

СЕНСОРНАЯ ДИАГНОСТИКА ШИРОКОПОЛОСНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ КАНАЛОВ С ПОЛОСОЙ ДО 1 МГц ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СКРЫТНОСТИ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С ППРЧ ЗА СЧЁТ АДАПТИВНОГО ЭКВАЛАЙЗИРОВАНИЯ ВНУТРИМОДОВОЙ ДИСПЕРСИИ

В.В. Овчинников, Д.В. Иванов, В.А. Иванов, М.И. Рябова

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

SENSOR DIAGNOSTICS OF WIDEBAND IONOSPHERIC CHANNELS OF 1 MHz WIDTH TO INCREASE THE COVERTNESS OF FREQUENCY HOPPING DATA TRANSMISSION SYSTEMS BY MEANS OF ADAPTIVE EQUALIZATION OF INTRAMODE DISPERSION

V.V. Ovchinnikov, D.V. Ivanov, V.A. Ivanov, M.I. Ryabova

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

Аннотация. В работе представлены методика сенсорной диагностики ионосферных широкополосных СВ каналов и результаты адаптивного эквалайзирования дисперсии на основе созданного SDR радио сенсора, позволяющего исследовать прикладные задачи ионосферного распространения волновых пакетов с полосой частот до 1 МГц в интересах широкополосной СВ связи. Проведены натурные эксперименты по сенсорной диагностике таких каналов на NVIS радиотрассе протяженностью 90 км. Экспериментально показано, что в результате адаптивного эквалайзирования с учетом данных сенсорной диагностики, энергетический выигрыш систем с быстрой ППРЧ, определяющий скрытность, в среднем составлял 10 дБ. Экспериментально установлено, что период адаптации эквалайзера для NVIS трасс не меньше 60 сек.

Ключевые слова: сенсорная диагностика, ионосферная СВ связь, широкополосный канал, внутримодовая дисперсия, адаптивное эквалайзирование.

Abstract. This paper presents a method for sensor diagnostics of wideband ionospheric HF channels and the outcomes of adaptive equalization by means of radio sensor developed using modern SDR technology. This sensor enables the study of applied problems in ionospheric propagation of wave packets with bandwidths of up to 1 MHz, aimed at enhancing wideband HF communications. Full-scale experiments on sensor diagnostics of wideband 1-MHz channels were carried out over a 90 km NVIS radio path. The experiments demonstrated that adaptive equalization based on sensor diagnostic data resulted in an average energy gain of 10 dB, significantly enhancing the covertness of systems with fast frequency hopping. It was also found that the equalizer adaptation period on NVIS paths can be at least 60 seconds.

Keywords: sensor diagnostics, ionospheric HF communication, wideband channel, intramode dispersion, adaptive equalization.

ВВЕДЕНИЕ

Основными существенными эффектами, препятствующими организации связи по ионосферному широкополосному каналу, являются частотная зависимость задержки каждой скачковой моды (внутримодовая дисперсия) и изменчивость в геофизическом времени среды распространения. Данные эффекты приводят к изменениям во времени структурных функций радиоканалов [Иванов и др., 2022; Арманд, 2003; Аджемов и др., 2021]. Обычно дисперсия групповой задержки достигает величины в несколько десятков микросекунд на Меггерц. Преодоление изменчивых в геофизическом времени негативных эффектов внутримодовой дисперсии требует развития методов адаптивного эквалайзирования и сенсорной диагностики для обучения эквалайзера. Последний вопрос к настоящему времени наименее изучен. Новые возможности в решении данной проблемы создает активно развивающаяся технология программно-конфигурируемого (определяемого) радио (SDR).

МЕТОДИКА СЕНСОРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНЫХ ФУНКЦИЙ ИОНОСФЕРНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СВ КАНАЛОВ

Сенсорная диагностика основана на применении канальной модели распространения в

ионосфере волновых пакетов с учетом согласованной обработки их сложного сигнала в частотной и временной областях. Известно [Иванов и др., 2022], что на выходе канала спектр полезного сигнала $U_R(j\omega, t)$, кроме спектра излучаемого сигнала $U_T(j\omega)$, содержит мультипликативную помеху вида частотной характеристики $H(j\omega, t)$ (ЧХ) канала:

$$U_R(j\omega, t) = U_T(j\omega) \cdot H(j\omega, t). \quad (1)$$

ЧХ из-за дисперсии групповой задержки приводит к искажениям сжатых сигналов. В нашем случае таких сигналов два. Первый диагностирующий, а второй — связной.

Рассмотрим в начале задачу сенсорной диагностики. Методика работы сенсора направлена на оценку ЧХ канала, поскольку в ней содержится необходимая для адаптивного эквалайзирования информация. В рамках этой задачи, в выражение (1) мешающим является спектр излучаемого сенсором сигнала. Для удаления данной помехи применим метод согласованной фильтрации, тогда спектр сжатого сигнала можно представить в виде:

$$\hat{U}_R(j\omega, t) = U_R(j\omega, t) \cdot \hat{U}_T^*(j\omega) = H(j\omega, t) \cdot |U_T(\omega)|^2. \quad (2)$$

Спектральная плотность энергии $|U_T(\omega)|^2$ излучаемого сигнала является действительной функцией, определяющей пределы изменения частоты в его спектре и поэтому, в совокупности ЧХ, определяет частотный ионосферный канал, занимаемый сигналом сенсора.

Методика получения в эксперименте дискретных отсчетов широкополосной ЧХ $\{H_k(j\bar{\omega}_k, t)\}$ имеет свои особенности. Они сводятся к тому, что измерения отсчетов реализуются во временной области. С этой целью широкополосный канал декомпозируется по частоте на множество N парциальных примыкающих узкополосных ω_{ch} каналов, в которых внутримодовой дисперсией можно пренебречь. В таком случае структурная функция импульсной характеристики (ИХ) произвольного k -ого парциального подканала на рабочей частоте $\bar{\omega}_k = \frac{\omega_{k+1} + \omega_k}{2}$ с полосой частот $\omega_{ch} = \omega_{k+1} - \omega_k$ будет иметь вид [Ivanov et al., 2019]:

$$h_k(\bar{\omega}_k, t, \tau) = \frac{\omega_{ch}}{2\pi} H_k(\bar{\omega}_k, t) \cdot \exp[-j(\phi(\bar{\omega}_k, t))] \cdot \text{sinc}[\omega_{ch}(\tau - \phi'(\bar{\omega}_k, t))/2], \quad (3)$$

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

Видно, что значение ИХ в максимуме огибающей $\max |h(\bar{\omega}_k, \tau)|$, когда $\tau = \tau_{gk}$, даёт отсчёт комплексной ЧХ на частоте $\omega = \bar{\omega}_k$ парциала [Ivanov et al., 2019]:

$$h_k(\bar{\omega}_k, t, \tau = \tau_{gk}) = H_k(j\bar{\omega}_k, t) \cdot \frac{\omega_{ch}}{2\pi}. \quad (4)$$

Данная методика позволяет найти все множество отсчетов ЧХ широкополосного канала и записать их в виде:

$$H(j\omega, t) = \{H_1(j\bar{\omega}_1, t), H_2(j\bar{\omega}_2, t), \dots, H_{k-1}(j\bar{\omega}_{k-1}, t), H_k(j\bar{\omega}_k, t), \dots, H_{N-1}(j\bar{\omega}_{N-1}, t), H_N(j\bar{\omega}_N, t)\}. \quad (5)$$

Данный вектор является ключевым результатом сенсорной диагностики. Он позволяет, применив обратную фильтрацию реализовать метод адаптивного эквалайзирования для преодоления внутримодовой дисперсии в широкой полосе канала. Повторяя периодически в геофизическом времени данную процедуру реализуем метод адаптивного эквалайзирования. Очевидно, что за период сенсорной диагностики следует выбрать время стационарности канала [Ivanov et al., 2022; Ivanov et al., 2019].

МЕТОДИКА АДАПТИВНОГО ЭКВАЛАЙЗИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРЕОДОЛЕНИЯ ВНУТРИМОДОВОЙ ДИСПЕРСИИ ПРИ РАСШИРЕНИИ ПОЛОСЫ КВ КАНАЛА

Методика адаптивного эквалайзирования [Ivanov et al., 2022] для преодоления внутримодовой дисперсии базируется на модели (1) в частотной области. Подход основан на деконволюции ЧХ

широкополосного канала методом инверсной фильтрации. Характеристику фильтра можно оценить по известной ЧХ канала, используя соотношение:

$$K(j\omega, t) = H^{-1}(j\omega, t) = \frac{H^*(j\omega, t)}{H^2(j\omega, t)} \Rightarrow U_R(j\omega, t) \cdot K(j\omega, t) = U_T(j\omega). \quad (6)$$

Алгоритм деконволюции представлен формулой (6). В результате применения данной процедуры широкополосный связной сигнал, поступающий на вход эквалайзера с характеристикой $K(j\omega, t)$, заданной своими отсчетами, декомпозируется банком N полосовых фильтров на парциальные каналы с характеристиками обратным ЧХ ионосферного канала.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА. РЕЗУЛЬТАТЫ АДАПТИВНОГО ЭКВАЛАЙЗИРОВАНИЯ ДИСПЕРСИИ В ПОЛОСЕ 1 МГЦ НА NVIS РАДИОТРАССЕ

Терминалы сенсора реализованы на базе современной технологии SDR (software-defined radio) [Ivanov et al., 2022]. В качестве основы использована платформа USRP N210. Синтез и обработка сигналов осуществляется на ПК. Передатчик реализован с использованием усилителя мощности типа LZU-22.

Эксперименты проводились в сентябре 2023 г. на NVIS радиотрассе г. Йошкар-Ола – оз. Яльчик, протяженностью 90 км. Сенсорная диагностика каналов моды 1F с полосой 1 МГц в из диапазона 2–12 МГц проводилась на интервалах геофизического времени в 60 с. Данные обрабатывались по рассмотренным методикам и далее на основе результатов диагностики реализовалось обучение эквалайзера, способствующего преодолению негативного эффекта дисперсии задержки.

На рис. 1 представлены примеры ИХ канала с полосой 1 МГц, до коррекции 1(а) и после коррекции 1(б) в течение первых 5 секунд сенсорной диагностики канала на средней частоте 5 МГц. Красным цветом на рис. 1(а, б) отображается ИХ, полученная на 1 секунде тестирования, определяющей корректирующие коэффициенты адаптивного эквалайзера. Рис. 1(в) демонстрирует достигаемый энергетический выигрыш ИХ, в различные моменты времени. Синий график соответствует случаю ИХ до процедуры адаптивного эквалайзирования, оранжевый — после эквалайзирования.

Полученные результаты демонстрируют достигаемый эффект адаптивного эквалайзирования по данным сенсорной диагностики, когда внутримодовая фазовая дисперсия уменьшается до приемлемых величин, т.е. преодолевается существенное по величине дрожание фазы для ППРЧ. Установлено, что в результате адаптивного эквалайзирования, энергетический выигрыш для системы с быстрой программной перестройкой рабочей частоты в полосе 1 МГц в среднем составлял 10 дБ, в течение всего сеанса диагностирования канала. Экспериментально показано, что период адаптации эквалайзера не менее 60 секунд.

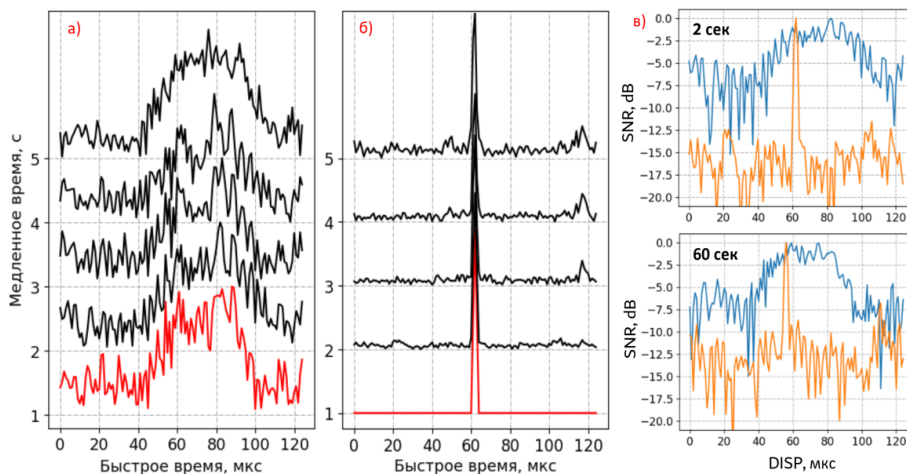


Рис. 1. Результаты сенсорной диагностики канала с полосой 1 МГц для одиночного сеанса: а) ИХ канала полученные сенсором; б) ИХ канала после адаптивного эквалайзирования; в) энергетический выигрыш в различные моменты времени

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен метод сенсорной диагностики для оценки структурных функций ионосферных широкополосных КВ каналов с внутримодовой дисперсией. Проведенные экспериментальные исследования с использованием созданного сенсора канала показали, что предложенный метод позволяет для систем широкополосной связи повысить энергетический выигрыш, определяющий дополнительную энергетическую скрытность, в среднем до 10 дБ. Преодолевается существенное по величине дрожание фазы, определяющее структурную скрытность. Дополнительно показано, что изменчивостью дисперсии в канале можно пренебречь на интервалах не менее 60 сек.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 22-19-00073.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Арманд Н.А. Распространение широкополосных сигналов в дисперсных средах // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 9. С. 1045–1057.
- Аджемов С.С., Лобов Е.М., Кандауров Н.А. и др. Алгоритмы оценки и компенсации дисперсионных искажений широкополосных сигналов ионосферных радиолиний связи // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13, № 5. С. 57–74.
- Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ovchinnikov V.V. et al. Method of Training Mode of Adaptive System for Frequency Dispersion Correction in Wideband Ionospheric HF Communication Channels // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), St. Petersburg, Russia. 2019. P. 1–4.