

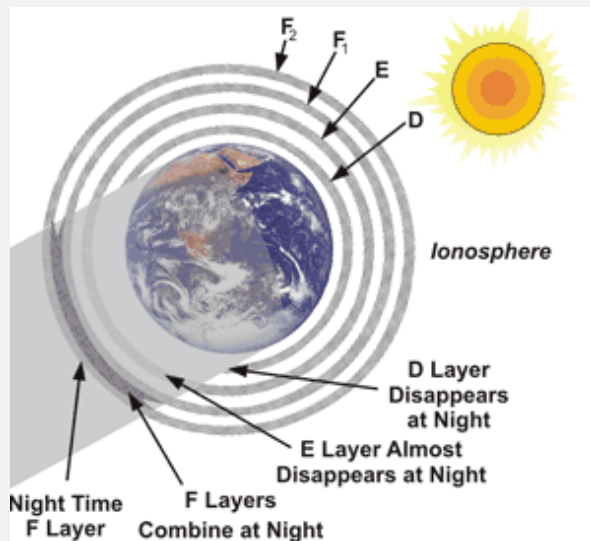


Поволжский государственный технологический университет

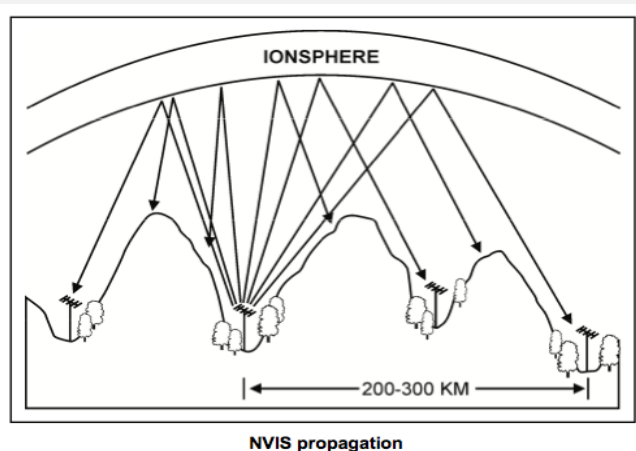
УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИОНОЗОНД НА ОСНОВЕ SDR ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ НАКЛОННОГО И
ВЕРТИКАЛЬНОГО ОДНОПОЗИЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ DSSS,
FMCW И FMICW СИГНАЛАМИ

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

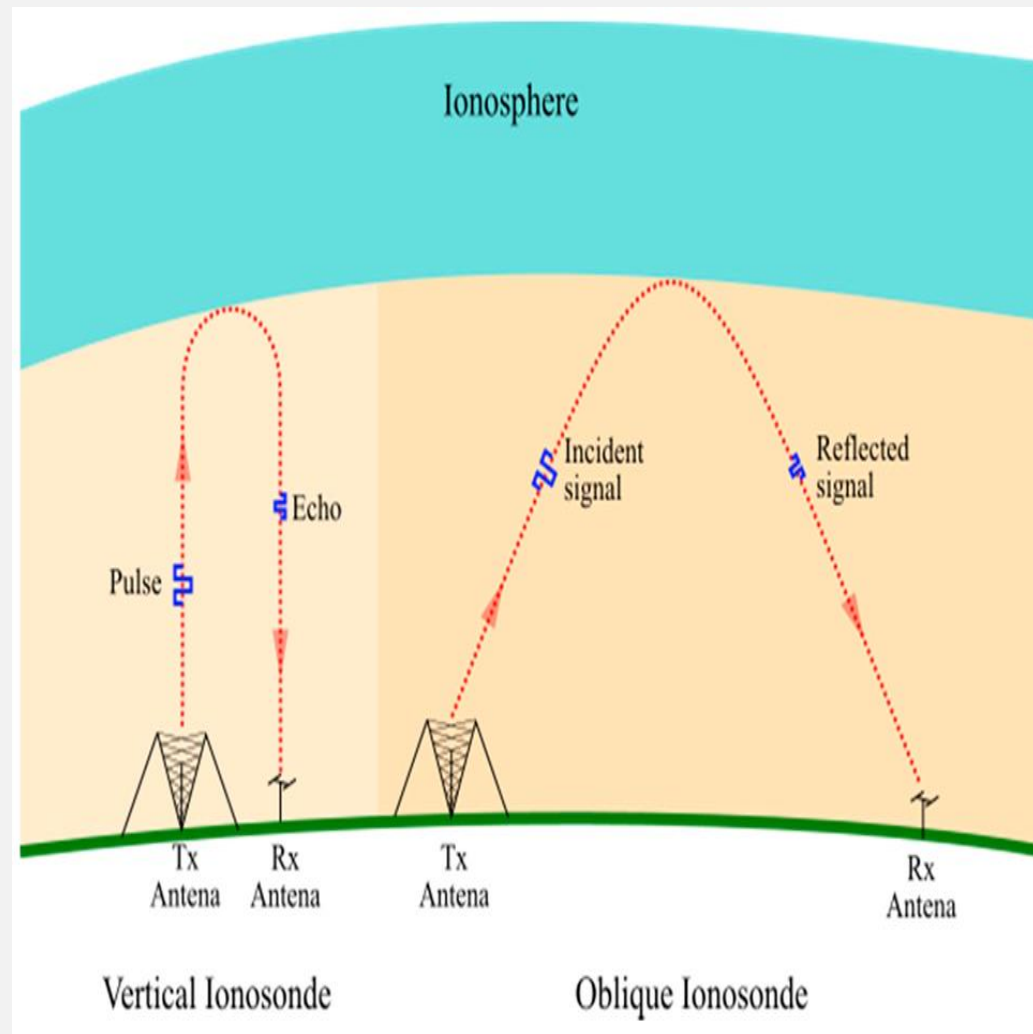
Способы зондирования ионосферы и классификация ионозондов



Структура ионосферы



Зондирование в режиме в NVIS и его применение для ближней КВ связи



По методу зондирования:

- вертикальные
- наклонные
- возвратно-наклонные

По определяемым характеристикам:

- дистанционно-частотные
- высотно-частотные
- каналные

По форме сигнала с расширенным спектром:

- с фазо-кодированным сигналом (DSSS)
- с линейно-частотно-модулированным сигналом (FMCW, FMICW)

Цель и задачи исследования

Цель работы: создание универсального по методу зондирования и по форме сигнала ионозонда, работающего маломощными сигналами с расширенным спектром.

Задачи:

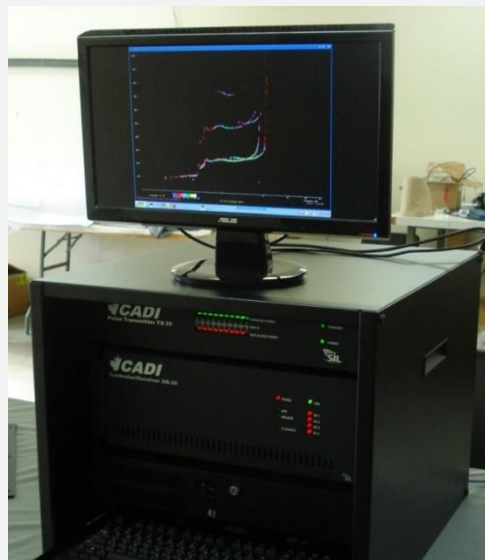
1. Анализ существующих ионозондов и их технических характеристик.
2. Разработка методик и алгоритмов синтеза и обработки зондирующих сигналов с расширенным спектром в комплексной области с возможностью реализации на универсальной аппаратной платформе по технологии программно-определяемого радио (SDR).
3. Создание программного обеспечения для реализации разработанных алгоритмов с использованием новых возможностей предоставляемых SDR технологией.
4. Экспериментальная верификация разработки при использовании режимов НЗ, одноантенного ВЗ и сигналов FMCW, FMICW и DSSS.

Анализ существующих ионозондов и их технических характеристик

США DPS - 4



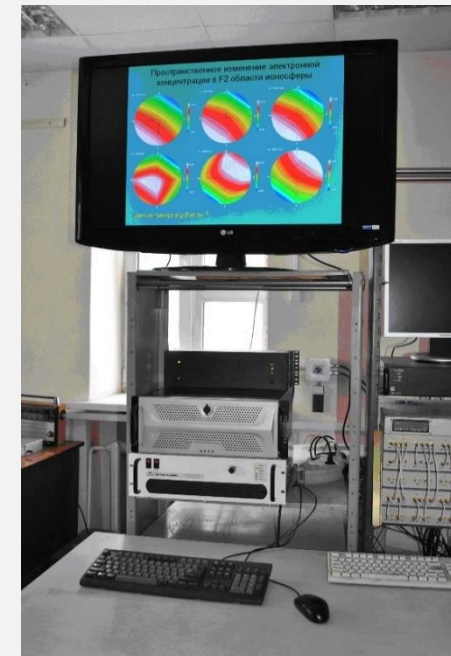
Канада - CADI



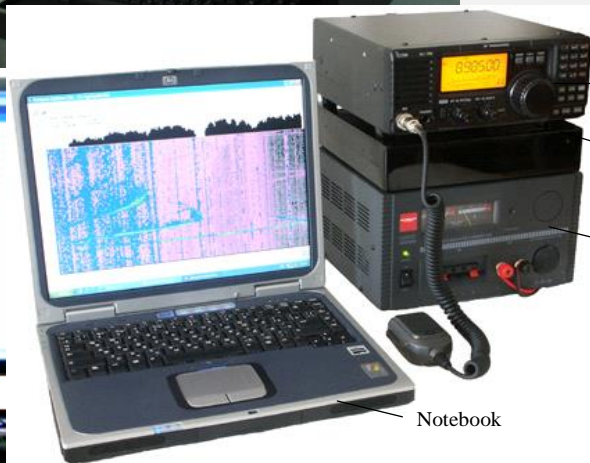
Англия - DAMSON



РФ - Томион



РФ - Многофункциональный ЛЧМ ионозонд ИСЗФ СО РАН



РФ - Мобильный ионозонд ПГТУ



США - chirp sounder



РФ - Парус-А

Анализ существующих ионозондов и их технических характеристик

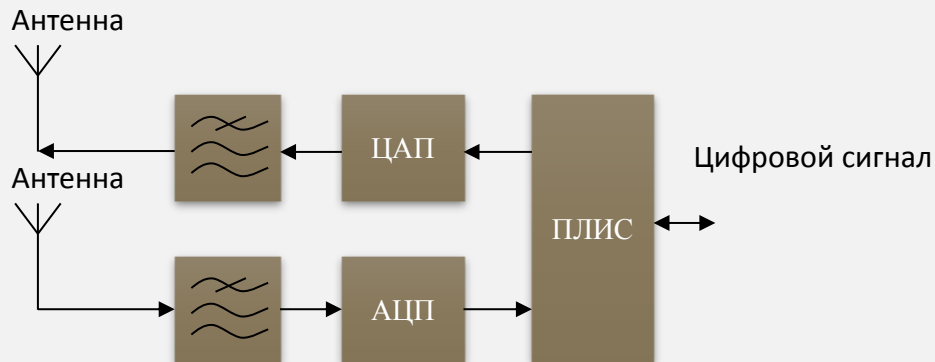
Название	Страна	Рабочие частоты, МГц	Излучаемая мощность, кВт	Вид сигнала	Вид зондирования
RCS-2 RCS-7	США	2-30	0,01-0,1	ЛЧМ	панорамный
DPS-4		1-30	0,3 2	ФКМ	панорамный
Dynasonde-21		0,1-30	4	Импульсный (простой)	панорамный
IPS-71	Австралия	2-20 2-62	0,05	ЛЧМ	панорамный
CADI	Канада	2-16	0,6	ФКМ	панорамный
Парус-А	Россия	1-20	12	Импульсный (простой)	панорамный
Авгур-К		1-20	15	Импульсный (простой)	панорамный
Ионозонд ПГТУ		2-20 2-30	0,03-0,1	ЛЧМ, ФКМ	панорамный, канальный
Ионозонд ИСЗФ СО РАН		2-30	0,03	ЛЧМ	панорамный
Ионозонд Томион		0,5-30	0,1-4	Импульсный (простой)	панорамный
DAMSON	Англия	2-21	0,01-0,1	ФКМ	канальный
SCIPION	Франция	1-30	0,25	ФКМ	панорамный, канальный

Возможности универсальной аппаратной платформы созданной по SDR технологии

SDR - технология программно-конфигурируемых (определяемых) радиосистем

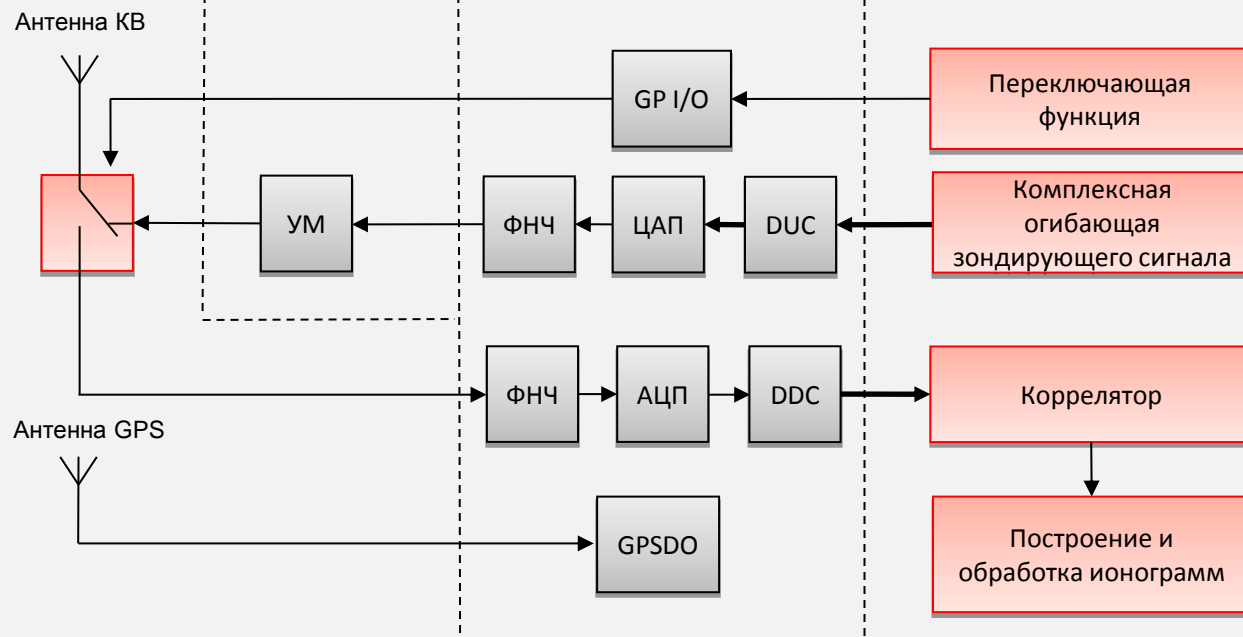
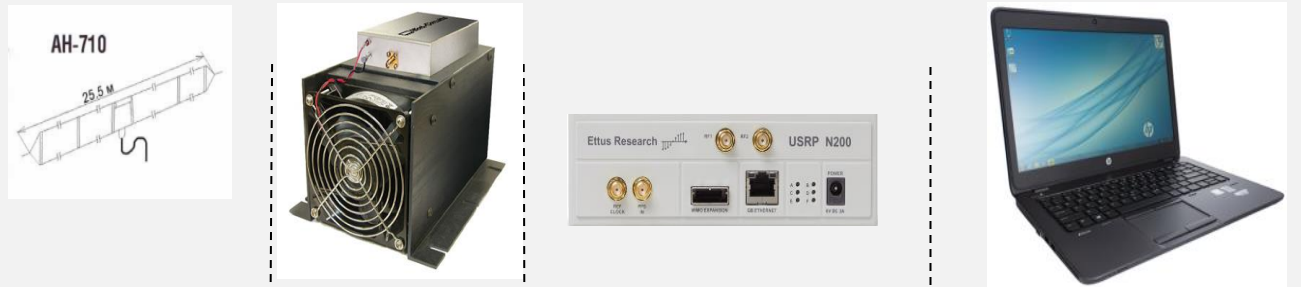
USRP - универсальная аппаратная платформа, позволяющая реализовать SDR технологию для различных устройств, работающих в диапазоне до 6 ГГц

- обеспечивает существенно более высокую точность математических операций при синтезе и обработке сигнала,
- обеспечивает возможность создания на одной аппаратной платформе различных (новых) устройств путем перепрограммирования,
- обеспечивает возможность применения более сложных алгоритмов обеспечивающих лучшие результаты выделения сигнала на фоне шумов.

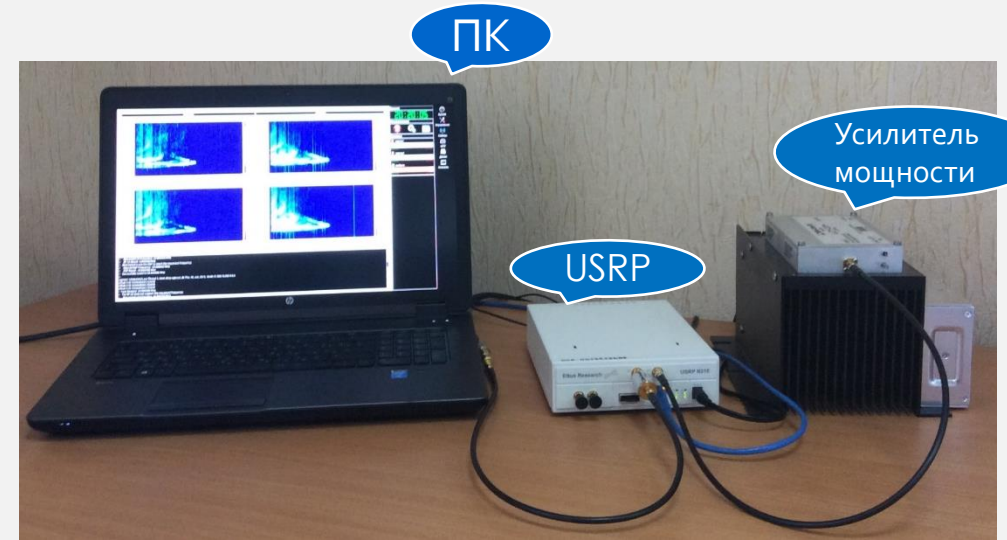


Полностью цифровые синтез и обработка сигналов благодаря применению принципа АЦП к антенне

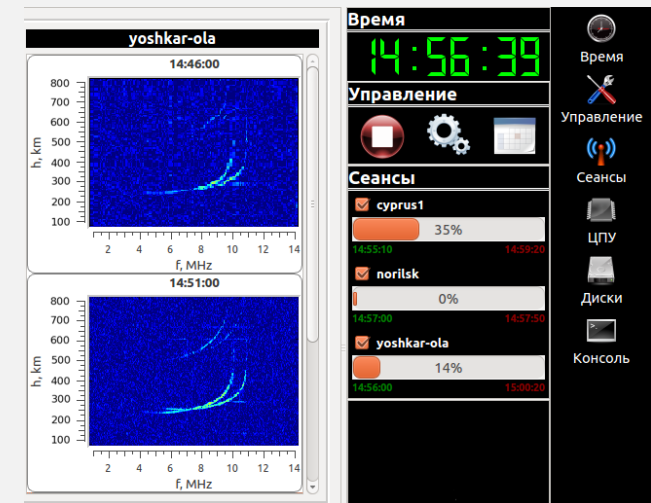
Блок схема и внешний вид созданного универсального ионозонда



Структурная схема



Внешний вид



Интерфейс программы

Методика применения FMICW сигнала в задаче одноантенного ВЗИ

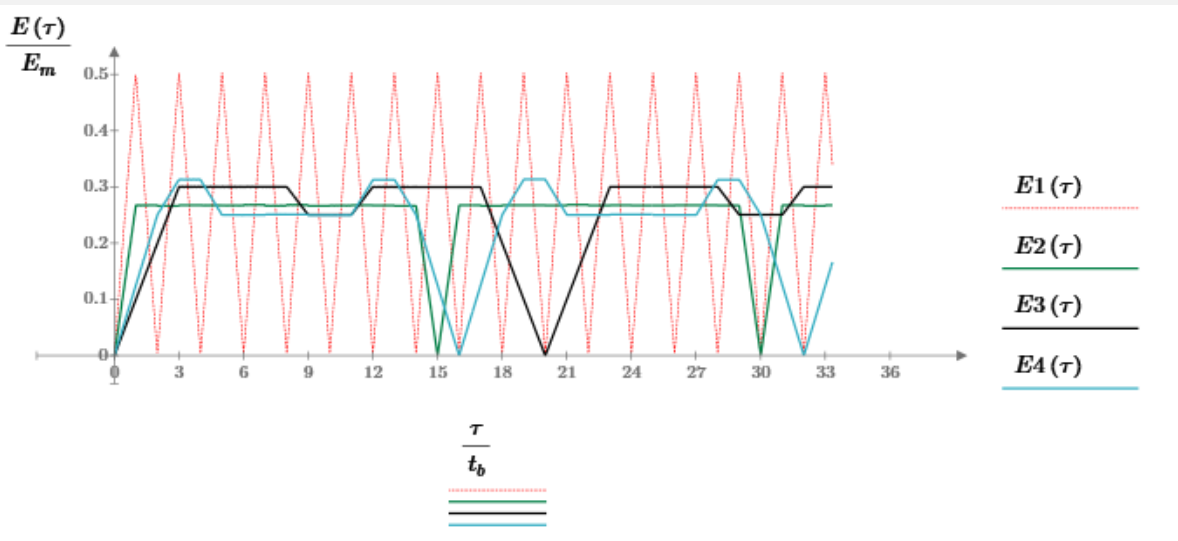
Средняя амплитуда сжатого принимаемого сигнала на периоде анализа

$$MRS = E(\tau) = \frac{1}{T_a} \int_0^{T_a} g(t - \tau) \cdot [1 - g(t)] dt$$

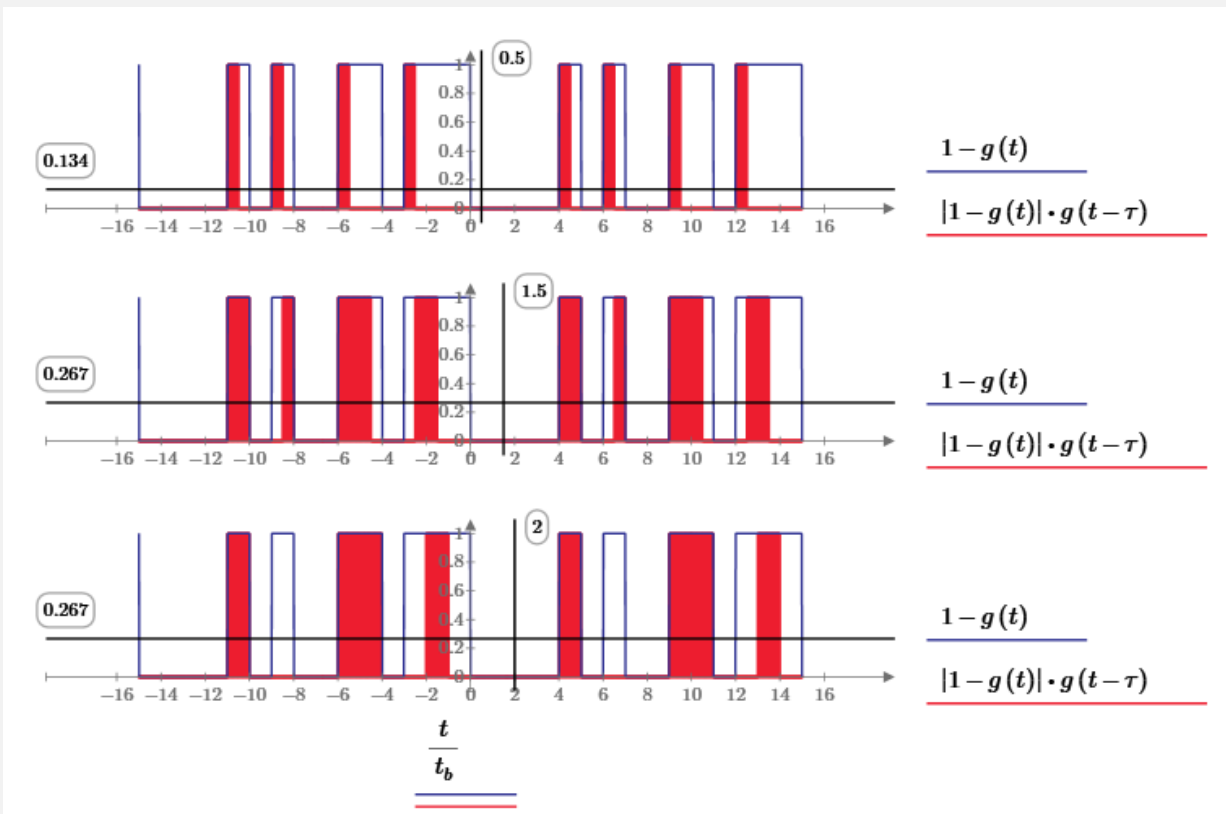
где

$g(t)$ -переключающая функция передачи

$[1 - g(t)]$ -переключающая функция приёма



Функция MRS при использовании в качестве переключающей функции: прямоугольных импульсов (E1 - красный) равной длительности; периодической M-последовательности длиной 15 бит (E2 - зеленый) и периодических последовательностей Salous длиной 20 бит (E3 - черный) и Barry (E4 - голубой) длиной 16 бит

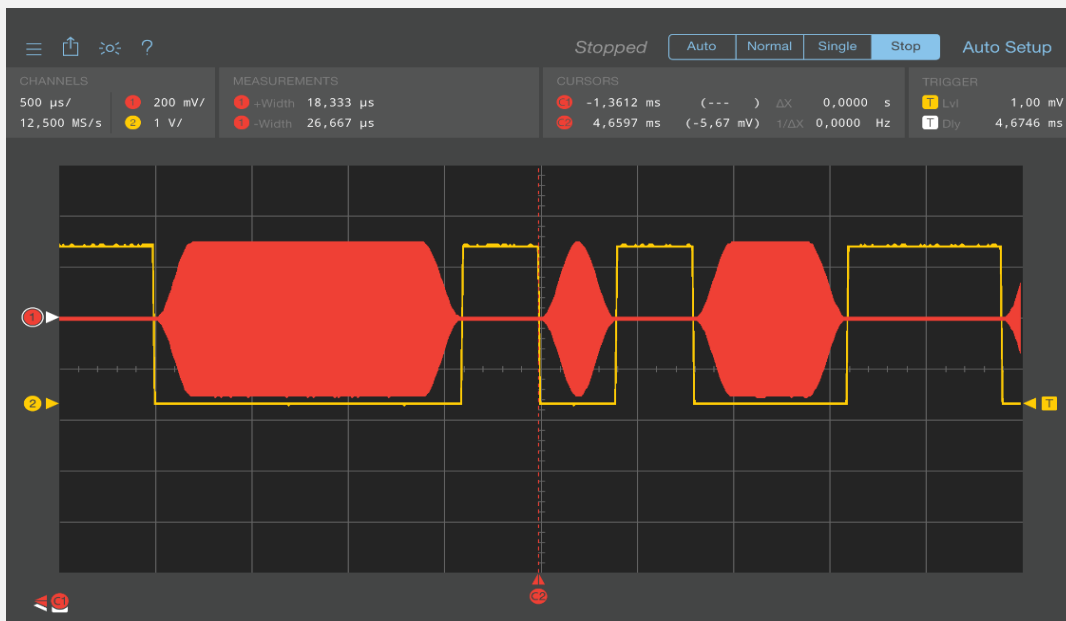


Функция приёма (синий), принятый сигнал (красный) и его средний уровень для задержек отнесённых к времени бита для M-последовательности

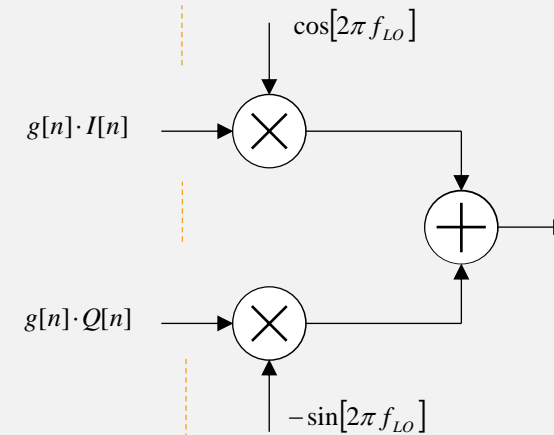
Алгоритм формирования FMCW и FMICW сигнала в комплексной области

Комплексная огибающая FMICW сигнала в цифровом виде

$$u[n] = g[n] \left(\underbrace{\cos\left(2\pi\left(f_{C1}t[n] + \frac{\dot{f}}{2}t^2[n]\right)\right)}_{I[n]} + j \underbrace{\sin\left(2\pi\left(f_{C1}t[n] + \frac{\dot{f}}{2}t^2[n]\right)\right)}_{Q[n]} \right)$$



Осциллограмма FMICW сигнала (1) и управляющего сигнала для антенного коммутатора (2) на выходе USRP



Программная часть

Аппаратная часть

Схема формирования FMCW и FMICW сигнала на основе универсального квадратурного модулятора

$B = f_2 - f_1$ - Полоса зондируемых частот

$f_{C1} = \frac{B}{2} - \frac{f_s}{2}$ - начальная частота

$t[n] = t[0] + \frac{n}{f_s}$ - дискретное время

f_s - частота дискретизации

\dot{f} - скорость изменения частоты

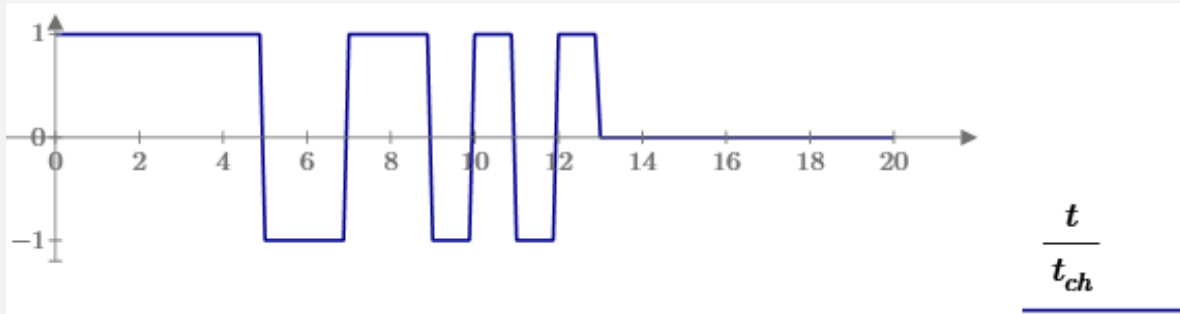
$g[n]$ - переключающая функция

f_{Lo} - частота гетеродина

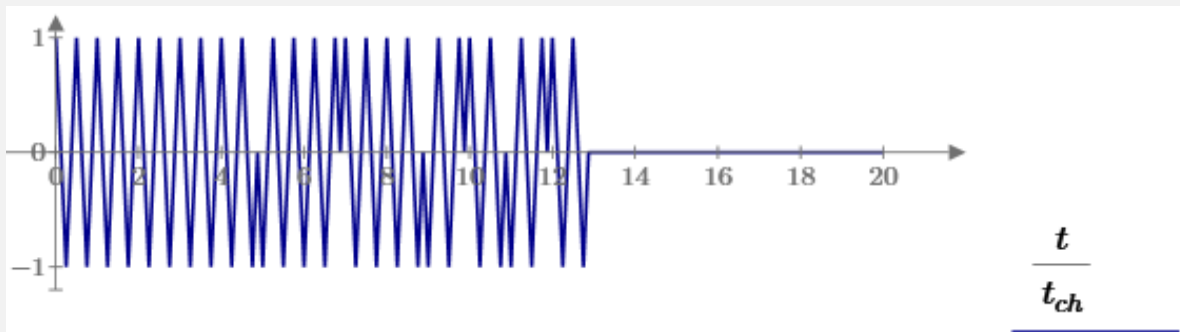
Алгоритм формирования DSSS сигнала в комплексной области

Комплексная огибающая DSSS сигнала в цифровом виде

$$u[n] = g[n](I[n] + jQ[n]) \quad \text{где} \quad I[n] = k[n] \quad Q[n] = 0$$



Форма DSSS сигнала на входе USRP



Форма DSSS сигнала на выходе USRP

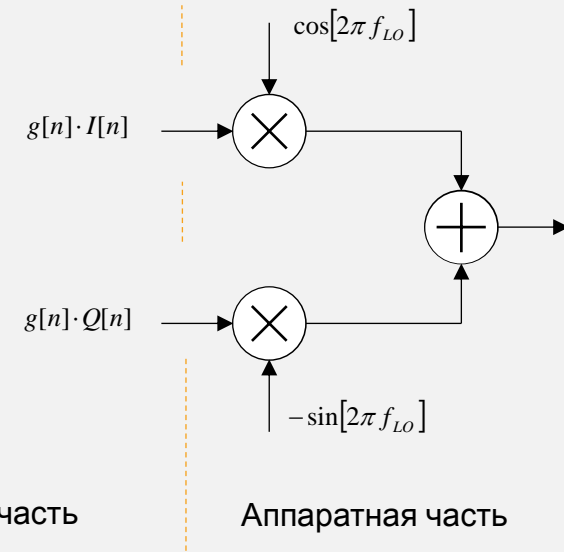


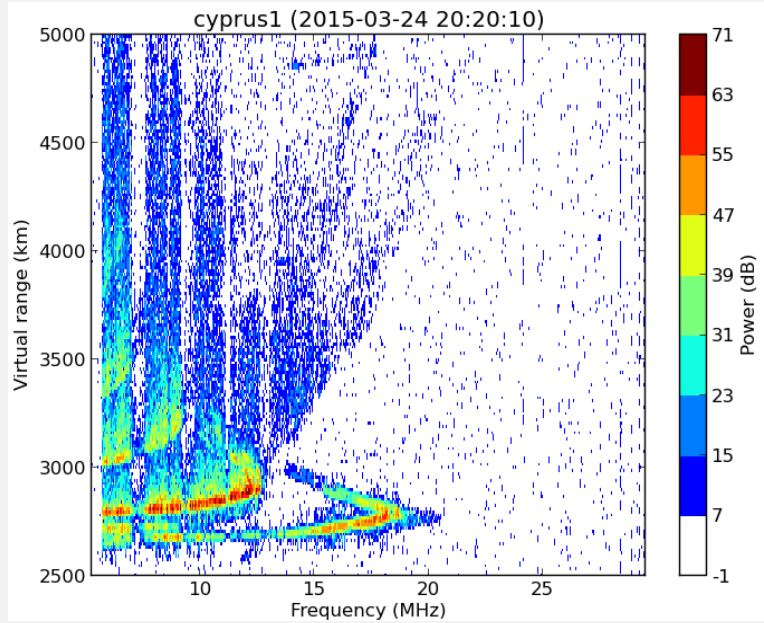
Схема формирования DSSS сигнала на основе универсального квадратурного модулятора

- $B = f_2 - f_1$ - Полоса зондируемых частот
- $f_{C1} = \frac{B}{2} - \frac{f_s}{2}$ - начальная частота
- $t[n] = t[0] + \frac{n}{f_s}$ - дискретное время
- f_s - частота дискретизации
- $k[n]$ - Кодовая последовательность
- $g[n]$ - переключающая функция
- $f_{LO} = f_{C1} + \Delta f$ - частота гетеродина
- Δf - шаг несущей частоты

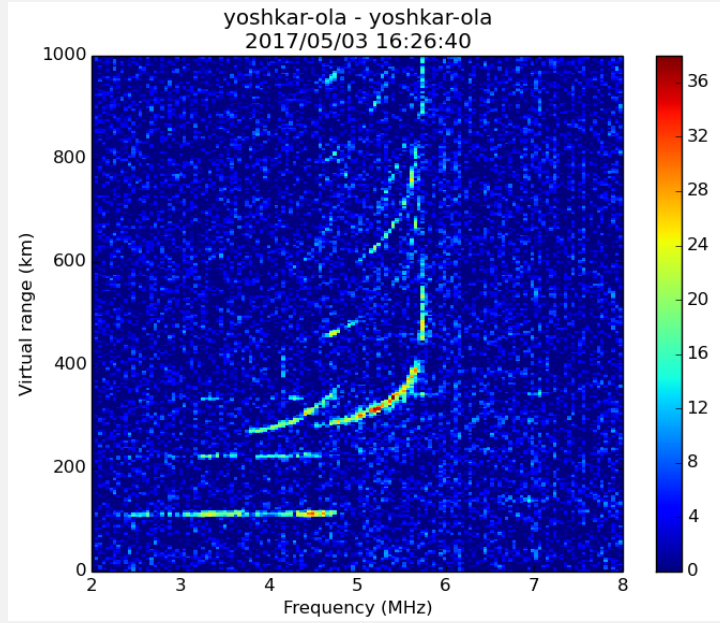
Технические характеристики универсального ионозонда

Диапазон частот	1,9 – 30 МГц
Форма сигнала с расширенным спектром	FMCW, FMICW, DSSS
Пиковая мощность передачи	до 30 Вт
Тип приемо-передающей антенны	T2FD
Частота дискретизации принимаемого сигнала	100 МГц
Полоса сигнала	до 25 МГц
Скорость сканирования (изменения) частоты в режиме FMCW	0,05 – 2 МГц/с
Диапазон наблюдаемых задержек при скорости 100кГц/сек в режиме НЗ (FMCW)	0 – 200 мс.
Диапазон наблюдаемых высот в режиме ВЗ для стандартных параметров сигналов	30-1000 км (FMICW) 78-768 км (DSSS)
Шаг перестройки частот в режиме DSSS	любой
Возможность когерентного накопления импульсов в режиме DSSS	4-8192 импульса

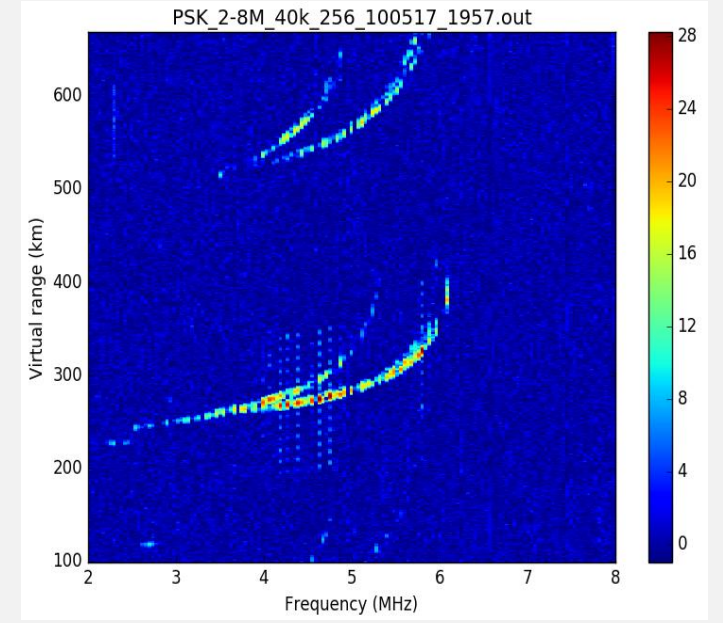
Верификация разработки в реальных физических экспериментах



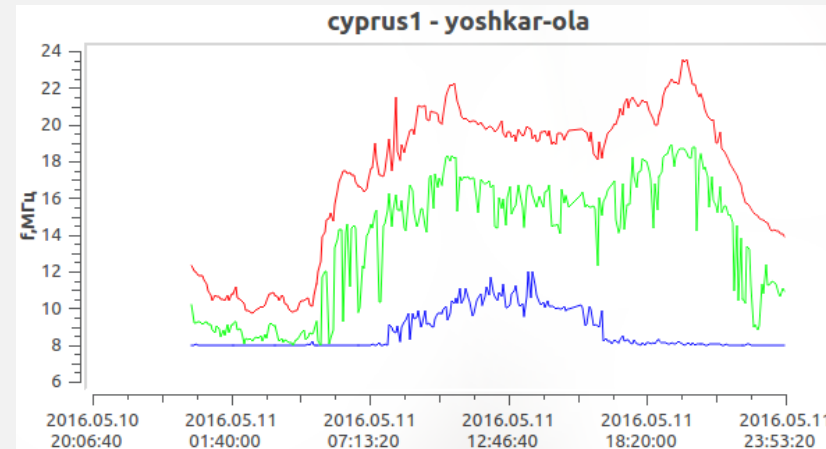
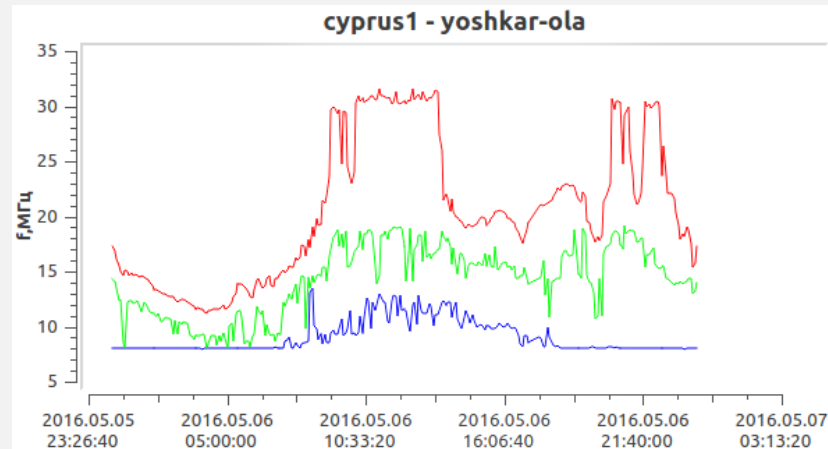
Ионограмма НЗ, полученная с помощью FMCW сигнала



Ионограмма ВЗ, полученная с помощью FMICW сигнала



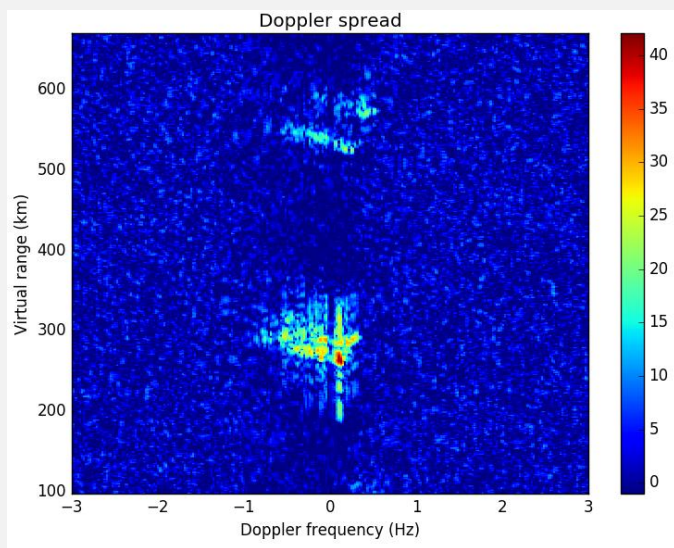
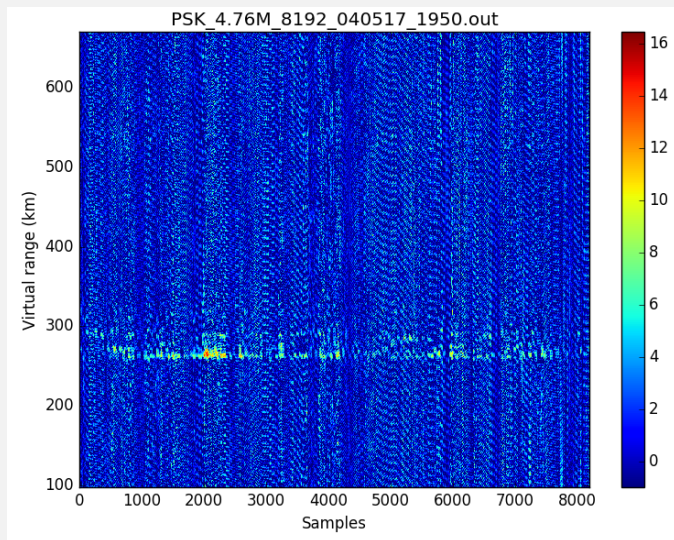
Ионограмма ВЗ, полученная с помощью DSSS сигнала



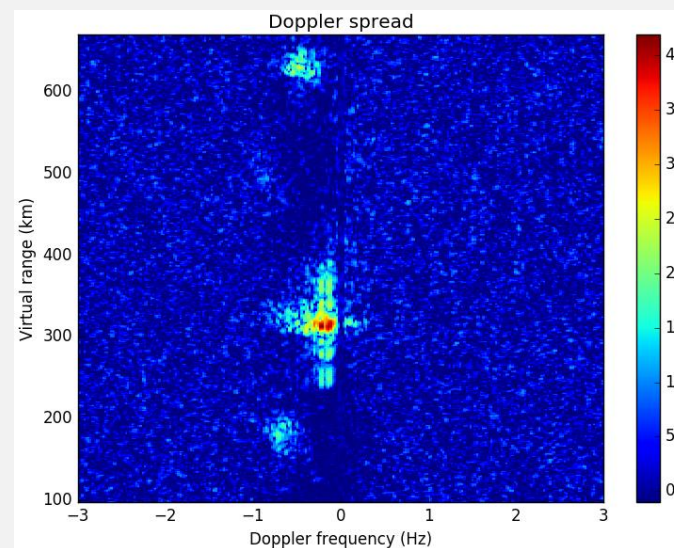
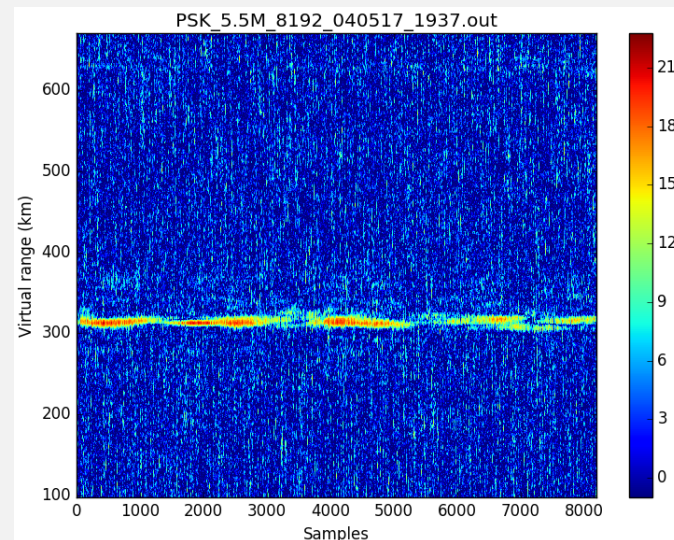
- МПЧ
- ОРЧ
- НПЧ

Суточные ходы, полученные с помощью FMCW сигнала

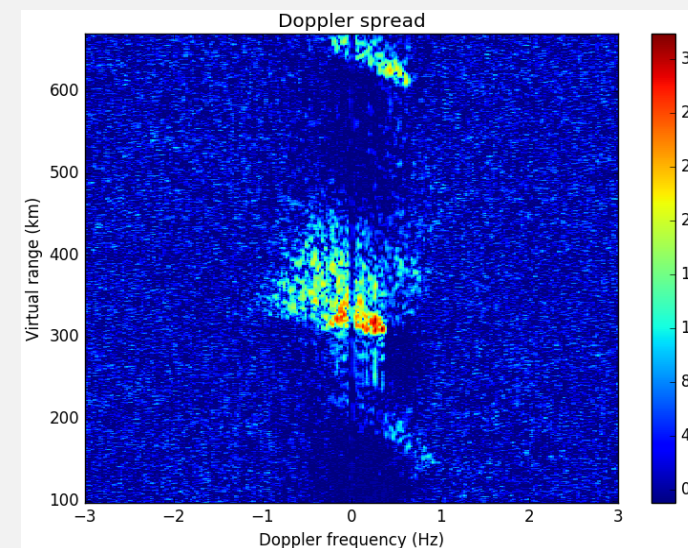
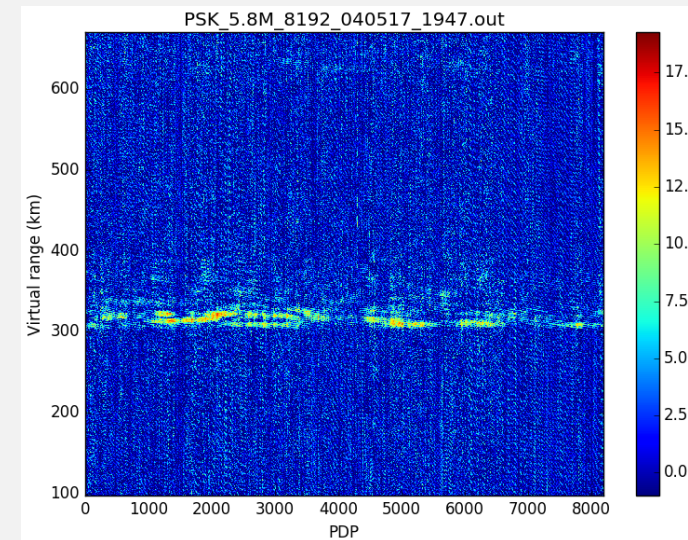
Экспериментальные ФРК полученные при ВЗИ универсальным ионозондом с маломощным DSSS сигналом



Рабочая частота 4,76 МГц



Рабочая частота 5,5 МГц



Рабочая частота 5,8 МГц

Когерентное накопления увеличивает отношение С/Ш на 16 дБ и более, что позволяет использовать для зондирования маломощные сигналы порядка 20 Вт.

Выводы

1. Создан не имеющий аналогов универсальный по методу зондирования и используемым СРС ионозонд, в котором реализованы методики и алгоритмы с использованием современных полностью цифровых методов синтеза и обработки сигналов в комплексной области.
2. Верификация разработки в реальных физических экспериментах показала, что ионозонд позволяет получить как характеристики ионосферы, так и ионосферных каналов КВ связи при низкой мощности (менее 20Вт) зондирующих сигналов и использовании стандартных широкополосных приёмо-передающих антенн типа T2FD.

Спасибо за внимание.