

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КЛЮЧЕВЫХ ПАРАМЕТРОВ МНОЖЕСТВА ПАРЦИАЛЬНЫХ КАНАЛОВ КВ-СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ USRP ПЛАТФОРМЫ

Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Н.В. Рябова, Р.Р. Бельгибаев, Н.А. Конкин

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия
ra4sbt@mail.ru

EXPERIMENTAL EVALUATION OF KEY PARAMETERS OF A SET OF PARTIAL COMMUNICATION CHANNELS, USING USRP PLATFORM

D.V. Ivanov, V.A. Ivanov, N.V. Ryabova, R.R. Belgibaev, N.A. Konkin

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia
ra4sbt@mail.ru

Аннотация. Решалась задача оценки параметров рассеяния на радиотрассе большой протяженности при зондировании ионосферного КВ-радиоканала сверхширокополосным ЛЧМ-сигналом. Ионосферный канал представлен в виде упорядоченного множества узкополосных примыкающих каналов со средними частотами. Получены экспериментальные данные о статистике параметров рассеяния и отношениях сигнал шум для всего множества каналов на радиотрассе Кипр — Йошкар-Ола. Для периодов блэкаутов получены характеристики полосы прозрачности линии КВ-связи и их корреляция с рентгеновским излучением.

Ключевые слова: частотный канал, частотная характеристика, импульсная характеристика, функция рассеяния канала, пассивный SDR ионозонд.

Abstract. The problem of estimating the scattering parameters on the far radio channel during the probing of the ionospheric HF radio channel by an ultra-wideband chirp signal was solved. The ionospheric channel is represented as an ordered set of narrow-band adjacent channels with medium frequencies. Experimental data on the statistics of the scattering parameters and the signal-to-noise ratio for the entire set of channels on the Cyprus — Yoshkar-Ola radio route were obtained. For periods of darkening, the characteristics of the transparency band of the HF link and their correlation with X-rays were obtained.

Keywords: frequency channel, frequency response, impulse response, channel spread function, passive SDR ionosonde.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство цифровых систем передачи данных в КВ-диапазоне работают в полосе 3 кГц. Основное влияние на их работу оказывают эффекты многолучевости, возникающие при распространении сигнала в ионосфере. Интерференция лучей с близкими частотами приводит к явлению замирания во временной области, а с близкими задержками — в частотной, что негативно влияет на помехоустойчивость системы. Вариации в полосе канала и замирания во временной области определяют частотно-селективный характер замираний. При этом затухание сигнала при распространении и аддитивные помехи мешают приему, заставляя повышать мощность связанного сигнала. Для эффективной борьбы с перечисленными явлениями необходима адаптация системы связи к изменяющимся параметрам канала на основе данных радиозондирования. Наиболее простым в реализации является метод пассивного зондирования, усовершенствование которого возможно с применением SDR-технологии, универсальных аппаратных платформ при цифровой квадратурной обработке сигнала.

Целью работы являлось исследование ключевых параметров парциальных КВ-радиоканалов и полосы прозрачности линии КВ-связи методом пассивного радиозондирования с использованием USRP платформы.

1. ЧАСТОТНЫЙ РАДИОКАНАЛ И ЕГО СИСТЕМНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Известно, что в ионосфере КВ-радиоволны распространяются от передатчика к приемнику лучами.

Существует дискретная многолучевость, обусловленная регулярной слоистой структурой ионосферы, и диффузная — обусловленная случайными неоднородностями среды. Лучевой трактовке в литературе ставится в соответствие радиотехническая, когда задача распространения сводится к задаче прохождения линейной системы с числом входов по числу дискретных лучей. При этом диффузные лучи определяют статистику амплитуд импульсных характеристик трактов линейной системы. На приемной антенне выходы всех трактов линейной системы суммируются.

При наклонном распространении КВ в ионосфере в точку приема приходят лучи на частотах от НПЧ до МПЧ, который разбит на частотные каналы с полосами частот, равными, полосе сигналов КВ-связи $B_{ch} = 3$ кГц, отличающиеся средней частотой. Поэтому на КВ-трассе может быть организовано $J = \text{INT}[\text{МПЧ-НПЧ}/B_{ch}]$ каналов, упорядоченных по средней (рабочей) частоте $\bar{\omega}$. Все упорядоченное множество частотных каналов можно описать в виде многомерного канала. Если в ионосфере наблюдаются вариации ее характеристик во времени T , то и характеристики каждого будут специфично также зависеть от времени.

Для описания характеристик произвольного узкополосного канала наибольшее распространение получила модель Ваттерсона [Waterson et al., 1970], в которой полоса частот самого радиоканала не ограничена. В рамках этой модели переменные: быстрое (задержка) и медленной (текущее) время

разделяются в смысле возможности представления системных функции двух переменных в виде произведения двух функций, одна из которых зависит только от быстрого, а вторая — от медленного времени. С учетом того, что в КВ-диапазоне аддитивно к сигналу действуют шумы и помехи различного происхождения ФРК многолучевого канала можно представить в виде [Cannon et al., 2002; Иванов и др., 2011]:

$$P_{\phi}(\bar{\omega}, \tau, F_d) = \sum_{n=1}^N SNR_n \times \exp\left[-(\tau - \bar{\tau}_n)^2 / 2\sigma_{\tau n}^2 - (F_d - \bar{F}_{dn})^2 / 2\sigma_{dn}^2\right], \quad (1)$$

где $\bar{\tau}_n$ — средняя задержка ИХ в канале, \bar{F}_{dn} — средний несущей в канале, $\sigma_{\tau n}$ — рассеяние ФРК по задержке, σ_{dn} — рассеяние ФРК по доплеровской частоте, SNR_n — отношение сигнал/шум в радиоканале.

Таким образом считается, что состояние канала определяется тремя ключевыми параметрами ($\sigma_{\tau n}$, σ_{dn} , SNR_n).

2. АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ УПОРЯДОЧЕННОГО МНОЖЕСТВА ЧАСТОТНЫХ КАНАЛОВ МЕТОДОМ ПАССИВНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

При последовательном зондировании упорядоченного по частоте множества узкополосных каналов оценивается ПЗМ и отношение сигнал-шум (SNR_n) каждого из них. Для его оценки SNR_n данные об уровне смеси сигнала и шума в частотном канале со средней частотой $\bar{\omega}$ $P_{sv}(\bar{\omega}, \tau)$ берутся из очищенной ионограммы, а уровень помехи определяется по формуле [Belgibaev et al., 2017; Ivanov et al., 2018]:

$$P_N(\bar{\omega}) = 1.44Me(\bar{\omega}), \quad (2)$$

где $Me(\bar{\omega})$ — медианное значение отсчетов сигнала в канале с частотой $\bar{\omega}$.

Отношение сигнал/шум в канале с частотой $\bar{\omega}$, рассчитывается как отношение усредненной энергии сигнала к усредненной спектральной плотности шума, которое также соответствует следующей формуле:

$$SNR(\bar{\omega}) = 10 \lg \left[\bar{P}_{sv}(\bar{\omega}) / \bar{P}_N(\bar{\omega}) - 1 \right], \quad (3)$$

где $\bar{P}_{sv}(\bar{\omega})$ — средний уровень смеси сигнала и шума, $\bar{P}_N(\bar{\omega})$ — средний уровень шума.

Рассеяние по задержке $\sigma_{\tau n}$ определяется на основе мгновенного ПЗМ (квадрат модуля импульсной характеристики) по уровню -3 дБ от максимума. Для оценки рассеяния по частоте σ_{dn} нами была разработана следующая методика, основанная на нелинейном уравнении регрессии, полученном из анализа экспериментальных данных [Warrington, Stocker, 2003; Stocker et al., 2013] одновременных измерений рассеяния по времени и частоте. Параболическое уравнение регрессии было получено [Бельгибаев,

2017; Belgibaev et al., 2017] методом наименьших квадратов. Оно имеет вид следующего полинома:

$$\sigma_d [\text{Гц}] = f(\sigma_{\tau}) = K_0 + K_1 \sigma_{\tau} [\text{мс}] + K_2 \sigma_{\tau}^2 [\text{мс}], \quad (4)$$

где, $K_0=1.55$ Гц, $K_1=-0.24$ Гц/мс, $K_2=0.33$ Гц/мс².

Формула (9) позволила нам по измеренному значению σ_{τ} , оценить σ_d .

3. ПАССИВНЫЙ SDR ИОНОЗОНД НА ПЛАТФОРМЕ USRP ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МНОГОМЕРНЫХ КВ-РАДИОКАНАЛОВ

Блок-схема созданного в работе приемного терминала SDR ионозонда, построенного на платформе USRP N210, представлена на рис. 1, а. В ионозонде использована дочерняя плата LFRX. На рис. 1, б полученная ионограмма.

Согласно схеме, ионозонд включает КВ-антенну, универсальную платформу USRP с встроенным модулем частотно-временной синхронизации и персональный компьютер (ПК) с ОС Ubuntu Linux, GNU Radio со специализированным программным обеспечением. Переход к данной схеме приемника пассивного зонда и новой методики цифровой обработки сигнала связана с необходимостью анализа прыгающих парциальных телефонных каналов. Кроме того, данная цифровая обработка сигнала в пассивном SDR-ионозонде позволяет получить более высокую помехоустойчивость системы зондирования. Высокая частота дискретизации сигнала позволяет производить оценки параметров задержки в канале с более высокой точностью.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ РАССЕЯНИЯ ПРИ РАБОТЕ НА СРЕДНЕШИРОТНОЙ ТРАССЕ БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ

Экспериментальные исследования параметров парциальных телефонных каналов и вариаций в период блэкаутов полосы прозрачности проводились на радиолинии Кипр — Йошкар-Ола. Результаты зондирования получали с периодом 5 мин круглосуточно. Всего было обработано 1728 ионограмм, для магнитоспокойных дней.

В таблице приведены средние значения отношения сигнал/шум $\langle SNR \rangle$ рассеяния по задержке $\langle \sigma_{\tau n} \rangle$, доплеровскому смещению $\langle \sigma_{dn} \rangle$ и СКО для них.

	Ночь	Утро	День	Вечер
$\langle SNR \rangle \pm RMS_{SNR}$	23.61±5.15	22.38±4.53	21.41±5.07	22.69±4.25
$\langle \sigma_{\tau n} \rangle \pm RMS_{\sigma_{\tau n}}$	2.17±0.91	2.19±1.01	1.90±0.73	2.21±0.90
$\langle \sigma_{dn} \rangle \pm RMS_{\sigma_{dn}}$	2.62±1.61	2.66±1.65	2.31±1.56	2.67±1.98

Полученные в данных экспериментах параметры рассеяния хорошо согласуются с полученными нами ранее данными [Иванов и др., 2009]. Отметим, что значения параметра рассеяния по задержке удовлетворяет модемам со скоростями передачи данных 9600 бод, а значения параметра рассеяния по доплеровской частоте ограничивают скорость передачи величиной 2400 бод. Большее значение на скорость

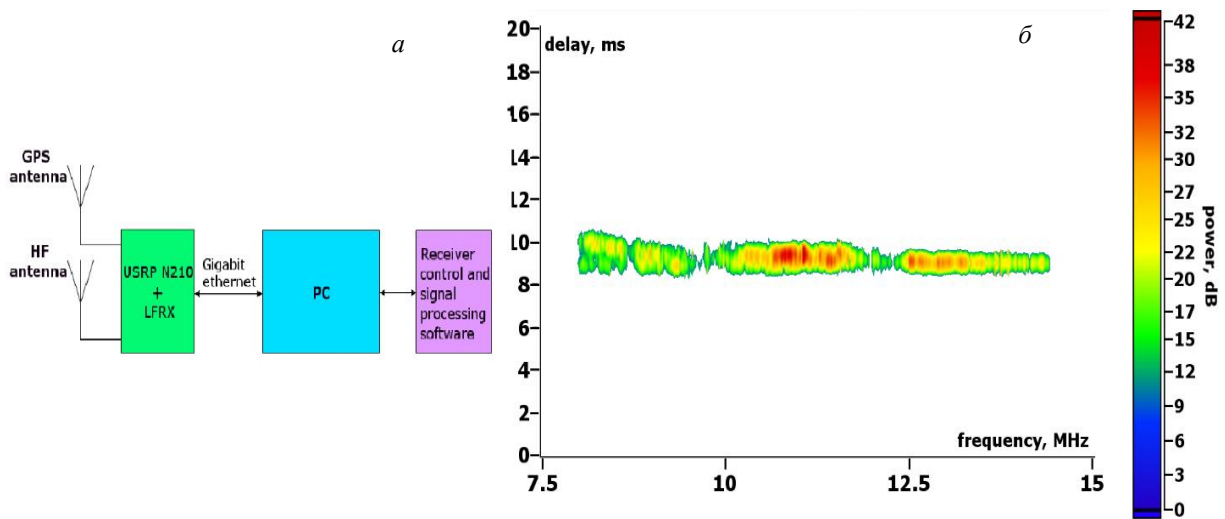


Рис. 1. Блок-схема приемного терминала SDR пассивного ЛЧМ-ионозонда (а) и получаемая очищенная от помех ионограмма (б) при полосе элемента 3 кГц

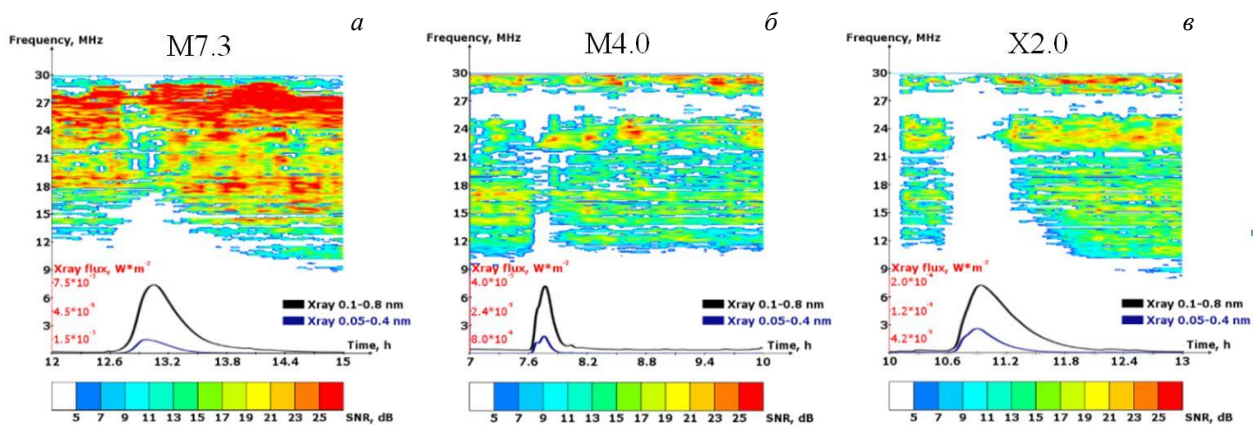


Рис. 2. Суточный ход частотной зависимости отношения сигнал/шум, плотность потока рентгеновского излучения с $\lambda_1 = 0.05\text{--}0.4$ нм (синий) и $\lambda_2 = 0.1\text{--}0.8$ нм (черный)

передачи информации оказывали вариации отношения сигнал-шум. Важное значение для КВ связи играют эффекты блэкаутов. Вариации параметров упорядоченного по частоте множества телефонных каналов в периоды блэкаутов исследовались в экспериментах 2014 г. в период с января по декабрь. Блэкауты были вызваны солнечными вспышками классов: М 7.3 (18.04), М4.0 (24.10) и X2.0 (26.10). Геомагнитная обстановка во время данных событий была невозмущенной. Из представленных на рис. 2 данных вариаций частотных зависимостей отношения сигнал-шум прослеживаются изменения полосы прозрачности для трех событий. Особенно значительные вариации имели место в период вспышки класса X2.0.

Из представленных данных видно, что НПЧ радиолинии следует за ходом интенсивности «мягкой» компоненты ($\lambda_2 = 0.1\text{--}0.8$ нм) рентгеновского излучения. Это означает, что именно она определяет поглощение КВ при распространении в условиях внезапных ионосферных возмущений. Обращает на себя внимание горизонтальные белые линии в диапазоне частот 25...28 МГц (рис. 2, б, в). Проведенные нами расчеты показали, что данный эффект связан с экранировкой скачковых мод на этих частотах сферической земной поверхностью.

ВЫВОДЫ

Использование в приемном терминале пассивного зонда, реализованного на базе USRP платформы позволило дополнительно исследовать ключевые параметры всей совокупности примыкающих телефонных (с полосой 3 кГц) каналов. Показано, что полученные значения параметров рассеяния соответствуют умеренно-возмущенным условиям. Параметры рассеяния по задержке обеспечивают скорости передачи данных 9600 бод, а значения параметра рассеяния по доплеровской частоте ограничивают скорость передачи величиной 2400 бод. Во время эффектов блэкаута полоса прозрачности убывает, следуя в основном за НПЧ, ход которой коррелирует с ходом «мягкой» компоненты рентгеновского излучения.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ: № 3.4074.2017/ПЧ грантов Российского фонда фундаментальных исследований: № 18-07-01376, № 17-07-01590.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бельгибаев Р.Р. Пассивное зондирование многомерного ионосферного КВ радиоканала // Труды Поволжского государственного технологического университета. Серия: Технологическая, 2017. С. 39–51.

Иванов В.А., Катков Е.В., Рябова М.И., Чернов А.А. Канальные параметры рассеяния для среднеширотной ионосферы // Вестник Поволжского государственного технологического университета. 2011. С. 93–101.

Иванов В.А., Рябова Н.В., Царев И.Е. Диагностика функции рассеяния декаметровых узкополосных стохастических радиоканалов // Радиотехника и электроника. 2009. № 55. С. 285–292.

Belgibaev R.R., Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ryabova N.V. Processing signals of passive chirp ionosonde in the problem of estimation the HF channel availability // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO). Kazan. 2017.

Cannon P.S., Angling M.J., Lundborg B. Characterization and Modeling of the HF Communications Channel // Rev. Radio Sci. 2002. N 27. P. 597–623.

Stocker A.J., Warrington E.M., Siddle D.R. Observations of Doppler and delay spreads on HF signals received over polar cap and trough paths at various stages of the solar cycle // Radio Sci. 2013. N 48. P. 638–645.

Warrington E.M., Stocker A.J. Measurements of the Doppler and multipath spread of HF signals received over a path oriented along the midlatitude trough // Radio Sci. 2003. N 38. P. 1–12.

Watterson C.C., Juroshek J., Bensema W.D. Experimental Confirmation of an HF Channel Model // IEEE Transactions on Communications. N 6. 1970792-803.