

УДК 621.39

DOI: 10.62955/0135-3748-2026-454

ORCID: 0000-0001-5185-0820

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДИСПЕРСИИ ПО ДАННЫМ СЕНСОРНОЙ ДИАГНОСТИКИ СРЕДЫ СЛОЖНЫМИ СИГНАЛАМИ С ПОЛОСОЙ, КРАТНО ПРЕВЫШАЮЩЕЙ ПОЛОСУ КОГЕРЕНТНОСТИ КВ КАНАЛА

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

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия,

ivanovdv@volgatchechnet

PARAMETRIC ESTIMATION OF DISPERSION FOR HF CHANNELS, USING SPREAD SPECTRUM SIGNALS EXCEEDING THE CHANNEL COHERENCE BANDWIDTH

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

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia, ivanovdv@volgatchechnet

Аннотация. В работе рассматривается задача параметрической оценки широкополосных диспергирующих ионосферных КВ-радиоканалов в условиях, когда ширина спектра зондирующего сигнала многократно превышает полосу когерентности канала. Для исследования канала используется технология когнитивной сенсорной диагностики на основе непрерывного линейно-частотно-модулированного (LFMCW) сигнала. Предложен метод формирования функции рассеяния канала на основе последовательности оценок импульсной характеристики, получаемых в медленном времени с последующим квазикогерентным накоплением и спектральной обработкой. Показано, что использование широкополосных сигналов с полосой порядка 10 % от несущей позволяет наблюдать выраженные эффекты частотной дисперсии и магнитоионного расщепления в NVIS-каналах. Это позволяет выполнять параметрическую оценку дисперсионного уширения, разности задержек магнитоионных компонент и структуры доплеровского рассеяния, а также использовать полученные параметры для адаптации SDR (software-defined radio) эквалайзеров внутримодовой дисперсии. Тем самым обеспечивается повышение устойчивости широкополосной КВ-связи в условиях выраженной дисперсии и быстрых геофизических изменений.

Ключевые слова: ионосфера, КВ-связь, широкополосный КВ-канал, внутримодовая дисперсия, функция рассеяния канала, сенсор КВ-канала.

Abstract. This paper addresses the problem of parametric estimation for wideband dispersive ionospheric HF radio channels when the bandwidth of the sounding signal significantly exceeds the channel's coherence bandwidth. The study employs cognitive sensing technology based on a linear frequency-modulated continuous-wave (LFMCW) signal. A method is proposed for constructing the channel scattering function by processing a sequence of impulse response estimates acquired over slow time, followed by quasi-coherent integration and spectral processing. It is demonstrated that using wideband signals with bandwidths of 10% of the carrier enables us to observe pronounced frequency dispersion effects and magnetoionic splitting in NVIS channels. This allows for parametric evaluation of dispersion broadening, the delay difference between magnetoionic components, and the Doppler scattering structure. The obtained parameters can then be used to adapt SDR (software-defined radio) equalizers for mitigating intramode dispersion, thereby enhancing the robustness of wideband HF communications under conditions of significant dispersion and rapid geophysical variations.

Keywords: ionosphere, HF communication, wideband HF channel, intramode dispersion, channel scattering function, HF channel sensor.

ВВЕДЕНИЕ

Современные системы коротковолновой (КВ) радиосвязи ориентируются на широкополосные сигналы, расширение спектра которых выше полосы когерентности ионосферного канала вызывает эффекты частотной дисперсии [Иванов и др., 2022; Арманд, 2003]. В этом случае различные спектральные компоненты сигнала испытывают неодинаковые групповые задержки и доплеровские искажения, что приводит к росту межсимвольной интерференции и деградации работы SDR (software-defined radio) эквалайзеров. В отличие от известных работ [Angling et al., 1998; Cannon et al., 2000; Hervás et al., 2020], ориентированных преимущественно на узкополосные модели КВ-каналов, в данной работе рассматривается случай, когда полоса зондирующего сигнала многократно превышает полосу когерентности канала. Поэтому возникает необходимость в новых методах анализа для оперативной параметрической оценки структуры

диспергирующего канала в пространстве задержек, доплеровских частот и дисперсионных параметров для последующей адаптации алгоритмов цифровой обработки сигнала. В работе предложен метод параметрической оценки широкополосного диспергирующего КВ-канала на основе когнитивной сенсорной диагностики с использованием непрерывного линейно-частотно-модулированного сигнала (Linear Frequency Modulated Continuous Wave, LFMCW) с полосой, кратной превышающей полосу когерентности канала. Подход основан на формировании многомерной последовательности импульсных характеристик (ИХ) в медленном времени с последующим квазикогерентным накоплением и спектральной обработкой. Это позволяет формировать статистически устойчивые оценки функции рассеяния канала (ФРК) при многократном превышении полосы когерентности в условиях влияния частотной дисперсии. Измеряемая ФРК содержит наблюдаемую внутримодовую дисперсионную структуру магнитоионных

компонент и используется как источник параметров для адаптации SDR-эквалайзера в широкополосных КВ-системах связи.

КОГНИТИВНАЯ СЕНСОРНАЯ ДИАГНОСТИКА LFMCW-СИГНАЛОМ С РАСШИРЕННЫМ СПЕКТРОМ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНЫХ ФУНКЦИЙ ИОНОСФЕРНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ КВ-КАНАЛОВ

Сенсорная диагностика основана на применении канальной модели распространения [Иванов и др., 2022] в ионосфере волновых пакетов с учетом согласованной обработки сложного сигнала в частотной и временной областях. Диагностика ориентирована на широкополосные каналы с полосой до 1 МГц, т. е. на режимы, в которых ширина спектра сигнала многократно превышает полосу когерентности канала [Иванов и др., 2025]. В таких условиях внутримодовая дисперсия групповой задержки (group delay dispersion) приводит к существенным искажениям структуры сигнала после согласованной обработки. В качестве зондирующих используются LFMCW-сигналы, обеспечивающие одновременно высокую энергетическую эффективность, возможность длительного накопления и высокое разрешение по задержке.

Пусть для тестирования используется LFMCW-сигнал в полосе порядка 1 МГц. При приеме непрерывный сигнал анализируется на интервале быстрого времени T_a , обеспечивая полосу частот $\omega_{ch} = \dot{\omega} T_a$ парциального канала.

Парциал LFMCW-сигнала имеет следующую форму и спектр:

$$v_T(t) = \exp(j(\dot{\omega}_k t + \frac{\dot{\omega}}{2} t^2)) \leftrightarrow$$

$$V_T(j\omega, t) = \sqrt{\frac{2\pi}{\dot{\omega}}} \exp\left[-j\left(\frac{(\omega - \dot{\omega}_k)^2}{2\dot{\omega}} - \frac{\pi}{4}\right)\right] =$$

$$V_T(\omega, t) \cdot \exp(j\vartheta(\omega, t)) \quad (1)$$

где $\dot{\omega} = \frac{d\omega}{dt}$ — скорость изменения частоты,

$$V_T(\omega, t) = \sqrt{\frac{2\pi}{\dot{\omega}}}, \vartheta(\omega, t) = -\frac{(\omega - \dot{\omega}_k)^2}{2\dot{\omega}} + \frac{\pi}{4}.$$

Было показано [Иванов и др., 2022], что спектр принимаемого сигнала отличается от спектра излучаемого сигнала на множитель, равный частотной характеристике подканала $H(j\omega_k, t)$. Умножая спектр [Иванов и др., 2022] принимаемого сигнала на комплексно-сопряженный спектр излучаемого сигнала, получим оценку частотной характеристики широкополосного канала в точке $\omega = \dot{\omega}_k$ в случае приема одной скачковой моды распространения, а при одновременном приеме M мод частотная характеристика канала представляет собой сумму вкладов отдельных мод:

$$H_n(j\dot{\omega}_k, t) = \sum_{n=0}^{K-1} H_{kn}(j\dot{\omega}_k, t). \quad (2)$$

Для разрешения принимаемых мод по задержке и получения ИХ, используя формулу (2), перейдем во временную область:

$$h_k(\dot{\omega}_k, t, \tau) = \frac{\omega_{ch}}{2\pi} H_k(\dot{\omega}_k, t) \cdot \exp[-$$

$$j(\phi(\dot{\omega}_k, t)) \cdot \text{sinc}[\omega_{ch}(\tau - \phi'(\dot{\omega}_k, t))/2], \quad (3)$$

где $H_k(\omega, t) \approx H_k(\dot{\omega}, t)$ — амплитудно-частотная характеристика парциального канала, $\phi_k(\omega, t) \approx \phi_k(\dot{\omega}_k, t) + \phi'_k(\dot{\omega}_k, t) \cdot (\omega - \dot{\omega}_k)$ — его фазо-частотная характеристика, $\phi'(\dot{\omega}_k, t) = \tau_{gk}(\dot{\omega}_k, t)$ — коэффициент фазовой дисперсии первого порядка, равный групповой задержке.

Следует отметить важную особенность использования СРС типа LFMCW для зондирования. Сигнал с непрерывной перестройкой частоты присутствует в полосе в течение времени анализа T_a . Например, при полосе сигнала 500 кГц и скорости перестройки 1 МГц/с база сигнала на выходе канала достигает величины порядка $BT \approx 2,5 \cdot 10^5$. Таким образом, база сигнала существенно превышает единицу, что обеспечивает значительный выигрыш по отношению сигнал/шум после согласованной обработки. Данное обстоятельство является принципиально важным при исследовании дисперсионных эффектов широкополосных ионосферных каналов, поскольку позволяет выполнять устойчивое измерение импульсных характеристик даже в условиях слабых и быстро флуктуирующих сигналов.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИИ РАССЕЯНИЯ ДИСПЕРГИРУЮЩЕГО ШИРОКОПОЛОСНОГО ИОНОСФЕРНОГО КАНАЛА

Структура выходного сигнала после согласованной фильтрации несет полную информацию о временных, частотных и доплеровских свойствах среды распространения [Иванов и др., 2022]. Поскольку импульсная и частотная характеристики канала подвержены случайным замираниям, для повышения статистической устойчивости оценок вводится процедура усреднения по медленному времени. Это приводит к определению функции рассеяния канала (ФРК), представляющей собой усредненный квадрат модуля двумерного преобразования импульсной характеристики:

$$P_\phi(\dot{\omega}, \tau, \Omega) = E_t[|\Phi(\dot{\omega}, \tau, \Omega)|^2] \approx$$

$$\frac{1}{T} \left| \int_0^T h(\dot{\omega}, \tau, T) \exp(-j\Omega T) dT \right|^2. \quad (4)$$

Функция рассеяния является плотностью спектра мощности импульсной характеристики канала. Она обобщает одновременно свойства временного спектра задержек и доплеровского спектра рассеяния. При фиксированном значении $F_d = \text{const}$ ФРК характеризует распределение мощности по задержке, а при фиксированном значении $\tau = \text{const}$ — структуру доплеровского спектра. Далее формируется последовательность импульсных характеристик, полученных при многократном повторном зондировании произвольного k -го канала на средней частоте $\omega = \dot{\omega}_k$, представляемая в виде матрицы:

$$H_k = \begin{bmatrix} h_k(\dot{\omega}_k, t_1, \tau_1) & h_k(\dot{\omega}_k, t_2, \tau_1) & \dots & h_k(\dot{\omega}_k, t_N, \tau_1) \\ h_k(\dot{\omega}_k, t_1, \tau_2) & h_k(\dot{\omega}_k, t_2, \tau_2) & \dots & h_k(\dot{\omega}_k, t_N, \tau_2) \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ h_k(\dot{\omega}_k, t_1, \tau_L) & h_k(\dot{\omega}_k, t_2, \tau_L) & \dots & h_k(\dot{\omega}_k, t_N, \tau_L) \end{bmatrix} \quad (5)$$

где L — число бинов задержки, а N — число последовательных измерений.

Таким образом, одномерный временной вектор преобразуется в двумерную структуру, содержащую эволюцию импульсной характеристики в медленном времени. Для каждой фиксированной задержки τ_l формируется временной ряд $\{h_{kl}(\bar{\omega}_k, t_n, \tau_l)\}$. Далее над каждым временным рядом выполняется дискретное преобразование Фурье:

$$P_{\phi l}(\bar{\omega}, \tau_l, \Omega) = \left| \sum_{n=0}^{N-1} h(\bar{\omega}, t_n, \tau_l) \cdot e^{-j2\pi F_D t_n} \right|^2 \quad (6)$$

Получаемый вектор представляет собой сечение функции рассеяния плоскостью фиксированной задержки $\tau = \tau_l$. Набор всех таких сечений формирует полную функцию рассеяния канала. Физически данная процедура соответствует квазикогерентному накоплению сигнала в медленном времени. При этом компоненты, обладающие устойчивым доплеровским сдвигом, повторно концентрируются в пространстве задержка — доплеровское смещение, что позволяет существенно повысить разрешающую способность метода.

СРЕДСТВА СЕНСОРНОЙ ДИАГНОСТИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ МЕТОДА В ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА NVIS-РАДИОТРАССЕ

Терминалы сенсора реализованы на базе современной технологии SDR [Иванов и др., 2022]. В качестве основы использована платформа USRP N210. Синтез и обработка сигналов осуществляется на ПК. Передатчик реализован с использованием усилителя мощности типа LZY-22. Экспериментальная верификация проводилась в сентябре 2023 г. на NVIS-радиотрассе г. Йошкар-Ола — оз. Яльчик протяженностью 90 км. В качестве тестирующего использовался сигнал типа LFMCW. Скорость перестройки частоты была равна 1 МГц/с. Мощность сигнала составляла 20 Вт. Сенсорная диагностика каналов моды 1F с полосой 1 МГц в диапазоне 2–12 МГц проводилась на интервалах геофизического времени 60 с. Данные обрабатывались по рассмотренным

методикам, и на основе результатов диагностики формировались ИХ и ФРК диспергирующих каналов. На рис. 1, а представлен пример эволюции ИХ в медленном времени, а на рис. 1, б — результат оценки ФРК с полосой сжатия 300 кГц и параметрической оценки канала.

Полученные результаты показывают, что функция рассеяния широкополосного КВ-канала при полосах сигнала, кратно превышающих полосу когерентности, содержит дополнительную информацию о внутримодовой дисперсии и магнитоионной структуре канала, недоступную в рамках традиционных узкополосных моделей. Это позволяет перейти от пассивной диагностики канала к задаче когнитивной адаптации широкополосных SDR-систем связи. Полученные импульсные характеристики демонстрировали существенное отличие от классической модели узкополосного канала. Наблюдалось выраженное дисперсионное уширение компонент распространения, обусловленное частотной дисперсией. Спектральная обработка по медленному времени обеспечивала концентрацию энергии компонент в пространстве задержка — доплеровское смещение, соответствующих О- и Х-магнитоионным компонентам. При этом магнитоионные компоненты визуализировались как две устойчивые диспергирующие области, обладающие различными групповыми задержками и различной структурой доплеровского рассеяния. Полученные характеристики позволяют выполнить параметрическую оценку широкополосного диспергирующего канала, включая дисперсию группового запаздывания в широкополосном канале $DISP$ [мкс], разность задержек магнитоионных компонент $\Delta\tau_{ox}$ [мкс], рассеяние по задержкам $\Delta\tau_o$ и $\Delta\tau_x$ для О- и Х-компонент, доплеровские смещения F_{Do} и F_{Dx} для О- и Х-компонент. Полученные данные могут использоваться для динамического выбора адаптивного SDR-эквалайзера внутримодовой дисперсии в зависимости от текущего состояния ионосферного канала. Тем самым обеспечивается повышение устойчивости широкополосной КВ-связи в условиях выраженной дисперсии и быстрых геофизических изменений.

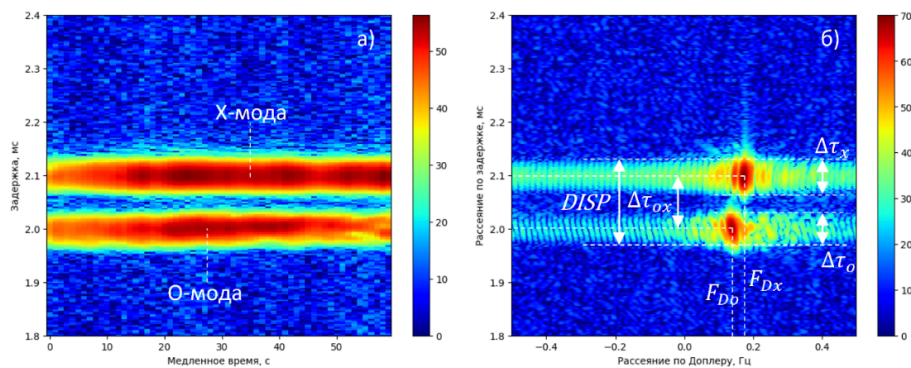


Рис. 1. Результаты сенсорной диагностики канала с полосой 300 кГц: а — эволюция ИХ в медленном времени; б — функция рассеяния канала

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен метод параметрической оценки широкополосных диспергирующих ионосферных КВ-каналов на основе измерения функции рассеяния с использованием технологии когнитивной сенсорной диагностики и LFM CW-сигналов. Показано, что при ширине спектра сигнала, существенно превышающей полосу когерентности канала, начинают проявляться выраженные эффекты внутримодовой частотной дисперсии и магнитоионного расщепления, существенно изменяющие структуру импульсной характеристики и функции рассеяния канала. Предложенный метод основан на формировании последовательности импульсных характеристик канала с последующей квазикогерентной спектральной обработкой по медленному времени, что обеспечивает устойчивое выделение энергетических областей, соответствующих О- и Х-магнитоионным компонентам в пространстве задержка – доплеровское смещение. Экспериментальные исследования на NVIS-радиотрассе подтвердили работоспособность метода в условиях широкополосного зондирования с полосами порядка 10 % от несущей частоты. Показано, что измеряемая функция рассеяния широкополосного КВ-канала содержит дополнительную информацию о внутримодовой дисперсии, недоступную в рамках традиционных узкополосных моделей канала. Это позволяет выполнять параметрическую оценку дисперсионного уширения, разности задержек

магнитоионных компонент и структуры доплеровского рассеяния, а также использовать полученные параметры для адаптации широкополосных SDR-систем связи.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 26-19-00555.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Арманд Н.А. Распространение широкополосных сигналов в дисперсных средах // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 9. С. 1045–1057.

Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В. и др. Новые возможности систем широкополосной когнитивной связи, работающих в ионосферных КВ-радиоканалах с внутримодовой дисперсией // Радиотехника. 2022. Т. 86, № 11. С. 162–177.

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.

Angling, M.J., Cannon P.S., Davies N.C., et al. Measurements of Doppler and multipath spread on oblique high-latitude HF paths and their use in characterizing datamodem performance // Radio Sci. 1998. N 33. P. 97–107.

Cannon P.S., Angling M.J., Davies N.C., et al. DAMSON HF channel characterisation – A Review // MILCOM 2000. 21st Century Military Communications Conf. Proc. 2000. N 1. P. 59–64.

Hervás M., Bergadà P., Alsina-Pagès R.M. Ionospheric Narrowband and Wideband HF Soundings for Communications Purposes: A Review // Sensors. 2020. N 20 (9). P. 2486.