

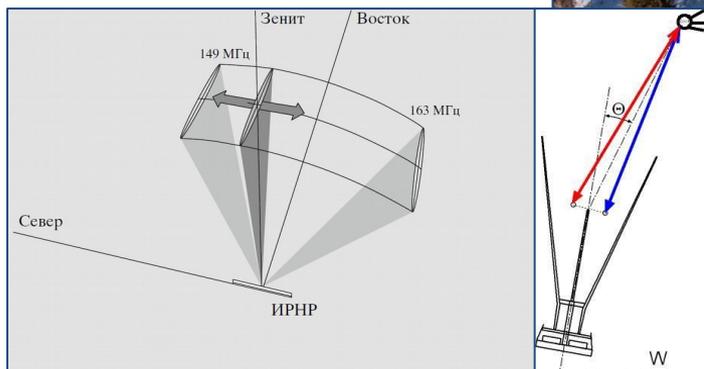


# Обработка данных наблюдения за космическими объектами в реальном времени с помощью GPU

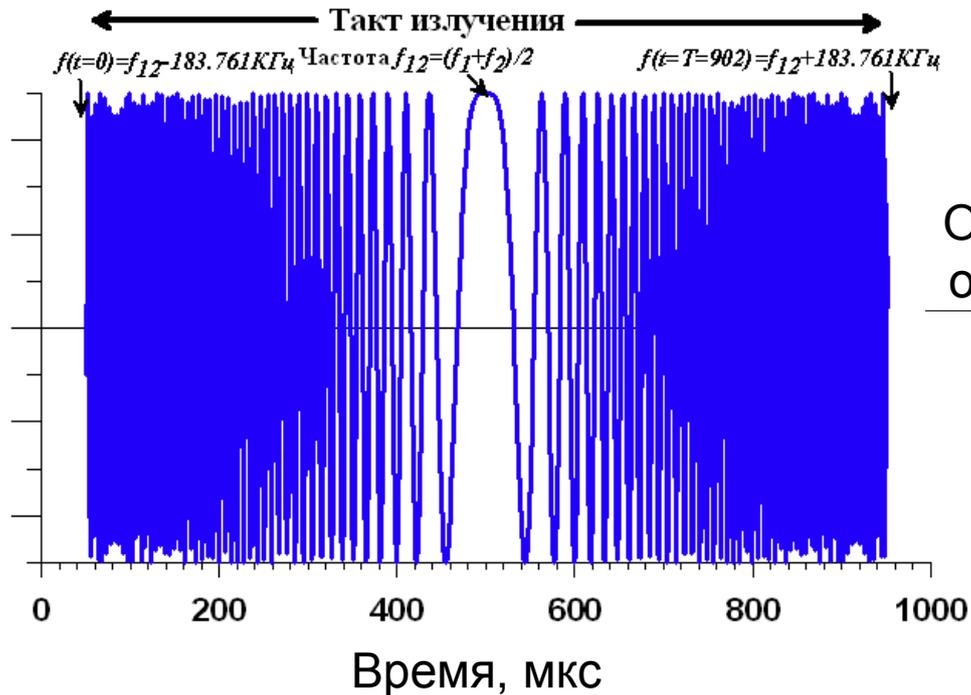
А.Г. Сетов, В.П. Лебедев, Д.С. Кушнарев

# Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР)

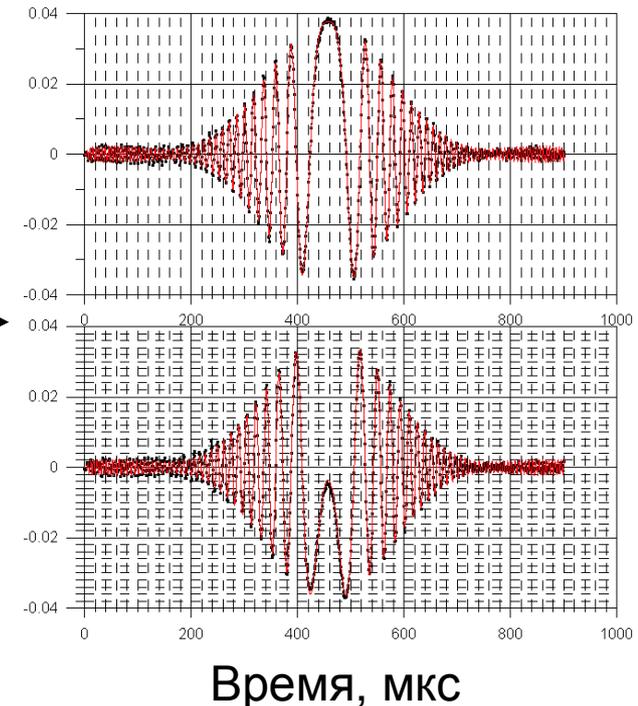
- Рупорная антенна 246×12 м
- 2 полурупора
- $f = 154\text{-}162$  МГц
- Частотный принцип сканирования
- Наклонение луча на  $30^\circ$  на юг
- Поляризационный фильтр
- $P_t \leq 3$  МВт
- Луч  $0.5^\circ \times 10^\circ$



- Наблюдаются **космические объекты** на высотах от 200 до 3000 км
- В качестве импульса используются сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ),  $\Delta f = 367$  кГц



Отражение  
от объекта



# Частотное сканирование и ЛЧМ

- Диаграмма направленности сканирует небольшой диапазон углов за время излучения ЛЧМ импульса
- $\Delta f = 367 \text{ кГц} \rightarrow \Delta \varepsilon \approx 1.3^\circ$
- Расположение объекта в лепестке диаграммы определяет положение максимума в принятом сигнале

Синфазная  
компонента

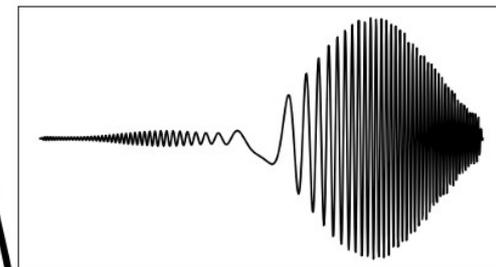
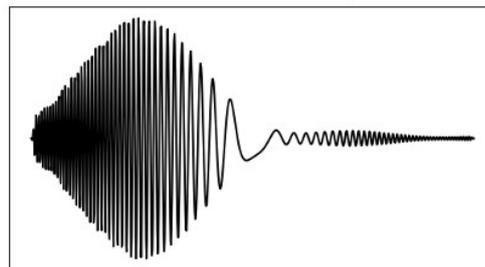
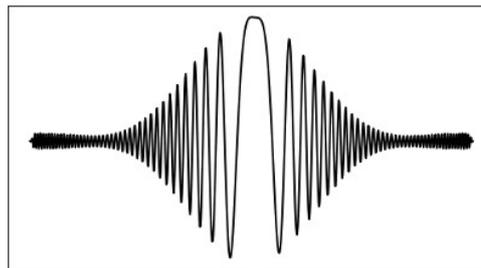
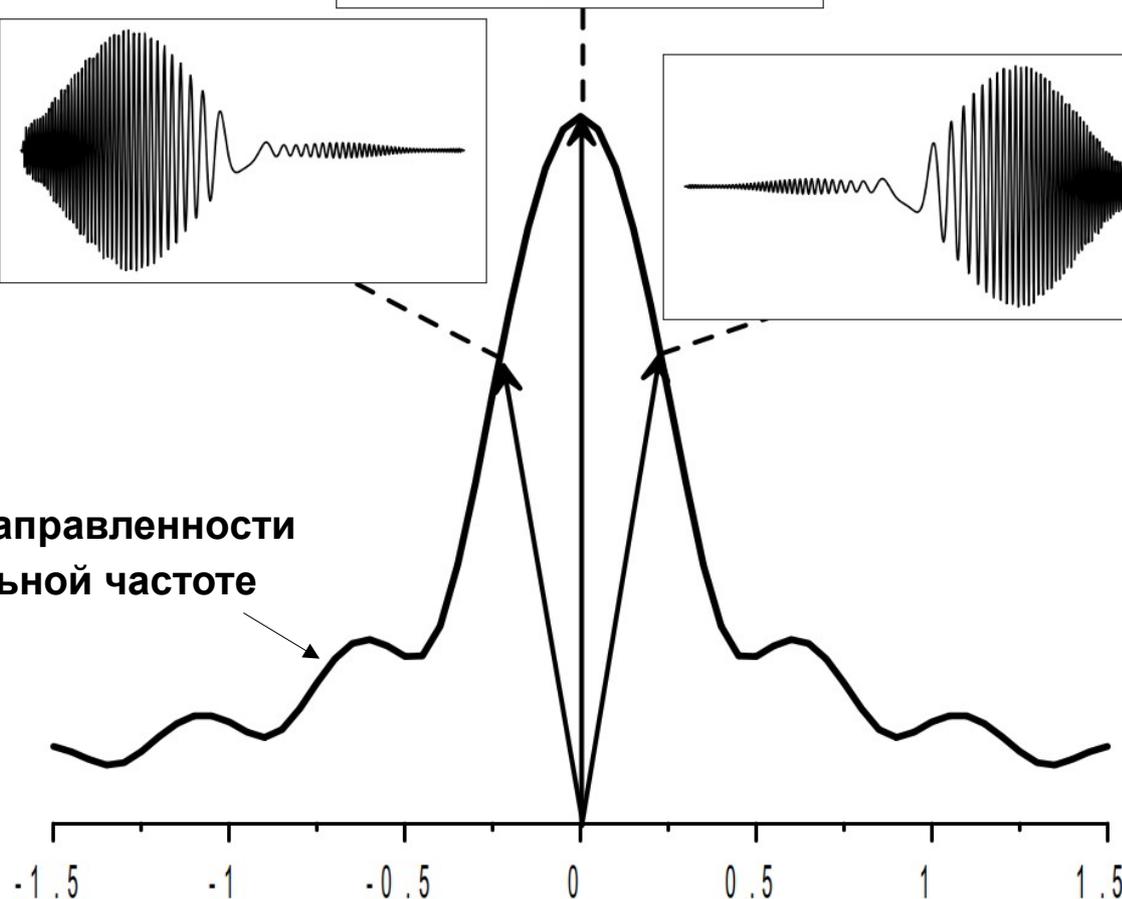


Диаграмма направленности  
на центральной частоте

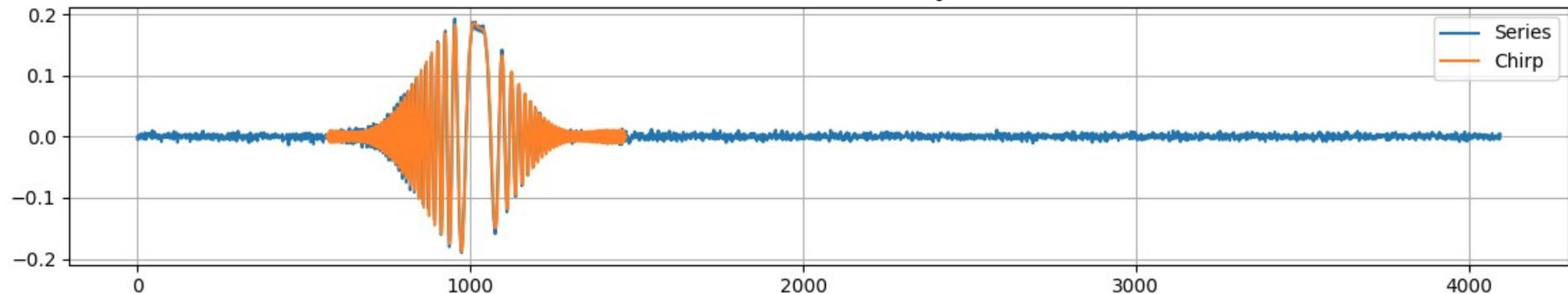


# Алгоритм обработки обратного сигнала

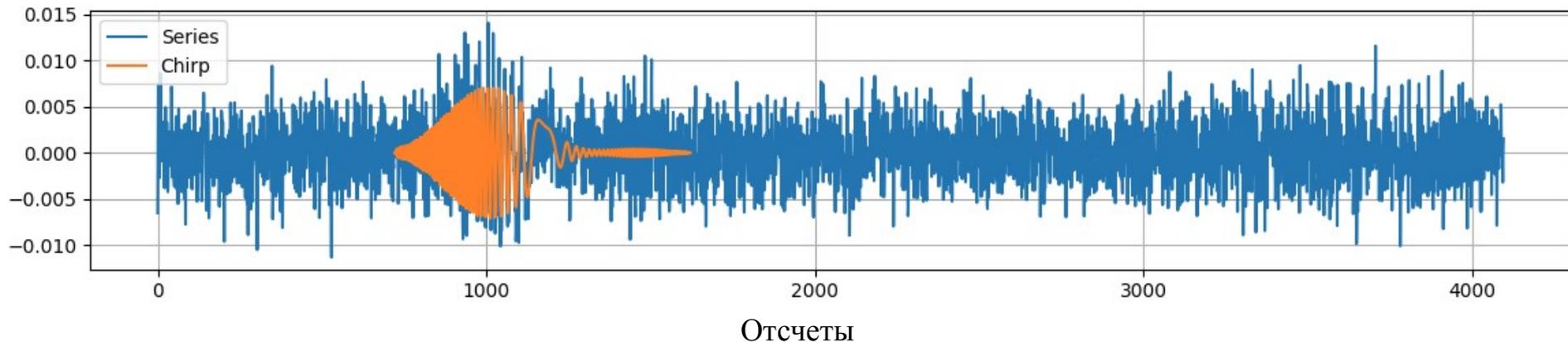
- 1 этап — первоначальный поиск задержки до отраженного импульса
- 2 этап — поиск оптимального модельного ЛЧМ импульса и уточнение задержки
- 3 этап — фильтрация и вычисление параметров объекта

# 1 этап: Первоначальный поиск задержки

Высокий сигнал/шум



Низкий сигнал/шум — помехи затрудняют поиск задержки



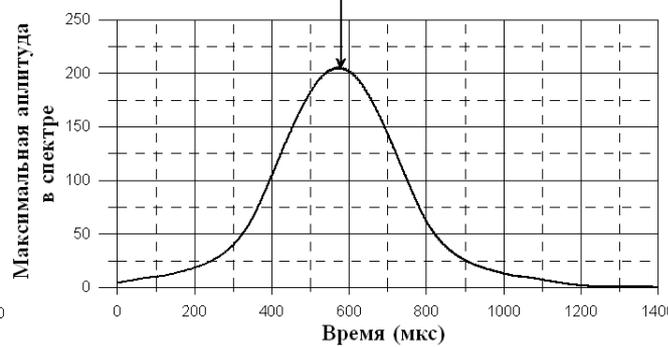
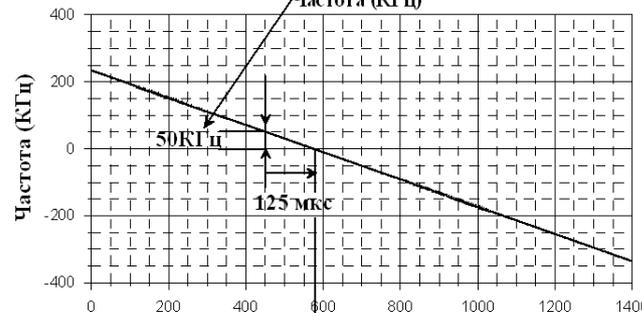
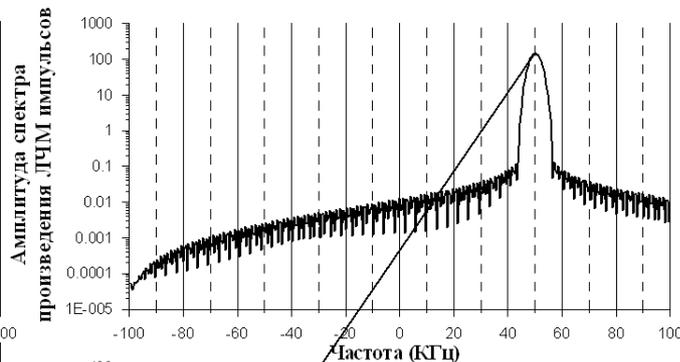
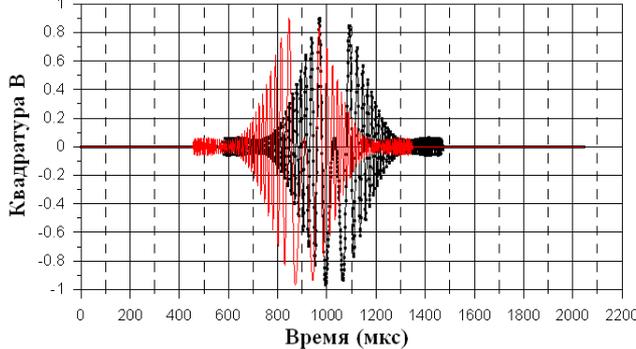
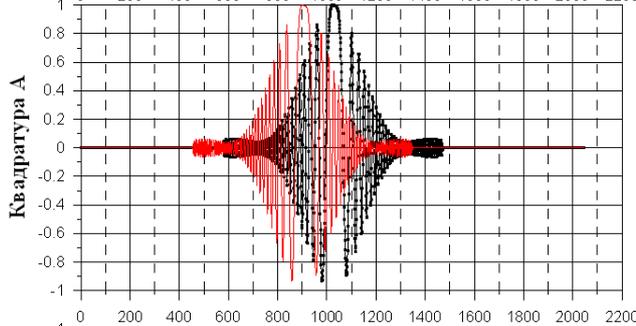
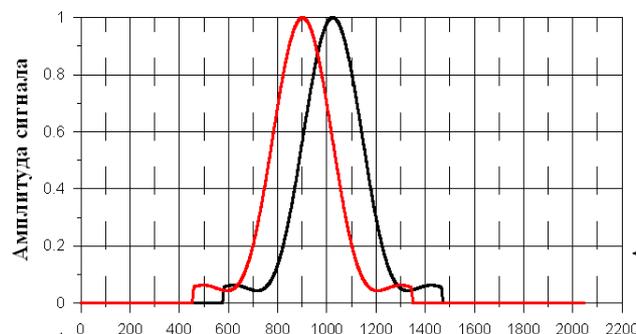
# 1 этап: Алгоритм поиска задержки

**Красный** — некоторый модельный ЛЧМ сигнал  
**Черный** — принятый ЛЧМ сигнал

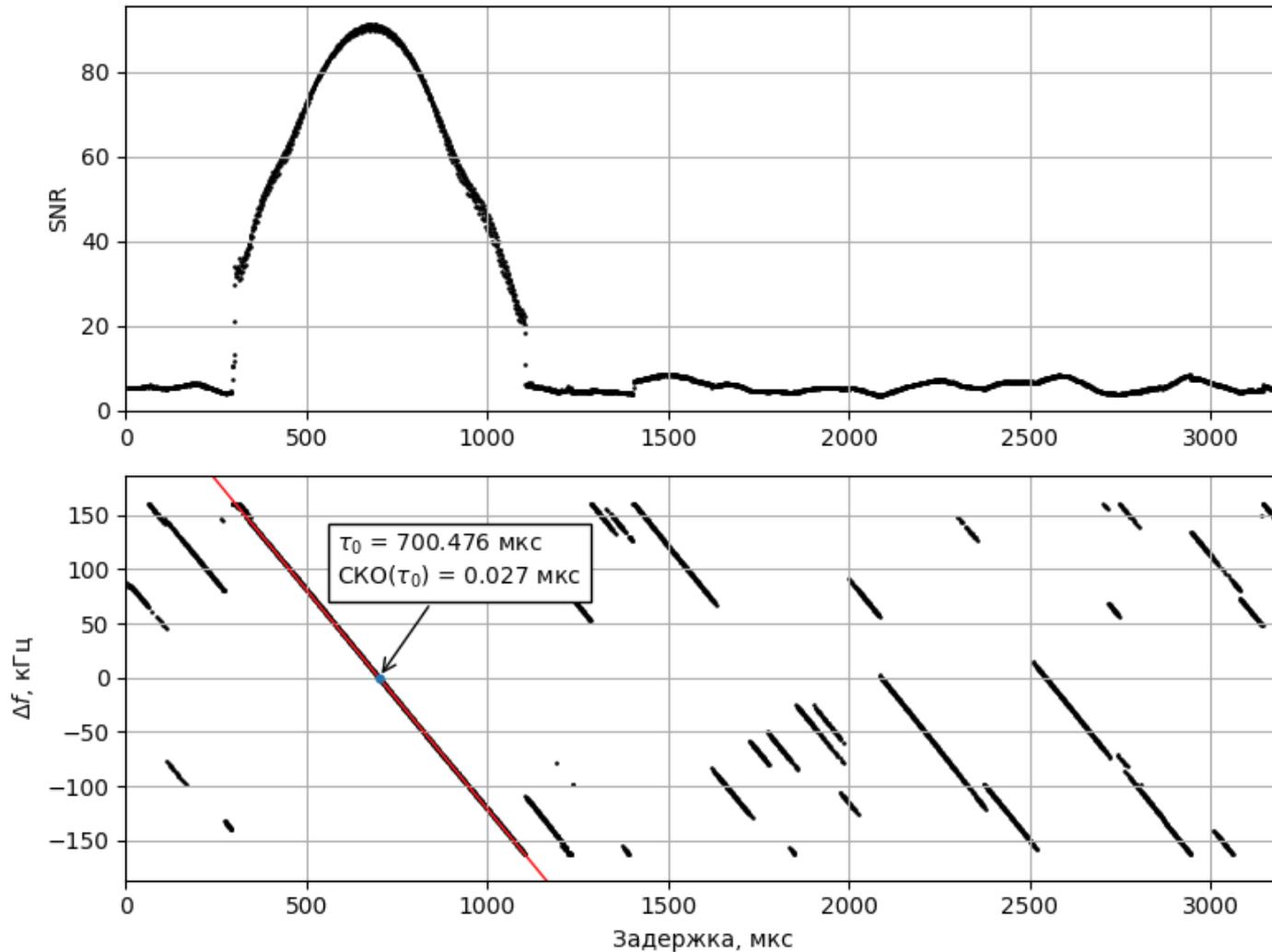
Спектр произведения двух ЛЧМ импульсов смещен на величину, пропорциональную задержке:

$$\tau = \frac{2\pi \Delta f}{\beta}$$

Так как одиночная оценка частоты может быть неточной, найдем  $\Delta f$  для всех возможных смещений. Далее по МНК найдем параметры линии  $\Delta f(\tau)$ .

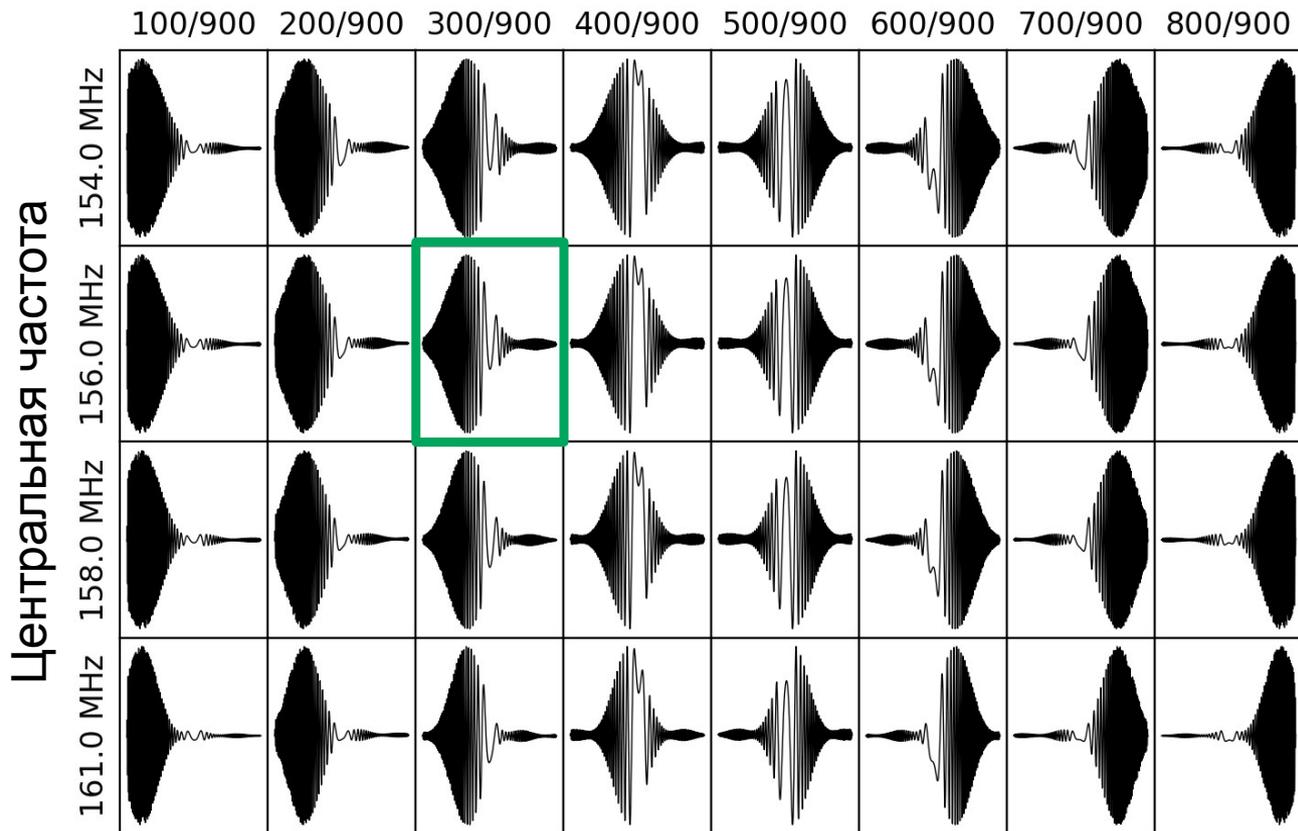


# 1 этап: Пример поиска задержки



## 2 этап: Поиск оптимального ЛЧМ импульса

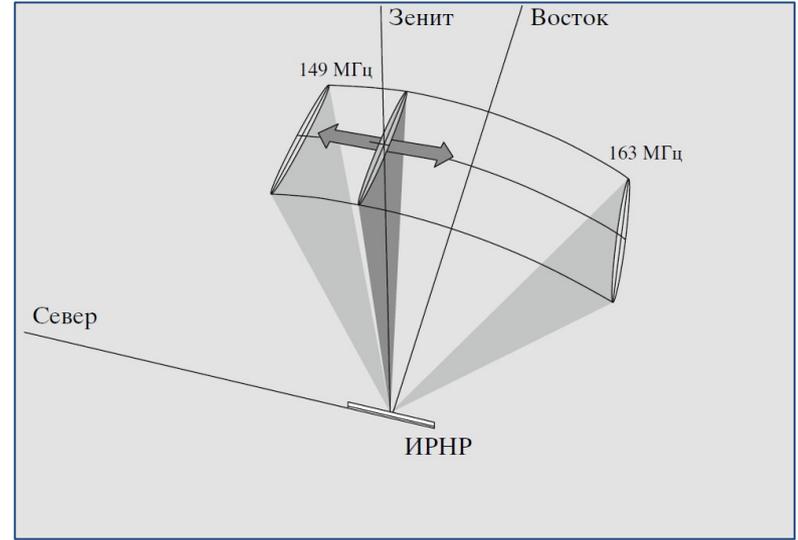
- Имеется массив модельных ЛЧМ импульсов, соответствующих обратному сигналу от точечного объекта  
Для каждой центральной частоты — по 900 импульсов для каждого возможного положения объекта
- Путем перебора определяется положение объекта внутри импульса и уточняется задержка



Всего 9000 частот × 900 положений ≈ 108 Гб в памяти

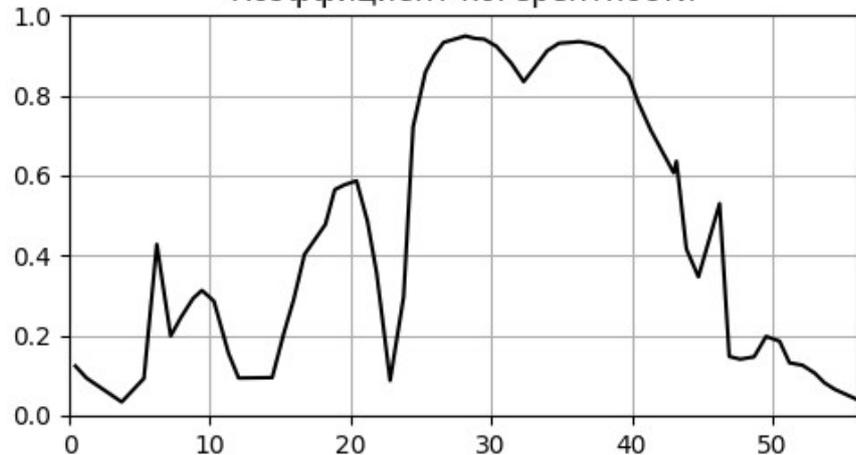
# 3 этап: Фильтрация и вычисление параметров объекта

- Фильтрация по уровню сигнал/шум
- Выбор одной из сканирующих частот
- Вычисление параметров объекта:
  - амплитуда сигнала
  - коэффициент когерентности
  - расстояние до объекта
  - угла места и азимут в системе координат радара

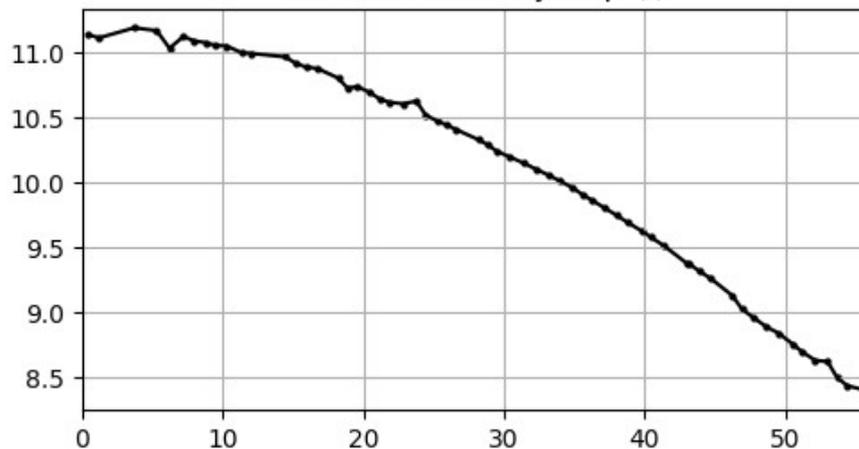


# STARLINK-1261 (Norad 45571)

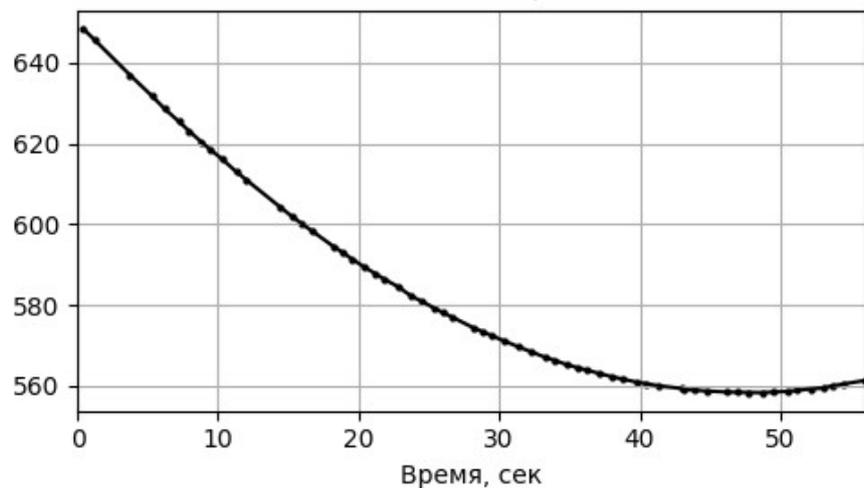
Коэффициент когерентности



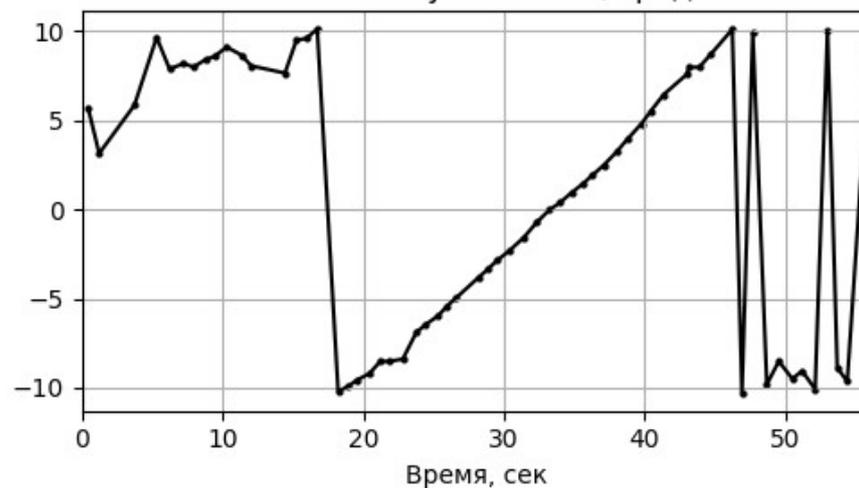
Антенный азимут, град



Расстояние, км

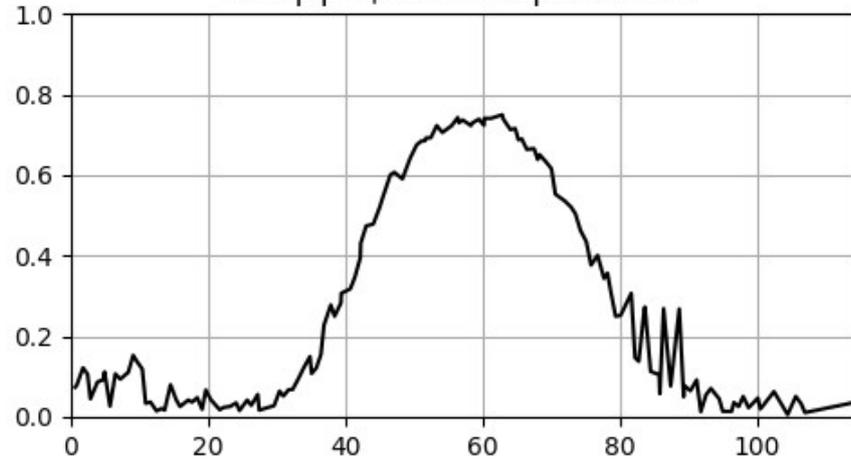


Антенный угол места, град

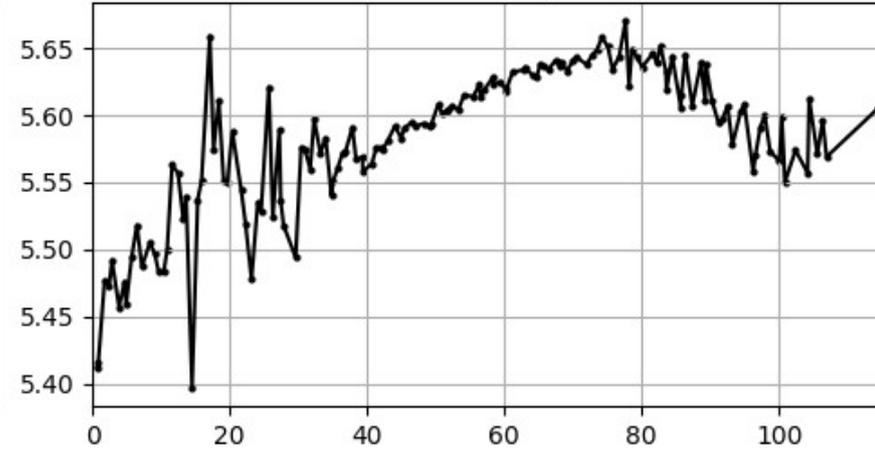


# GLOBALSTAR M073 (Norad 37193)

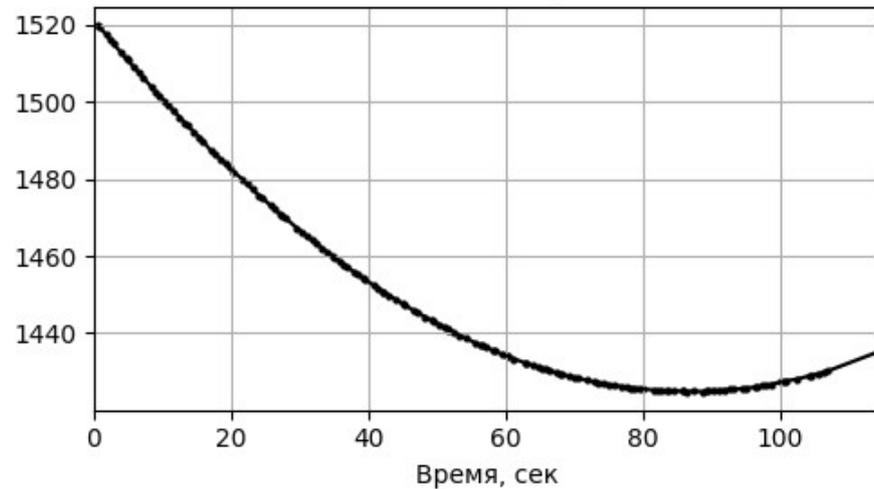
Коэффициент когерентности



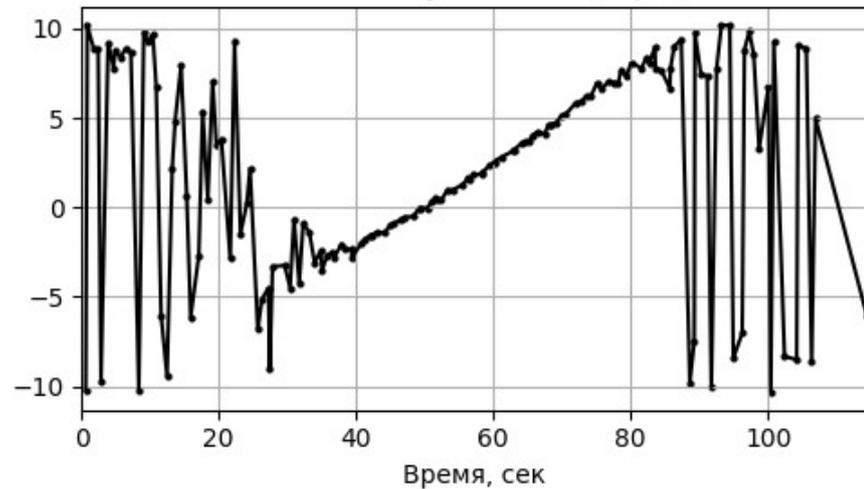
Антенный азимут, град



Расстояние, км



Антенный угол места, град



# Вычислительная сложность

- 1 этап алгоритма: Развертка 4096 точек, импульс 900 точек, всего 3196 возможных задержек, нужно найти спектр комплексного произведения длиной 900 точек
- 26 млн. операций умножения и 13 млн. операций суммирования
- Частота повторения импульсов достигает 24.4 Гц, поэтому обработать импульс нужно за ~41 мс
- Всего требуется около 600 GFLOPS
- 2 этап требует в 5 раз больше вычислений
- Производительность лучших процессоров достигает 500 GFLOPS



# Вычисления на GPU



- Современные видеокарты обладают тысячами ядер
- Дешевле и проще, чем многопроцессорные распределенные системы
- Достаточно обычного персонального компьютера
- Много библиотек для разных языков программирования

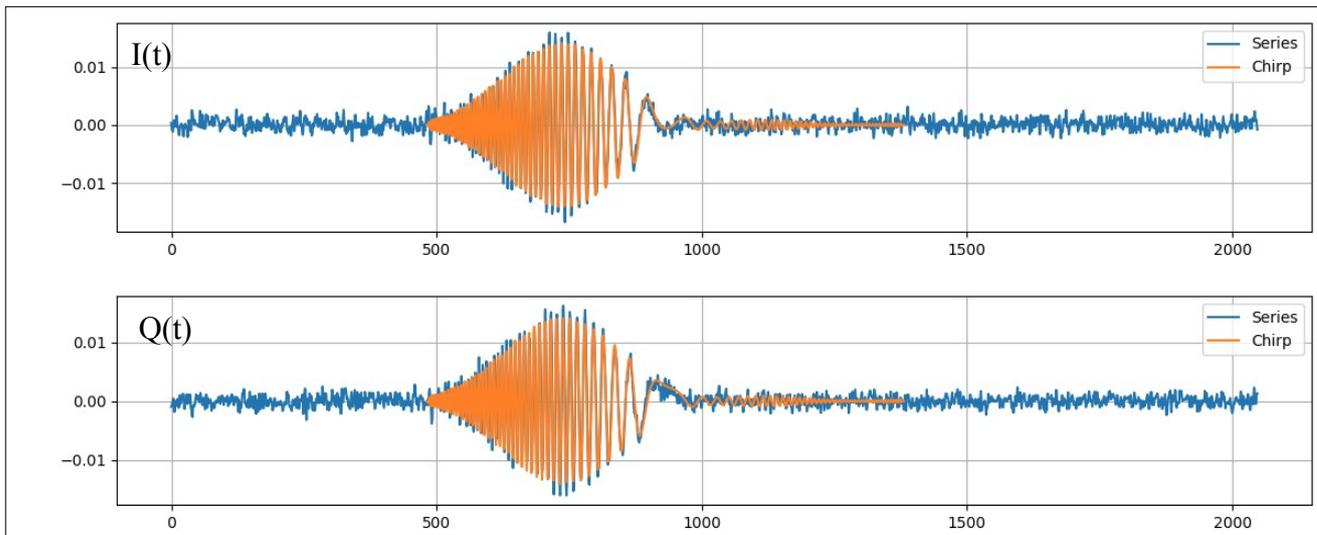


# Библиотека Tensorflow

- Бесплатная библиотека для упрощения вычислений на CPU, GPU и распределенных системах
- Изначально эта библиотека для машинного обучения, но включает в себя множество удобных математических операций
- Можно использовать из Python, C, C++, JS и Java. Поддержка многих других языков реализована сообществом.
- Видеокарта должна поддерживать CUDA =>



# **Результаты модернизации**



## Увеличение длины развертки



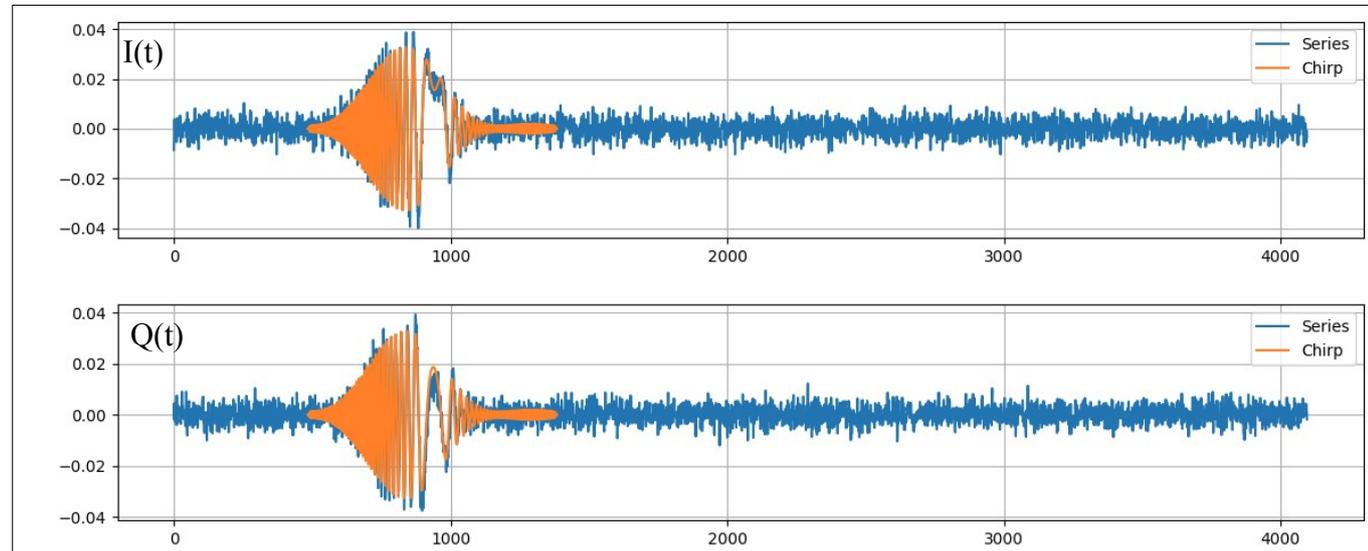
Было                  Стало

2048 мкс → 4096 мкс

~307 км → ~614 км

Проводились успешные тесты  
работы с разверткой 8192 мкс  
(1228 км)

Старая обработка 2048 точек



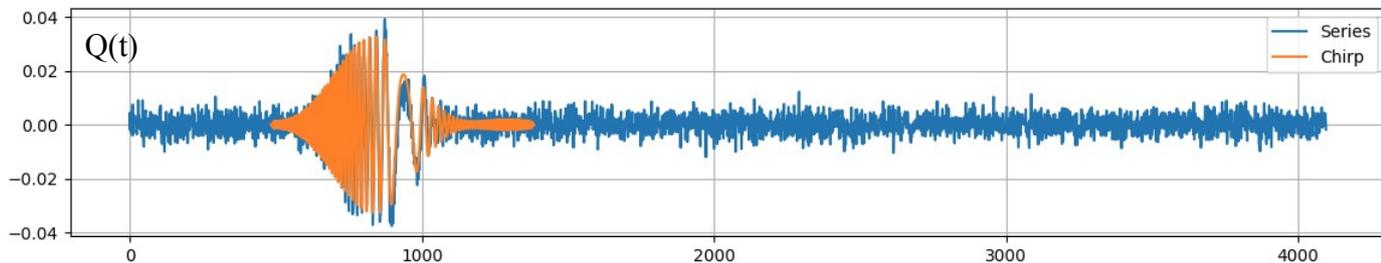
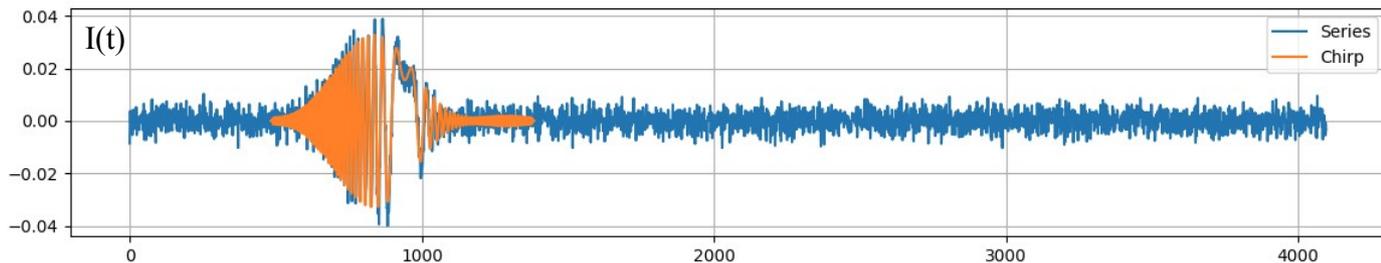
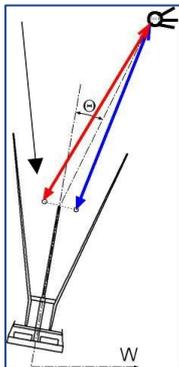
Новая обработка 4096 точек

## Одновременная обработка двух каналов

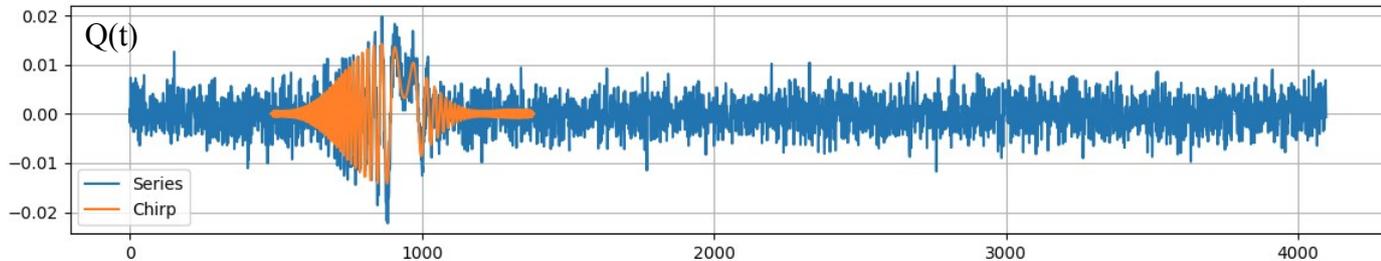
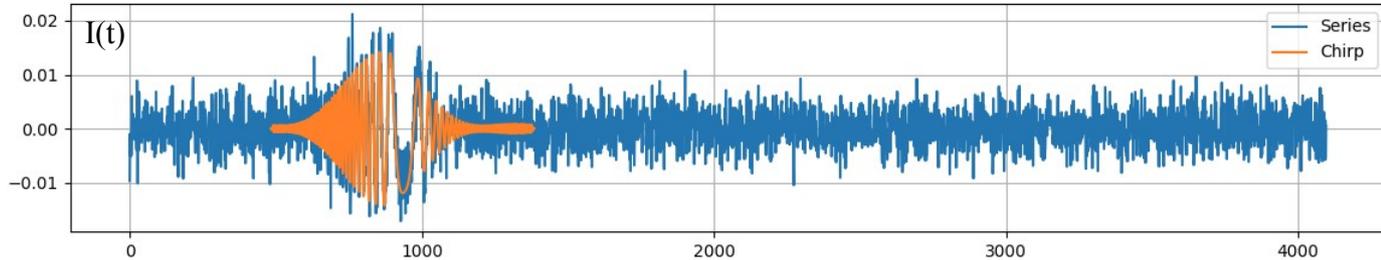
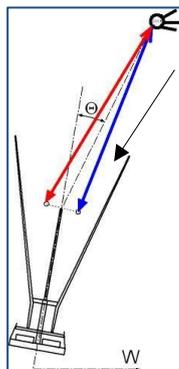


- больше данных
- возможность фильтрации
- по схожести каналов

Канал верхнего полурупора

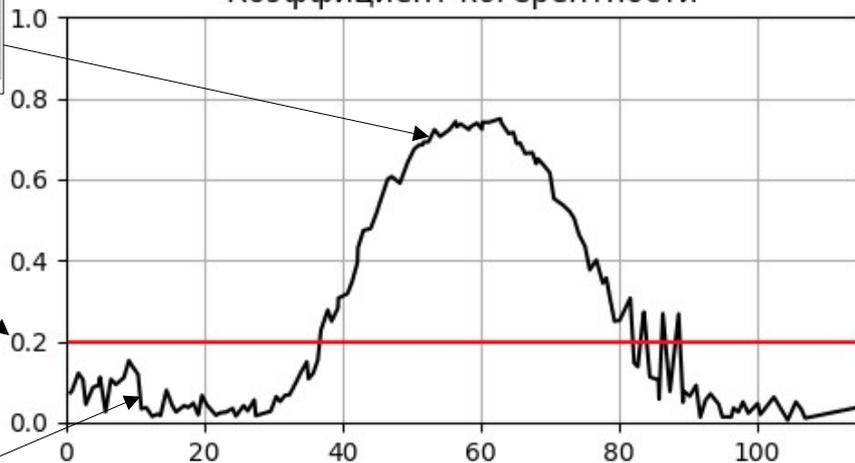


Канал нижнего полурупора

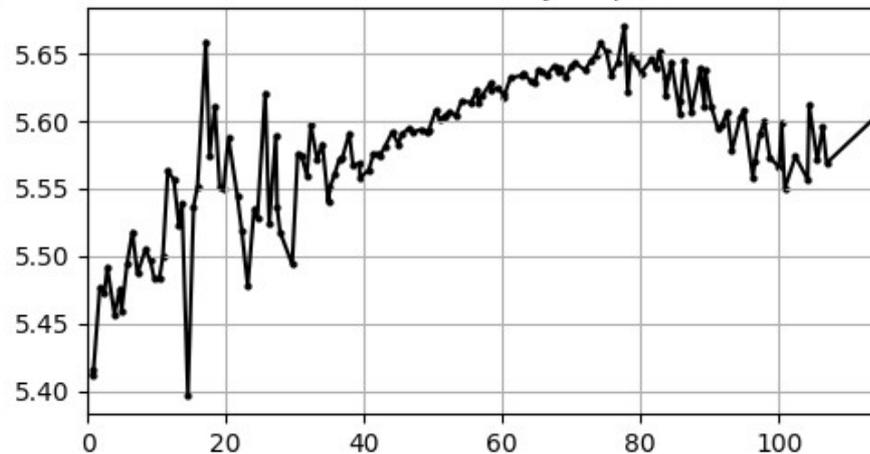


# GLOBALSTAR M073 (Norad 37193)

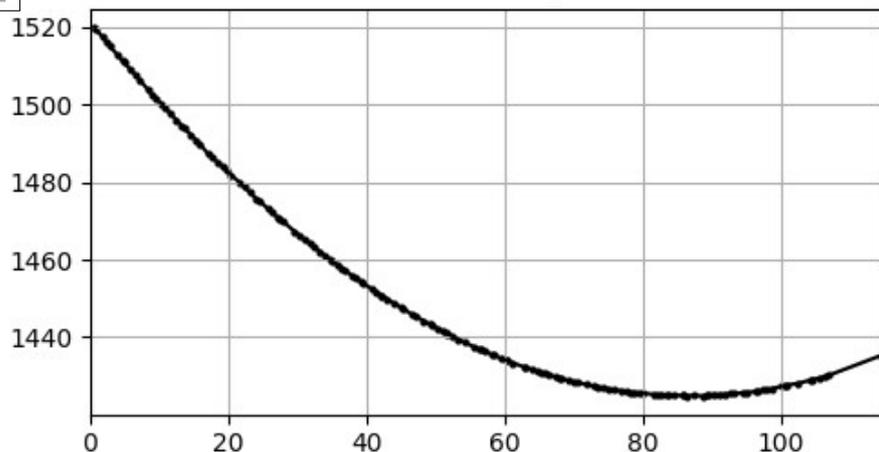
Коэффициент когерентности



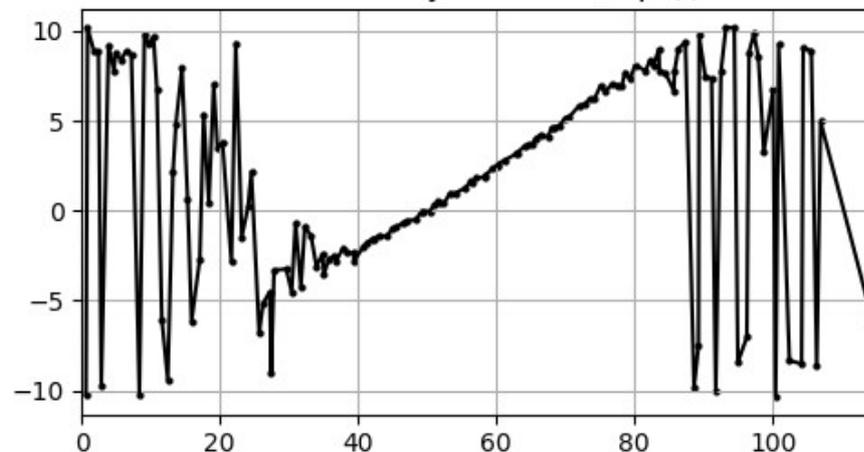
Антенный азимут, град



Расстояние, км



Антенный угол места, град



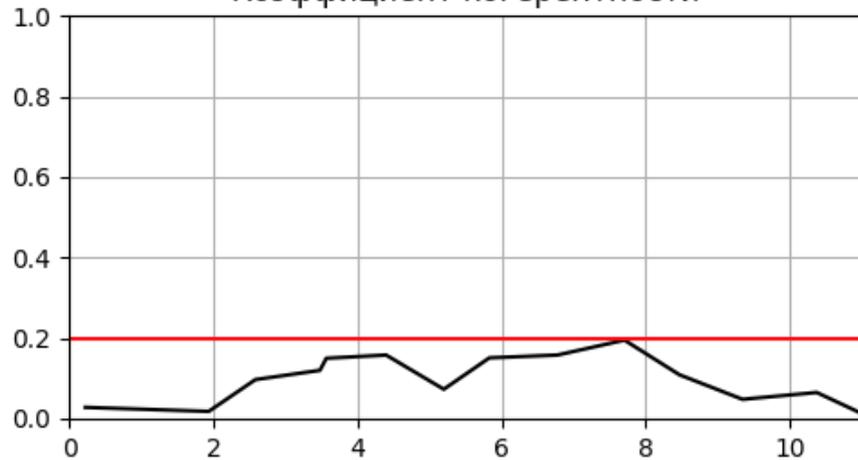
Получение  
данных ниже  
порога  
фильтрации

Время, сек

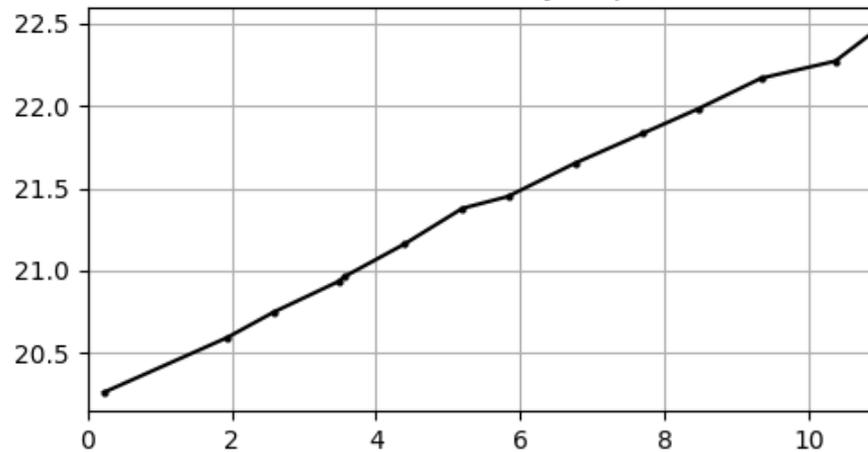
Время, сек

# SPATIUM-I (Norad 43638)

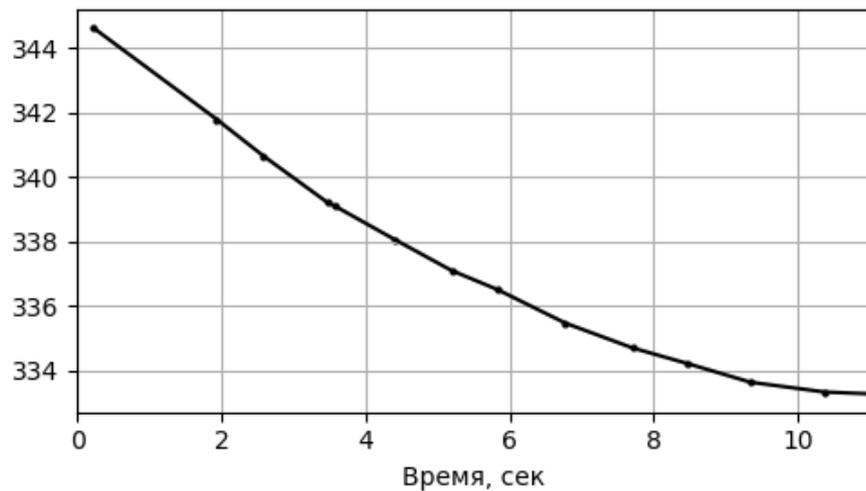
Коэффициент когерентности



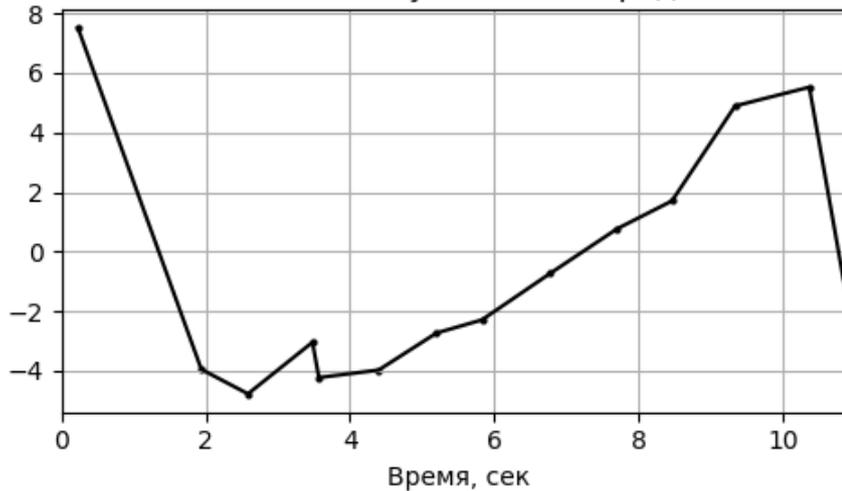
Антенный азимут, град



Расстояние, км



Антенный угол места, град

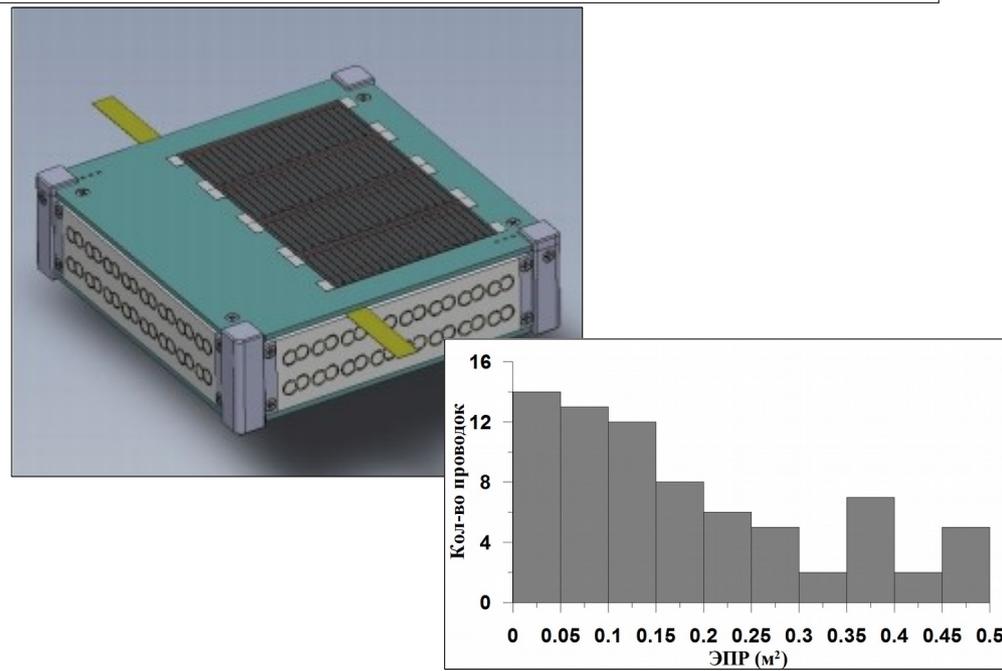
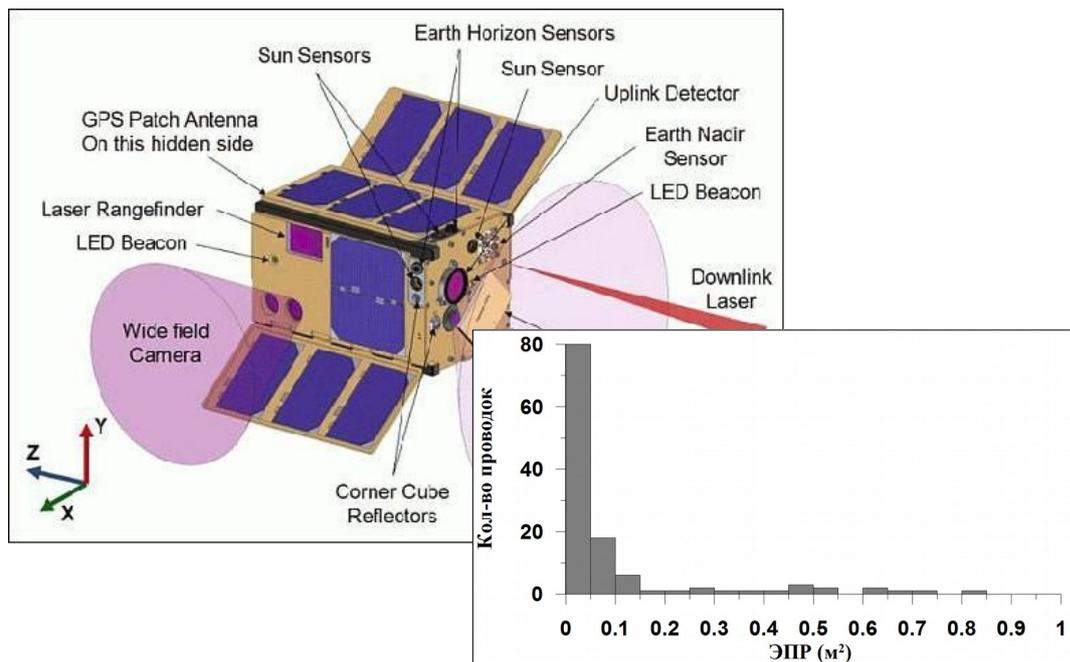


# Количественное сравнение

- За период с 03.2021 по 07.2021 измерения в новом режиме проводились 53 дня
- Всего наблюдалось 22137 проводок идентифицированных космических объектов
- Из них использование GPU позволило удлинить наблюдаемый трек для 14400 проводок (65%)
- Для 5141 проводок (23%) трек был существенно удлинен (добавлено >30% точек)
- 1576 объектов (7%) удалось обнаружить только благодаря GPU\*
- Эти 7% представляют большой интерес, так как это малозаметные объекты

# Примеры наблюдаемых объектов

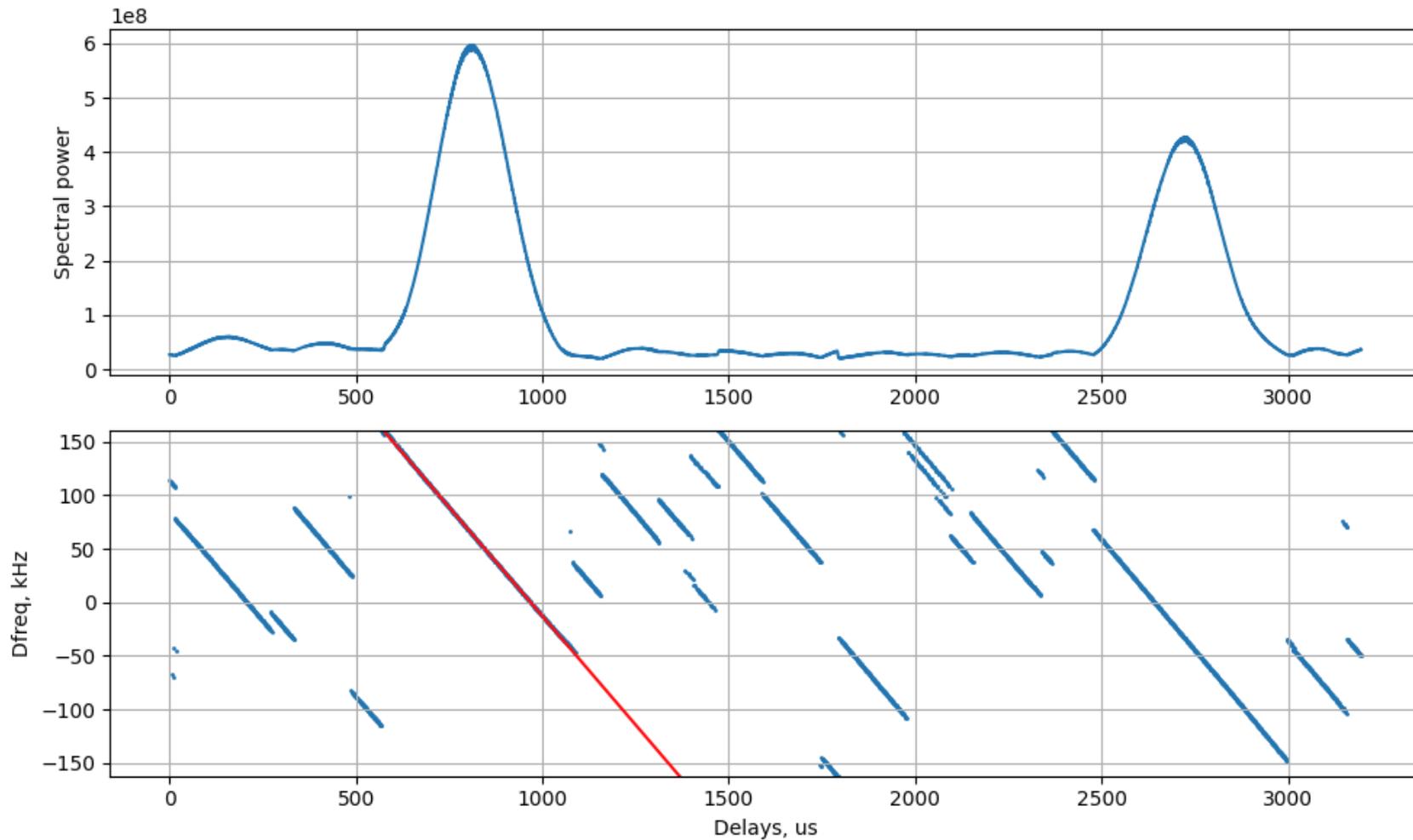
AeroCube	SpaceBEE
Размеры 10x10x15 см	Размеры 10x10x2.8 см
Дальность 450-550 км	Дальность 500-600 км
Масса от 1.5 кг	



# Спасибо за внимание!

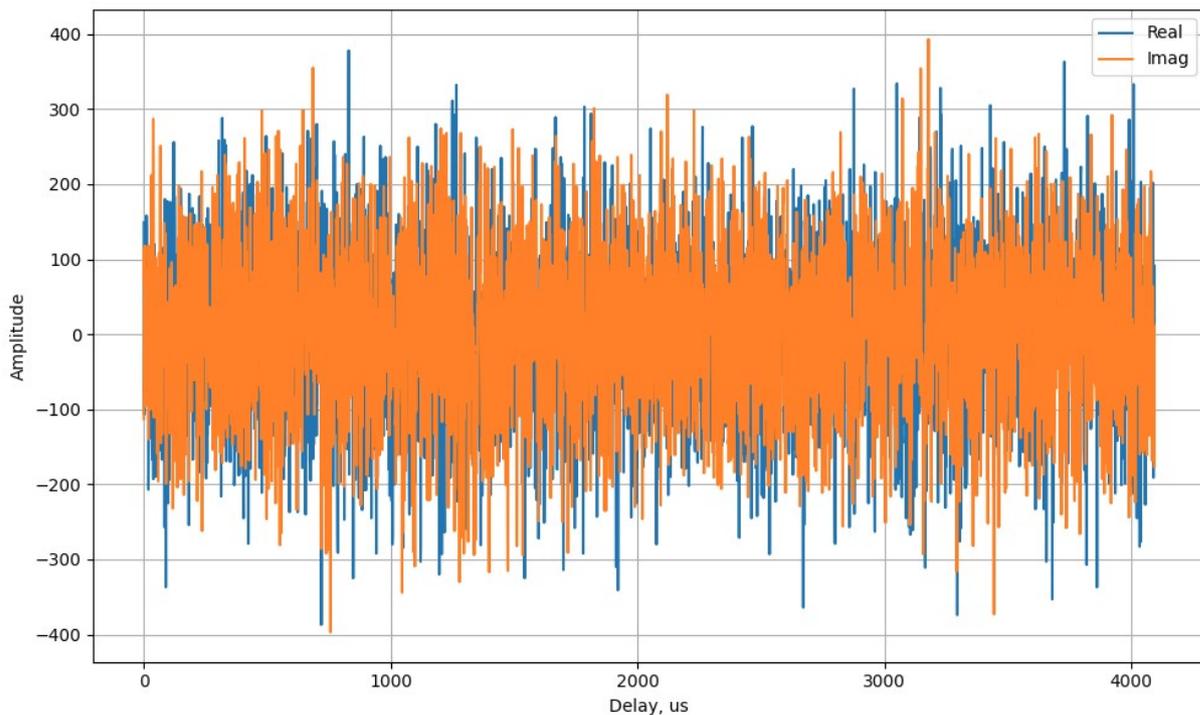
Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 20-05-00580 А. Результаты наблюдений были получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>] в рамках базового финансирования программы ФНИ И.12.

# Нерешенные проблемы: разделение двух объектов



# Нерешенные проблемы: разделение двух объектов

Принятый сигнал



Все спектры комплексных  
произведений

