

Модификация пассивного ионозонда для исследования эффектов солнечных вспышек

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

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет,
424000, Респ. Марий Эл, г. Йошкар-Ола, Площадь Ленина, 3, BelgibaevRR@volgatech.net

Ухудшение работы систем КВ связи часто вызваны непрогнозируемыми возмущениями ионосферы, обусловленными солнечными вспышками. Это приводит к необходимости их экспериментального исследования, методами радиозондирования. Однако для этих целей метод пассивного зондирования ионосферы и упорядоченного по частоте множества парциальных КВ каналов требует своего развития. В работе данная задача решена благодаря созданию оригинального алгоритмического обеспечения и применению современных технологий цифровой обработки сигнала, позволившей оценивать параметры внезапных ионосферных возмущений в широкой полосе частот и реальном времени, а также параметры вызванных ими блэкаутов. Эксперименты, посвященные исследованию релаксации блэкаутов проводились 18 апреля, 24 и 26 октября 2014 года.

Unpredictable ionospheric disturbances caused by the solar flares are often the main cause of disruption of HF communication systems. Thus, it is crucial to do experimental research into the methods of radio sounding. However, for these purposes, the method of passive sounding of the ionosphere and the frequency-ordered set of partial HF channels required its development. The problem was solved through the development of appropriate algorithms and the usage of the state-of-the-art digital signal processing technologies. This allowed a real-time estimation of parameters of sudden ionospheric disturbances in a wide frequency band as well as the parameters of communications blackouts. Experiments on the blackouts relaxation were carried out on April 18, October 24 and 26 in 2014.

Введение

Короткие волны является эффективным средством решения проблемы обеспечения беспроводной связи на дальние расстояния и в местах со сложным рельефом местности из-за их свойства отражаться от ионизированных слоев верхней части атмосферы. Основные проблемы для систем связи вызваны непрогнозируемыми возмущениями ионосферы, что негативно сказывается на работе систем КВ связи. Физическими процессами, приводящие к ним относятся солнечные вспышки, возмущения магнитного поля Земли, спорадический E слой и др.

В настоящее время для зондирования используется 2 типа ионозондов: панорамные и каналные. Наибольшее распространение получили панорамные ионозонды с непрерывным линейно-частотномодулированным (ЛЧМ) сигналом. Для них эффективна оптимальная обработка зондирующего сигнала в приемнике, которая позволяет получить значительный (до $10^5 - 10^6$) выигрыш в величине отношения сигнал/шум и существенно снизить мощность зондирующего сигнала. Однако, для реализации ЛЧМ ионозонда требуется дорогостоящее специальное оборудование.

Для зондирования ионосферы, возможно применение пассивного ЛЧМ ионозонда. В этом случае для приема зондирующих сигналов можно использовать аппаратуру связи. Однако подход пассивного панорамного зондирования требует своего развития в алгоритмической и программной частях. Это особенно важно для исследования эффекта блэкуата вызванного рентгеновскими вспышками.

Цель работы: создание алгоритмов и программного обеспечения для развития метода пассивного панорамного зондирования ионосферы и исследование на их основе

влияния эффектов солнечных вспышек на радиоканал, а также времени релаксации наименьшей применимой частоты.

1. Виды ионосферных возмущений. Блэкауты.

В то время как в невозмущенном виде ионосфера является сложной и весьма неоднородной системой, существуют механизмы, которые могут вызвать серьезные отклонения ее параметров, известные под общим названием ионосферных возмущений. Возмущения ионосферы является результатом событий, происходящих на Солнце. Основными причинами ионосферных возмущений являются солнечные вспышки. Рентгеновские вспышки разделены по классам (см. табл. 1) [1].

Таблица 1 – Классы солнечных вспышек

Обозначение	Интенсивность рентгеновского излучения в пике (Bm/m^2)
A	$<10^{-7}$
B	$10^{-7}-10^{-6}$
C	$10^{-6}-10^{-5}$
M	$10^{-5}-10^{-4}$
X	$>10^{-4}$

Основные причины и их эффекты показаны на рис 1.

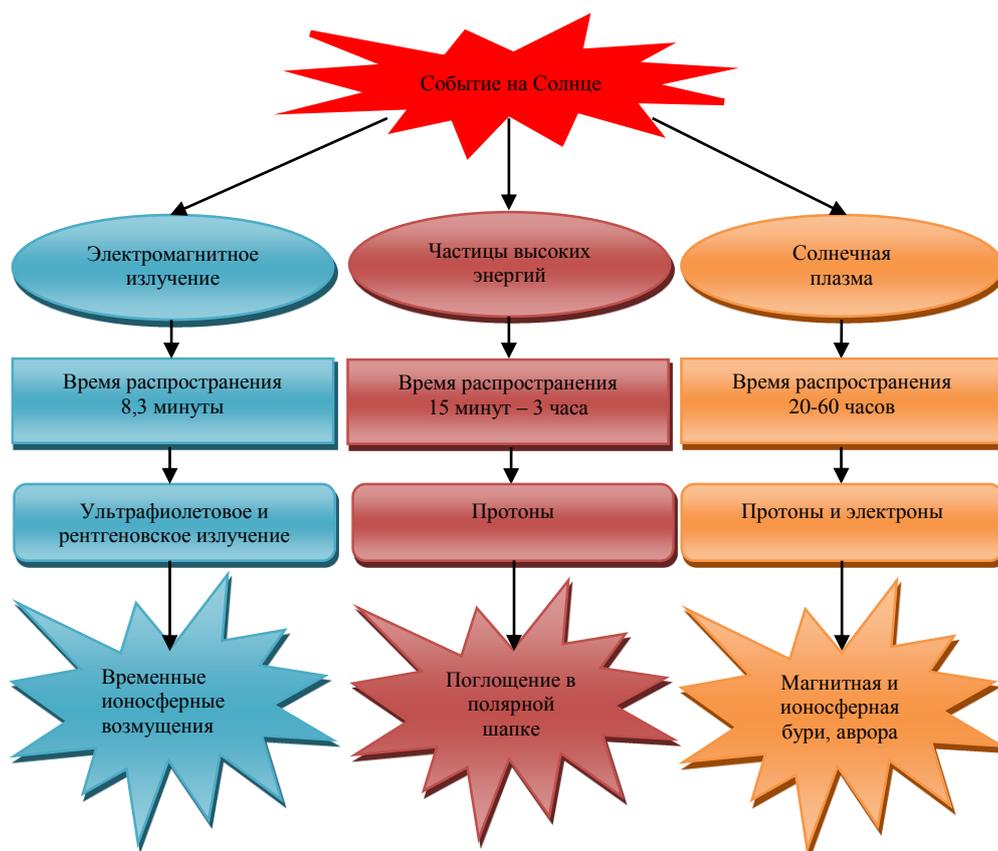


Рис. 1 – Ионосферные возмущения и их причина

Эффекты, вызванные событиями на Солнце, делятся на внезапные ионосферные возмущения (ВИВ), геомагнитные бури и поглощения в полярной шапке.

Эффект поглощения радиоволн во время ВИВ в литературе часто называется блэкаутом. Блэкауты разделяются на классы (см. табл. 2).

Таблица 2 – Классы блэкаутов (Solar Flares (Radio Blackouts), 2017)

Классификация NOAA	Класс солнечных вспышек	Длительность
R1	M1	минуты
R2	M5	десятки минут
R3	X1	около часа
R4	X10	1-2 часа
R5	X20	несколько часов

Данные события являются трудно предсказуемыми, поэтому для их регистрации и исследования необходимо проведение радиозондирования.

2. Развитие метода пассивного зондирования для оценки параметров ионосферных возмущений.

В наших исследованиях для изучения эффектов ионосферных возмущений было предложено использовать пассивный ЛЧМ ионозонд. Учитывалось, что передатчики панорамных ионозондов излучают непрерывный ЛЧМ сигнал в диапазоне $2-30$ МГц со скоростью перестройки $50-500$ кГц/с. Синхронная работа передающего и приемного терминалов пассивного зонда обеспечивается привязкой к точному времени, шкалу которого задают спутниковые навигационные системы ГЛОНАСС и GPS. Используется согласованный метод приема. Синтез согласованных приёмников, осуществляющих обнаружение ЛЧМ сигнала с базой до $100-150$, подробно исследован в (Кук, Ч.; Бернфельд, М., 1971), (Тихонов, 1983), (Трухачев, 2005). В нашем случае согласованная обработка осуществляется корреляционным методом.

Зондирующий сигнал на выходе приемника с учетом переноса его начальной частоты в нуль, а спектра на полосу $-0-3$ кГц можно представить в виде:

$$u_R^{out}(\bar{\omega}_i, \hat{t}) = \begin{cases} \sqrt{2P} \cdot H_0(\bar{\omega}_i) \cdot \cos \frac{\dot{\omega}}{2} (\tilde{t} - \tau_g(\bar{\omega}_i))^2 & \forall \tilde{t} \in [0, T] \\ 0 & \forall \tilde{t} \notin [0, T] \end{cases}, \quad (1)$$

где $\tilde{t} = \hat{t} - t_{i1}$ - время, отсчитываемое от $t_{i1} = \bar{\omega}_i / \dot{\omega}$.

Схема корреляционной обработки низкочастотного ЛЧМ сигнала представлена на рисунке 2. Здесь он поступает на два умножителя. В первом - сигнал умножается на отсчеты функций $\cos[\dot{\omega}(\tilde{t} - \tau)^2/2]$, а во втором – на $\sin[\dot{\omega}(\tilde{t} - \tau)^2/2]$, где τ - изменяемая с шагом $1/F_S$ задержка. Для каждого значения задержки τ отсчеты сигнала суммируются (интегрируются) за время $T=30$ мс. При этом получается отсчет функций $I(\tau(q))$ и $Q(\tau(q))$, а по ним - $I^2(\tau(q))$ и $Q^2(\tau(q))$ (q - номер отсчета). Диапазон анализируемых задержек составляет 150 мс, что позволяет зондировать трассы протяженностью до кругосветных. Однако, как правило, отображаются диапазон задержек $0-40$ мс.

Интегрирование ведется по времени \tilde{t} , а результат является функцией задержки τ . Запишем выражение для составляющих сигнала на входе интегратора:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left[u_R^{out}(\bar{\omega}_i, \tilde{t} - \tau_g) \cos[\dot{\omega}(\tilde{t} - \tau)^2/2] + j u_R^{out}(\bar{\omega}_i, \tilde{t} - \tau_g) \sin[\dot{\omega}(\tilde{t} - \tau)^2/2] \right] d\tilde{t} = \int_{-\infty}^{\infty} u_R(\bar{\omega}_i, \tilde{t} - \tau_g) \cdot e^{j\tilde{\varphi}(\tilde{t})} d\tilde{t}, \quad (5)$$

где $\tilde{\varphi}(\tilde{t}) = \dot{\omega}(\tilde{t} - \tau)^2/2$.

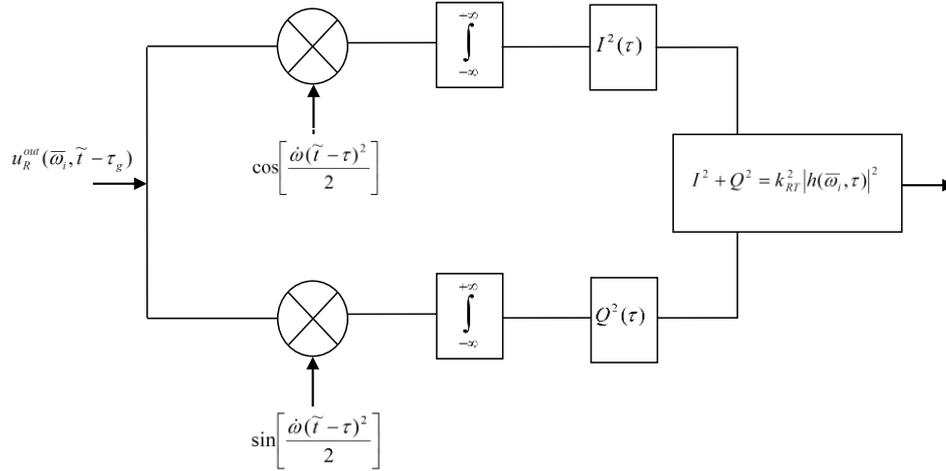


Рис. 2 – Алгоритм согласованной обработки низкочастотного зондирующего сигнала

Представим действительный сигнал в виде суммы комплексных, применив формулу Эйлера:

$$u_R^{out}(\bar{\omega}_i, \tilde{t} - \tau_g) = \begin{cases} \frac{\sqrt{2P}}{2} \cdot H_0(\bar{\omega}_i) \cdot [e^{j\phi(\tilde{t})} + e^{-j\phi(\tilde{t})}] & \tilde{t} \in [\tau_g, \tau_g + T] \\ 0 & \tilde{t} \notin [\tau_g, \tau_g + T] \end{cases}, \quad (6)$$

где $\phi(\tilde{t}) = \dot{\omega}(\tilde{t} - \tau_g)^2 / 2$

Далее преобразуем выражение (5):

$$\int_{-\infty}^{\infty} u_R(\bar{\omega}_i, \tilde{t} - \tau_g) \cdot e^{j\tilde{\varphi}(\tilde{t})} d\tilde{t} \approx \frac{\sqrt{2P}}{2} \cdot H_0(\bar{\omega}_i) \cdot \int_{\tau}^{\tau+T} [e^{j(\tilde{\varphi}(\tilde{t}) + \varphi(\bar{\omega}_i, \tilde{t}))} + e^{j(\tilde{\varphi}(\tilde{t}) - \varphi(\bar{\omega}_i, \tilde{t}))}] d\tilde{t}. \quad (7)$$

Интегрирование эквивалентно фильтрации сигнала ФНЧ с полосой частот $2/T = 66,6 \text{ Гц}$. Первое слагаемое в подынтегральном выражении (7) является быстроосциллирующей функцией и фильтруется при интегрировании. Второе слагаемое является комплексной амплитудой сжатого сигнала:

$$U_{RT} = I + j \cdot Q = \frac{\sqrt{2P}}{2} \cdot H_0(\bar{\omega}_i) \cdot \int_{\tau}^{\tau+T} e^{j(\tilde{\varphi}(\tilde{t}) - \varphi(\bar{\omega}_i, \tilde{t}))} d\tilde{t}, \quad (8)$$

где $\tilde{\varphi}(\tilde{t}) - \varphi(\tilde{t}) = \dot{\omega}(\tilde{t} - \tau)^2 / 2 - \dot{\omega}(\tilde{t} - \tau_g)^2 / 2 \approx -\dot{\omega}(\tau - \tau_g) \cdot (\tilde{t} - \tau)$.

Интегрируя в (27) и возводя результат в квадрат, получим (Belgibaev, R. R.; Ivanov, D. V.; Ivanov, V. A.; Ryabova, N. V., 3-4 July 2017):

$$|U_{RT}(\bar{\omega}_i, \tau)|^2 = I^2 + Q^2 = k_{RT}^2 |h(\bar{\omega}_i, \tau)|^2 = 2PT^2 \cdot H_0^2(\bar{\omega}_i) \cdot \sin^2\left(\frac{T\dot{\omega}(\tau - \tau_g)}{2}\right). \quad (9)$$

Растровое изображение ПЗМ дает «портрет» ионосферного канала, позволяет определять НПЧ, МПЧ и отношение сигнал/шум линии ВЧ связи.

3. Техника и условия проведения эксперимента.

Блок–схема разработанного нами устройства для пассивного зондирования ионосферного ВЧ радиоканала представлена на рис. 3.

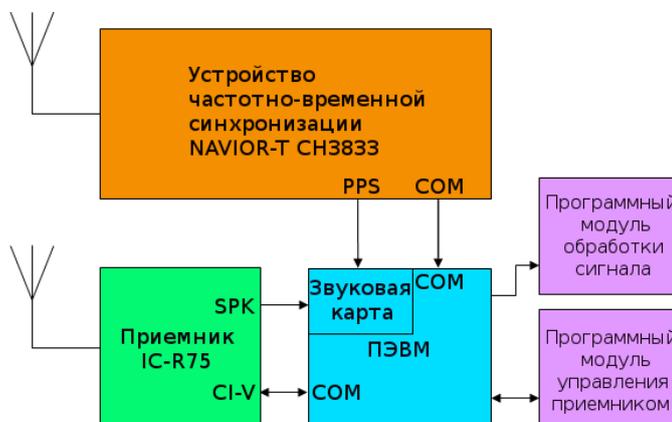


Рис. 3 – Блок-схема устройства для пассивного зондирования ионосферного ВЧ радиоканала

Пусть режим работы ЛЧМ ионозонда известен в месте приема и приемник пассивного зонда перестраивается пошагово вслед за изменениями излучаемой частоты зондирующего сигнала. Шаг перестройки составляет 100 кГц, а полоса приемника (полосового фильтра частотного канала) составляет 2,7 кГц. Перестройка приемника осуществляется с помощью модуля управления синхронизировано по времени и центральной частоте канала. Приемник пассивного зонда «вырезает» в принимаемом непрерывном сигнале ЛЧМ импульс с девиацией, равной полосе пропускания приемника, и длительностью $T_0=27$ мс.

Частотно-временная синхронизация (Бельгибаев, Р. Р.; Иванов, Д. В.; Иванов, В. А.; Рябова, М. И.;, 2009), (Иванов & Чернов, 2012), (Иванов, В. А.; Катков, Е. В.; Чернов, А. А.;, 2010) осуществляется по сигналам навигационных систем ГЛОНАСС и GPS с помощью модуля NAVIOR-T CH3833. Принимаемый низкочастотный ЛЧМ сигнал преобразуется в цифровую форму с помощью звуковой карты, а его согласованная обработка, определение параметров парциальных каналов и отображение информации осуществляется в персональном компьютере (ПЭВМ) с помощью модуля обработки сигнала. Общий вид пассивного ЛЧМ ионозонда, созданного в ПГТУ представлен на рис 4.

На рис. 5а в качестве примера приведен ПЗМ парциального канала, отмеченного на рис. 5б белой вертикальной полосой. На рис. 5б,в. – ПЗМ ионосферного канала для той же радиолинии Кипр – Йошкар-Ола протяженностью 2630 км. Цветом обозначена мощность сигнала.

Рис. 5в отличается тем, что на нем методами обработки изображений удалена шумовая составляющая. Первый спектр на ПЗМ принимаем за наименьшую применимую частоту (НПЧ), а последний – за максимальную применимую частоту (МПЧ) (см. рис. 5в). Алгоритмы обнаружения и выделения полезного сигнала на фоне помех, представлены в работе (Иванов, В. А.; Иванов, Д. В.; Рябова, Н. В.; Мальцев, А. В.;, 2009), (Патент № 2017615391, 2017), (Belgibaev, R. R.; Ivanov, D. V.; Ivanov, V. A.; Ryabova, N. V.; Ryabova, M. I.;, 2016).

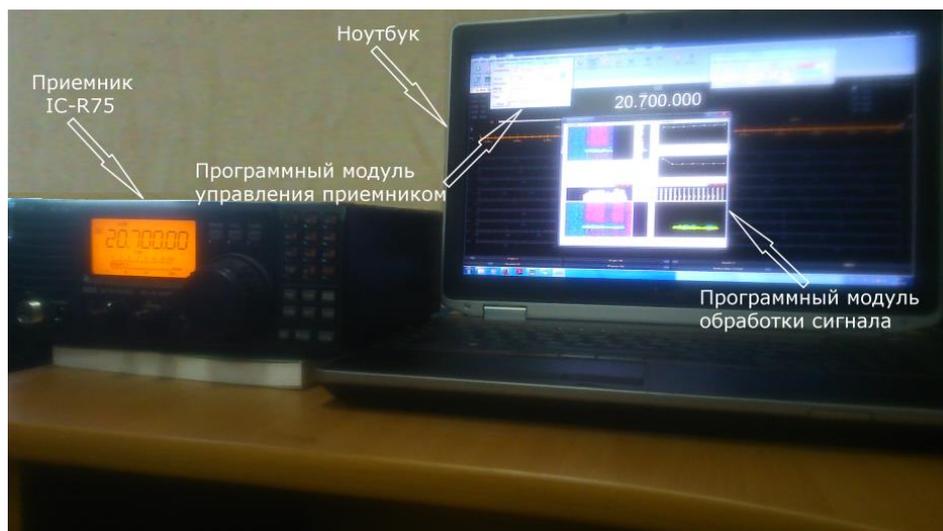


Рис. 4 – Пассивный ЛЧМ ионозонд

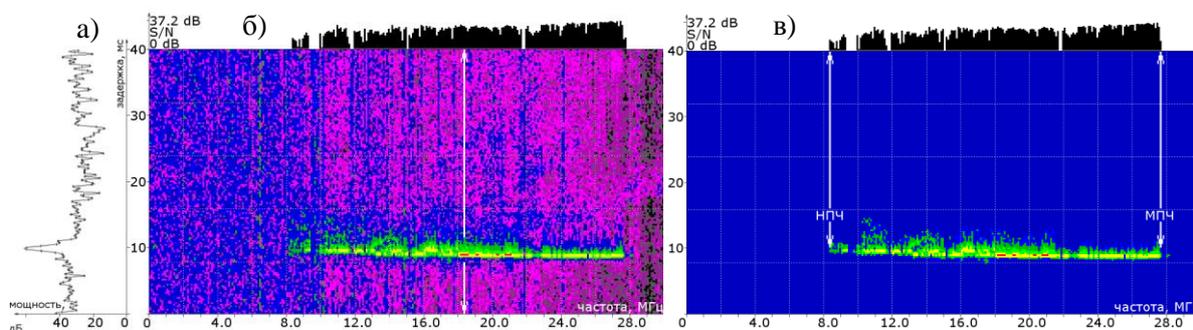


Рис. 5 – Сигнал на выходе согласованного фильтра (а), ПЗМ ионосферного ВЧ радиоканала для трассы Кипр – Йошкар-Ола (б) и ПЗМ очищенный от шумов (в)

4. Экспериментальные исследования влияния ВИБ.

Проводились исследования солнечных событий в ходе патрульных экспериментов в период с января по декабрь 2014 года на среднеширотной радиолинии Кипр – Йошкар-Ола. К зарегистрированным событиям относятся: вспышка класса М 7.3 – 18 апреля 2014 года (рис. 6а), вспышка класса М4.0 – 24 октября 2014 года (рис. 6б) и вспышка класса Х2.0 – 26 октября 2014 года (рис. 6в). Также, на рисунке показаны ходы отношения сигнал/шум и плотности потока мягкой и жесткой компоненты рентгеновского излучения. Геомагнитная обстановка во время данных событий была невозмущенной.

Видно, что продолжительность блэкаута определяется временем релаксации рентгеновского излучения. Обращает на себя внимание горизонтальные белые линии на частотах 25...28 МГц. Проведенные нами расчеты показали, что данный эффект связан с экранировкой лучей на этих частотах сферической земной поверхностью.

Исследовалось влияние компонент рентгеновского излучения на блэкаут. Для этого воспользуемся законом релаксации. Пусть релаксация возмущения рентгена и наименьшая применимая частота (НПЧ) радиолинии описывается экспоненциальным законом со своими параметрами:

$$y(t) = y_0 e^{-t/T_R}, \quad (10)$$

где T_R - время релаксации (время уменьшения начального возмущения в e раз), y_0 – амплитуда в максимуме возмущения.

Логарифмируя обе части выражения (10), получим:

$$\ln(y(t)/y_0) = -(t/T_R). \quad (11)$$

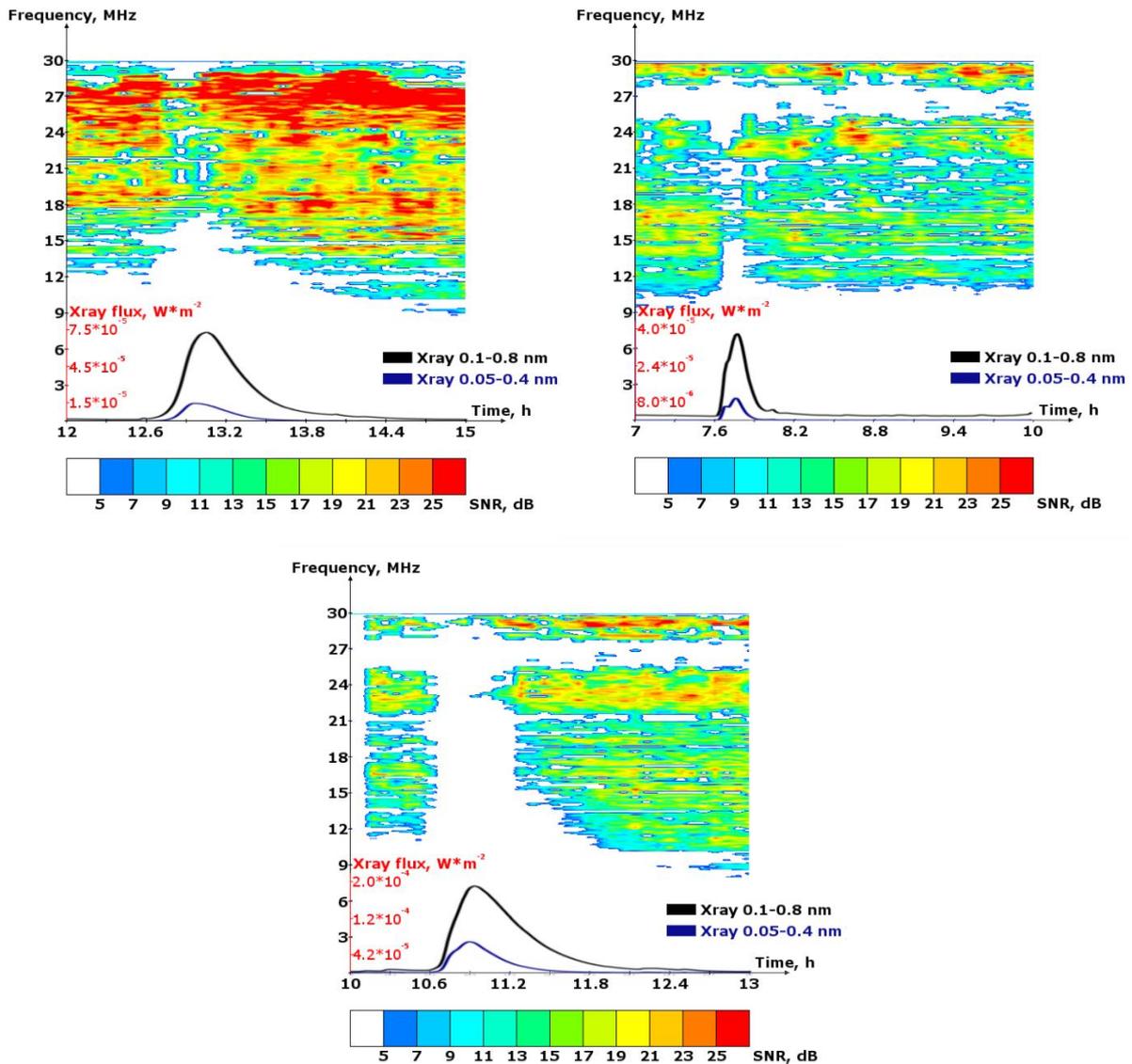


Рис. 6 – Ход отношения сигнал/шум ионосферного ВЧ радиоканала, плотность потока рентгеновского излучения с $\lambda_1=0,05-0,4$ нм (синий) и $\lambda_2=0,1-0,8$ нм (черный)

Графики экспериментальных зависимостей исследуемых функций (2) представлены на рис. 3. Аппроксимирующие прямые получены методом наименьших квадратов.

Из представленных данных видно, что НПЧ следует за ходом интенсивности «мягкой» компоненты рентгеновского излучения. Это означает, что именно эта компонента рентгена определяет поглощение КВ при распространении в условиях внезапных ионосферных возмущений.

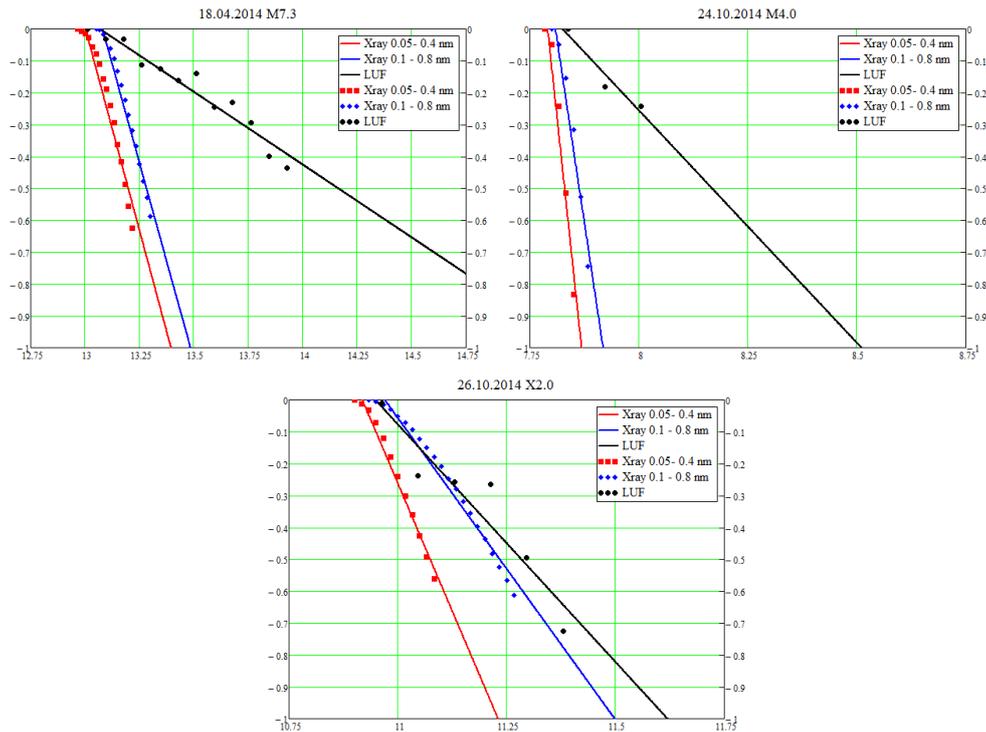


Рис. 7 – Логарифмы хода НПЧ (черный), рентгеновского излучения с $\lambda_1=0,05\text{--}0,4$ нм (красный) и $\lambda_2=0,1\text{--}0,8$ нм (синий), нормированные на единицу и их аппроксимация.

Выводы

Данная аппаратура позволила исследовать взаимосвязи функциональных зависимостей рентгена и НПЧ в периоды внезапных ионосферных возмущений, приводящих к блэкаутам различного класса. Установлено, что релаксация блэкаута определяется «мягкой» компонентой рентгеновского излучения. Развитие метода пассивного ЛЧМ зондирования и созданная на этой основе аппаратура позволяют интегрировать приемный терминал зонда в систему когнитивной СВ связи.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 18-19-00401.

Литература

1. NOAA Space Weather Scales [Электронный ресурс] // National Oceanic and Atmospheric Administration: [сайт]. [2017]. URL: <http://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation> (дата обращения: 27.август.2017).
2. Solar Flares (Radio Blackouts) [Электронный ресурс] // National Oceanic and Atmospheric Administration: [сайт]. [2017]. URL: <http://www.swpc.noaa.gov/phenomena/solar-flares-radio-blackouts> (дата обращения: 27.август.2017).
3. Кук, Ч.; Бернфельд, М.. Радиолокационные сигналы. Теория и применение. М.: Советское Радио, 1971. 567 с.
4. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983. 320 с.
5. Трухачев А.А. Радиолокационные сигналы и их применения. М.: Воениздат, 2005. 320 с.
6. Belgibaev, R.R.; Ivanov, D.V.; Ivanov, V.A.; Ryabova, N.V. Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO) // Processing signals of passive chirp ionosonde in the problem of estimation the HF channel availability. Kazan. 3-4 July 2017. Vol. 7997501.

7. Бельгибаев, Р.Р.; Иванов, Д.В.; Иванов, В.А.; Рябова, М.И. Автоматическое обнаружение работы и поддержание синхронизации станций в мировой сети ЛЧМ ионозондов // Вестник Поволжского Государственного Технологического Университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы, № 2, 2009. С. 3-12.
8. Иванов В.А., Чернов А.А. Развитие теории синхронизации РТС декаметровый связи и панорамного зондирования ионосферы // Телекоммуникации, № 2, 2012. С. 16-22.
9. Иванов, В.А.; Катков, Е.В.; Чернов, А.А.. Устройство и алгоритмы синхронизации радиотехнических систем связи и зондирования ионосферных высокочастотных радиоканалов // Вестник Марийского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы, № 2 (9), 2010. С. 114-126.
10. Иванов, В. А.; Иванов, Д. В.; Рябова, Н. В.; Мальцев, А. В. Адаптивное обнаружение и выделение широкополосного сигнала с линейной частотной модуляцией при сжатии его в частотной области // Электромагнитные волны и электронные системы, Т. 14, № 8, 2009. С. 34-45.
11. Бельгибаев Р.Р., Иванов В.А., Иванов Д.В. ChirpSPU– Программа для обнаружения и согласованной обработки узкополосного ЛЧМ сигнала, версия 1.0, Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017615391, май 16, 2017.
12. Belgibaev, R.R.; Ivanov, D.V.; Ivanov, V.A.; Ryabova, N.V.; Ryabova, M.I. Engineering development of passive ionosonde to study the effect of the blackout on HF communication // Journal of applied engineering science, Vol. 14, No. 4, 2016. pp. 493-501.