



Международная Байкальская молодежная научная  
школа по фундаментальной физике (БШФФ–2019)

# 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,  
424000, г. Йошкар–Ола, пл. Ленина 3. E-mail: ra4sbt@mail.ru

**Иркутск, 16 — 20 сентября 2019 г.**

# Цели и задачи

► 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.

# События на солнце и вызываемые ими эффекты



Рис. 1 – Ионосферные возмущения и их причина

Таблица 1 – Классы солнечных вспышек

Обозначение	Интенсивность рентгеновского излучения в пике (Вт/м <sup>2</sup> )
A	<10 <sup>-7</sup>
B	10 <sup>-7</sup> –10 <sup>-6</sup>
C	10 <sup>-6</sup> –10 <sup>-5</sup>
M	10 <sup>-5</sup> –10 <sup>-4</sup>
X	>10 <sup>-4</sup>

Таблица 2 – Классы блэкаутов

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.

# Реализация алгоритма работы пассивного ЛЧМ ионозонда

Зондирующий сигнал на выходе приемника можно представить в виде:

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

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

Схема корреляционной обработки 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  $\tau$  - изменяемая с шагом  $1/F_S$  задержка. Для каждого значения задержки отсчеты сигнала суммируются (интегрируются) за время  $T = 30$  мс. При этом получается отсчет функций  $I^2(\tau(q))$  и  $Q^2(\tau(q))$ . Диапазон анализируемых задержек составляет 150 мс, что позволяет зондировать трассы протяженностью до кругосветных.

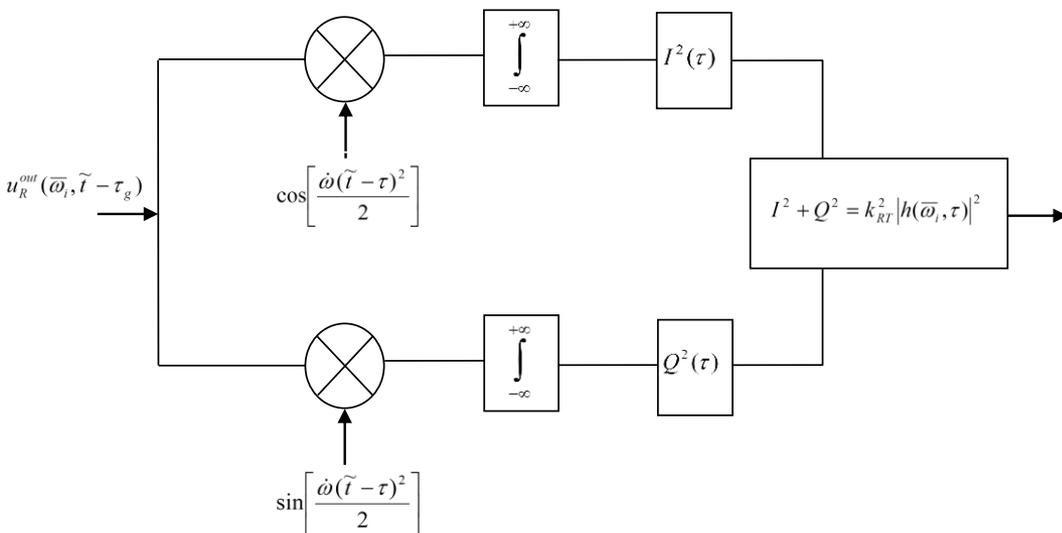


Рис. 2 – Алгоритм согласованной обработки низкочастотного зондирующего сигнала

$$P_{RT}(\bar{\omega}_i, \tau) = |U_{RT}(\bar{\omega}_i, \tau)|^2 = I^2 + Q^2 = k_{RT}^2 |h(\bar{\omega}_i, \tau)|^2 = 2PT^2 H_0^2(\bar{\omega}_i) \sin^2(T \dot{\omega}(\tau - \tau_g)/2) \quad (2)$$

Сигнал на выходе системы сжатия представляет собой *sinc* функцию. Известно, что уровень ее первых боковых лепестков составляет 13 дБ. Упомянутые выше боковые лепестки по задержке могут представлять собой источник интерференционных помех, которые могут замаскировать более слабые сигналы. Для того, чтобы минимизировать их воздействие необходима весовая обработка принимаемого сигнала. Оценки показывают, что для надежной регистрации зондирующего сигнала необходим запас в отношении сигнал/аддитивный шум до 22 дБ. Кроме того, необходимо соблюсти условие сохранения допустимой разрешающей способности по задержке. Проведенные исследования показали, что этим условиям удовлетворяет весовая обработка усеченным гауссовым полуокном длительностью  $0,21 \cdot T$  фронтов опорных сигналов коррелятора.

# Программно-аппаратный комплекс пассивного ЛЧМ ионозонда

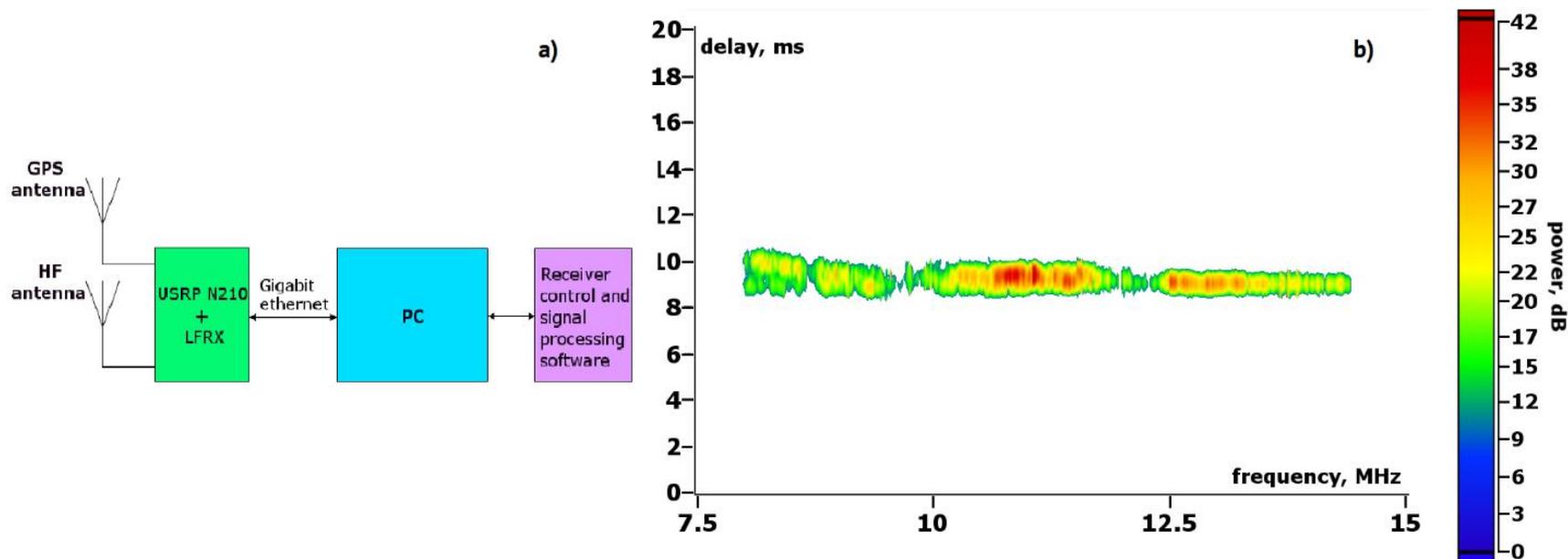


Рис. 3 – Блок-схема приемного терминала SDR пассивного ЛЧМ ионозонда (а) и получаемая очищенная от помех ионограмма (б) при полосе элемента 3 кГц

Таблица 1 – Средние значения отношения сигнал/шум  $\langle SNR \rangle$  рассеяния по задержке  $\langle \sigma_{tn} \rangle$ , 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
$\langle \sigma_{tn} \rangle \pm RMS_{\sigma_{tn}}$	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

# Экспериментальные исследования внезапных

## ионосферных возмущений

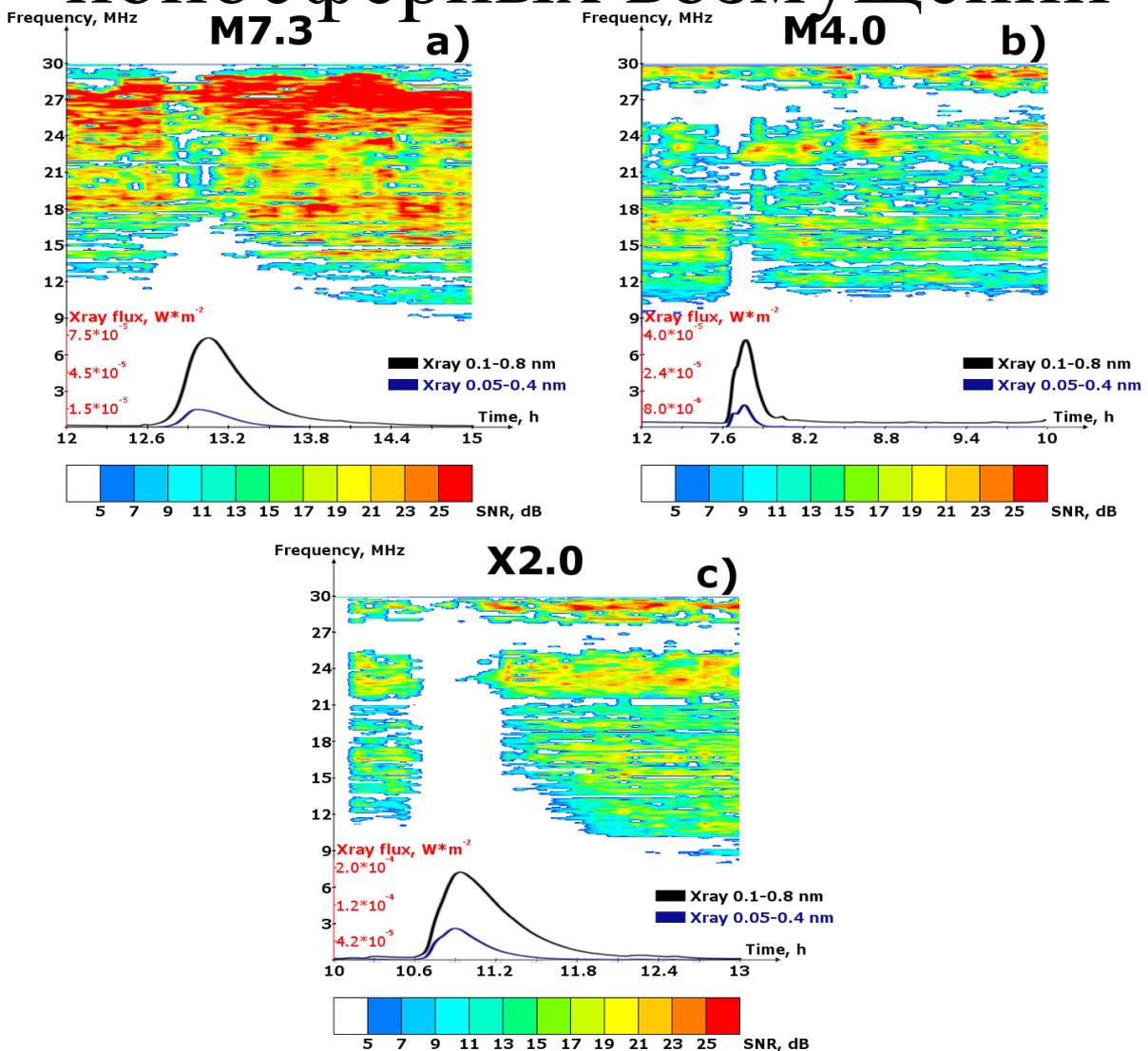


Рис. 4 – Ход отношения сигнал/шум ионосферного КВ радиоканала, плотность потока рентгеновского излучения с  $\lambda_1=0,05-0,4$  нм (синий) и  $\lambda_2=0,1-0,8$  нм (черный)

# Экспериментальные исследования внезапных ионосферных возмущений

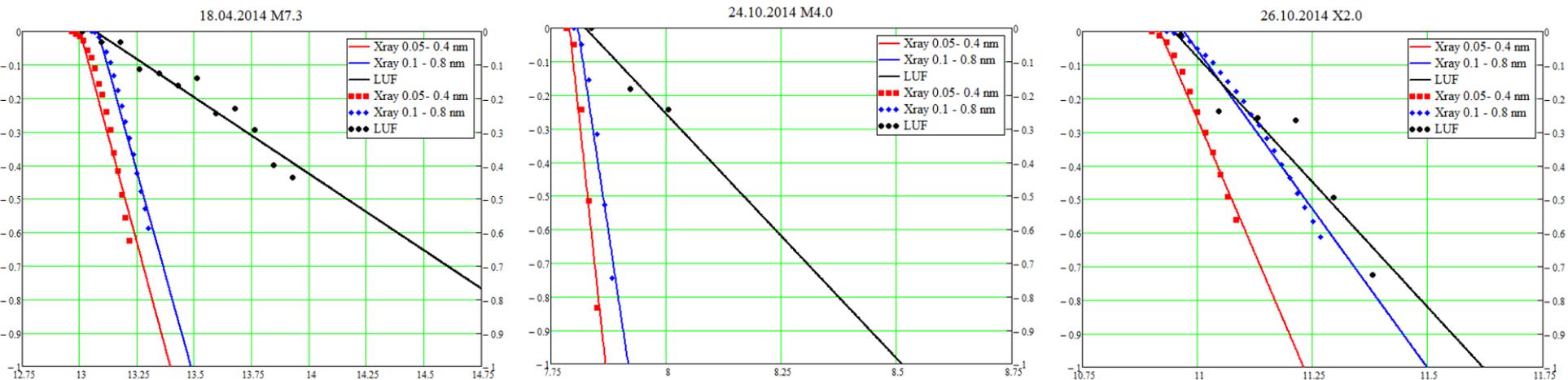


Рис. 7 – Логарифмы хода НПЧ (черный), рентгеновского излучения с  $\lambda_1=0,05-0,4$  нм (красный) и  $\lambda_2=0,1-0,8$  нм (синий), нормированные на единицу и их аппроксимация.

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.

## 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: № 8.2817.2017/ПЧ и грантов Российского фонда фундаментальных исследований: № 17-07-01590, № 18-07-01376. <sup>7</sup>