка методом обратной фильтрации, обеспечивает компенсацию дисперсионных искажений и повышение энергетической эффективности канала передачи. Показано, что использование данного подхода позволяет восстановить сигнал в полосе до 1 МГц, что существенно превосходит параметры стандартных КВ-систем связи. Экспериментальная верификация метода выполнена на NVIS-радиотрассе г. Йошкар-Ола - оз. Яльчик (протяжённостью 90 км). Результаты показали выигрыш по энергетическому критерию до 23 дБ, что обеспечивает поддержание скоростей передачи данных до 9,6 кбит/с. Показано, что когнитивная сенсорная диагностика обеспечивает не только энергетический выигрыш, но и прирост структурной и энергетической скрытности системы за счёт учёта внутримодовой дисперсии и согласованной адаптации к параметрам среды в режиме NVIS.

## Информация об авторах:

**Иванов Дмитрий Владимирович,** Доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, проректор по научной работе, Поволжский государственный технологический университет, 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, Йошкар-Ола, Россия. ORCID: 0000-0002-9860-4771. Область научных интересов – ионосфера, распространение радиоволн, моделирование, широкополосные сигналы.

**Овчинников Владимир Викторович,** Кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и связи, Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия. ORCID 0000-0001-5185-0820. Область научных интересов – дистанционное зондирование ионосферы, КВ связь, машинное обучение, нейронные сети.

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

## Для цитирования:

Иванов Д. В., Иванов В. А., Овчинников В. В., Рябова Н. В. Энергетические характеристики диспергирующего широкополосного канала связи и скорости передачи информации в когнитивной беспроводной сенсорной сети // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №10. С. 13-20.

## For citation:

D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, V. V. Ovchinnikov, N. V. Ryabova, "Energy Characteristics of Dispersive Wideband Channel and Data Rates in a Cognitive WSN," T-Comm, 2025, vol. 19, no.10, pp. 13-20. (in Russian)

## Введение

Коротковолновая (КВ) радиосвязь остаётся одной из наиболее универсальных технологий передачи данных на ближние и дальние расстояния в условиях, когда использование спутниковых или тропосферных систем невозможно или экономически нецелесообразно. Ионосферные КВ-каналы обладают высокой дальностью, однако характеризуются изменчивостью параметров среды и ограниченной полосой пропускания вследствие частотно-зависимой дисперсии [1]. Особенно остро эти эффекты проявляются в системах квазизенитной (NVIS) связи, где радиоволны отражаются от ионосферы под углами  $75-90^\circ$ , обеспечивая связь на расстояниях до 650 км. При этом увеличивается параметр внутримодовой дисперсии групповой задержки (Group delay dispersion, GDD), что вызывает значительные искажения широкополосных сигналов и снижение энергетической эффективности канала [1-5]. Этот эффект требует разработки методов когнитивной коррекции дисперсионных искажений и оценки энергетического состояния канала в реальном времени.

Современные методы повышения пропускной способности КВ-систем, такие как ММО, QAM, адаптивные модуляции, ориентированы в основном на компромисс между спектральной и энергетической эффективностью [6]. В настоящей работе акцент сделан именно на энергетическом критерии канала, выраженном через отношение сигнал/шум (SNR) после согласованной обработки. Метод заключается в сочетании когнитивной диагностики канала в реальном времени и адаптивной коррекции дисперсионных искажений с использованием технологии программно-определяемого радио (SDR). Это позволяет системе NVIS-связи динамически адаптироваться к текущим условиям ионосферы, восстанавливая энергетический профиль широкополосного канала и поддерживая заданные скорости передачи данных при минимальной излучаемой мощности.

Достоверность разработанного метода подтверждена экспериментальными испытаниями на радиолинии г. Йошкар-Ола – оз. Яльчик, имеющей протяжённость порядка 90 км.

**Цель работы:** развитие метода когнитивной сенсорной диагностики с учётом особенностей режима NVIS и экспериментальная оценка его эффективности в части повышения энергетического критерия и доступности широкополосных диспергирующих радиоканалов.

### 1 Когнитивная сенсорная диагностика широкополосного диспергирующего канала связи

Из-за изменчивости среды распространения ионосферного КВ канала его основные параметры во времени претерпевают вариации, способные значительно влиять на энергетические характеристики радиолинии. В первую очередь это связано с внутримодовой дисперсией групповой задержки, которая приводит к неравномерной фазовой задержке в различных поддиапазонах частот и вызывает растяжение (чирпинг) импульсной характеристики (ИХ) сигнала. Это, в свою очередь, снижает отношение сигнал/шум на выходе приёмника, ограничивая допустимые скорости передачи данных [1].

Для поддержания требуемого энергетического критерия канала связи необходимо использование когнитивной диагностики его структурных функций и адаптивная коррекция

дисперсионных искажений. Такая коррекция реализуется путем адаптивного расчета весовых коэффициентов обратного (инверсного) фильтра, задачей которого является компенсация фазовых рассогласований и приведение формы ИХ сигнала к исходному состоянию [1, 3, 4].

Применительно к каналу, имеющему фиксированную полосу пропускания и заданную частотную характеристику (ЧХ)  $H(j\omega, t)$ , любой сигнал со спектром  $U_T(j\omega)$ , не выходящим за границы этой полосы, может быть передан и однозначно восстановлен на приемной стороне. Условием для этого является установка инверсного фильтра с соответствующей ЧХ  $H^{-1}(j\omega, t)$  после квазистационарного канала.

Разработанная методика когнитивной сенсорной диагностики предназначена для быстрой оценки частотных характеристик широкополосных ионосферных КВ-каналов. Такой подход позволяет в реальном масштабе времени компенсировать дисперсионные искажения, восстанавливая энергетический профиль импульсной характеристики и повышая помехоустойчивость и скрытность радиосистемы. Метод ориентирован на каналы с шириной полосы частот до 1 МГц, где влияние внутримодовой дисперсии (GDD) становится критическим. На выходе такого канала искажения сигнала приводят к повышению структурной скрытности системы, с учётом эффективной демодуляции частотной характеристики канала на основе диагностических данных. При этом наибольшим искажениям подвержены NVIS каналы [7].

Для построения инверсного фильтра требуются значения отсчетов ЧХ  $H_k(j\bar{\omega}_k)$  широкополосного канала. Методика их получения в широкой полосе частот имеет свои особенности, которые сводятся к тому, что они определяются в области быстрого времени на основе отсчётов для совокупности комплексных примыкающих ИХ подканалов широкополосного канала.

В режиме диагностики структурных характеристик методика измерений учитывала интерференцию ИХ скачковых мод, за счёт выбора полосы парциала сложного тестирующего сигнала. Теоретический анализ задачи показал, что для широкополосного канала с полосой 1 МГц необходимо разбиение на  $N=125$  подканалов, каждый из которых имеет ширину полосы  $\omega_{ch} = 8$  кГц. Такая декомпозиция обоснована тем, что в столь узкой полосе  $[\bar{\omega}_k - \omega_{ch}/2, \bar{\omega}_k + \omega_{ch}/2]$  нелинейными фазовыми искажениями можно пренебречь.

С целью исследования широкополосного канала и измерения его ЧХ в среде с выраженной частотной дисперсией была предложена физическая модель связанного КВ сигнала [8]. На основе математического анализа было показано, что его адекватной моделью может служить сигнал типа Linearly Frequency Modulated Continuous Wave (LFMCW) с полосой частот 1 МГц, существенно превышающей полосу когерентности канала. Такой сигнал позволяет на приемной стороне декомпозировать соседние узкополосные компоненты, длительность  $T_a$  которых согласуется с шириной полосы отдельных подканалов  $\omega_{ch} = \dot{\omega} T_a$ . Совокупность таких элементов представляет собой набор узкополосных LFMCW-компонент, у которых центральные частоты изменяются по линейному закону (см. рис. 1).

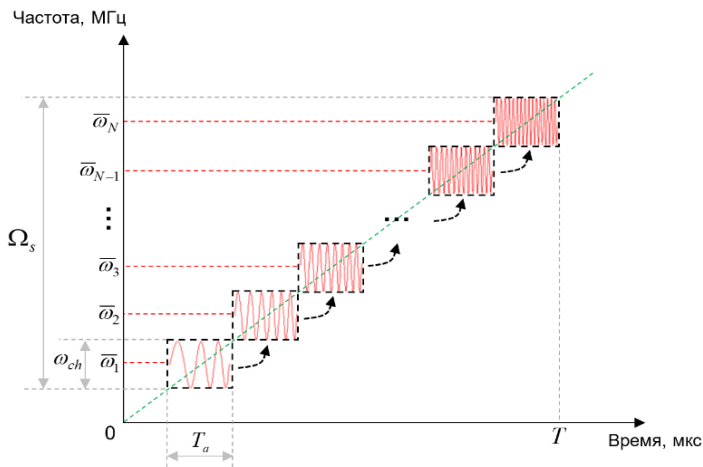


Рис. 1. Модель связанного КВ сигнала на основе LFMCSW сигнала [8]

Структура LFMCSW сигнала имеет сходство со связным сигналом, использующим псевдослучайную перестройку рабочей частоты (ППРЧ), когда парциалы передаются последовательно на различных поднесущих  $\bar{\omega}_k = \bar{\omega}_1 + k\omega_{ch}$ . Ключевое различие состоит в линейном характере изменения частоты, что обеспечивало когерентность между парциалами и возможность восстановления ЧХ по их совокупности. Это свойство позволило использовать широкополосный LFMCSW сигнал для последовательного тестирования множества узкополосных подканалов, заданных на сетке частот с шагом  $\omega_{ch}$ . В LFMCSW сигнале каждый элемент подвергается спектральному анализу на времени равном его длительности. Сжатый элемент сигнала в полосе подканала  $\omega_{ch}$  определяет его ИХ  $h_k(\tau)$  [1, 8]. Было показано [4], что при  $\tau = \tau_{gk}$  комплексное значение амплитуды ИХ можно рассматривать как дискретное значение комплексной ЧХ (коэффициент передачи) для соответствующего подканала на его центральной частоте  $\bar{\omega}_k$ :

$$H_k(j\bar{\omega}_k) = \frac{2\pi}{\omega_{ch}} \cdot \dot{h}_k(\tau = \tau_{gk}). \quad (1)$$

Разработанный алгоритм дает возможность, используя отсчеты комплексных амплитуд ИХ парциальных каналов, сформировать упорядоченную по частоте  $\bar{\omega}_k$  совокупность из  $N = \Omega_{ch} / \omega_{ch}$  отсчетов комплексной ЧХ, а также множество отсчетов  $\{1/H_k(j\bar{\omega}_k)\}_N$  инверсного фильтра. В контексте цифровой квадратурной обработки произвольный комплексный отсчет ЧХ инверсного фильтра целесообразно представить в алгебраической форме:

$$H_k^{-1}(j\bar{\omega}_k) = \frac{1}{|H(\bar{\omega}_k)|} \cdot \exp[j\phi(j\bar{\omega}_k)] = X_k + jY_k, \quad (2)$$

где  $X_k$  и  $Y_k$  – коэффициенты коррекции,  $P_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |H_k|$  – нормировочный коэффициент,  $X_k = P_0 \cdot \text{Re}\left(\frac{1}{H_k}\right) = \frac{P_0}{|H_k|^2} \text{Re}(H_k)$ ,  $Y_k = P_0 \text{Im}\left(\frac{1}{H_k}\right) = -\frac{P_0}{|H_k|^2} \text{Im}(H_k)$ .

Если канал имеет фиксированную полосу пропускания и заданную ЧХ  $H(j\omega, t)$ , то любой сигнал, чей спектр  $U_T(j\omega)$  не выходит за пределы этой полосы, может быть передан без потерь информации при условии включения обратного фильтра (оператора деконволюции) с согласованной характеристикой вида  $H^{-1}(j\omega, t)$ . При этом предполагается, что изменения параметров канала на интервале стационарности (медленного времени) несущественны.

Действие инверсного фильтра заключается в преобразовании спектра принятого сигнала  $U_R(j\omega) = U_T(j\omega) \cdot H(j\omega)$  в спектр переданного сигнала  $U_T(j\omega)$ , что эквивалентно компенсации дисперсионных искажений, вносимых каналом. Алгоритм цифрового эквалайзера основывается на кусочно-постоянной аппроксимации функции  $H^{-1}(j\omega)$ , задаваемой ограниченным набором частотных отсчетов  $N$  в точках  $\bar{\omega}_k$ , где  $k \in [1, N]$ . Каждому подканалу соответствует собственный фильтр с корректирующими коэффициентами, которые периодически обновляются для поддержания точности компенсации в условиях изменяющихся параметров среды. Алгоритм коррекции для произвольного подканала на интервале медленного времени, в течение которого параметры среды можно считать постоянными, описывается выражением:

$$U_R(j\bar{\omega}_k) \cdot H^{-1}(j\bar{\omega}_k) = U_T(j\bar{\omega}_k) \Rightarrow [\text{Re}U_R(j\bar{\omega}_k) + \text{Im}U_R(j\bar{\omega}_k)] \cdot [X_k + jY_k]. \quad (3)$$

Конструктивно эквалайзер включает в себя банк из  $N$  цифровых фильтров с набором корректирующих коэффициентов и выходной сумматор [4]. Каждый из фильтров вносит поправку в одну из  $N$  выборок ЧХ  $H_k(j\bar{\omega}_k)$  в частотной области.

Для обеспечения длительной работы корректора в алгоритме заложена процедура периодического обновления его параметров, то есть обучение эквалайзера. Интервал между такими обновлениями является функцией медленного времени. Технология широкополосной КВ связи в обязательном порядке должна принимать во внимание эту зависимость и в случае снижения энергетического критерия доступности модема технология должна обеспечивать за счёт когнитивной диагностики адаптацию корректора.

## 2 Средства когнитивной сенсорной диагностики КВ радиоканалов

При решении задачи создания универсальной системы сенсорной диагностики [1, 4, 8] предпочтение нами было отдано технологии программно-конфигурируемого радио (Software Defined Radio, SDR). В системе реализованы передающий и приёмный терминалы сенсора. В качестве аппаратной платформы была выбрана USRP N210, выполняющая функции преобразования цифровых потоков в аналоговые сигналы. Передающий модуль преобразует цифровые потоки в аналоговую форму при помощи 16-битного ЦАП с частотой дискретизации 400 МГц, что обеспечивает работу в КВ диапазоне. На приёмной стороне используется 14-битный АЦП,

который выполняет прямое оцифровывание входного сигнала от антенны. Применяются процедуры цифрового переноса частоты вверх (Digital-Up Conversion, DUC) и вниз (Digital-Down Conversion, DDC), обеспечивающие точное согласование полос при передаче и приёме. В состав системы диагностики входят персональные компьютеры, снабженные операционной системой Ubuntu 22.04.3 LTS и пакетом GNU Radio 3.10.1.1. Они выполняют функции цифрового синтеза и обработки сложного тестирующего сигнала типа LFMCW. Компьютеры взаимодействуют с USRP через сетевой интерфейс Gigabit Ethernet.

Данный подход позволяет адаптировать созданную нами радиотехническую систему как под решение различных задач когнитивной сенсорной диагностики, так и задач перспективных систем КВ связи. Для повышения уровня передаваемого сигнала применяется усилитель мощности LZY-22+. В качестве антенных систем использованы широкополосные диполи АН-710, охватывающие диапазон рабочих частот от 2 до 30 МГц.

### 3 Натурные эксперименты передачи тестирующего широкополосного сигнала и получения диагностической информации на NVIS радиотрассе

Для экспериментальной верификации предложенного метода когнитивной сенсорной диагностики были проведены натурные испытания на NVIS радиотрассе г. Йошкар-Ола – оз. Яльчик (длина ~90 км). Трасса характеризуется типичными условиями ближней КВ-связи с отражением от нижних ионосферных слоёв под углами 75-90°, что позволило оценить устойчивость энергетического критерия широкополосного канала при изменяющихся параметрах среды.

В качестве тестирующего использовался сигнал типа LFMCW с линейным законом изменения частоты. Скорость перестройки частоты была равна 1 МГц/с. Несущая частота каналов с полосой 1 МГц выбиралась из диапазона 2-12 МГц. Мощность сигнала составляла 20 Вт. Принимаемый антенной RF сигнал, оцифровывался платформой и преобразовывался в Baseband на отрезке [-500; +500] кГц.

В физических экспериментах выполнялась оценка энергетического профиля широкополосного диспергирующего канала, определяемого зависимостью отношения сигнал/шум от медленного времени. Этот параметр характеризует доступность канала для заданного модема [9]. Экспериментально было показано, что дисперсия приводит к расширению ИХ и, при неизменной энергии, к снижению её импульсной мощности, что эквивалентно уменьшению энергетического выигрыша [4]. Время, в течение которого ИХ сохраняла свою мощность, принималось за интервал устойчивости энергетического критерия, обеспечивающего требуемое значение SNR для заданной скорости передачи данных.

Предположение о стационарности канала было подтверждено для широкополосного ВЧ распространения в более ранней работе MITRE [10, 11], которая показала, что время стационарности обычно составляет около 10 секунд, но не менее 30 секунд в дневное время и всего одну секунду в переходное время суток. Как и для узкополосных, для широкополосных каналов условия связи зависят от выбора рабочей частоты. От средней частоты канала зависят как условия рас-

пространения волнового пакета, так и уровень помех в канале. В экспериментах на первой частоте (сеанс 1) уровень шумов был выше, чем на второй частоте (сеанс 2), что позволило нам сопоставить энергетические характеристики каналов при различных уровнях помех.

Для количественной оценки энергетического критерия использовалось выражение для отношения сигнал/шум на выходе согласованного фильтра:

$$SNR_{out} = 2 \frac{E_s}{n_0} = 2 B_s T_s \cdot SNR_{in}, \quad (4)$$

где  $E_s$  – энергия сигнала,  $n_0$  – спектральная плотность мощности шума,  $B_s$  – полоса тестирующего сигнала,  $T_s$  – длительность тестирующего сигнала.

Зависимость (4) отражает выигрыш по энергетическому критерию, возникающий при обработке сигналов с расширенным спектром (СРС). Коэффициенты адаптивного корректирующего фильтра определялись на основе измеренной ЧХ при тестировании широкополосного канала. Энергетический выигрыш, связанный с инверсной фильтрацией дисперсионных искажений, измерялся величиной изменения отношения мощности ИХ из-за дисперсии.

В экспериментах исследовалась стабильность энергетического профиля канала, определяемая интервалом времени, в котором отношение SNR сохранялось практически постоянным, и рассчитывались оценки допустимых скоростей передачи данных (0,3 кбит/с – 0-3 дБ, 0,6 кбит/с – 3 дБ, 1,2 кбит/с – 7 дБ, 3,2 кбит/с – 10 дБ, 6,4 кбит/с – 13,5 дБ, 9,6 кбит/с – 18 дБ) [9]. При этом принималось во внимание, что в процессе передачи информационный поток расширяется до полосы 1 МГц, а на приеме происходит его сжатие до исходной информационной полосы. Иными словами, сигнал конвертируется в низкочастотную огибающую на нулевой промежуточной частоте для последующего извлечения битовой информации. Это давало основания полагать, что генерируемый модулирующий сигнал соответствует требованиям современных модемов.

Ранее было показано [9], что для параллельного 39-тонового модема (полоса 2,4 кГц, 39 подканалов по 61 Гц) отношение можно связать с энергетикой LFMCW-сигнала через выражение:

$$SNR_c = 2 \cdot 0,85 \frac{P_c \Pi T_c}{n_0}, \quad SNR_s = 2 \frac{P_s \Pi T_s}{n_0}, \quad (5)$$

где  $SNR_c$ ,  $SNR_s$  – отношения сигнал/шум,  $P_c$ ,  $P_s$  – мощности,  $T_c$ ,  $T_s$  – длительности для связного и тестирующего сигнала соответственно;  $\Pi$  – потери при распространении.

Предполагалось, что в системе связи используются сигналы с расширенным спектром (СРС), тогда ключевым параметром, определяющим выигрыш согласованной обработки, является база сигнала. Для связного СРС эффективная база при учёте защитного интервала составит  $D_c^{eff} = 67,2$ . Для тестирующего LFMCW сигнала база равна  $D_s = 64$ . Разница между базами связного и тестирующего сигналов не превышает ~0,2 дБ. Благодаря малым отличиям энергии СРС, применяемым для связи и тестирования, при равных спектральных условиях (одинаковая спектральная плотность шума и

одинаковые потери распространения) полученное при тестировании отношение SNR было сопоставимо с отношением для связанного СРС. Таким образом, использование LFMCW-зондирования позволило детально оценить временную динамику энергетического профиля канала и определить диапазон устойчивости широкополосного канала. Следует отметить, что при одинаковой энергии бита  $E_b$  широкополосный сигнал обладает меньшей спектральной плотностью энергии, поскольку его энергия распределяется по значительно более широкой полосе частот. Это снижает среднюю мощность излучения на каждый герц спектра, повышая спектральную эффективность, выражаемую в повышенной энергетической и структурной скрытности системы.

Дисперсионные свойства ионосферного канала вызывали временное растяжение (чирпирование) сжатого сигнала, что проявлялось в расширении импульсной характеристики (чирпирование ИХ). Этот эффект, наряду с понижением импульсной мощности, увеличивал скрытность передачи информации, так как расширенная ИХ затрудняла обнаружение сжатого сигнала на фоне шумов. Для устранения искажений и демодуляции сигнала использовался алгоритм адаптивного эквалайзера, который выполнял обратную фильтрацию, восстанавливая исходную форму сигнала. В результате ИХ сжималась, а её импульсная мощность возрастала. Очевидно, что изменчивость среды приводит к вариации параметров чирпирования, поэтому для поддержания эффективности коррекции и обеспечения стабильного энергетического критерия требовалась актуализация коэффициентов эквалайзера по данным, полученным при когнитивной диагностике.

Рассматривались сеансы длительностью 20 секунд, что позволило оценить степень устойчивости канала при различных условиях распространения.

#### 4 Экспериментальные исследования достигнутых значений энергетических характеристик и скорости передачи данных модемов систем когнитивной беспроводной сенсорной сети

Тестирующий LFMCW сигнал имел скорость изменения частоты 1 МГц/с, поэтому процедура зондирования канала с полосой 1 МГц занимала временной интервал длительностью 1 секунда. По итогам каждого сеанса зондирования регистрировалась ЧХ радиоканала, служащая основой для расчета его ИХ. Качество работы адаптивного эквалайзера оценивалось путем сопоставления формы ИХ канала до применения коррекции и после нее. Коэффициенты адаптивного эквалайзера [1, 4] определялись с применением метода согласованной обработки принятого сигнала во временной области.

В качестве примера в статье представлены данные двух сеансов зондирования, отличающихся условиями распространения (благоприятные и неблагоприятные). Первый экспериментальный сеанс был проведен 21 сентября 2023 года в 13:00 LT для канала со средней частотой 6,5 МГц (0,72 МПЧ) при неблагоприятных условиях распространения, когда сигнал без коррекции не обнаруживался. Второй сеанс проведен в 14:49 LT на частоте 5 МГц (0,56 МПЧ), когда наблюдались более благоприятные условия и устойчивая детектируемость сигнала.

На рисунке 2 показаны ИХ канала с полосой 1 МГц: исходная (слева) и скорректированная (справа) в начальный 20-секундный интервал тестирования в диапазоне 6-7 МГц для сеанса 1. ИХ, зарегистрированная на 1-й секунде тестирования и задающая коэффициенты адаптивного эквалайзера, выделена красным цветом.

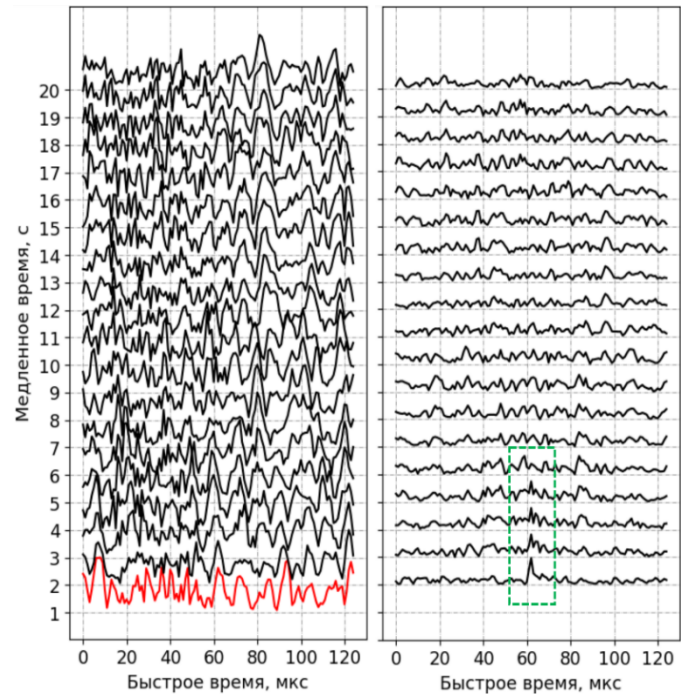


Рис. 2. ИХ канала с полосой 1 МГц: исходная (слева) и скорректированная (справа) в начальный 20-секундный интервал тестирования в диапазоне 6-7 МГц для сеанса 1

Рисунок 2 иллюстрирует ситуацию неблагоприятного распространения, когда в канале без коррекции сжатый СРС не обнаруживался, а ИХ канала имела шумоподобную огибающую (см. рис. 2 слева). В результате коррекции по данным ЧХ измеренной на 1 секунде, сигнал восстанавливался только в течение первых 5 секунд (см. рис. 2 справа).

На рисунке 3 приведены ИХ канала с полосой 1 МГц: исходная (слева) и скорректированная (справа) в начальный 20-секундный интервал тестирования в диапазоне 4,5-5,5 МГц для сеанса 2. Красным цветом, как и ранее, обозначена ИХ, полученная на 1-й секунде и определяющая коэффициенты адаптивного эквалайзера.

На основе полученных данных, с учётом того что условия распространения могут сильно ухудшаться, в исследованиях энергетических характеристик канала рассматривались два режима актуализации.

- режим 1: коррекция дисперсии выполнялась по результатам первой секунды сеанса;
- режим 2: коррекция выполнялась через секунду (т.е. период актуализации 2 секунды).

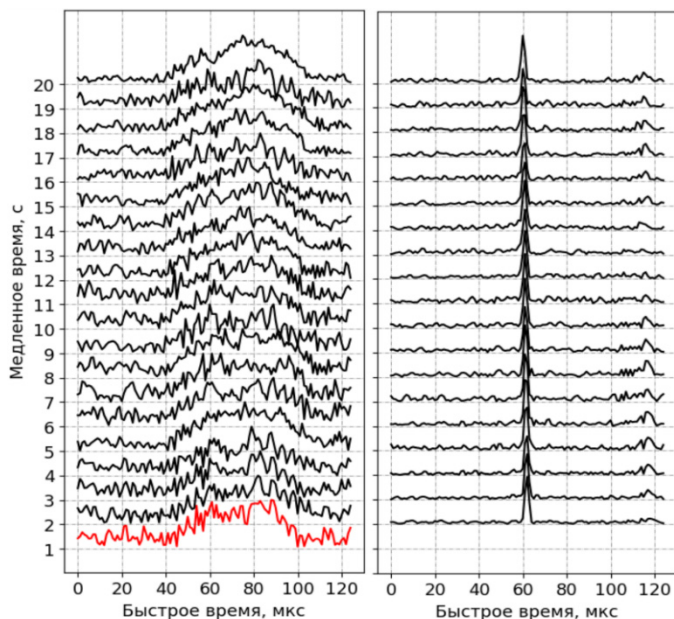


Рис. 3. ИХ канала с полосой 1 МГц: исходная (слева) и скорректированная (справа) в начальный 20-секундный интервал тестирования в диапазоне 4,5-5,5 МГц для сеанса 2

На рисунках 4-7 представлены результаты оценки стабильности энергетического профиля канала с полосой 1 МГц при изменении периода актуализации.

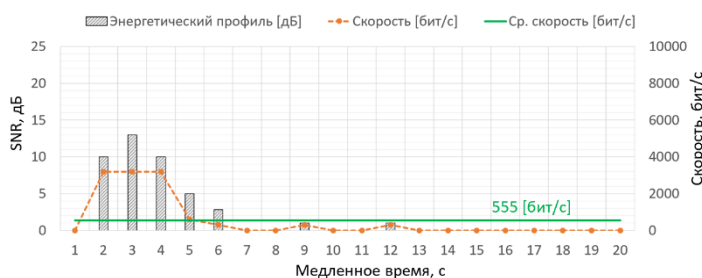


Рис. 4. Энергетический профиль канала и доступные скорости передачи данных для сеанса 1, при актуализации эквалайзера только на 1 секунде сеанса

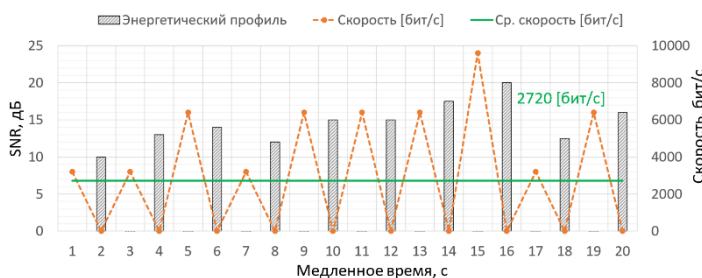


Рис. 5. Энергетический профиль канала и доступные скорости передачи данных для сеанса 1, при актуализации эквалайзера через секунду

На рисунке 4 график, отображенный столбчатой диаграммой, показывает вариации отношения SNR в скорректированном канале (энергетический профиль канала). При условии, что коэффициенты эквалайзера определяются только на первой секунде сеанса (длительностью 20 с), видно, что уже к

седьмой секунде из-за дисперсии сжатый СРС не обнаруживается. Пунктирная оранжевая линия демонстрирует доступную скорость передачи данных, в течение всего сеанса зондирования. Сплошная зелёная линия показывает усреднённую скорость передачи данных на всём интервале.



Рис. 6. Энергетический профиль канала и доступные скорости передачи данных для сеанса 2, при актуализации эквалайзера только на 1 секунде сеанса

Из рис. 6 следует, что при благоприятных условиях во втором сеансе уровень SNR изменялся в диапазоне 10-23 дБ даже при единичной актуализации коэффициентов. Это обеспечивало стабильную работу модема со скоростями 3,2-9,6 кбит/с (со средней скоростью передачи в сеансе около 5,3 кбит/с, см. рис. 6) на протяжении более 20 с.

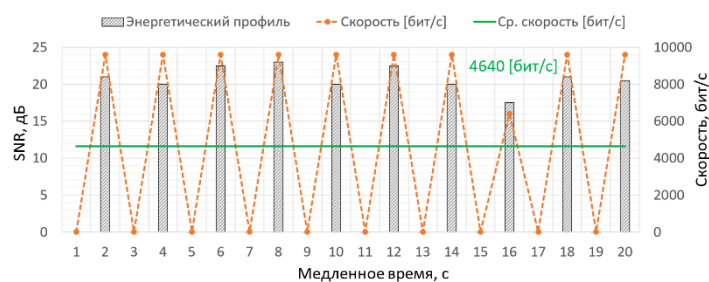


Рис. 7. Энергетический профиль канала и доступные скорости передачи данных для сеанса 2, при актуализации эквалайзера через секунду

При обновлении коэффициентов эквалайзера через секунду (период актуализации 2 с) значение SNR оставалось выше 18 дБ, что позволяло поддерживать максимальную скорость 9,6 кбит/с. Для первого сеанса ситуация была более сложная, что особенно наблюдается в случае актуализации эквалайзера на первой секунде сеанса (см. рис. 4) так как канал лишь в течение 2-4 с обеспечивал доступность для модема со скоростью 3,2 кбит/с, на 5 с отношение SNR составило 5 дБ, обеспечивая доступность для модемов производительностью 0,6 кбит/с, и на 6 с снизилось до 2,85 дБ обеспечивая доступность для модемов, работающих на скоростях 0,3 кбит/с.

Начиная с 7 секунды сеанса сигнал не удавалось восстановить. Анализ результатов показал, что уменьшение энергии сигнала приводит к снижению времени стационарности канала. Иными словами, чем ниже энергетический уровень ИХ, тем быстрее изменяются её параметры, что сокращает длительность интервала, в течение которого сохраняется стабильный энергетический критерий. Это означает, что стационарность NVIS канала сохраняется на меньшем времени, чем для канала стратегической связи (около 10 с).

Для обеспечения заданной производительности модема широкополосной связи это требует более частой, чем через 10 с актуализации коэффициентов эквалайзера. В этом случае актуализация эквалайзера через секунду позволяла поддерживать отношение SNR в канале не ниже 10 дБ, обеспечивая гарантированную доступность канала для модема со скоростью не ниже 3,2 бит/с. При этом средняя скорость для всего сеанса, с учётом чередования передачи и измерения ЧХ канала, составила 2,72 кбит/с.

#### 4 Выводы

В работе исследованы энергетические характеристики диспергирующего широкополосного канала связи и влияние адаптивной коррекции внутримодовой дисперсии на скорости передачи информации модемов когнитивной беспроводной сенсорной сети. Проведённые натурные эксперименты на радиотрассе г. Йошкар-Ола – оз. Яльчик (длина ~90 км) позволили получить детальные данные об энергетических профилях NVIS канала и динамике изменения отношения SNR во времени.

Результаты показали, что энергетический профиль широкополосного канала существенно зависит от внутримодовой дисперсии групповой задержки. Дисперсия приводит к уширению импульсной характеристики и снижению её импульсной мощности, что эквивалентно уменьшению энергетического критерия. Применение адаптивной инверсной фильтрации позволило компенсировать дисперсионные искажения и сократить длительность ИХ до значений, близких к случаю отсутствия дисперсии. В ряде случаев энергетический выигрыш после коррекции достигал 23 дБ, что обеспечивало возможность надёжного приёма сигнала и увеличения допустимой скорости передачи данных.

Анализ временных вариаций энергетических профилей показал, что в режиме NVIS время квазистационарности канала составляет 3-5 секунд, что значительно меньше, чем в стратегических системах дальней КВ связи. Такое поведение ограничивает длительность интервала, в течение которого канал сохраняет стабильный энергетический критерий. Когнитивный подход, реализованный через сенсорную диагностику и адаптивную подстройку коэффициентов эквалайзера, позволил компенсировать это ограничение за счёт динамической актуализации параметров фильтрации.

Показано, что при адаптивной актуализации эквалайзера с периодом обновления 2 секунды обеспечивается устойчивое значение отношения сигнал/шум не ниже 18 дБ в случае благоприятных условий распространения, и не ниже 10 дБ в случае неблагоприятных условий в канале, что соответствует скоростям передачи 3,2-9,6 кбит/с при вероятности ошибки не выше  $10^{-3}$ . Это демонстрирует прямую зависимость между энергетическим состоянием канала и производительностью модема, а также подтверждает корректность использования энергетического критерия как показателя доступности канала.

Полученные результаты подтверждают необходимость

когнитивной диагностики и управления параметрами адаптивных эквалайзеров, для существенного повышения доступности по энергетическому критерию и производительности широкополосных ВЧ каналов. Это открывает новые возможности для построения высокоэффективных когнитивных беспроводных сенсорных сетей КВ диапазона, способных обеспечивать связь в сложных ионосферных условиях при ограниченной излучаемой мощности.

#### Источник финансирования. Благодарности

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

#### Литература

1. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Овчинников В.В. Новые возможности систем широкополосной когнитивной связи, работающих в ионосферных КВ-радиоканалах с внутримодовой дисперсией // Радиотехника. 2022. Т. 86, № 11. С. 162-177.
2. Witvliet B.A. Near Vertical Incidence Skywave – The propagation mechanism, the impact of antenna, backscatter and solar flares : paper presented at Nordic HF 2022, Fårö, Sweden, 2022.
3. Аджемов С.С., Лобов Е.М., Кандауров Н.А., Лобова Е.О., Липаткин В.И. Алгоритмы оценки и компенсации дисперсионных искажений широкополосных сигналов ионосферных радиолоний связи // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13, № 5. С. 57-74.
4. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова М.И., Овчинников В.В. Эффекты дисперсии в ионосферных радиоканалах. Ч. 3. Внутримодовая дисперсия и технология широкополосной КВ-связи // Радиотехника. 2025. Т. 89, № 1. С. 24-36.
5. Belknap D.J., Bungard D.R., Hart L.A., Perry B.D. Linear FM vertical sounder for ionospheric distortion correction : MITRE Working Paper WP-2774 (ESD-TR-69-377). Dec. 1969.
6. Глушанков Е.И., Елисеев Н.К. Анализ энергетической и спектральной эффективности сигналов в радиоканалах с замираниями // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2025. № 2 (58). С. 5-13.
7. Иванов В.А., Иванов Д.В., Рябова М.И., Тимофеев Е.В. Особенности характеристик высокочастотных ионосферных радиолоний квазизенитного распространения // Электросвязь. 2013. № 5. С. 45-48.
8. Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ryabova N.V., Ovchinnikov V.V. Actualization of parameters of adaptive SDR-equalizer of wideband HF radio channels to effectively correct for frequency intramode dispersion // 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO, Kaliningrad, Russia, 2021). P. 1-4.
9. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Бельгибаев Р.Р. Оценка доступности частотных каналов для различных модемов КВ-связи на основе пассивного зондирования многомерного ионосферного радиоканала // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2017. № 2 (34). С. 39-53.
10. Belknap D.J., Haggarty R.D., Perry B.D. Adaptive signal processing for ionospheric distortion correction : USAF Document ESD-TR-70-30. 1970.
11. Perry B.D. Real-time correction of wideband oblique HF paths : USAF Document ESD-TR-70-371. 1970.

## ENERGY CHARACTERISTICS OF DISPERSIVE WIDEBAND CHANNEL AND DATA RATES IN A COGNITIVE WSN

**Dmitry V. Ivanov**, Volga state university of technology, Yoshkar-Ola, Russia, ORCID 0000-0002-3609-1157, [ivanovdv@volgatech.net](mailto:ivanovdv@volgatech.net)

**Vladimir A. Ivanov**, Volga state university of technology, Yoshkar-Ola, Russia, [ivanovva@volgatech.net](mailto:ivanovva@volgatech.net)

**Vladimir V. Ovchinnikov**, Volga state university of technology, Yoshkar-Ola, Russia, ORCID 0000-0001-5185-0820,

[ovchinnikovv@volgatech.net](mailto:ovchinnikovv@volgatech.net)

**Natalya V. Ryabova**, Volga state university of technology, Yoshkar-Ola, Russia, ORCID 0000-0002-3515-4750,

[ryabovanv@volgatech.net](mailto:ryabovanv@volgatech.net)

### Abstract

This study investigates the energy characteristics of dispersive wideband high-frequency (HF) radio channels and the impact of adaptive correction for intramode dispersion on the information transmission efficiency in cognitive wireless sensor networks (WSN). The signal-to-noise ratio (SNR) after matched filtering was used as the primary metric for evaluating energy parameters. Paper proposes a method for cognitive sensor diagnostics. It is based on channel sounding with a linear frequency-modulated continuous wave (LFMCW) signal and subsequent adaptive inverse filtering, which compensates for dispersion-induced distortions and enhances the energy efficiency of the wideband channel. Study demonstrates that this approach enables signal recovery within a bandwidth of up to 1 MHz, significantly exceeding the capabilities of standard HF communication systems. Experimental verification of the method was carried out on an NVIS radio link between Yoshkar-Ola and Lake Yalchik (spanning 90 km). The results showed a gain in the energy parameter of up to 23 dB, which supports sustainable data rates of up to 9600 bits/s. It is shown that cognitive sensor diagnostics provide not only an energy gain but also an improvement in the system's structural and energy covertness characteristics by accounting for intramode dispersion and performing matched adaptation to the environmental parameters in NVIS mode.

**Keywords:** Ionosphere, HF communication, dispersive wideband channel, intramode dispersion, cognitive diagnostics, adaptive inverse filtering, SDR, NVIS

### References

- [1] D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, V. V. Ovchinnikov "New capabilities of broadband cognitive communication systems operating in ionospheric HF radio channels with intramode dispersion," *Radiotekhnika*, vol. 86, no. 11, pp. 162-177, 2022.
- [2] B. A. Witvliet, "Near vertical incidence skywave – The propagation mechanism, the impact of antenna, backscatter and solar flares," presented at Nordic HF 2022, Faro, Sweden, 2022.
- [3] S. S. Adzhemov, E. M. Lobov, N. A. Kandaurov, E. O. Lobova, V. I. Lipatkin "Algorithms for estimation and compensation of dispersion distortions of broadband signals in ionospheric communication lines," *H-ES Research*, vol. 13, no. 5, pp. 57-74, 2021.
- [4] D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, M. I. Ryabova, and V. V. Ovchinnikov, "Dispersion effects in ionospheric radio channels. Part 3. Intramode dispersion and broadband HF communication technology," *Radiotekhnika*, vol. 89, no. 1, pp. 24-36, 2025.
- [5] D. J. Belknap, D. R. Bungard, L. A. Hart, and B. D. Perry, Linear FM vertical sounder for ionospheric distortion correction, MITRE Working Paper WP-2774 (ESD-TR-69-377), Dec. 1969.
- [6] E. I. Glushankov and N. K. Eliseev, "Analysis of energy and spectral efficiency of signals in fading radio channels," *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy*, no. 2 (58), pp. 5-13, 2025.
- [7] V. A. Ivanov, D. V. Ivanov, M. I. Ryabova, and E. V. Timofeev, "Characteristics of high-frequency ionospheric quasi-zenith propagation radio links," *Elektrosvyaz*, no. 5, pp. 45-48, 2013.
- [8] D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, and V. V. Ovchinnikov, "Actualization of parameters of adaptive SDR-equalizer of wideband HF radio channels to effectively correct for frequency intramode dispersion," in *Proc. 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Kaliningrad, Russia, 2021, pp. 1-4.
- [9] D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, and R. R. Belgibaev, "Assessment of frequency channel availability for various HF modem types based on passive sounding of a multidimensional ionospheric radio channel," *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy*, no. 2 (34), pp. 39-53, 2017.
- [10] D. J. Belknap, R. D. Haggarty, and B. D. Perry, Adaptive signal processing for ionospheric distortion correction, USAF Document ESD-TR-70-30, 1970.
- [11] B. D. Perry, Real-time correction of wideband oblique HF paths, USAF Document ESD-TR-70-371, 1970.