Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 360–362.

УДК 621.396
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-360

МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРНОГО КВ-КАНАЛА ПО ДАННЫМ НАКЛОННОГО ЛЧМ-ЗОНДИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Н.В. Рябова, В.В. Овчинников, С.С. Станкевич

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия,
StankevichSS@volgatech.net

METHODOLOGY FOR RECOVERING PARAMETERS OF THE IONOSPHERIC HF CHANNEL FROM OBLIQUE CHIRP SOUNDING DATA, USING DIRECT MEASUREMENTS

N.V. Ryabova, V.V. Ovchinnikov, S.S. Stankevich

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia, StankevichSS@volgatech.net

Аннотация. В работе представлена методика восстановления амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристик широкополосного ионосферного канала коротковолнового диапазона, а также расчета дисперсии групповой задержки (GDD) на основе данных наклонного ЛЧМ-зондирования. Экспериментальную базу составляют LFS-файлы, полученные на среднеширотной трассе остров Кипр — город Йошкар-Ола в ходе совместных измерений ПГТУ. Методика включает разбиение широкополосного сигнала полосой 1 МГц на парциальные подканалы шириной 8 кГц, сжатие каждого подканала, выделение пиковых отсчетов импульсной характеристики и последующее восстановление частотных характеристик. По параболической форме ФЧХ вычисляется параметр GDD, необходимый для оценки дисперсионного уширения.

Ключевые слова: ионосферный КВ-канал, наклонное ЛЧМ-зондирование, LFS-файлы, АЧХ, ФЧХ, дисперсия групповой задержки (GDD), внутримодовая дисперсия, SDR-эквалайзер.

Abstract. This paper presents a method for recovering the amplitude-frequency (AFC) and phase-frequency (PFC) characteristics of a broadband ionospheric high-frequency (HF) channel, as well as calculating the group delay dispersion (GDD) based on oblique chirp sounding data. The experimental basis consists of LFS files obtained on the mid-latitude path from Cyprus to Yoshkar-Ola during joint measurements by Volga State University of Technology (VSUT). The method includes splitting a 1 MHz broadband signal into 8 kHz partial subchannels, compressing each subchannel, extracting peak samples of the impulse response, and subsequently recovering the frequency characteristics. The GDD parameter, required for estimating dispersive broadening, is calculated from the PFC parabolic shape.

Keywords: ionospheric HF channel, oblique chirp sounding, LFS files, AFC, PFC, group delay dispersion (GDD), intramode dispersion, SDR equalizer.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы обусловлена необходимостью верификации существующих моделей ионосферного распространения и актуализации параметров адаптивных SDR-эквалайзеров. Современные системы коротковолновой связи все чаще используют сигналы с полосой до 1 МГц и более. Однако в таких широкополосных каналах начинают сильно сказываться эффекты внутримодовой частотной дисперсии, которые приводят к параболическим искажениям фазо-частотной характеристики и дисперсионному уширению импульсного отклика. Как следствие, полоса когерентности канала снижается до значений 50–100 кГц, что делает невозможным качественный прием без специальной коррекции. Для борьбы с этими искажениями применяются адаптивные SDR-эквалайзеры, но их эффективная работа возможна только при точном знании текущих параметров канала — АЧХ, ФЧХ и особенно величины дисперсии групповой задержки GDD.

Прямые измерения этих параметров в реальном времени на действующих радиолиниях остаются сложной задачей. В нашей работе мы предлагаем методику восстановления АЧХ, ФЧХ и GDD по данным наклонного ЛЧМ-зондирования, которые регулярно получаются на трассе о. Кипр – г. Йошкар-Ола (ФГБОУ ВО «ПГТУ»). Основная ценность методики в том, что она позволяет использовать штатные зондирующие сигналы без дополнительной аппаратуры и верифицировать теоретические модели ионосферного канала, а также уточнять коэффициенты эквалайзеров под конкретные геофизические условия.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА LFS-ФАЙЛОВ

Экспериментальную основу работы составляют данные наклонного зондирования ионосферы ЛЧМ-сигналом. Прием ведется на среднеширотной трассе протяженностью 2600 км между островом Кипр и г. Йошкар-Ола. Сигнал имеет полосу 1 МГц и скорость перестройки частоты 100 кГц/с. Результаты зондирования сохраняются в файлах специального формата LFS. Каждый такой файл содержит заголовок размером 512 байт с метаданными (датой и времени, трассой, координатами, параметрами зондирования и др.), а также бинарные данные в формате complex64, представляющие собой дискретизированные выборки комплексной огибающей. Исходная частота дискретизации при записи составляет 25

МГц, однако в файле она уже децимирована до 40 кГц, поскольку полезная разностная частота находится в районе 9 кГц.

При обработке данные разбиваются на подвыборки комплексных отсчетов. Для каждого фрагмента временное разрешение составляет 25 мкс (величина, обратная частоте дискретизации 40 кГц), а общая длительность фрагмента составляет 80 мс. Зная скорость перестройки ЛЧМ-сигнала, можно определить полосу, которую реализует каждая подвыборка (в нашем случае 8 кГц). Этот шаг важен для последующего согласования с шириной парциальных подканалов.

МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ АЧХ И ФЧХ ПО ПИКОВЫМ ОТСЧЕТАМ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Ключевая идея методики заключается в том, чтобы декомпозировать широкополосный сигнал полосой 1 МГц в виде совокупности узких примыкающих подканалов, в которых дисперсией можно пренебречь. Ширина каждого подканала выбиралась равной 8 кГц, поскольку именно при такой полосе в импульсной характеристике начинают уверенно разделяться отдельные скачковые моды [Иванов и др., 2025], что видно на получаемых ионограммах. Тогда полное число подканалов на 1 МГц составляет 125. Каждый подканал обрабатывается независимо.

Для каждого из 125 подканалов выполняется согласованная обработка сигнала [Иванов и др., 2025]. Модуль результата дает импульсную характеристику в данном подканале. В полученной импульсной характеристике используем экстремум, т. е. точку с максимальной амплитудой. Это значение соответствует наиболее мощной скачковой моде. Важно, что комплексное значение в экстремальной точке (включающее амплитуду и фазу) представляет собой один отсчет частотной характеристики канала на центральной частоте данного подканала [Иванов и др., 2025].

Повторив эту операцию для всех 125 подканалов, получаем два массива: набор амплитуд, который и есть амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), и набор фаз, т. е. фазо-частотную характеристику (ФЧХ). На практике фазу для каждого подканала вычисляем как аргумент комплексного значения в максимуме огибающей. Восстановленная таким способом АЧХ обычно показывает замирания глубиной 2–4 дБ с масштабом вариаций от 20 до 300 кГц [Ovchinnikov et al., 2019], что согласуется с известными данными для среднеширотных трасс. ФЧХ же, как правило, имеет параболическую форму, что свидетельствует о доминировании дисперсии второго порядка.

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДА В НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА СРЕДНЕШИРОТНОЙ РАДИОТРАССЕ

Дисперсия групповой задержки является мерой уширения импульса в канале и напрямую связана с кривизной ФЧХ. Для параболической ФЧХ величина GDD вычисляется как вторая производная фазы по частоте, деленная на 2π. Размерность при этом получается в секундах на герц, но для удобства ее пересчитывают в микросекунды на мегагерц.

В нашей реализации мы имеем 125 дискретных отсчетов фазы, полученных из экстремальных значений огибающей импульсной характеристики. Данные фазовых измерений подвергаются процедуре восстановления и последующей аппроксимации полиномом второй степени с использованием метода наименьших квадратов. После чего вычисляется коэффициент и затем GDD. Для оперативных оценок иногда используют формулу:

$$GDD[\text{мкс/МГц}] = \frac{8\cdot\phi_{\text{град}max}}{360\cdot b_{ch}[\text{МГц}]}, \qquad (1)$$

где ϕ_{max} — изменение фазы в пределах полосы b_{ch}.

Характерные результаты измерения АЧХ и ФЧХ широкополосного канала с дисперсией для скачковой моды 1F представлены на рис. 1.

На рисунке видно, что АЧХ имеет заметные провалы и подъемы, что свидетельствует об интерференции магнитоионных компонент. ФЧХ, в свою очередь, имеет форму, близкую к параболической, что является прямым признаком доминирования дисперсии групповой задержки второго порядка. Именно эта параболическая форма позволяет количественно оценить параметр GDD с помощью описанной выше аппроксимации или упрощенной формулы. В приведённом случае значение параметра GDD составило 29,1 мкс/МГц, что в 29 раз превышает значения в случаях отсутствия дисперсии в канале.

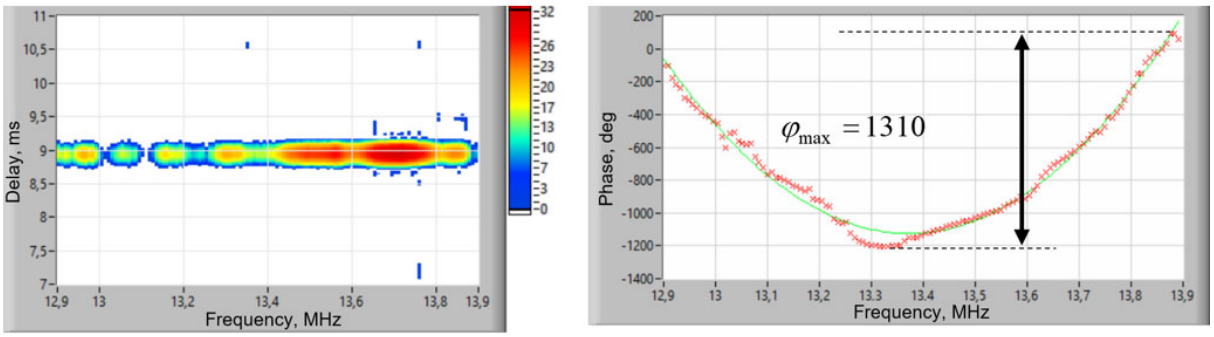

Рис. 1. АЧХ широкополосного (1 МГц) канала (справа) и ФЧХ канала и ее параболическая аппроксимация для моды 1F (слева)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика позволяет по данным наклонного ЛЧМ-зондирования в формате LFS восстанавливать полную комплексную частотную характеристику ионосферного КВ-канала в полосе 1 МГц и вычислять ключевой параметр — дисперсию групповой задержки. Экспериментальные данные, полученные на трассе о. Кипр – г. Йошкар-Ола подтвердили работоспособность подхода: АЧХ и ФЧХ качественно соответствуют теоретическим ожиданиям для одномодового распространения, а значения GDD наблюдались в предсказуемых пределах. Данная методика дает возможность верифицировать существующие модели ионосферного канала, сравнивая расчетные и экспериментальные характеристики, также на ее основе можно актуализировать параметры адаптивных SDR-эквалайзеров, выбирая динамический диапазон (порядка 90 дБ), длительность импульсной характеристики (около 125 мкс) и полосу парциального подканала (8 кГц) в соответствии с реальными условиями на трассе.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Иванов Д.В. Методы и математические модели исследования распространения в ионосфере сложных декаметровых сигналов и коррекции их дисперсионных искажений: монография. Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2006. 148 с.

Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В. и др. Деконволюция широкополосного КВ-сигнала, искаженного поляризационной и частотной внутримодовой дисперсией // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 1(49). С. 6–19. DOI: 10.25686/2306-2819.2021.1.6.

Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова М.И. и др. Эффекты дисперсии в ионосферных радиоканалах. Ч. 2. Виды частотно-временно́й дисперсии // Радиотехника. 2024. Т. 88, № 11. С. 63–77. DOI: 10.18127/j00338486-202411-10.

Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова М.И. и др. Эффекты дисперсии в ионосферных радиоканалах. Ч. 3. Внутримодовая дисперсия и технология широкополосной КВ-связи // Радиотехника. 2025. Т. 89, № 1. С. 24–36. DOI: 10.18127/j00338486-202501-02.

Ovchinnikov V.V., Ivanov V.A., Ryabova N.V. Effect of season on single mode propagation band of short-wave signals // Proc. 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP), Kazan, Russia, 2019. P. 325–328.