

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

¹Д.В. Иванов, ¹В.А. Иванов, ¹Н.В. Рябова, ²М.И. Рябова, ¹В.В. Овчинников, ¹А.А. Елсуков

¹Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия

²Московский 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

¹D.V. Ivanov, ¹V.A. Ivanov, ¹N.V. Ryabova, ²M.I. Ryabova, ¹V.V. Ovchinnikov, ¹A.A. Elsuokov

¹Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia

²Bauman 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 — рабочей 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

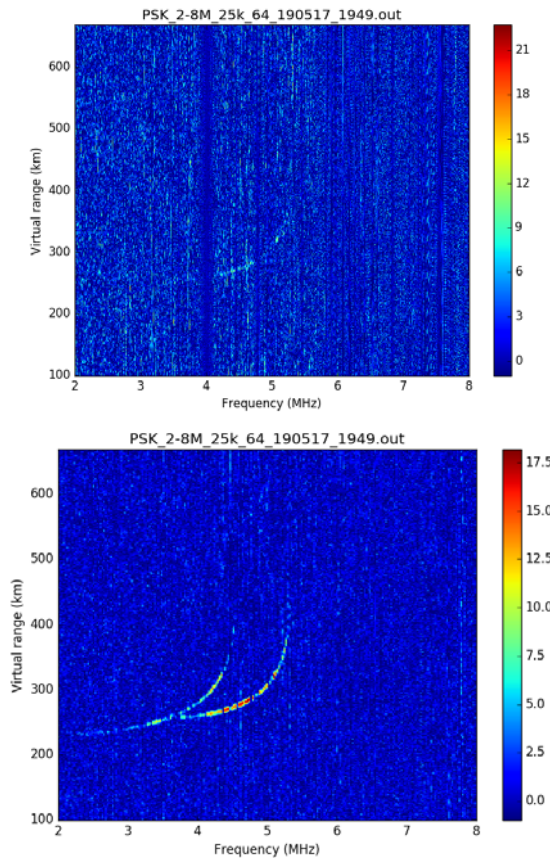


Рис. 1. Ионограммы без накопления (сверху) и с накоплением (внизу) 64 сигналов, излученных на каждой несущей частоте

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.

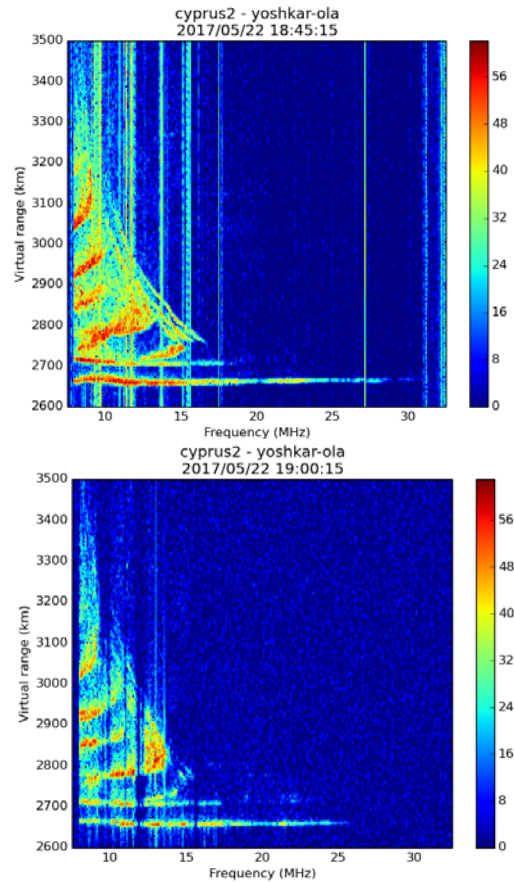


Рис. 2. Ионограммы до и после применения алгоритма обеляющего эквалайзирования

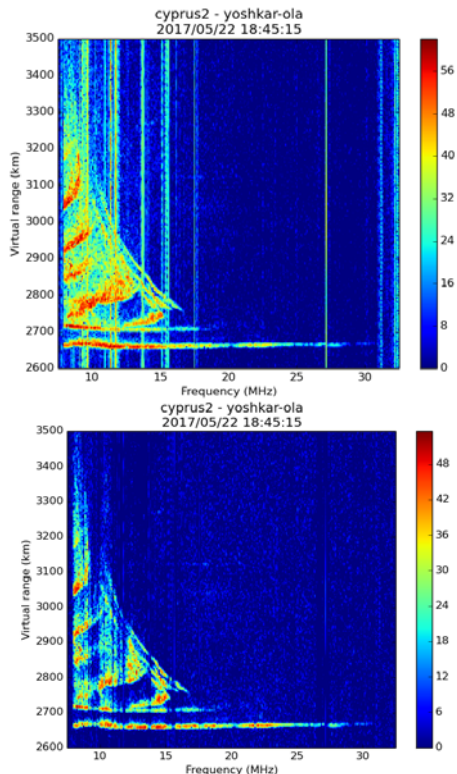


Рис. 3. Эффективность применения алгоритма медианного эквалайзирования

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, α — 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.

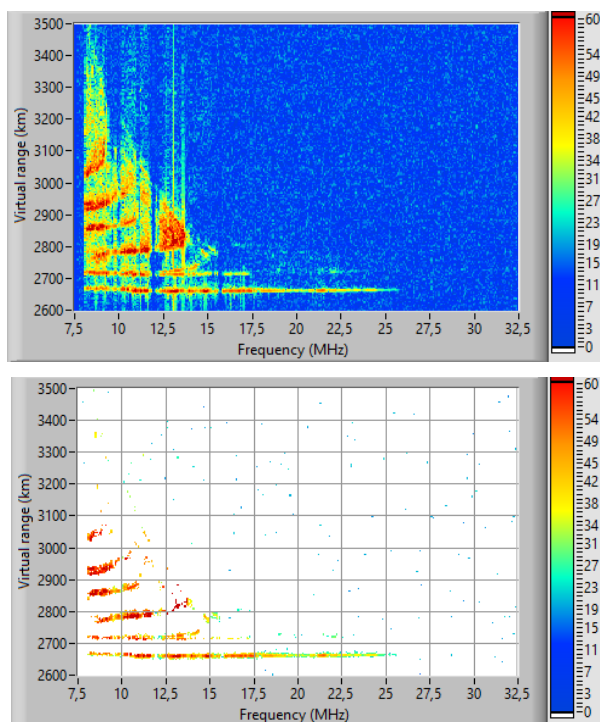


Рис. 4. Ионограммы до и после применения алгоритма CA-CFAR