



Поволжский государственный технологический университет

Алгоритмы обнаружения полезного сигнала  
на фоне помех и их верификация для  
универсального цифрового ионозонда,  
созданного по SDR технологии

Авторы: Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Рябова М.И., **Овчинников В.В.**, Елсуков А.А.

## Цель работы:

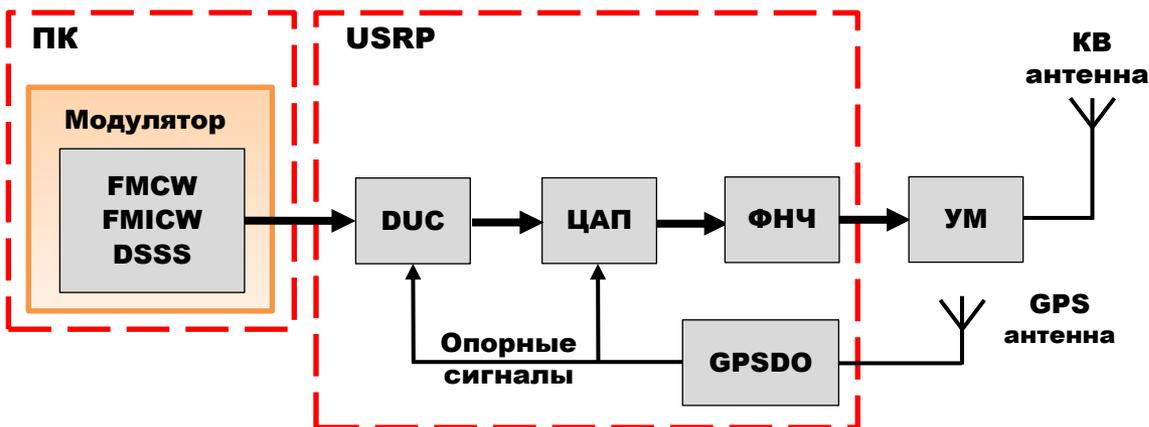
Разработка и исследование алгоритмов обнаружения полезного сигнала на фоне помех с учётом новых возможностей обработки, предоставляемых SDR технологией с использованием платформы USRP.

## Задачи:

- Разработка новых алгоритмов оптимального приёма, которые позволяет реализовать платформа USRP, для универсального цифрового ионозонда при зондировании ионосферы FMCW, FMICW и DSSS сигналами.
- Апробация и верификация разработанных алгоритмов и схем на ионограммах, полученных в натурных экспериментах.
- Анализ полученных результатов.

# Универсальный цифровой ионозонд ПГТУ, созданный по SDR технологии с использованием платформы USRP

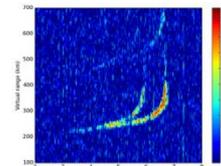
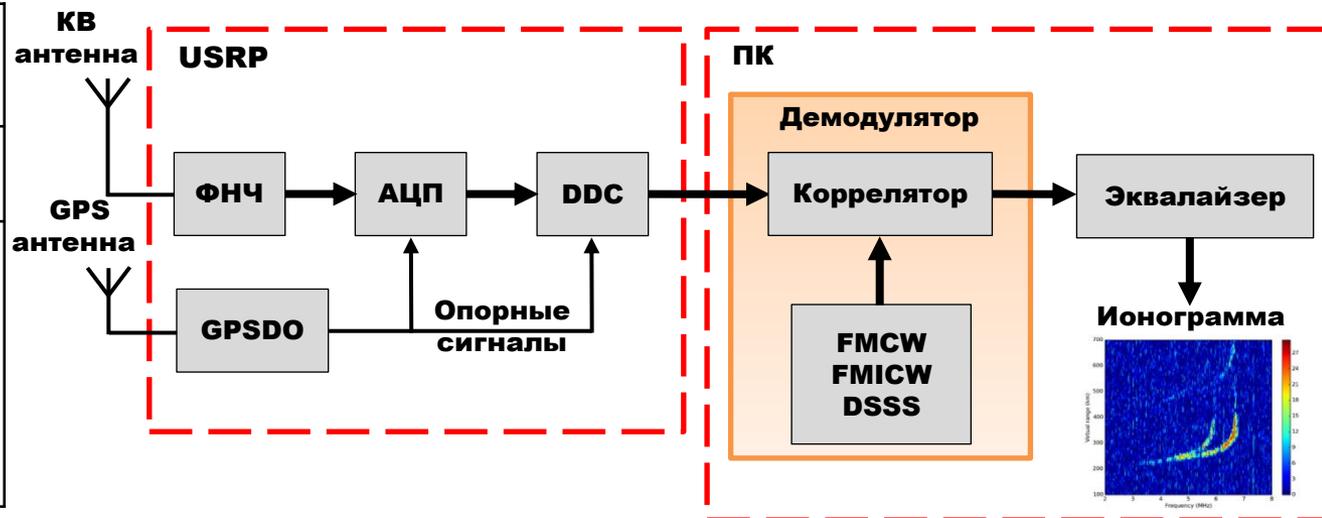
## Передающий терминал:



ЦАП	16 бит, 400 МГц
Диапазон рабочих частот	1,9 – 30 МГц
Пиковая мощность: FMCW DSSS	<b>12 Вт</b> <b>19 Вт</b>

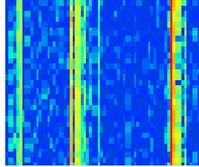
## Приёмный терминал: по принципу «АЦП к антенне»

АЦП	14 бит, 100 МГц
Диапазон рабочих частот	1,9 – 30 МГц
Скорость сканирования (изменения) частоты: FMCW FMICW	100 кГц/с 50 кГц/с

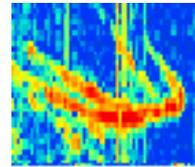


# Примеры объектов изображения исходной ионограммы наземного зондирования ионосферы

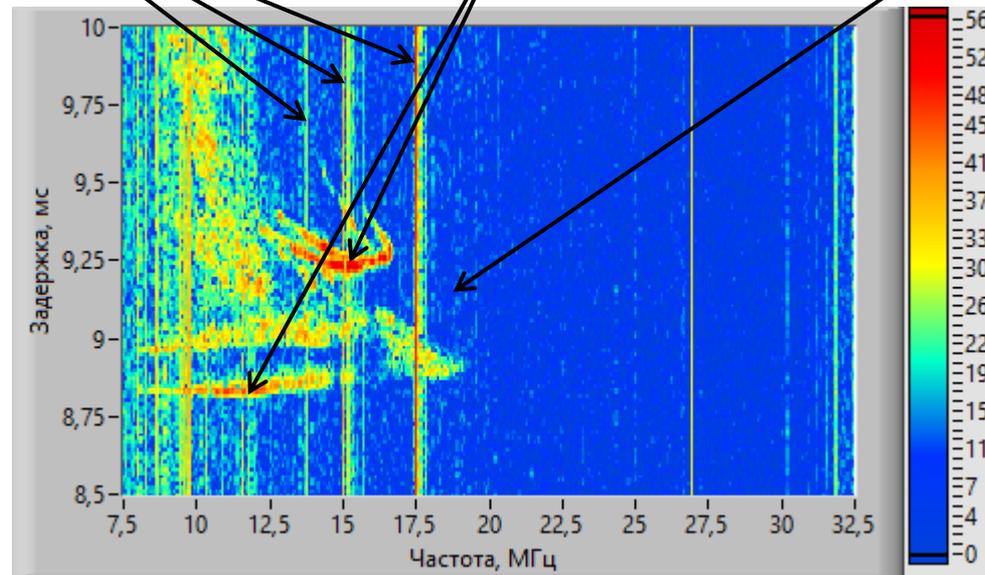
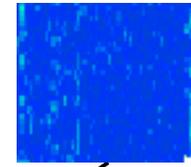
*Сосредоточенные помехи*



*Полезный сигнал*



*Фоновый шум*

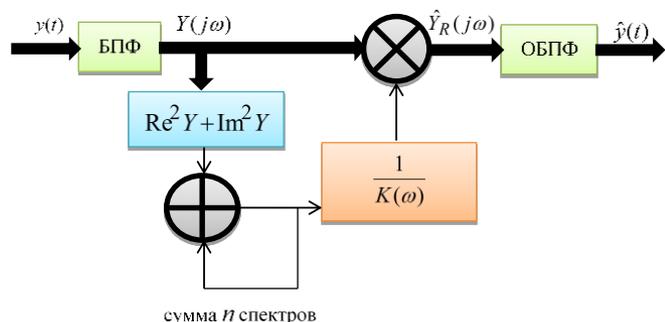


*Пример ионограммы наклонного зондирования ионосферы FMCW сигналом, полученной на радио трассе о. Кипр – г. Йошкар-Ола*

**Проблема** оптимального приёма сигнала, заключающаяся в максимально возможном подавлении помех различной природы и шумов

# Фильтрация сосредоточенных помех

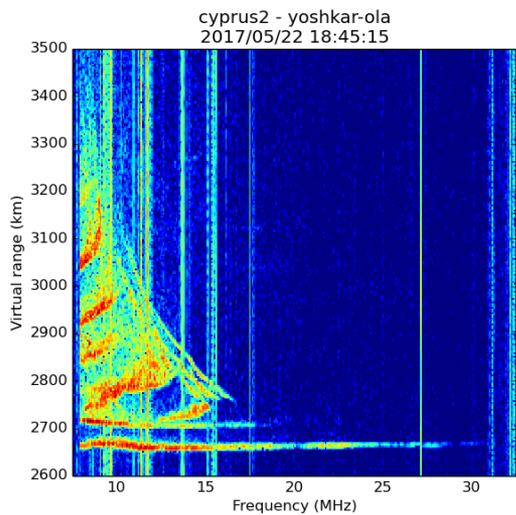
✓ Алгоритм адаптивного обеления помех. Позволяет отфильтровывать сосредоточенные помехи до операции сжатия сигнала



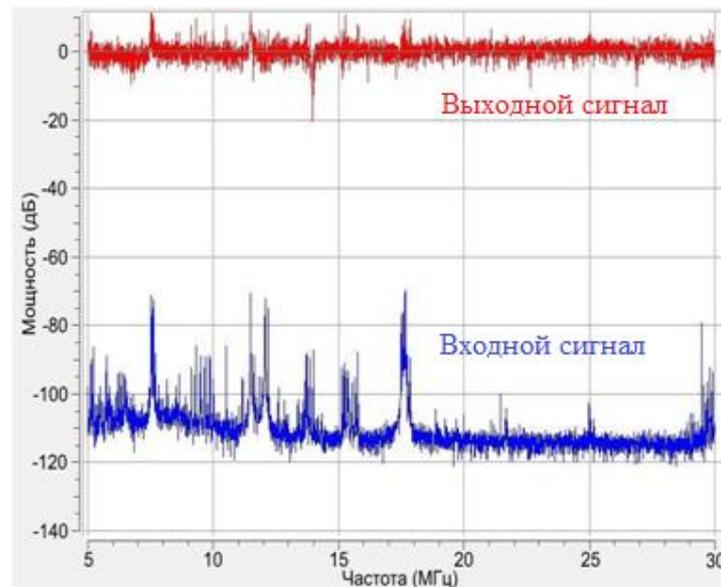
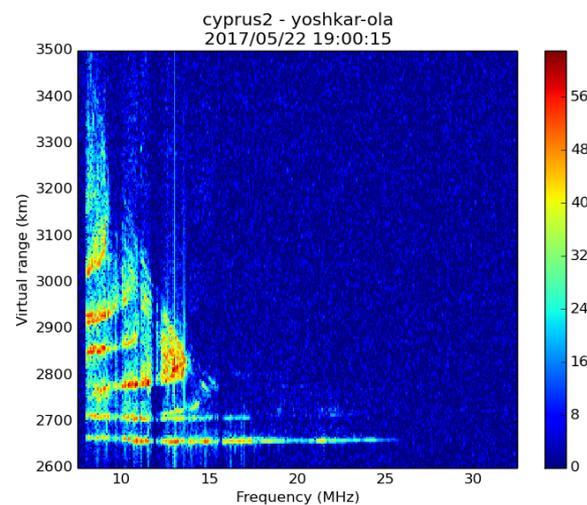
Обеление происходит при умножении текущего выборочного спектра на коррекционную функцию  $\frac{1}{K(\omega)}$

$$K(\omega) = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n Y_i(\omega)}{n}}$$

До обеления

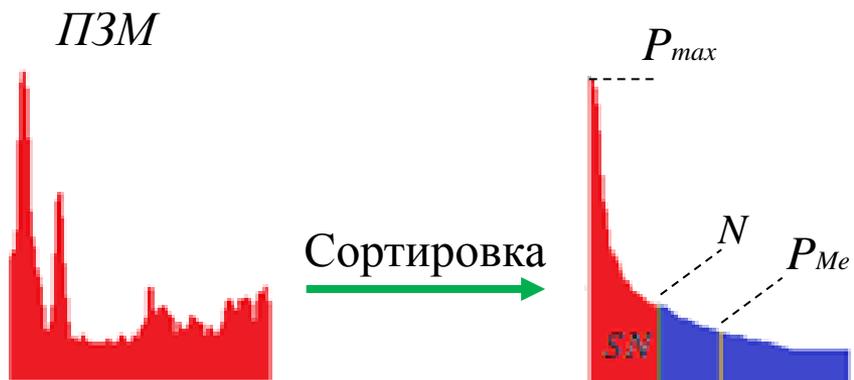


После обеления



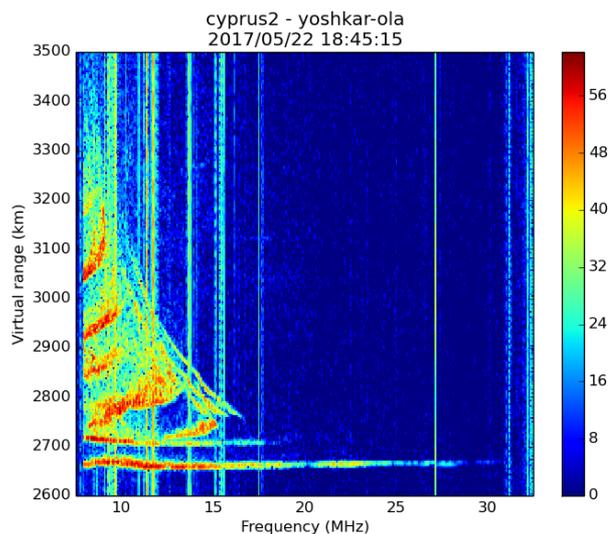
# Фильтрация остаточной компоненты сосредоточенных помех

✓ Алгоритм медианного эквалайзирования. Выполняется после операции сжатия сигнала. Позволяет отфильтровать остаточную компоненту сосредоточенных помех и приводит к близкому для всех ПЗМ уровню помех.

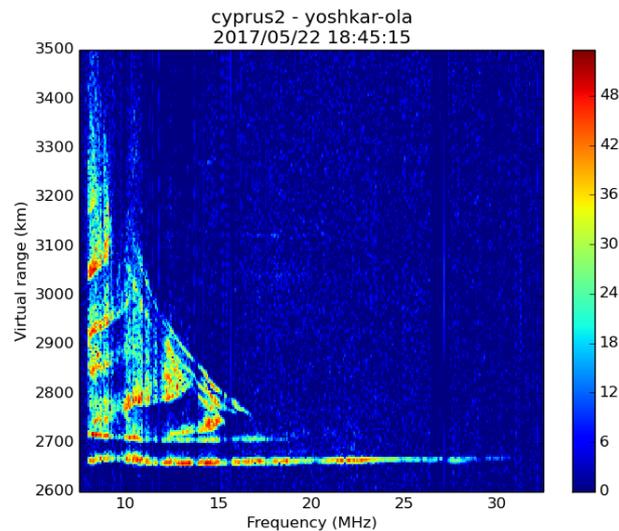


- 1) Для каждого полученного ПЗМ строится вариационный ряд и определяется медиана.
- 2) Все отсчеты ПЗМ нормируются на медианное значение.
- 3) В результате получаем отсчеты ПЗМ в единицах отношения сигнал-шум

До медианного эквалайзирования

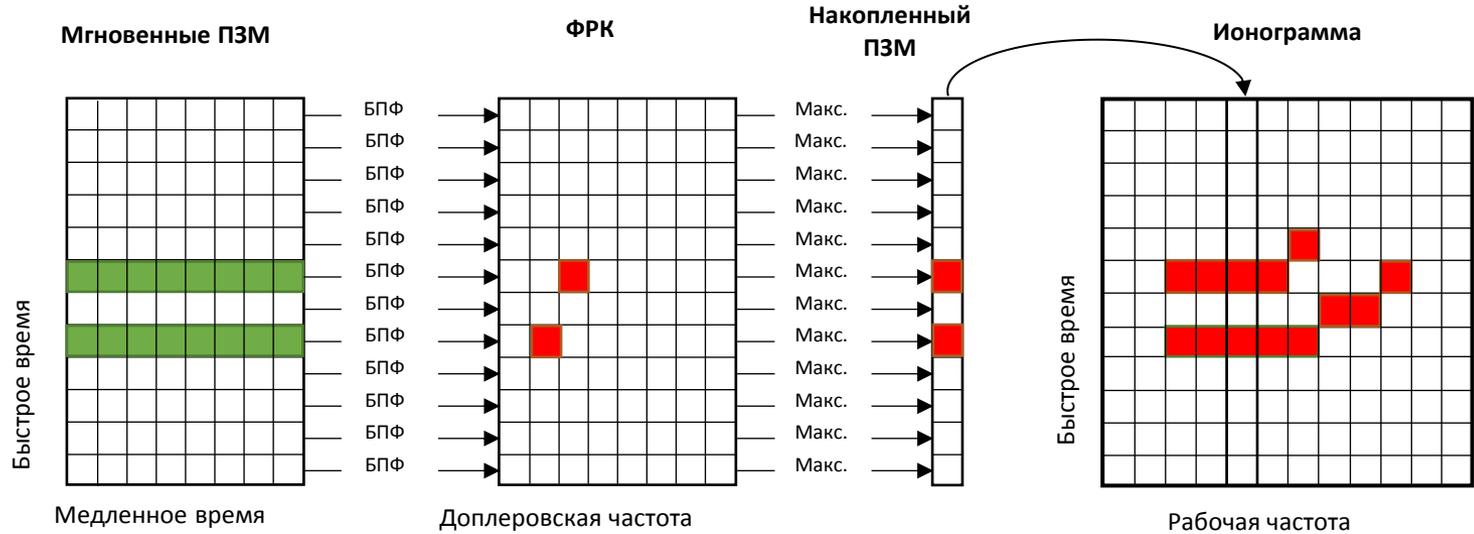


После медианного эквалайзирования

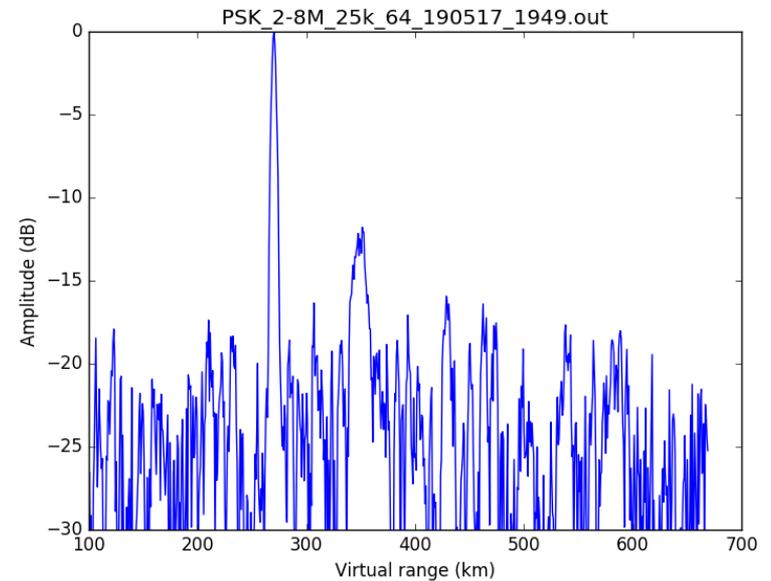
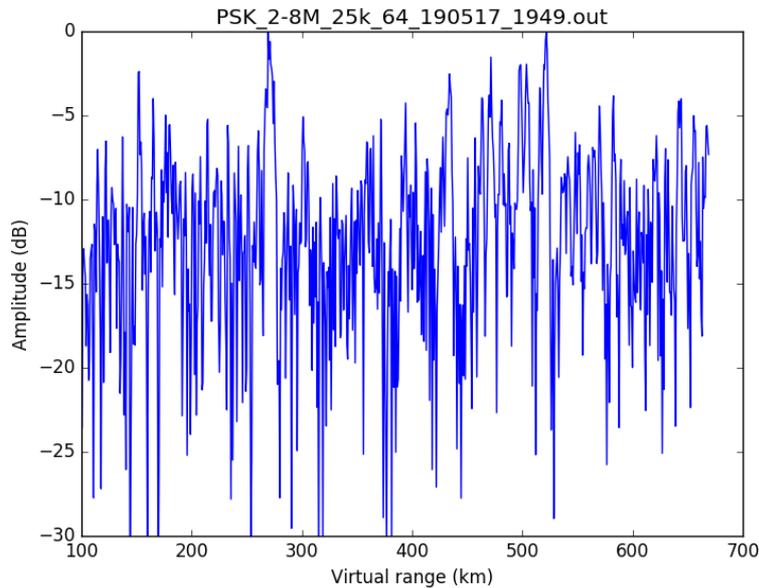


# Когерентное спектральное накопление

Алгоритм когерентного спектрального накопления ПЗМ

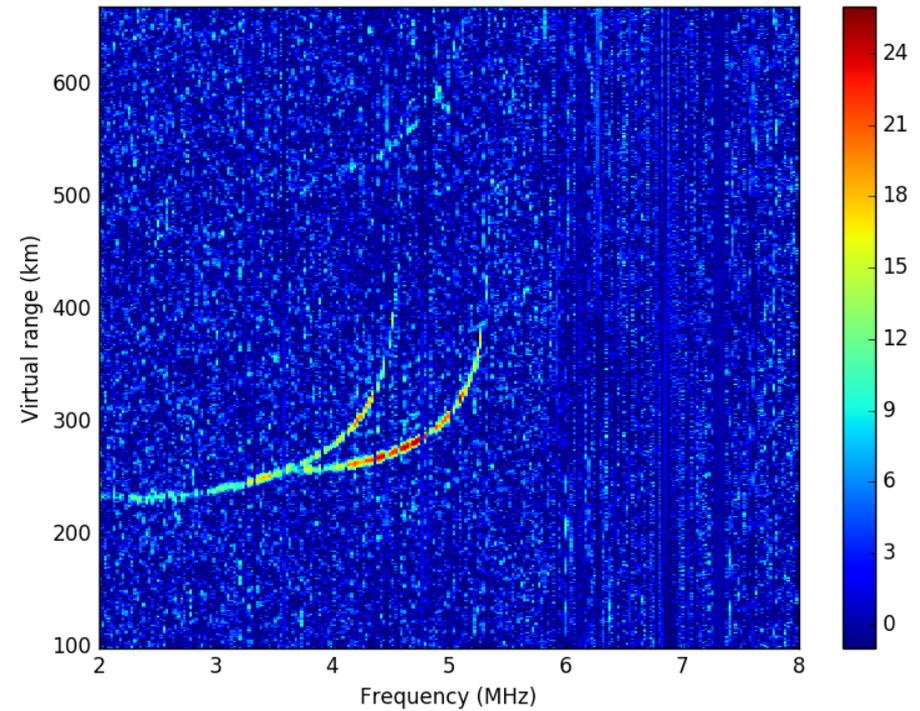
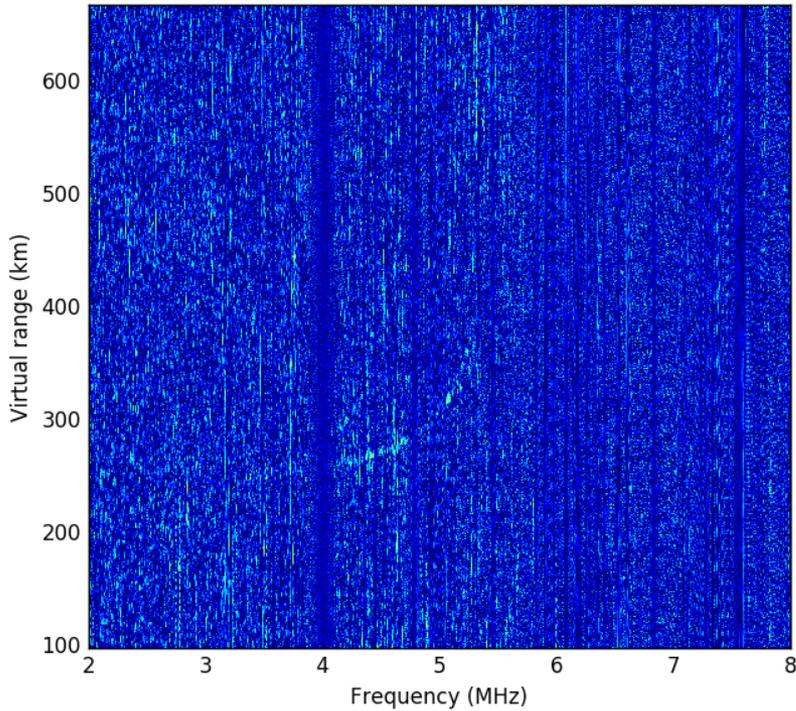


Профили задержки DSSS сигнала: до когерентного накопления (слева); после когерентного накопления (справа)



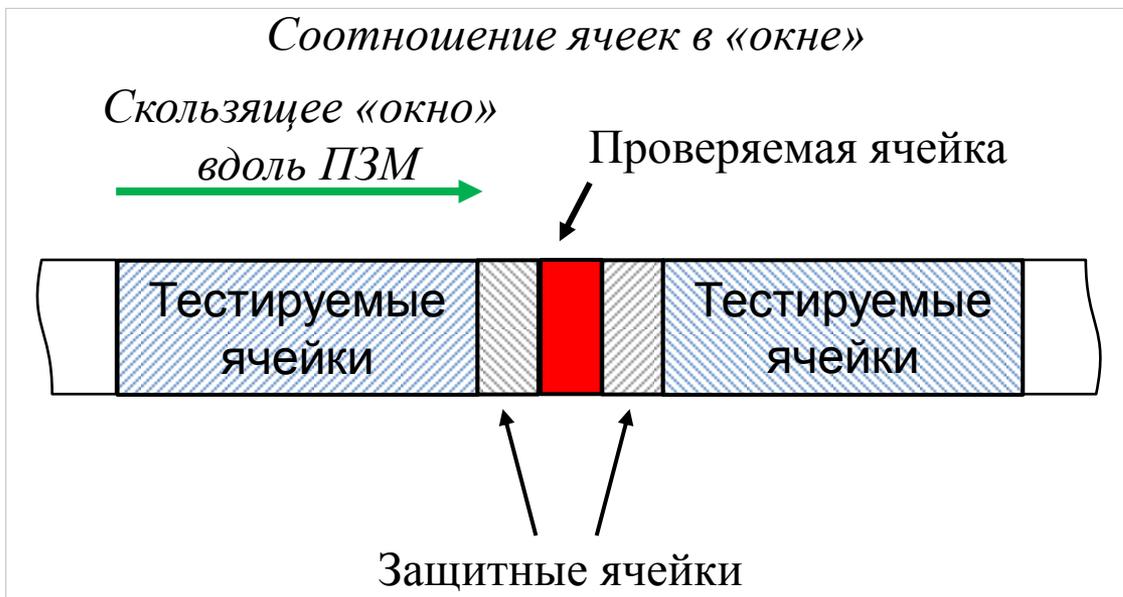
# Эффективность применения когерентного спектрального накопления

*Ионограммы без накопления (слева) и с накоплением (справа) 64 сигналов, излучённых на каждой несущей частоте*



# Алгоритм обнаружения полезного сигнала CA-CFAR

CA-CFAR – cell averaging Constant False Alarm Rate. В реальных условиях мощность шума априори неизвестна, поскольку плотность распределения мощности отличается от Гауссовского распределения. Техника CFAR решает данную проблему.



Порог обнаружения  $G$  определяется путём оценки уровня мощности тестируемых ячеек вокруг проверяемой ячейки:

$$G = \alpha \cdot P_n$$

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

Оценка мощности шума: 
$$P_n = \frac{1}{N} \cdot \sum_{m=1}^N x_m$$
, где  $N$  – количество тестируемых ячеек,

$x_m$  - значение амплитуды тестируемой ячейки.

Пороговый фактор определяется следующим выражением:

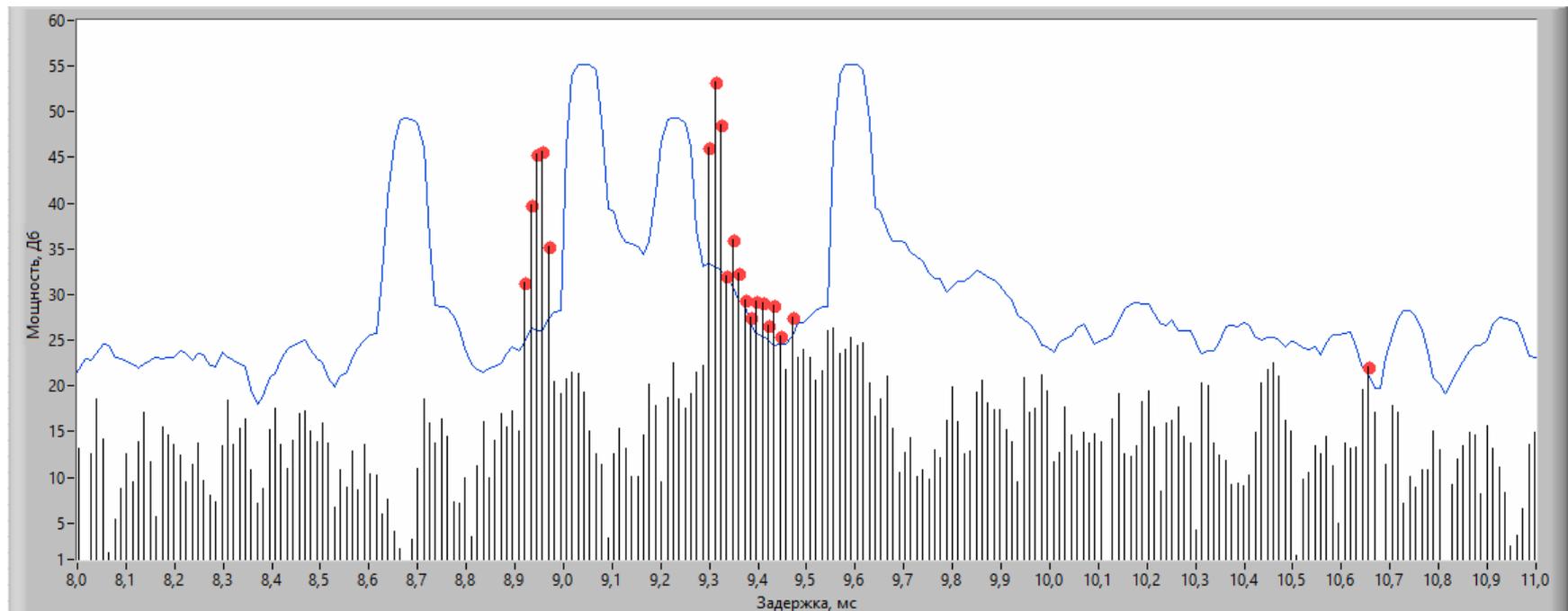
$$\alpha = N \cdot (P_{far}^{-1/N} - 1)$$

, где  $P_{far}$  - требуемая частота ложных срабатываний.

# Эффективность применения алгоритма CA-CFAR

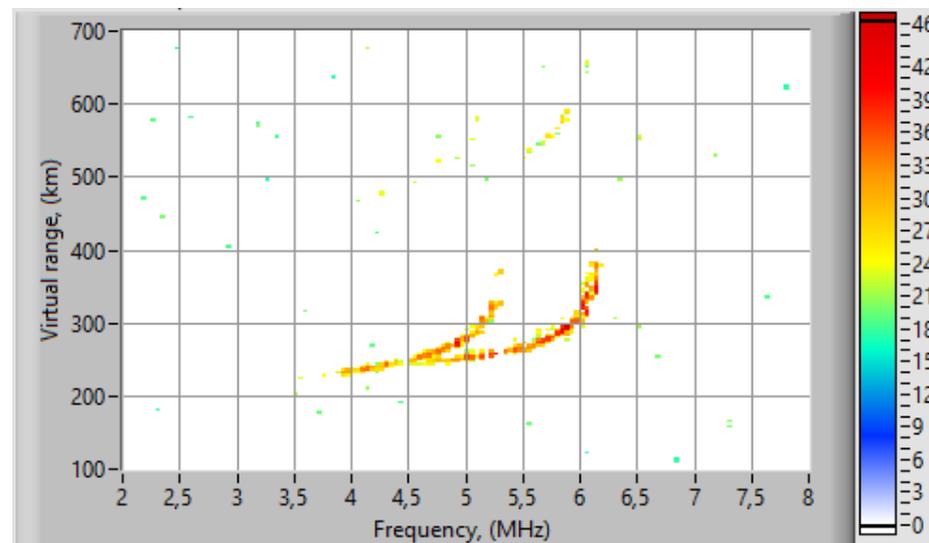
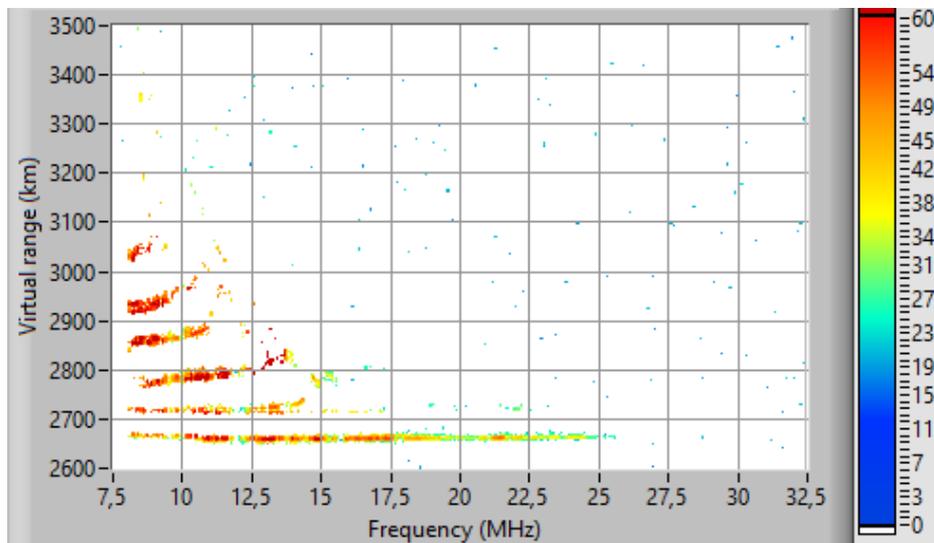
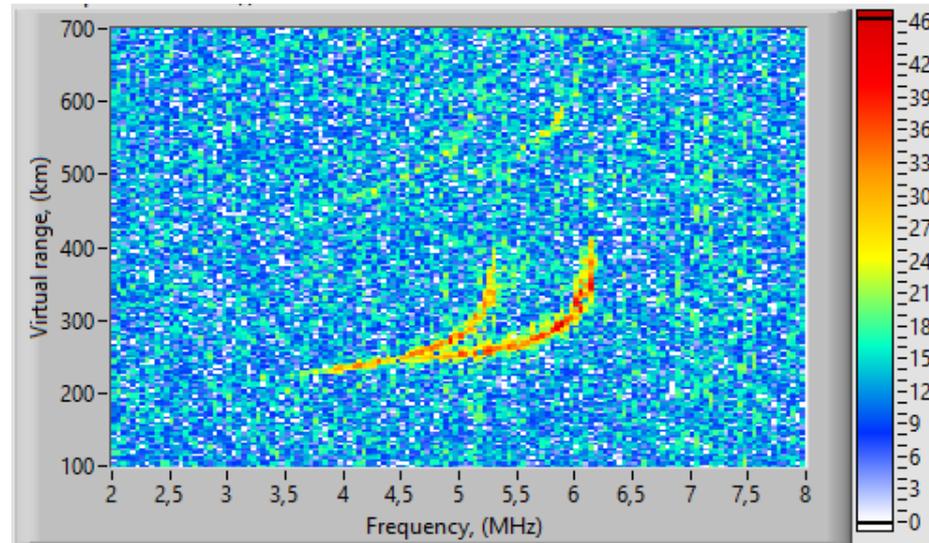
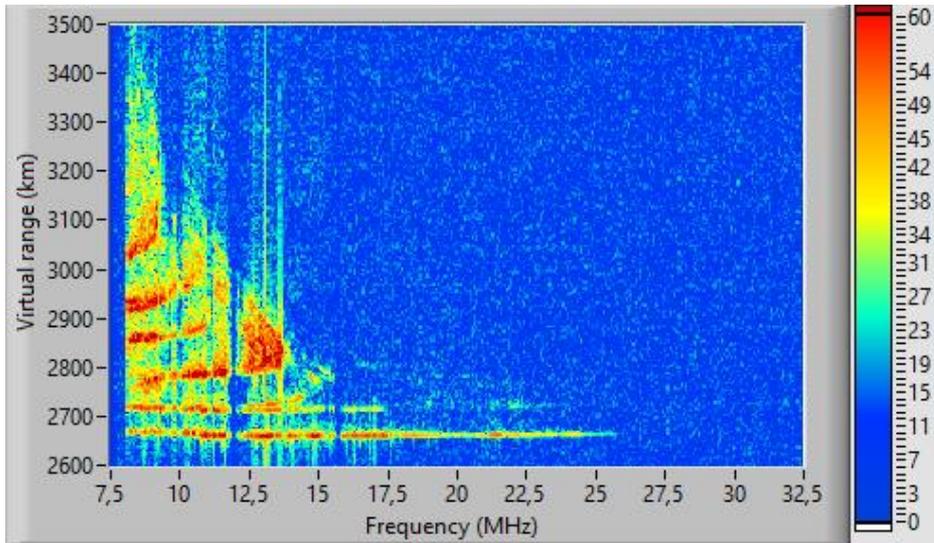
Количество ячеек скользящего окна	21
Количество тестируемых ячеек	12
Количество защитных ячеек	8
Частота ложных срабатываний	0,001

— Отсчёты ПЗМ    — Порог    • Выделенный сигнал



# Результат работы алгоритма CA-CFAR

Ионограммы, до (сверху) и после (снизу) применения алгоритма CA-CFAR



## Выводы:

- ✓ Разработанные новые алгоритмы для универсального цифрового ионозонда верифицированы в ходе натурных экспериментов при зондировании FMCW, FMICW и DSSS сигналами радиотрасс о. Кипр – г. Йошкар-Ола, г. Йошкар-Ола – г. Йошкар-Ола.
- ✓ Визуальная оценка ионограмм, к которым были применены исследуемые алгоритмы, говорит о способности алгоритмов подавлять мощные сосредоточенные помехи и фоновый шум, что позволяет эффективно использовать их в решении задачи оптимального приёма сигнала.
- ✓ На следующем этапе планируется апробировать разработанные алгоритмы на ионограммах, полученных при различных геофизических условиях и получить количественные оценки их эффективности.