

## АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА НА ФОНЕ ПОМЕХ И ИХ ВЕРИФИКАЦИЯ ДЛЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО ЦИФРОВОГО ИОНОЗОНДА, СОЗДАННОГО ПО SDR-ТЕХНОЛОГИИ

<sup>1</sup>Д.В. Иванов, <sup>1</sup>В.А. Иванов, <sup>1</sup>Н.В. Рябова, <sup>2</sup>М.И. Рябова, <sup>1</sup>В.В. Овчинников, <sup>1</sup>А.А. Елсуков

<sup>1</sup>Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия  
ivanovdv@volgatech.net

## USEFUL-SIGNAL DETECTION ALGORITHMS ON THE INTERFERENCE BACKGROUND AND THEIR VERIFICATION THE FOR SDR-BASED DIGITAL IONOSONDE

<sup>1</sup>D.V. Ivanov, <sup>1</sup>V.A. Ivanov, <sup>1</sup>N.V. Ryabova, <sup>2</sup>M.I. Ryabova, <sup>1</sup>V.V. Ovchinnikov, <sup>1</sup>A.A. Elsuokov

<sup>1</sup>Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Аннотация.** Решалась задача максимально возможного подавления шумов и помех различной природы при зондировании ионосферы FMCW-, FMCW- и DSSS-сигналами. Рассмотрена эффективность применения различных новых алгоритмов в задаче обнаружения и выделения зондирующего сигнала на фоне помех в связи с применением для зондирования технологии SDR. Алгоритмы верифицированы в эксперименте по наклонному и вертикальному зондированию ионосферы FMCW, FMCW и DSSS сигналами радиолиний Кипр — Йошкар-Ола, Йошкар-Ола — Йошкар-Ола.

**Ключевые слова:** обеляющее эквалайзирование, медианное эквалайзирование, алгоритм CA-CFAR, технология SDR

**Abstract.** We study the problem of the maximum possible filtering of noise and interferences which contaminate the sounding signals. The efficiency of various new algorithms for detecting and extracting a sounding signal was considered in connection with the use of SDR technology. The algorithms were verified in the field experiment in oblique and vertical ionosphere sounding of radio links Cyprus — Yoshkar-Ola, Yoshkar-Ola — Yoshkar-Ola using FMCW, FMCW and DSSS signals.

**Keywords:** whitening equalize, median equalizing, CA-CFAR algorithm, SDR technology

---

### Введение

Ионограмма является упорядоченным множеством ПЗМ многомерного КВ радиоканала, заданном на носителе — рабочая частота. Она по сути является основным источником информации о состоянии ионосферы и многомерного КВ радиоканала. Проблема в этом случае заключается в том, что ионограмма всегда зашумлена помехами различной природы. Поэтому значимым этапом в осуществлении диагностики ионосферного КВ-радиоканала является фильтрация помех, приводящая к ее очистке. Существует достаточно много алгоритмов очистки изображений. Однако не все они могут быть использованы при конкретной аппаратной реализации зонда. Применение в зондировании технологии SDR позволяет расширить число применяемых методов в решении данной задачи, но требует детального анализа эффективности новых процедур.

### Форма зондирующих сигналов

В современных ионозондах применяются «длинные» широкополосные сигналы вида FMCW, FMCW и DSSS (ЛЧМ, ЛЧМ с амплитудной манипуляцией по псевдослучайному закону и ФКМ). В ПГТУ по технологии SDR (программно-конфигурируемое радио) был создан универсальный вертикально-наклонный ионозонд, в котором на платформе USRP реализованы все перечисленные сигналы [Иванов и др., 2013; Иванов и др., 2015; Ива-

нов и др., 2017]. В ионозонде использовано программное обеспечение GNU Radio. Основу приёмного тракта устройства составляет 14-битный АЦП работающий на скорости 100 MS/s, что позволяет принимать радиосигналы до 50 МГц без предварительного преобразования.

При обработке учитывалось, что согласованный прием ЛЧМ-сигнала приводит к отклику с огибающей вида  $\frac{\sin(x)}{x}$ , требующей применения сгла-

живающих окон. Автокорреляционная функция кода Баркера, имеет одинаковый уровень боковых лепестков (корреляционных шумов), равный  $1/N$ , где  $N$  — число элементов последовательности [Иванов и др., 2017]. Помимо корреляционной обработки для DSSS сигнала используется когерентное накопление нескольких десятков последовательных импульсов на основе процедуры БПФ, существенно увеличивающее отношение сигнал – шум (до  $10\log(N_p)$  дБ, где  $N_p$  — количество импульсов накопления), но приводящее к увеличению времени зондирования.

### Когерентное накопление

В случае применения DSSS сигнала используется когерентное накопление на основе БПФ преобразования. Идея когерентного накопления основана на том, что в течение некоторого интервала времени фазы сигналов, отраженных от ионосферы меняются линейно по времени. В этом случае появ-

ляется возможность когерентного сложения  $N$ -сигналов с компенсацией фазовых сдвигов, что повышает отношение сигнал-шум пропорционально количеству суммируемых сигналов. На рис. 1 представлены ионограмма (слева), без накопления и ионограмма (справа), с накоплением 64 сигналов, излученных на каждой несущей частоте.

### Фильтрация помех

Для фильтрации используется [Ivanov et al., 2015] два метода эквалайзирования: обеляющее и медианное. При обеляющем эквалайзировании FMCW и FMICW сигналов на первом шаге находится текущий спектр мощности принимаемого сигнала на заданных с некоторым шагом интервалах времени. Далее он усредняется для выборки, полученной за 10 с. Усредненный спектр используется для эквалайзирования в течении следующих 10 с, пока набирается следующая выборка. Данный алгоритм подавляет сосредоточенные помехи и обеляет флуктуационный шум. Результат работы алгоритма представлен на рис. 2.

Как показали наши исследования эффективным методом фильтрации является медианное эквалайзирование. В этом случае, для каждого полученного ПЗМ строится вариационный ряд и определяется медиана. Затем все отсчеты ПЗМ делятся на ее значение. Это приводит к близкому для всех ПЗМ уровню помех (следовательно, для ионограммы) и позволяет эффективно применять пороговый метод

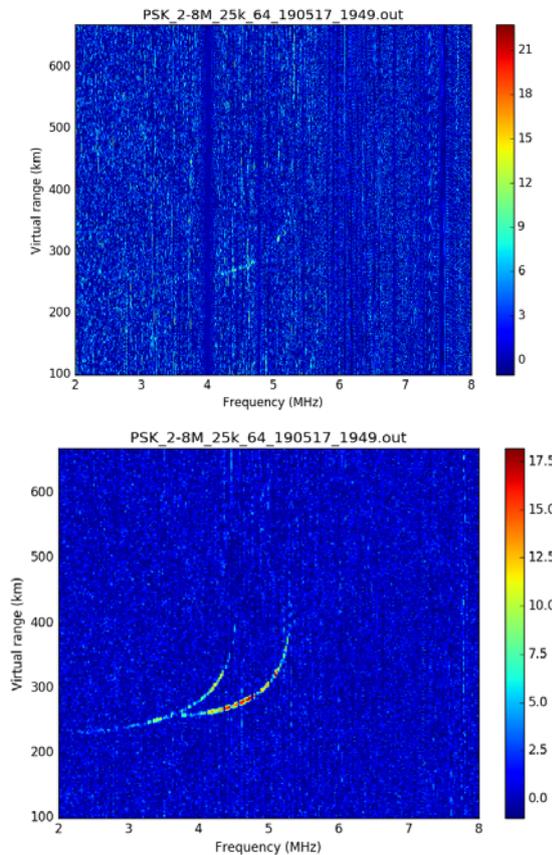


Рис. 1. Ионограммы без накопления (сверху) и с накоплением (внизу) 64 сигналов, излученных на каждой несущей частоте

сразу для всей ионограммы, но в результате получаем отсчеты ПЗМ в единицах отношения сигнал-шум. Эффективность алгоритма медианного эквалайзирования для «очистки» ионограммы иллюстрирует рис. 3.

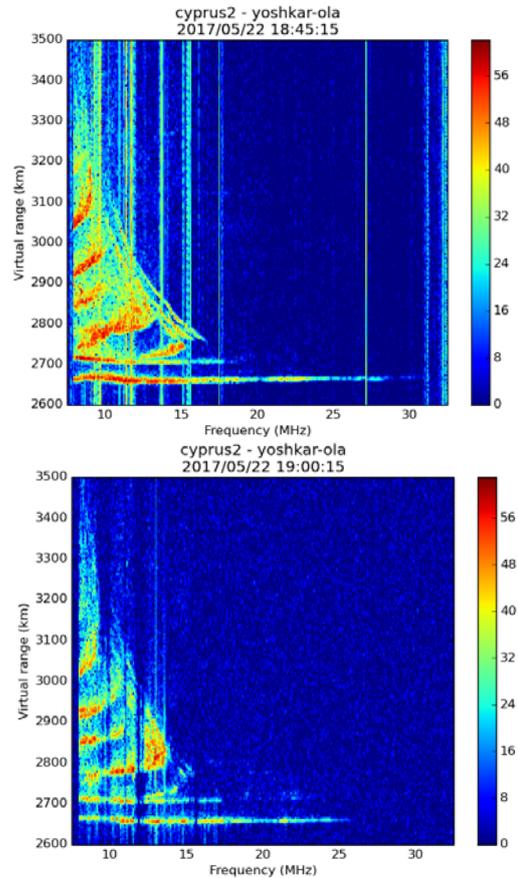


Рис. 2. Ионограммы до и после применения алгоритма обеляющего эквалайзирования

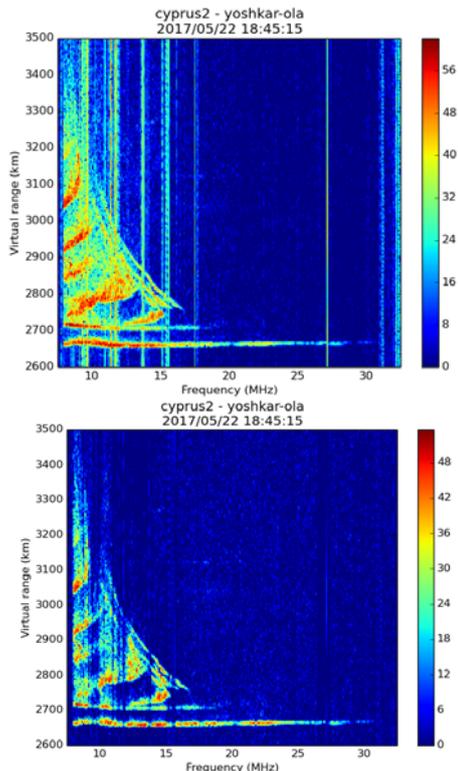


Рис. 3. Эффективность применения алгоритма медианного эквалайзирования

### Алгоритмы обнаружения полезного сигнала

При зондировании мощность помех априори неизвестна поэтому определение порога является проблемой для каждого ПЗМ. Разновидностью пороговых методов является адаптивный алгоритм Cell-Averaging Constant False Alarm Rate (CA-CFAR). Данный алгоритм широко применяется в радиолокационных системах, для обнаружения целей в условиях многочисленных и разнообразных окружающих помех [Richards, 2005], однако в задаче зондирования ионосферы и каналов КВ связи он еще не опробован. На рис. 4 представлен результат работы алгоритма. Порог обнаружения  $G$  определяется путем оценки уровня мощности шумового поля вокруг проверяемой ячейки (отсчета ПЗМ):

$$G = \alpha P_n,$$

где  $P_n$  — оценка мощности шума,  $\alpha$  — пороговый фактор.

Для реализации алгоритма в задаче зондирования нами использовалось сдвигаемое «окно» из 21 пиксела. Усреднялись значения по 6 пикселов с права и лева от середины «окна». Пороговый фактор учитывает заданную частоту ложных срабатываний алгоритма, которая выбиралась нами равной 0.001.

### Заключение

Использование в ионозондах технологии SDR позволяет обеспечить более высокую точность математических операций при синтезе и обработке сигнала. Возможность обработки сигнала программными средствами позволяет эффективно решать задачу фильтрации помех различной природы, а также обнаружения и выделения полезного сигнала на фоне шумов и помех. Проведенные исследования показали высокую эффективность рассмотренных ал-

горитмов. На следующем этапе предполагается провести исследования по созданию комплексного алгоритма, включающего несколько последовательных этапов обработки.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: № 17-07-01590; 17-07-00799; грантов министерства образования и науки РФ: № 8.2817.2017/ПЧ, № 3.4074.2017/ПЧ.

### Список литературы

Иванов Д.В., Иванов В.А., Елсуков А.А. Однопозиционный с одной антенной вертикальный ионозонд с непрерывным ЛЧМ-сигналом на основе SDR технологии // Радиолокация, навигация, связь: XXI Международная научно-техническая конференция, Воронеж, 14–16 апреля 2015 г., Воронеж, 2015. С. 1169–1176.

Иванов Д.В., Иванов В.А., Елсуков А.А. и др. ФКМ ионозонд, созданный по технологии SDR с применением универсальной аппаратной платформы. // Радиолокация, навигация, связь: XXIII Международная научно-техническая конференция. Воронеж, 18–20 апреля 2017 г., Воронеж, 2017. Т. 2. С. 567–574.

Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В. и др. SDR-ионозонд с непрерывным ЛЧМ-сигналом на платформе USRP // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2013. № 3. С. 80–94.

Ivanov V., Ivanov D., Ryabova N., et al. Algorithms and software of whitening of noise in the reception of broadband chirp signals in the HF communication channel // J. App. Engineering Sci. 2015. V. 13 (4). P. 245–250.

Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ryabova N.V., Elsukov A.A. Software-defined radio technology in the problem concerning with the successive sounding of HF ionospheric communication channels // J. Communications Technology and Electronics. 2016. V. 61, № 7. P. 767–775.

Richards M. Fundamentals of Radar Signal Processing, McGraw Hill. 2005. 528 p.

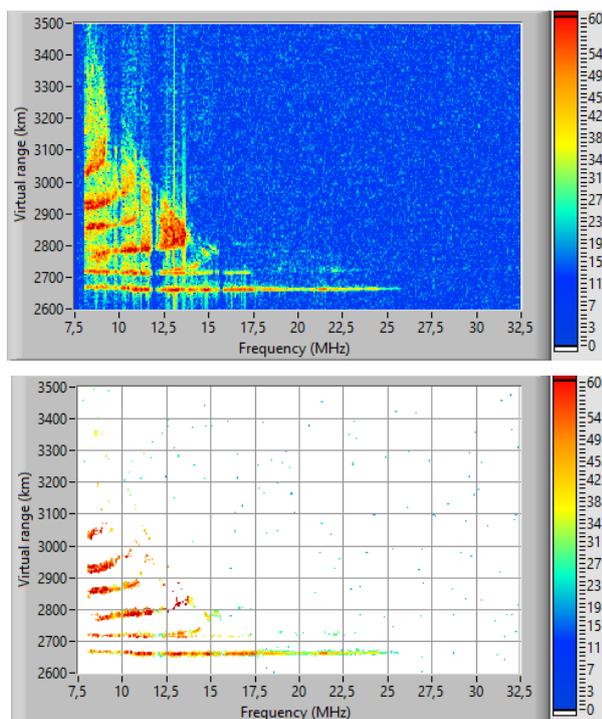


Рис. 4. Ионограммы до и после применения алгоритма CA-CFAR