

## **Ионозонд для вертикально – наклонного зондирования ионосферы и каналов КВ связи на основе технологии программно-конфигурируемых радиосистем**

Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Н.В. Рябова, А.А. Елсуков, А.Р. Лащевский, М.И. Рябова, М.А. Шалагин

*Решалась задача создания на основе SDR технологии вертикально – наклонного ионозонда с применением квазинепрерывного зондирующего ЛЧМ сигнала. Показано, что для обеспечения работы передатчика и приемника на одну антенну использовать амплитудную манипуляцию зондирующего непрерывного ЛЧМ сигнала по закону M - последовательности. Показано, что данная технология может быть использована для оценки параметров каналов ВЧ связи из полосы прозрачности радиолинии, для выбора оптимального из них и позволяет совместить в одном устройстве систему связи и систему радиозондирования.*

*Solves the problem of creating based on SDR technology vertically - inclined Ionosonde using quasi-continuous probing chirp signal. It is shown that for the operation of the transmitter and receiver to use a single antenna amplitude shift keying continuous probing chirp signal according to the law of M - sequence. It is shown that this technology can be used to estimate the parameters of HF channels of communication of the passband of the radio link, to select the optimal one and allows to combine in a single device communication system and radiosonde systems.*

В последнее время в связи с появлением новых технических возможностей, позволяющих реализовать разработанные ранее подходы оптимальной цифровой обработки сигналов, и, как следствие, существенно улучшить характеристики радиосистем, усилился интерес к коммерческому использованию дальней коротковолновой (КВ) связи (или высокочастотной (ВЧ) [1]. При этом наиболее важными становятся помехоустойчивость и скрытность работы системы связи. Для их повышения приходится, кроме обозначенной выше проблемы, решать ряд других научно-технических задач. Первая - связана с тем, что ионосферный радиоканал приводит к искажениям радиосигналов из-за ряда «негативных» явлений [2-4]. Наиболее существенными из них являются эффекты: «многоскачкового» распространения; двойного лучепреломления в магнитоактивной плазме, рассеяния на случайных неоднородностях и частотной дисперсией из-за зависимости от частоты фазовой скорости распространения волны [5].

С позиций радиофизики ионосферный радиоканал можно описать с помощью стохастических частотной и импульсной характеристик [6] и статистически устойчивой характеристики – функции рассеяния канала (ФРК) [7]. Модель ФРК определяется рядом параметров, которые называются канальными. Из них наиболее важными являются: отношение сигнал/шум, рассеяние по задержке и рассеяние по частоте [6, 8]. Уменьшение влияния негативных явлений в канале осуществляется путем решения второй задачи - согласования («синхронизации») параметров систем связи с параметрами радиоканала.

При этом, однако, возникает третья задача, связанная с тем, что параметры радиоканала меняются во времени из-за изменения геофизических условий для ионосферной плазмы: времени года, суток, эффектов на солнце и др. В этом случае параметры канала «деградируют». «Деградация» порождает необходимость адаптации параметров системы к текущим параметрам канала путем использования данных радиозондирования. При этом актуализация параметров систем связи выполняется после сеанса зондирования, осуществляемого через интервалы, равные времени «деградации» канала.

Для зондирования ионосферного радиоканала используются панорамные и каналные ионозонды, которые также постоянно модернизируются для улучшения своих характеристик. В последнее время появилась возможность использования в ионозондах перспективной технологии программно определяемого радио (SDR), которая в принципе позволяет реализовывать программными средствами на основе универсальной аппаратной платформы (USRP) устройства, выполняющего различные функции (системы связи, зондирования, локации и т.п.) [9]. Для реализации на ее основе панорамного ионозонда (последовательного зондирования всевозможных каналов ВЧ связи) сверхширокополосными сигналами с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) требуется разработка методик и алгоритмов цифровой обработки зондирующего сигнала при его поэлементном сжатии в частотной области для оценки параметров всех каналов ВЧ связи и их верификация в натуральных экспериментах

### Про SDR

В последнее время активно развивается направление, названное программно-определяемым радио (SDR). Эта технология позволяет обеспечить более высокую точность математических операций при синтезе и обработке сигнала, а также возможность создания на одной аппаратной платформе различных новых устройств путем перепрограммирования. Одним из наиболее гибких аппаратных реализаций SDR, является универсальная аппаратная платформа (USRP) компании Ettus Research [3] в конфигурациях с различными частотными диапазонами и поддерживающее для управления и программирования такое программное обеспечение как GNU Radio, NI LabVIEW, MathWorks Matlab, HDSDR и др. Функциональные возможности некоторых систем связи и радиолокации, реализованные на платформе USRP, были исследованы и доказали свою перспективность Структурная схема USRP представлена на рис. 5. Благодаря сменным дочерним платам система может работать в различных диапазонах от 0 до 6 ГГц. Материнская плата обеспечивает преобразование аналогово сигнала в цифровой и обратно, обеспечивает цифровое преобразование частоты вверх или вниз в заданной полосе частот и синхронизацию семплов с временной шкалой посредством встроенного GPS модуля. Модуляция, демодуляция и другие алгоритмы обработки цифрового сигнала осуществляются на персональном компьютере посредством собственных программ или использования готовых программных модулей.

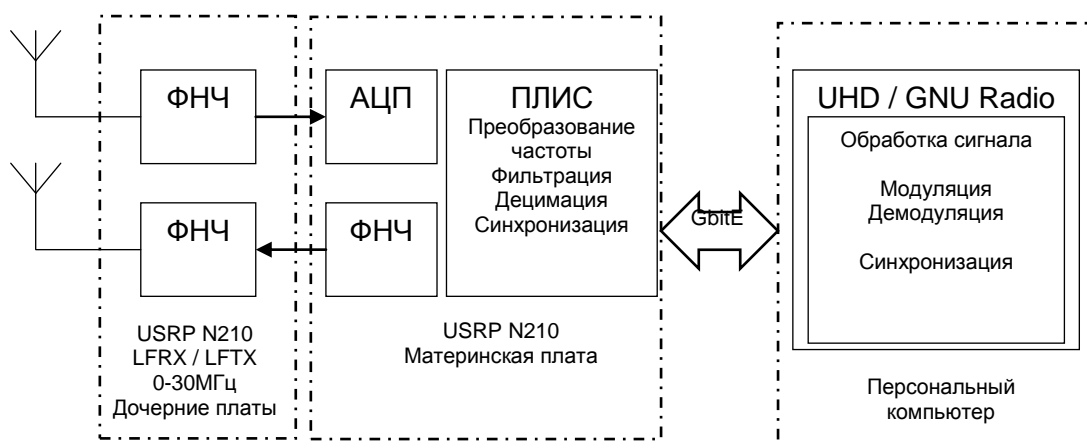
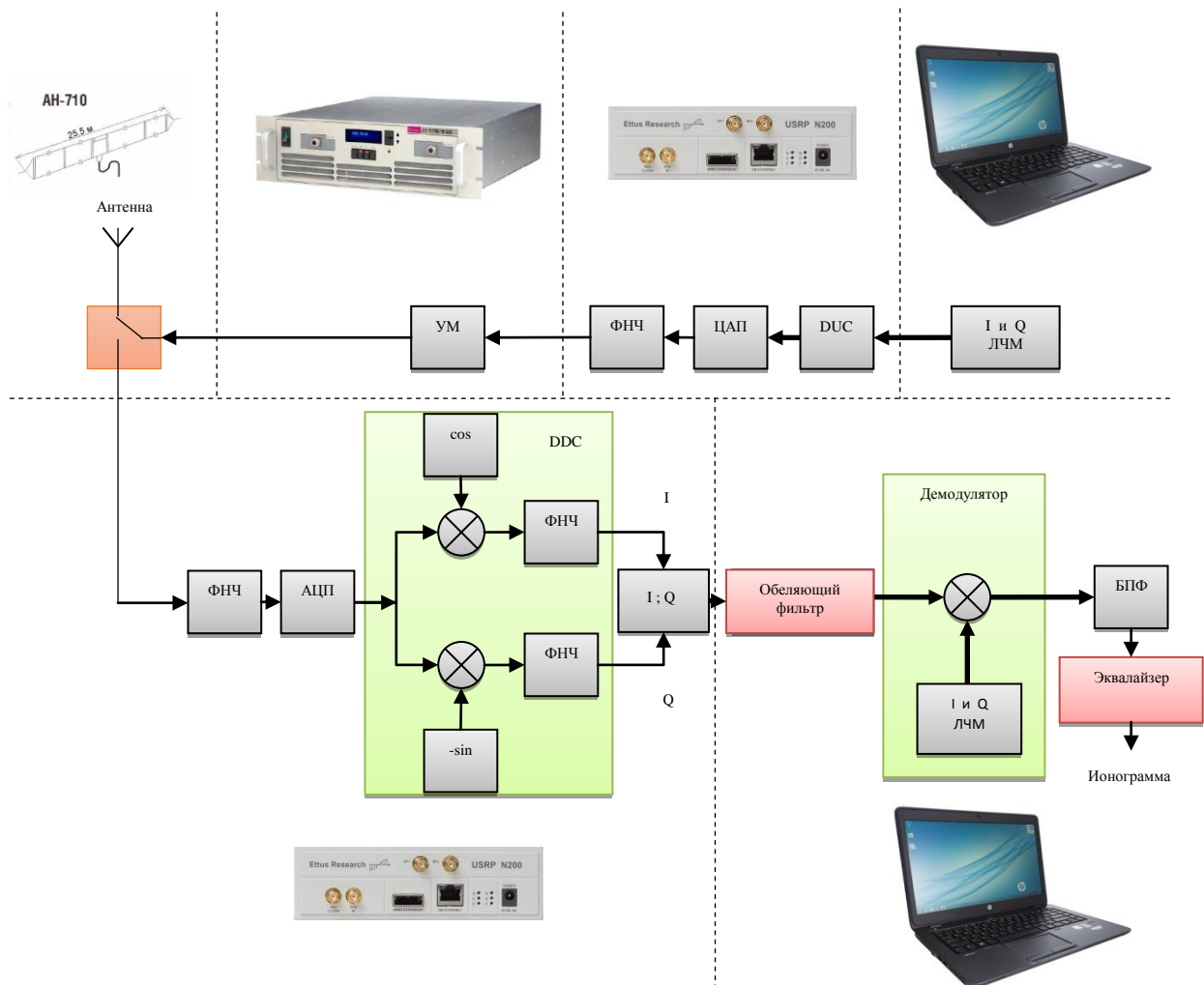


Рис.1. Структурная схема платформы USRP



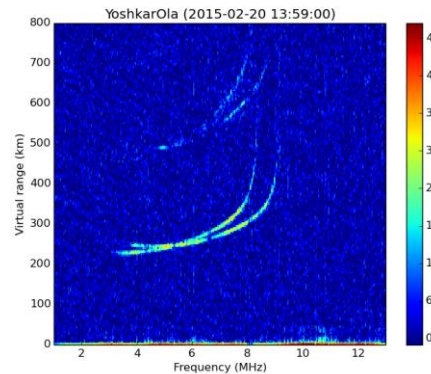
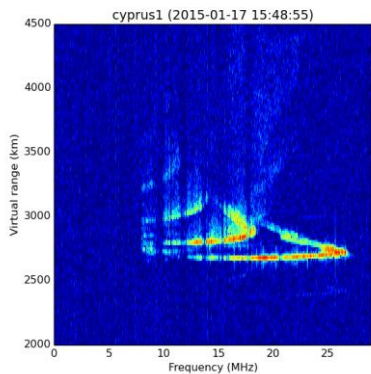
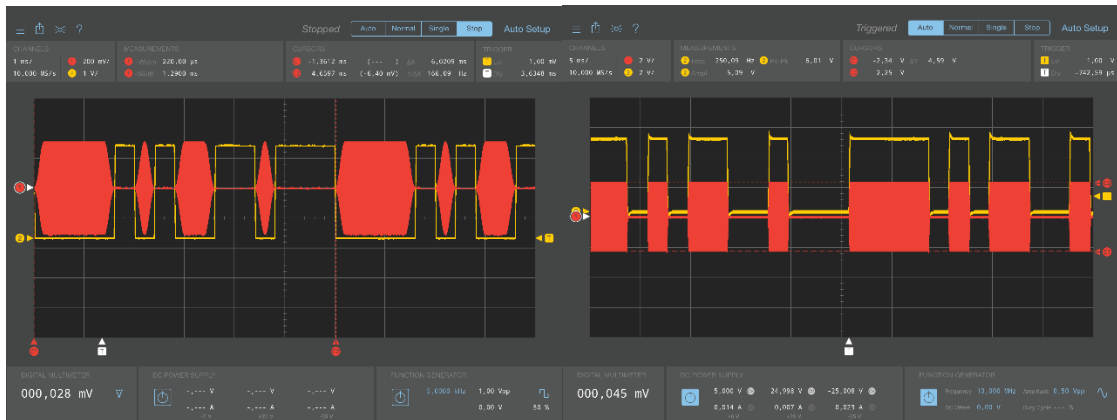
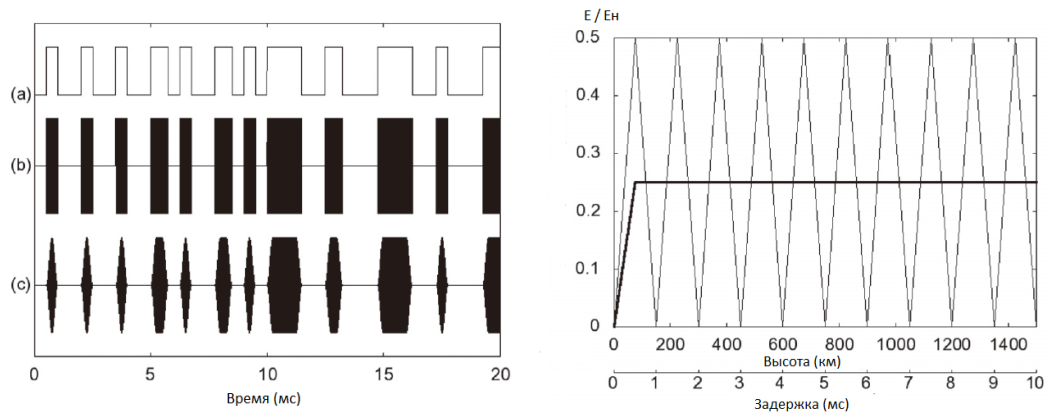
**Рис.2. Структурная схема вертикально – наклонного ионозонда.**

Комплексный зондирующий ЛЧМ сигнал формируется в персональном компьютере. Далее он поступает в универсальную аппаратную платформу (USRP) где переносится на рабочую частоту посредством цифрового преобразователя вверх (DUC) и преобразуется в аналоговую форму (ЦАП). После усилителя мощности (УМ) через коммутатор, который переключается по закону  $M$ -последовательности, сигнал поступает в антенну. Отраженный от ионосферы сигнал принимается той же антенной и через коммутатор поступает в универсальную аппаратную платформу (USRP), реализующую приемник. Здесь принятый сигнал сразу преобразуется в цифровую форму (АЦП). Далее цифровой понижающий конвертер (DDC) производит выборку спектра необходимой полосы и передачу его в персональный компьютер для обработки в комплексном виде. Обработка сигнала заключается в фильтрации принятого ЛЧМ сигнала от стационарных помех, сжатие и запись в файл. Сжатие ЛЧМ сигнала осуществляется путем перемножения принятого сигнала с аналитическим ЛЧМ сигналом. Для визуализации данных вычисляется высотно-частотная характеристика (ионограмма).

#### **Особенности работы передатчика и приемника на одну антенну.**

При моностатический режиме работы с использованием ЛЧМ сигнала возникает проблема разделения временных интервалов работы приёмника и передатчика. Кроме того необходимым условием является обеспечение приема сигнала с задержкой от

0,6мс до 6,67мс. Данные задержки соответствуют высотам отражения зондирующего сигнала от 90 до 1000 км соответственно. При использовании импульсов равной длительности отраженная энергия зависит от высоты по пилообразному закону (рис), причем максимумы зависят от длительности импульса. Такая система будет эффективна только на определенных высотах. Использование в качестве переключающих последовательностей последовательности максимальной длины ( $M$ -последовательности) [2] обеспечивает равную вероятность сочетаний 1|0 на всем ее периоде и позволяет получать одинаковый уровень отраженного сигнала в нужном диапазоне задержек. Кроме того, прямоугольный характер амплитудно-манипулированных импульсов, приводит к высокому уровню корреляционных шумов. Для ослабления нужно применять сглаживающие окна.



## Результаты

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 13-07-00371-а; 13-02-00524-а; 15-07-05280; 15-07-05294), госзадания Министерства образования и науки РФ (проекты 8.2697.2014/К, 3.2695.2014/К).*

### **Литература**

1. Иванов В.А. ЛЧМ – ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях (обзор). В.А. Иванов, В.Н. Куркин, В.Е. Носов и др. Радиопизика, 2003, т. 34, №11, с. 919-952.
2. Pool A. W. V. On the use of pseudorandom codes for «chirp» radar // IEEE transaction on antennas and propagation / 1979. v. AP27, n. 4, P. 480-485.
3. Salous S. Weighted sequences for HF FMCW sounding // ‘HF Radio Systems and Techniques’, 7-10 july 1997, Conference Publication No. 411, © IEEE, 1997.
4. Иванов Д.В. Алгоритм работы однопозиционного вертикального ЛЧМ ионозонда с минимальной излучаемой мощностью. / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Н.В. Рябова, А.В. Мальцев, А.А. Елсуков // Сборник докладов XIII международной НТК Радиолокация, радионавигация, связь. Воронеж, 17-19 апреля 2007г. т.3 с. 2261-2270
5. Иванов, Д.В. SDR-ионозонд с непрерывным ЛЧМ-сигналом на платформе USRP / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Н.В. Рябова, А.А. Елсуков и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2013. – № 3 (19). – С. 80-93.
6. Иванов, Д.В. ЛЧМ ионозонд нового поколения на платформе USRP / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Н.В. Рябова, А.А. Елсуков, М.И. Рябова, А.А. Чернов // Сборник докладов конференции «RLNC 2014» Т. 1. – С. 405-414.
7. Иванов, Д.В. Радиозондирование ионосферных каналов ВЧ связи. Методы и оборудование поволжского государственного технологического университета / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Н.В. Рябова, А.Р. Лащевский, А.А. Елсуков, М.И. Рябова, А.А. Чернов, А.В. Зуев, Н.Н. Михеева, Р.Р. Бельгибаев // Труды XXIV Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн», РРВ-24, Иркутск, 29 июня-5 июля 2014 г., Т. I. –С. 38-45.