

АКТИВНО-ПАССИВНЫЙ РАДИОСЕНСОР ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КВ-СВЯЗИ

*Д. В. Иванов, В. А. Иванов, Н.В. Рябова, Р.Р. Бельгибаев, А.А. Елсуков,
А.А. Кислицын, В.В. Овчинников*

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

Аннотация. Представлен созданный на основе современных технологий SDR, DSA, ML интеллектуальный радиосенсор, позволяющий исследовать прикладные задачи ионосферного распространения волновых пакетов с полосой частот от 3 кГц до 1 МГц в интересах дальней КВ-связи. Развита методика зондирования ионосферы на предельно малых мощностях и за минимальное время; оценки доступности парциальных КВ-каналов; коррекции негативных эффектов внутримодовой дисперсии в КВ-каналах с полосой 1 МГц.

Ключевые слова: радиосенсор, ионосфера, КВ-связь.

Введение

Проведенные в последнее время исследования показали [1-5], что текущая диагностика ионосферных радиоканалов является эффективным способом развития телекоммуникационных систем, работающих в сложных и изменяющихся условиях. С успехами вычислительной техники существенно изменились технологии создания новых систем связи и их интегрирование в одном устройстве с сенсорными системами. Создано большое количество универсальных аппаратных платформ на основе технологии программно-конфигурируемого радио - SDR, позволяющих создавать новые интеллектуальные сенсорные системы путем разработки сложных алгоритмов и их программной реализации [1-3]. Основные новые задачи направлены на повышение возможностей КВ-связи и включают: существенное снижение излучаемой мощности; увеличение скорости передачи информации за счет увеличения в 8 – 16 раз параллельно работающих узкополосных каналов (3 кГц), приводящее к расширению полосы WBNF парциального канала до 24 – 48 кГц [1]; увеличение структурной скрытности и автономности КВ связи за счет расширения в сотни раз (до 1 МГц) полосы связного сигнала – СРС (предпочтительно с быстрой ППРЧ) с преодолением изменяющегося во времени негативного природного явления внутримодовой дисперсии среды, создающей дополнительное кодирование для широкополосного сигнала при его распространении в ионосфере [1].

Решение поставленных выше задач основано на преодолении негативного влияния КВ радиоканала на передачу информации, и может быть пояснено двумя фундаментальными положениями.

Первое указывает, что спектр принимаемого сигнала равен произведению спектра излучаемого сигнала на частотную характеристику (ЧХ) канала:

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

Второе определяет связь между отношением сигнал-шум на приеме с энергией сигнала и спектральной плотностью мощности аддитивного шума (помех) в канале:

$$SNR = 2E / n_0 \quad (2)$$

Обращаясь к первой формуле, отметим, что для систем связи передаваемая (полезная) информация содержится в спектре излучаемого сигнала. При этом в принимаемом сигнале она мультипликативно искажается ЧХ канала. Вторая формула свидетельствует о том, что защитное отношение – SNR зависит от энергии сигнала, которую при ограничении на излучаемую мощность можно увеличить за счет длительности, применяя сложный сигнал. Кроме этого, защитное отношение может быть увеличено, благодаря выбору для работы парциальных каналов с минимальной спектральной плотностью шума (уменьшение знаменателя дроби).

Обе задачи относятся к проблеме когнитивности систем связи. Метод ее решения базируется на применении интеллектуального радиосенсора канала для оценки загруженности парциальных каналов путем спектрального анализа (в реальном времени) во всем КВ- диапазоне помех с разрешением 3 кГц, и оценки ЧХ широкополосного канала и ее эквалайзирования.

Целью работы являлось создание интеллектуального радиосенсора с расширенной областью применения и исследование на его основе возможностей повышения эффективности систем диагностики каналов. Решаемые задачи предполагают развитие методов диагностики, спектрального анализа помех и разработку методов, алгоритмов и аппаратных средств для оценки в геофизическом времени либо ЧХ канала, либо ее ключевых параметров с применением технологий: программно-определяемого радио – SDR; машинного обучения (Machine Learning - ML) и Big Data.

Подходы к решению новых задач на основе интеллектуального радиосенсора канала

При создании интеллектуального сенсора использованы результаты ранее выполненных нами исследований: методы, алгоритмы и программно-аппаратные средства, соответствующие SDR технологии и адаптированные к платформе USRP – 210 для синтеза и обработки сложных сигналов типа LFMCW, LFMICW, BPSK, OFDM [1,2,4]. Применены результаты разработки методов оценки межмодовой дисперсии в узкополосных каналах и преодоления внутримодовой и поляризационной дисперсий в ионосферных каналах с полосой до 1 МГц. Интеллектуальный сенсор работает в двух режимах: диагностики узкополосных каналов (с полосами частот 3 кГц) с применением панорамного тестирования КВ диапазона сигналом типа LFMCW; широкополосного канального тестирования (в полосе 0,25-1 МГц) сигналом типа LFMCW. В последнем случае результаты ориентированы на обеспечение работы систем связи с быстрой ПППЧ (SSB-FFH). Новые методики основаны на применении канальной модели распространения в ионосфере скачковых мод с учетом согласованной обработки сложных сигналов сенсора в частотной и временной областях. Программная реализация радиосенсора на платформе SDR использует возможности пакета GNU Radio. Методика работы сенсора в режиме диагностики узкополосных каналов направлена на оценку параметров межмодовой дисперсии путем определения функции рассеяния (ФПК), включающей три параметра: рассеяние по Доплеру, рассеяния по задержке и отношение сигнал-шум (SNR) [3]. В пространстве с одноименными координатами оно отображается точкой. В данном режиме

сенсор реализует интеллектуальный анализ данных измерения ФРК множества подканалов с применением математического анализа. Данные о параметрах рассеяния и SNR проходят валидацию и объединяются. Интеллектуальный анализ представляет собой процесс обнаружения подходящего канала для данного модема связи, путём сопоставления множества полученных ФРК с параметрами характеристической функции модема [1,3]. Канал считается доступным для используемого модема, если ФРК принадлежит области допустимых значений его ХФМ. Периодичность процесса интеллектуального анализа множества ФРК зависит от условий распространения сигнала и в среднем составляет 1 минуту. Режим широкополосного канального тестирования для преодоления внутримодовой дисперсии основан на следующих рассуждениях. Согласно (1) спектр принимаемого сигнала содержит мультипликативную помеху вида ЧХ канала, которая из-за дисперсии искажает передаваемую информацию. Для преодоления искажений из данного уравнения необходимо выразить спектр излучаемого сигнала путем умножения спектра принимаемого сигнала на функцию вида $1/H(j\omega, t)$. Такое умножение называют инверсной фильтрацией спектра принимаемого сигнала фильтром с ЧХ вида:

$$K(j\omega, t) = H^{-1}(j\omega, t) = H^*(j\omega, t) / |H(j\omega, t)|^2$$

Отметим, что числитель корректирует внутримодовую дисперсию групповой задержки, а знаменатель – внутримодовую поляризационную дисперсию. Инверсный фильтр реализован нами с применением метода адаптивного эквалайзирования. Для его активации, осуществляется машинное обучение, как процесс применения математического алгоритма к данным, полученным сенсором перед сеансом связи. Для этого интеллектуальный радиосенсор осуществляет воздействие на ионосферный широкополосный канал сигналом типа LFM CW, позволяющим периодически получать отсчеты комплексной ЧХ. Полученные отсчеты сенсор использует для вычисления корректирующих коэффициентов каждого сквозного парциального подканала, в соответствии с разработанным алгоритмом. В процессе обучения каждому подканалу эквалайзера присваивается свой корректирующий коэффициент, актуальный в течение времени когерентности канала. Сквозной канал считается доступным для передачи широкополосного SSB-FFH сигнала до следующего цикла обучения.

Интеллектуальный радиосенсор с LFM CW, LFMICW, BPSK, OFDM сигналами на основе технологии SDR и ПО типа GNUradio для решения задач когнитивной КВ-связи

Интеллектуальный радио сенсор реализован на алгоритмическом и программном уровне на базе универсальной приемопередающей SDR платформы, персонального компьютера (ПК) и программного обеспечения (ПО) GNU Radio. ПО позволяет реализовывать несколько режимов работы в одном устройстве: диагностика узкополосных каналов с полосами 3 кГц; оценка степени загруженности каналов и интеллектуальный выбор доступных парциальных каналов для работы системы связи; оценка ЧХ широкополосного канала и обучение SDR-эквалайзера. Блок-схема интеллектуального радио сенсора приведена на рисунке 1. В задаче определения доступности КВ радиоканала использовалась методика спектральной оценки. Принимаемый из эфира сигнал в полосе 25 МГц (в диапазоне 3-28 МГц) подвергается быстрому преобразованию Фурье с числом точек 65536. В результате получаем спектр сигнала с разрешением по частоте 381,47 Гц. Для

получения спектральной плотности мощности (СПМ) сигнала в канале с полосой 3,051 кГц необходимо провести усреднение по 8 соседним отсчетам. СПМ сигнала в канале с базовой полосой 3 кГц получался путем линейного пересчета мощности из СПМ сигнала в канале с полосой 3,051 кГц. Затем эти данные пересчитывались на СПМ каналов с полосой до 48 кГц. Записанные из радиоэфира спектры носят случайный во времени характер. Чтобы получить статистически устойчивую выборку спектров для оценки СПМ использовалось усреднение спектров, полученных последовательно за 1 с (см. рисунок 1). Далее, для анализа доступности радиоканала усредненный спектр помех делился на поддиапазоны по 1 МГц. Для каждого поддиапазона строился вариационный ряд по возрастанию, бралось 3% отсчетов с наименьшей СПМ и вычислялось их среднее. Это необходимо для определения минимального уровня шума в каждом поддиапазоне [1-5]. Определение минимального уровня шума необходимо для определения нулевого уровня от которого будем определять доступность радиоканала пороговым методом. Доступность канала определялась заданием уровня порога в 10 дБ от минимального уровня шума, превышение которого означало загруженность анализируемого канала. Для прогнозирования доступности нами использовалась метрика, названная СМА. Она соответствующей следующей гипотезе: если радиоканал свободен в течение 2-х минут, то он будет свободным и в 3-ю минуту [1-3].

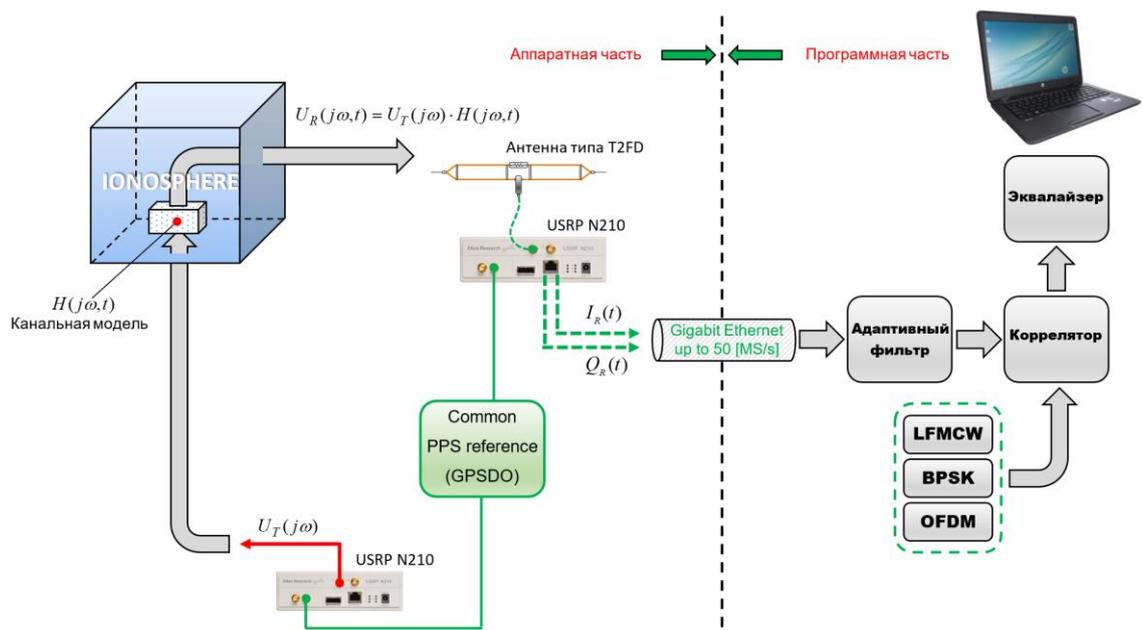


Рис.1. Блок-схема интеллектуального радиосенсора с обратной связью

Примеры данных пассивно-активного и канального зондирования интеллектуальным радиосенсором приведены на рис. 2.

Эксперименты показали, что для ионосферных каналов возможно существенное расширение полосы частот (до 1 МГц) путем применения предложенного метода инверсной фильтрации. Получено, что в результате фильтрации, длительность ИХ уменьшалась до значений ~ 1 мкс, характерных для случая отсутствия дисперсии в канале. Следовательно, при совмещении устройства эквализации с действующей системой связи полоса неискажённой передачи может быть увеличена в сотни раз.

Ионограммы НЗ зондирования:

- Верхняя – пассивное
- Нижняя - активное

Временной ход ПЗМ и для него
- ФПК NVIS канала на частоте
5,8 МГц (Йошкар-Ола)

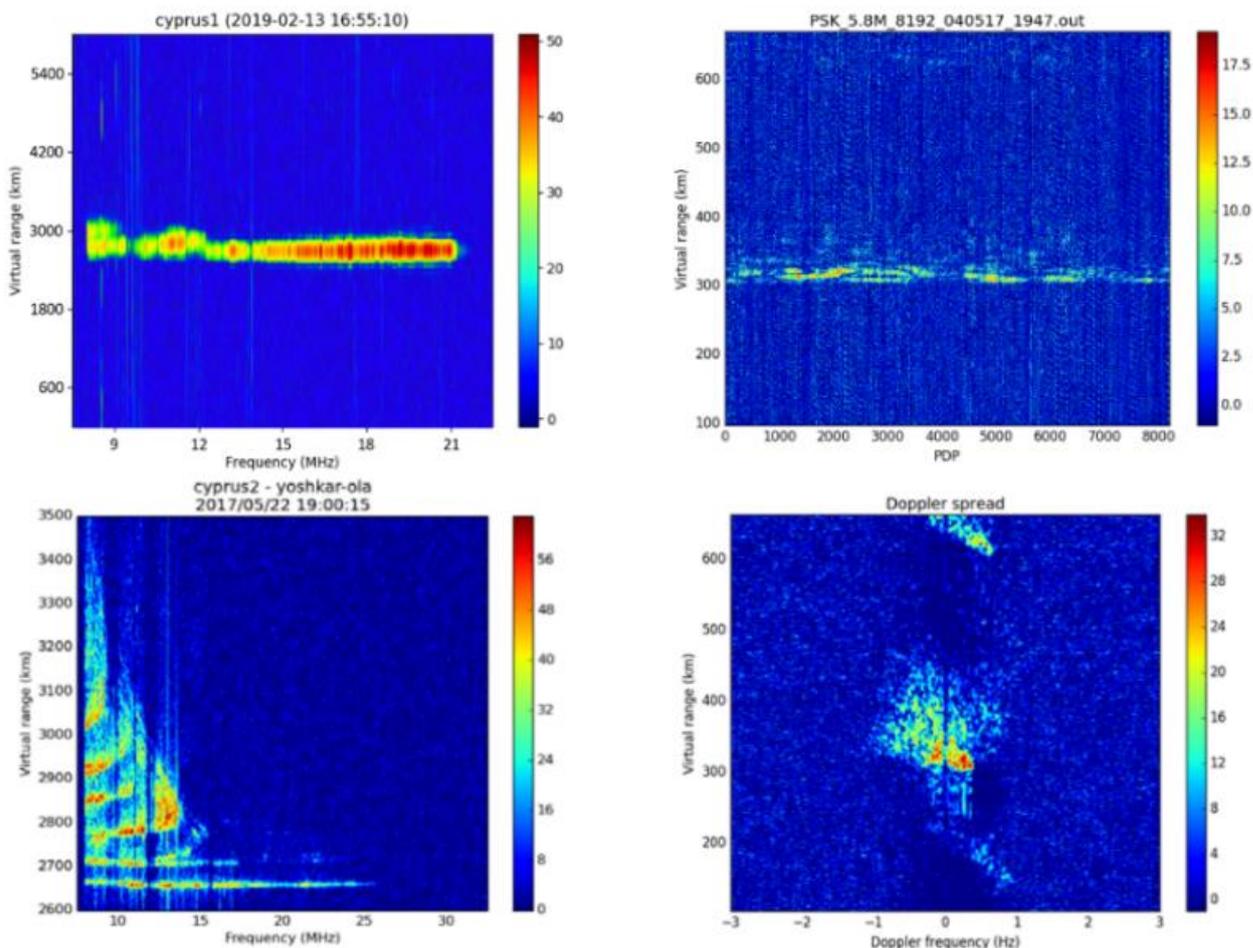


Рис. 2. Примеры полученных данных с сенсора сигналами типа LMCW, LMICW, BPSK, ФПК зондируемого канала

Заключение

Разработанный радиосенсор позволяет зондировать ионосферу на предельно малых мощностях и за минимальное время, что важно для геофизических исследований. Для систем КВ связи он позволяет оценивать основные характеристики упорядоченного по частоте множества каналов с различной полосой частот, оценивать их доступность и дает возможность интегрировать данную систему в аппаратуру когнитивной КВ связи. Расширение функциональных возможностей сенсора для решения задачи существенного расширения полосы частот каналов связи путем преодоления негативного влияния частотной внутримодовой дисперсии (групповой задержки и поляризационной) достигнуто за счет применения сложных цифровых алгоритмов синтеза и обработки сигналов и применения современных ИТ технологий. Экспериментально установлено, что полоса неискажённой передачи в диспергирующих каналах ионосферной КВ-связи может быть увеличена в сотни раз.

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

Список литературы

1. Иванов Д.В. Разработка и испытание аппаратно-программного комплекса для наземного мониторинга ионосферы с применением SDR-технологии, сложных зондирующих фазо-кодо-манипулированных сигналов и квадратурной обработки / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, А.А. Елсуков // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2019. - № 2 (42). - С. 71-85. DOI: 10.25686/2306-2819.2019.2.71
2. Ryabova N.V. Studying the algorithms of processing a FMICW signal for vertical incidence ionospheric sounding with the use of a single antenna / N.V. Ryabova, D.V. Ivanov, V.A. Ivanov et al. // 2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2018-January. - P. 1-4. DOI: 10.1109/SOSG.2018.8350631
3. Иванов Д.В. Оптимальные полосы частот сложных сигналов для декаметровых радиолиний / Д.В. Иванов // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51, № 4. – С. 389-396.
4. Ivanov, D. V. Universal ionosonde for diagnostics of ionospheric HF radio channels and its application in estimation of channel availability / D.V. Ivanov, V.A. Ivanov, N.V. Ryabova et al. //12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018), London, 2018, P. 1-5. DOI: 10.1049/cp.2018.0473
5. Belgibaev R.R. Software-Defined Radio Ionosonde for Diagnostics of Wideband HF Channels with the Use of USRP Platform / R. R. Belgibaev, V. A. Ivanov, D. V. Ivanov et al. // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), Saint-Petersburg, Russia, 2019. - P. 1-4. DOI: 10.1109/WECONF.2019. 8840637

ACTIVE-PASSIVE RADIO SENSOR FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF HF COMMUNICATION

D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, R.R. Belgibaev, A.A. Elsuikov, A.A. Kislitsyn, V.V. Ovchinnikov

Volga State Technological University
3, sq. Lenina, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation

Annotation. An intelligent radio sensor developed on the basis of modern SDR, DSA, ML technologies is presented. Methods have been developed: sounding the ionosphere at extremely low powers and in the minimum time; assessing the availability of partial HF channels; correction of the negative effects of intramode dispersion in HF channels with a bandwidth of 1 MHz.

Keywords: radio sensor, ionosphere, HF communication.

Статья поступила в редакцию 15.03.2023