

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИОНОЗОНД НА ОСНОВЕ SDR-ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ НАКЛОННОГО И ВЕРТИКАЛЬНОГО ОДНОПОЗИЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ С DSSS-, FMCW- И FMICW-СИГНАЛАМИ

Д.В. Иванов, В.А. Иванов, А.А. Елсуков, В.В. Овчинников

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия
ElsukovAA@volgatech.net

SDR-BASED FLEXIBLE IONOSONDE FOR OBLIQUE AND VERTICAL SINGLE-POSITION IONOSPHERIC SOUNDING USING DSSS, FMCW AND FMICW SIGNALS

D.V. Ivanov, V.A. Ivanov, A.A. Elsukov, V.V. Ovchinnikov

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia

Аннотация. Ионозонд является одним из основных инструментов, используемых для определения состояния ионосферы. В зависимости от режима работы (наклонного или вертикального) с целью обеспечения максимальной энергетической эффективности применяются различные сложные сигналы, такие как DSSS, FMCW и FMICW. Каждый из этих сигналов обладает своими преимуществами и недостатками. В данной работе решалась задача создания универсального ионозонда с применением данных типов сигналов. Рассмотрены частотные и временные характеристики сигнала и накладываемые на них ограничения в задаче получения максимальной энергии зондирующего сигнала при минимальной мощности передачи. Разработанный ионозонд реализован по технологии SDR на универсальной приемопередающей платформе USRP N210 и использует для передачи и приема сигнала в режиме вертикального зондирования одну антенну.

Ключевые слова: ионозонд, широкополосная модуляция с прямым расширением спектра, непрерывный сигнал с линейно-частотной модуляцией, программно-конфигурируемое радио.

Abstract. Ionosonde is one of the main instruments used to determine the state of the ionosphere. Depending on the mode of operation (inclined or vertical), various complicated signals such as DSSS, FMCW and FMICW are used to provide maximum energy efficiency. Each of these signals has its advantages and disadvantages. In this paper, the problem of creating a universal ionosonde with the application of these types of signals was solved. The frequency and time characteristics of the signal and the confines imposed on them in the problem of obtaining the maximum energy of the probe signal with a minimum transmission power are considered. The developed ionosonde is implemented using SDR technology on the USRP N210 universal transceiver platform and uses one antenna to transmit and receive the signal in vertical mode.

Keywords: ionosonde, DSSS, FMCW, FMICW, SDR.

Введение

Зондирование ионосферы является разновидностью радиолокации, когда объект носит распределенный в пространстве характер. При панорамном зондировании последовательно сканируются частоты из заданного диапазона. Для каждой частоты получают профиль задержки мощности (ПЗМ). Упорядоченное множество ПЗМ, заданных на сетке частот составляют ионграмму или высотно-частотную характеристику. Используя различные алгоритмы обработки ионграмм можно получить информацию о действующих высотах и критических частотах, а также профиль электронной концентрации. Для получения ионграммы высокого качества необходимо обеспечить максимально возможное отношение сигнал-шум. В современных радиотехнических системах радиозондирования ионосферы используются сигналы с расширенным спектром (СРС или Spread Spectrum), такие как FMCW (Frequency-Modulated Continuous Wave), FMICW (Frequency-Modulated Interrupted Continuous Wave) и DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). Расширение спектра в этих сигналах происходит за счет линейного изменения чистоты (FMCW и FMICW) или за счет манипуляции фазы (DSSS). Существующие

ионозонды использовали один из двух этих способов модуляции. Появление универсальных аппаратных платформ, построенных по SDR технологии, когда создание нового зонда сводится к разработке алгоритмов и программного обеспечения для синтеза и обработки зондирующего сигнала позволило нам применить разные типы сигналов в одном устройстве.

Цель работы: создание универсального ионозонда, работающего в режиме либо наклонного (НЗ), либо однопозиционного вертикального зондирования (ВЗ) сигналами с расширенным спектром.

Аппаратно-программный комплекс для вертикально-наклонного зондирования ионосферы сигналами FMCW, FMICW и DSSS

Согласно SDR технологии для реализации функций радиосвязи используются программные модули, выполняемые на аппаратной платформе общего назначения. Универсальный ионозонд, разработанный по этой технологии, реализован на базе приемопередающей платформы USRP N210, персонального компьютера (ПК) и программного обеспечения GNU Radio. Основу платформы составляют 14 бит АЦП работающий на частоте 100 МГц и 16 бит

ЦАП работающий на частоте 400 МГц. Диапазон доступных частот определяется установленной дочерней платой, на которой может быть реализовано аналоговое преобразование частоты, и может достигать 6 ГГц. В нашем случае для работы в декаметровом диапазоне использовались дочерние платы LFTX и LFRX, на которых реализован только ФНЧ. Перенос сигнала на рабочую частоту и обратно происходит при помощи цифрового преобразователя вверх (DUC) и цифровой преобразователя вниз (DDC). Интерфейс связи с ПК основан на технологии Gigabit Ethernet и позволяет передавать отсчеты комплексной огибающей в 16 битном коде на скорости до 25 MS/s, ограничивая таким образом доступную полосу канала 25 МГц. Так же в состав ионозонда входят усилитель мощности LZY-22+, антенна АН-710 и специально разработанный антенный переключатель. Синтез и обработка сигнала осуществляется на ПК с применением программного обеспечения (ПО) GNU Radio. Данное ПО позволяет реализовывать алгоритмы синтеза [Иванов и др., 2012] и обработки сигнала с применением программных модулей написанных на языках программирования высокого уровня таких как C++ и Python.

Особенности применения FMCW и FMICW сигналов в ионосферном зондировании

Известно [Uryadov et al., 1995], что при наклонном панорамном зондировании оптимальным является непрерывный ЛЧМ сигнал, называемый FMCW. При вертикальном зондировании возникает проблема использования для приема и передачи одной антенны. В этом случае непрерывный сигнал подвергается амплитудной манипуляции по псевдослучайному закону заданному периодической с периодом T_s переключающей функцией $g(t)$. Такой сигнал называется FMICW. При этом один бит переключающей функции приравнивается к наименьшей длительности импульса t_b . Очевидно, что переключающая функция для принимаемого сигнала будет равна $1-g(t)$. Сигналы FMICW и FMCW сжимаются в приемнике. Сжатие производится путем перемножения принятого сигнала с опорным, и спектрального анализа, за время T_a , сигнала разностной частоты. Время анализа T_a и скорость перестройки частоты \dot{f} определяет полосу сигнала B_s . В результате операции получаем спектр частот, который пересчитывается в ПЗМ. Особое внимание для FMICW сигнала уделялось выбору параметров переключающей функции, таких как: наименьшая длительность импульса t_b ; вид псевдослучайной последовательности и функции весовой обработки. Вид последовательности определялся интересующим диапазоном зондируемых высот [Иванов и др., 2016].

Особенности применения DSSS сигнала для ионосферного зондирования

Альтернативой FMICW сигналу считается DSSS сигнал, в котором выигрыш в отношении сигнал/шум достигается за счет манипуляции фазы кодовой последовательностью (ФКМ) и сжатием сигнала. Применяется [Reinisch et al., 2009] также коге-

рентное накопление нескольких (N) последовательных импульсов на одной несущей частоте. Однако, при этом увеличивается время зондирования. Из радиолокации известно, что длительность одного элемента кодовой последовательности (чипа) определяет полосу сигнала B_s . При сжатии каждый импульс подвергается корреляционной обработке. В результате получаем сигнал, пропорциональный импульсной характеристике канала, по которой определяется ПЗМ. Нижняя граница диапазона высот определяется длительностью импульса с фазовой манипуляцией. Верхняя определяется их частотой повторения. Помимо корреляционной обработки для DSSS сигнала можно использовать когерентное накопление. Для когерентного накопления используется преобразование Фурье. Эффект связан с побочным свойством преобразования, выражающимся в увеличении максимального значения спектра мощности. При этом отношение сигнал-шум увеличивается в N раз по мощности. При соответствующем выборе N данная операция позволяет определять доплеровское смещение частоты, связанное с перемещением плазмы в ионосфере. Анализ достаточно длинной выборки позволяет для этих рабочих частот определять функцию рассеяния канала (ФРК).

Экспериментальная апробация

Параметры зондирующих сигналов, используемых в универсальном ионозонде представлены в таблице.

Параметры зондирующих сигналов

Тип сигнала	FMCW	FMICW	DSSS
Тип последовательности	–	М-последовательность	Код Баркера
Количество элементов последовательности	–	15	13
Длительность элемента последовательности	–	0.2 мс	40 мкс
Назначение применяемой последовательности	–	Модуляция амплитуды с целью распределения импульсов по времени	Модуляция фазы с целью расширения спектра
Когерентное накопление	–	–	4...2048
Пиковая мощность передачи		12 Вт	19 Вт
Скорость перестройки частоты	100 кГц/с	50 кГц/с	–
Полоса сигнала	40 кГц	20 кГц	25 кГц
Период анализа сигнала	0.82 с	0.4 с	0.02–10.48 с
Коэффициент заполнения	–	0.2	0.098
База сигнала	67240	1600	803
Диапазон высот	–	30–1000 км	78–768 км
Разрешение по высоте (дальности)	1.8 км	7.5 км	6 км

Обработка принимаемого сигнала предусматривает применение методов борьбы с сосредоточенными помехами. В случае применения FMCW и FMICW сигналов используется алгоритм «отбеливающего» эквалайзера перед корреляционной обработкой и алгоритм медианного эквалайзера. Для DSSS используется алгоритм медианного эквалайзера. На рис. 1 и 2 в качестве примера

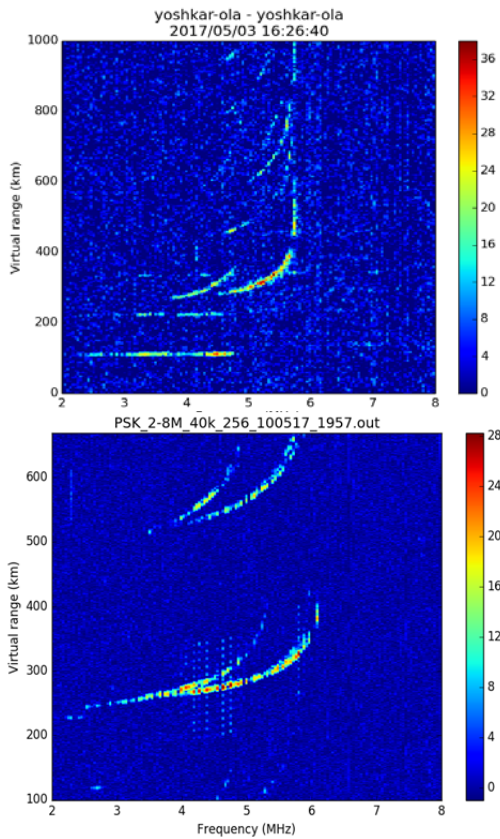


Рис. 1. Ионограммы ВЗ ионосферы FMICW (сверху) и DSSS (внизу) сигналами

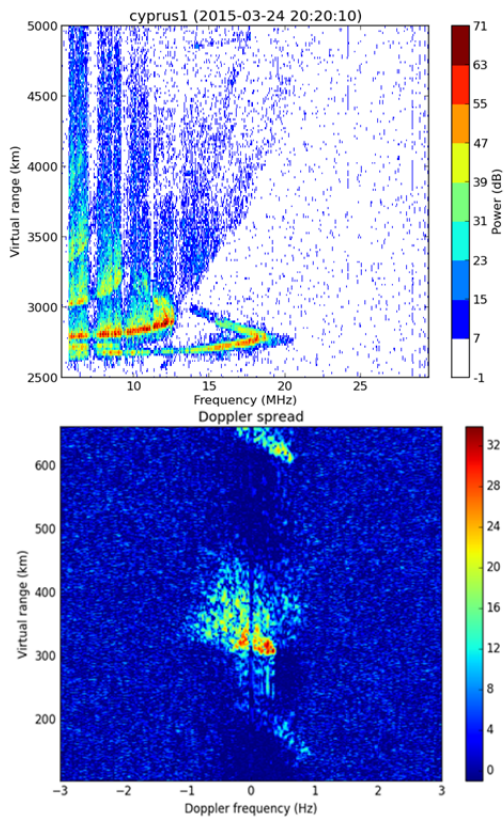


Рис. 2. Ионограмма НЗ на трассе Кипр–Йошкар-Ола с отражениями от полярной ионосферы (сверху) и ФПК канала при ВЗ ионосферы в Йошкар-Оле (внизу), полученные при зондировании FMCW и DSSS сигналами соответственно

приведены обработанные ионограммы ВЗ и НЗ ионосферы с разными СРС. Для излучения и приема СРС использовался широкополосный горизонтальный диполь с полосой рабочих частот 2...30 МГц, расположенный на крыше здания.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что применение маломощных (мощностью меньше 20 Вт) СРС и оптимальных цифровых методов обработки позволяет получать ионограммы ВЗ ионосферы приемлемого качества.

Заключение

Представлен созданный универсальный ионозонд, использующий современные полностью цифровые методы синтеза и обработки сигнала. Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение SDR технологии и универсальной платформы открывает новые перспективы в зондировании ионосферы сигналами с расширенным спектром.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: проекты № 15-07-05280; 15-07-05294, 16-37-60068, 16-35-50083; РНФ № 15-19-10053.

Список литературы

Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В. и др. Методы и программно-аппаратные средства для зондирования ионосферы непрерывными и квазинепрерывными сигналами с применением технологии программно-конфигурируемых радиосистем // Известия вузов. Физика. 2016. Т. 59, № 12-2. С. 21–28.

Иванов Д.В., Иванов В.А., Чернов А.А. Теоретические основы метода прямого цифрового синтеза радиосигналов для цифровых систем связи // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2012. № 1 (15). С. 3–34.

Reinisch B.W., Galkin I.A., Khmyrov G.M., Kozlov A.V., et al. New digisonde for research and monitoring applications // Radio Sci. 2009. V. 44.

Uryadov V.P., Ryabova N.V., Ivanov V.A., Shumaev V.V. The investigation of long-distance HF propagation on the basis of a chirp sounder // J. Atm. Terr. Phys. 1995. V. 57, № 11. P. 1263–1271.