

Корреляционная обработка РСДБ-наблюдений

Суркис И.Ф.

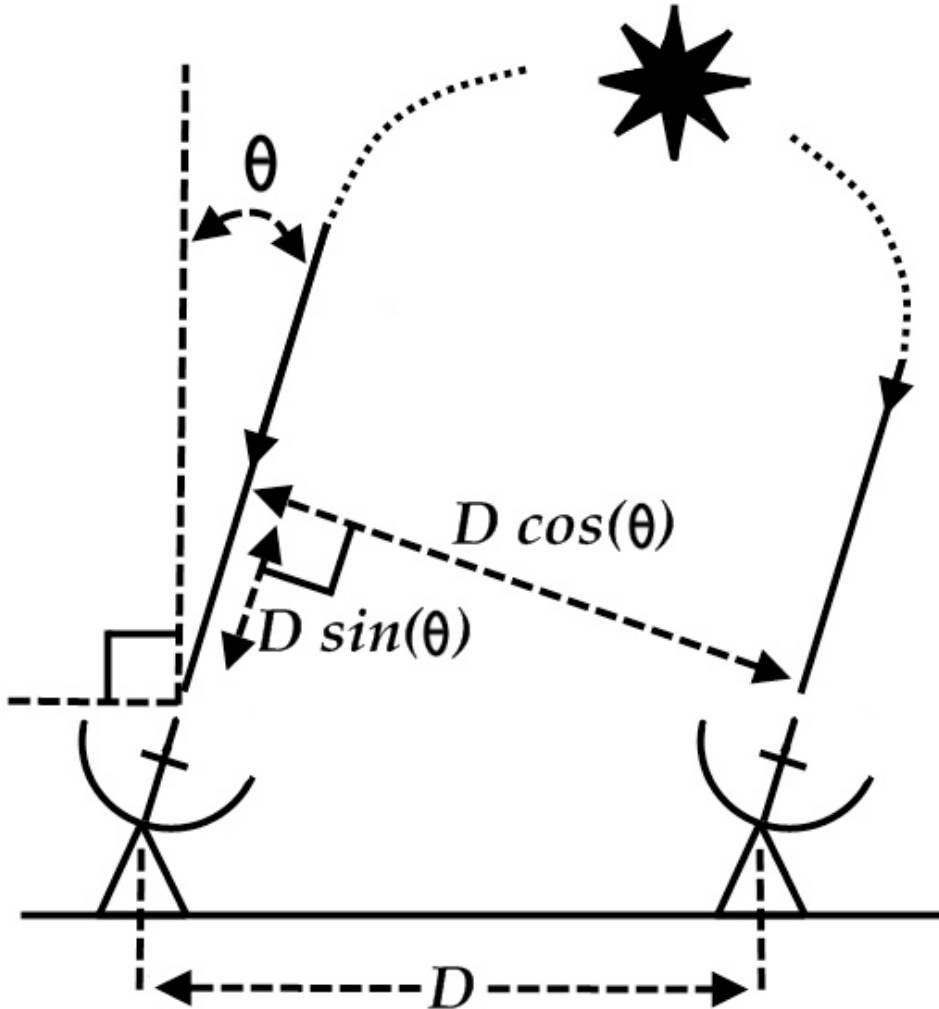
Квазары с точки зрения астрометриста

- Источники мощного радиоизлучения
- Удалены на большое расстояние от Земли – мегапарсеки, а значит могут считаться практически неподвижными на небесной сфере
- Являются хорошим репером для определения координат наземных станций ПВЗ
- Если уже известны координаты наземных станций и ПВЗ то из РСДБ можно определять координаты квазаров



- Измерение угла между ориентацией базы и направлением на квазар с точностью $(\text{ошибка_определения_задержки})/(\text{длина_базы})$
Например, для ошибки 4 мм и базы Бадары-Зелечукская 4000км - 1 нанорадиян
- Измерение длин баз с точностью миллиметры

Домашнее задание

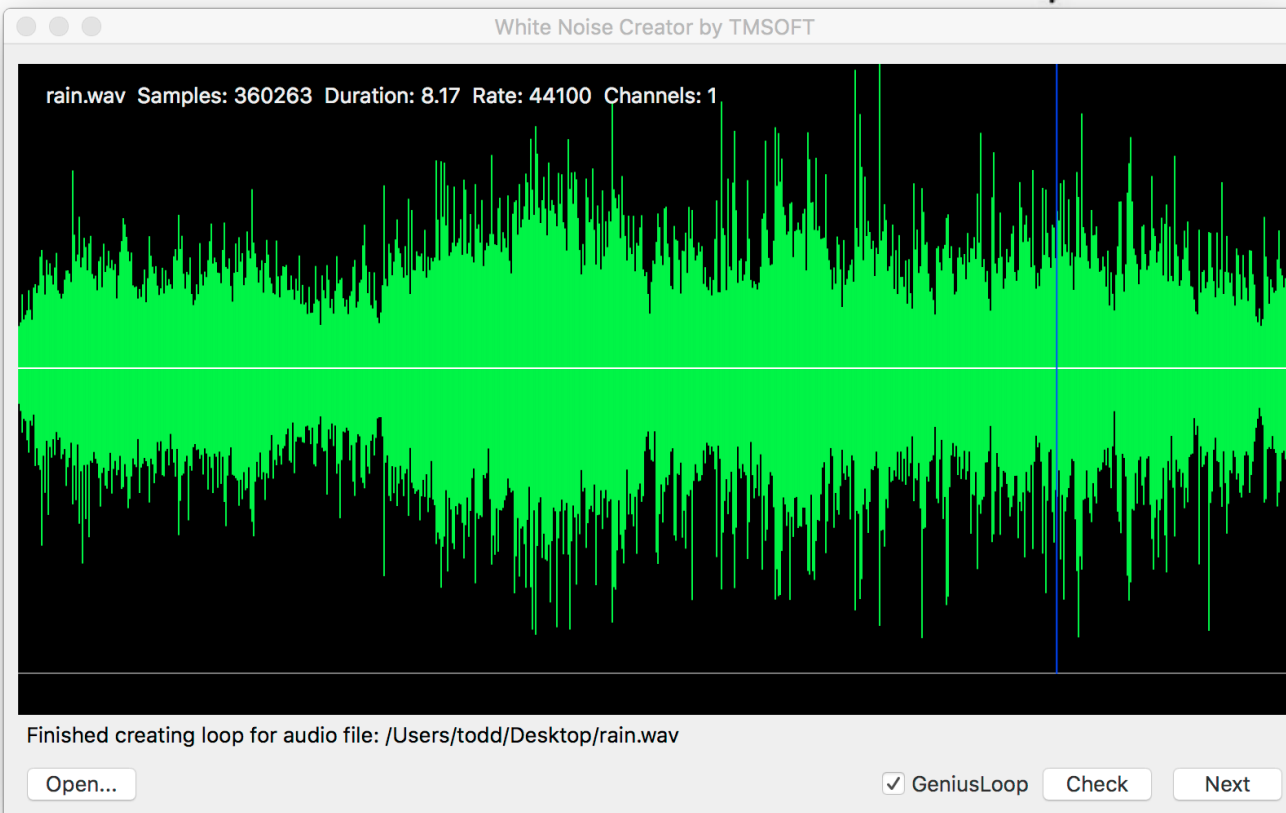
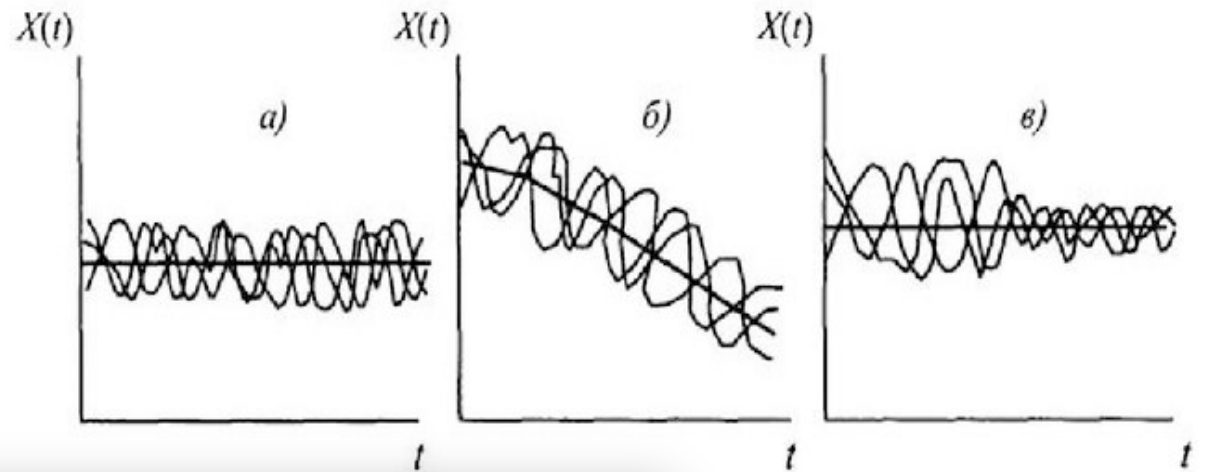


- Самостоятельно подумать: на каких углах лучше определять длину базы, на каких – сам угол
- Для настойчивых – вывести формулы ошибки определения длины базы (известны ошибка определения задержки, метры, начальная длина базы, начальный угол)

Принимаемые антеннами сигналы

- Сигнал квазара – белый шум
- Антенна (каждая) регистрирует
 - Сигнал квазара
 - Шумы атмосферы
 - Шумы приемной аппаратуры собственно антенны
- Задача коррелятора – определить задержку между приходами радиосигнала квазаров (белого шума) – на антенны базы

Случайные процессы



Характеристики случайных процессов

- Среднее $\bar{x} = \frac{1}{T} \int x(t) dt$

- Дисперсия (мощность сигнала)

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{T} \int (x(t) - \bar{x})^2 dt \quad \sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

- Среднеквадратическое отклонение (СКО)

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2}$$

Понятие корреляции

- Есть два сигнала $x(t), y(t), t \in [0, T]$

$$x(t) = (x_1, x_2, \dots, x_N) \quad y(t) = (y_1, y_2, \dots, y_N)$$

- Корреляция двух сигналов
$$Corr(x, y) = \frac{\frac{1}{T} \int (x(t) - \bar{x})(y(t) - \bar{y}) dt}{\sigma_x \sigma_y}$$

$$Corr(x, y) = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y}$$

- Корреляция с задержкой
$$Corr(x(t), y(t - \tau)) = \frac{\frac{1}{T} \int (x(t) - \bar{x})(y(t - \tau) - \bar{y}) dt}{\sigma_x \sigma_y}$$

- Автокорреляция
$$Auto_Corr(x, \tau) = \frac{\frac{1}{T} \int (x(t) - \bar{x})(x(t - \tau) - \bar{x}) dt}{\sigma_x \sigma_y}$$

Корреляция разных сигналов

Корреляции:

$$\text{Corr}(\sin(\omega t), \sin(\omega(t - \tau))) = \cos(\tau)$$

$$\text{Corr}(\sin(\omega t), -\sin(\omega(t - \tau))) = -\cos(\tau)$$

$$\text{Corr}(\sin(\omega t), \sin(100\omega t)(t - \tau)) \approx 0$$

Белый шум ни с кем не коррелирует кроме самого себя, причем

$\text{Auto_corr}=1$ при $\tau=0$ и 0 для любых других τ

Значит для нахождения τ надо перебрать корреляции

$$\text{Corr}(x, y) = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N x_i y_{i-j}}{\sigma_x \sigma_y}$$

и найти такое j при котором корреляция максимальна

Ура????????

Домашнее задание

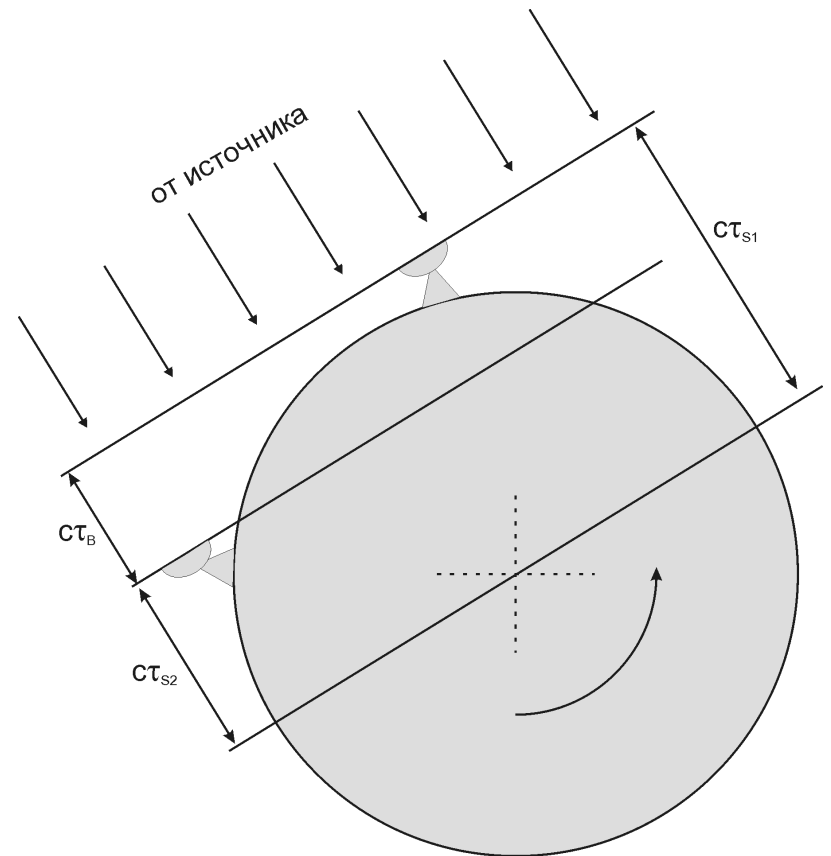
(для любознательных программистов)

На компьютере имитировать радиоинтерферометр

1. С помощью генератора случайных чисел (в C функция `random`) создать три выборки шумов A , B , C тысяч на десять точек
2. Имитировать регистрация сигнала двумя антеннами:
 $S1=A+B$ и $S2=A+C$,
 A имитирует сигнал квазара,
 B и C – шумы атмосферы и приемной аппаратуры станций 1 и 2
1. Вычислить корреляцию между $S1$ и $S2$ для нескольких точек вблизи нуля
2. Повторить пункты 2 и 3 смещая сигнал A на несколько точек.
Посмотреть как смещается корреляционный отклик
3. Повторить пункты 2 и 3 введя коэффициент мощности: $S1=qA+B$ и $S2=qA+C$, $q=0.5, 0.25, 0.1$ Посмотреть как меняется корреляция

Проблемы коррелирования

1. Изменение задержки во времени
2. Допплеровский сдвиг
3. Большое количество точек



Сопровождение сигналов по задержке и доплеру

- Нужно уменьшить требуемое количество вычисляемых точек в корреляционной функции до разумных пределов (например пары тысяч) и убрать доплеровское смещение
- Предвычисляются задержки (с некоторой начальной точностью)
- Сигналы смещаются по времени и доплеровскому сдвигу и только после этого коррелируются
- Сопровождение по времени: начальное смещение потока данных на некоторое количество точек, затем добавление или удаление из потока данных отдельных точек
- Сопровождение по доплеру... подобное вы будете изучать на втором-третьем курсах ВУЗа 😊

$$x(t) \rightarrow \begin{pmatrix} x(t) \cos \varphi_d(t) \\ x(t) \sin \varphi_d(t) \end{pmatrix}, \quad \varphi_d(t) = 2\pi f_c \tau(t)$$

Отношение сигнал/шум коррелятора

- При реальном вычислении корреляционной функции всегда будет некоторая шумовая подложка
- Если коэффициент корреляции мал – он утонет в шумовой подложке
- Отношение сигнал/шум коррелятора – отношение корреляционного пика к уровню шумовой подложки – пропорционально корню из количества точек $\sqrt{N}$

Объемы данных

- Мощность сигнала измеряется в долях (редко больше 1) Янских
 $1 \text{ Я} = 10^{-26} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{Гц})$
- Соответственно чтобы накопить достаточное соотношение сигнал/шум надо быстро и много регистрировать данные

Типичные величины (при двухбитовом квантовании)

- Радиотелескоп РТ-32:
 - скан 60 секунд, частота квантования 16 МГц, $N=960 \times 10^6$ точек
 - до 16 каналов
 - 256 Мбит/с, объем скана 2 Гбайта, объем часовой сессии наблюдений с каждой станции 40 Гбайт
- Радиотелескоп РТ-13:
 - скан 10 секунд, частота квантования 1024 МГц, $N=10.24 \times 10^9$ точек
 - до 8 каналов
 - 16 Гбит/с, объем скана 20 Гбайта, объем часовой сессии наблюдений с каждой станции 1.8 Тбайт

Коррелятор обязан обрабатывать данные не медленнее чем они поступают в центр корреляционной обработки

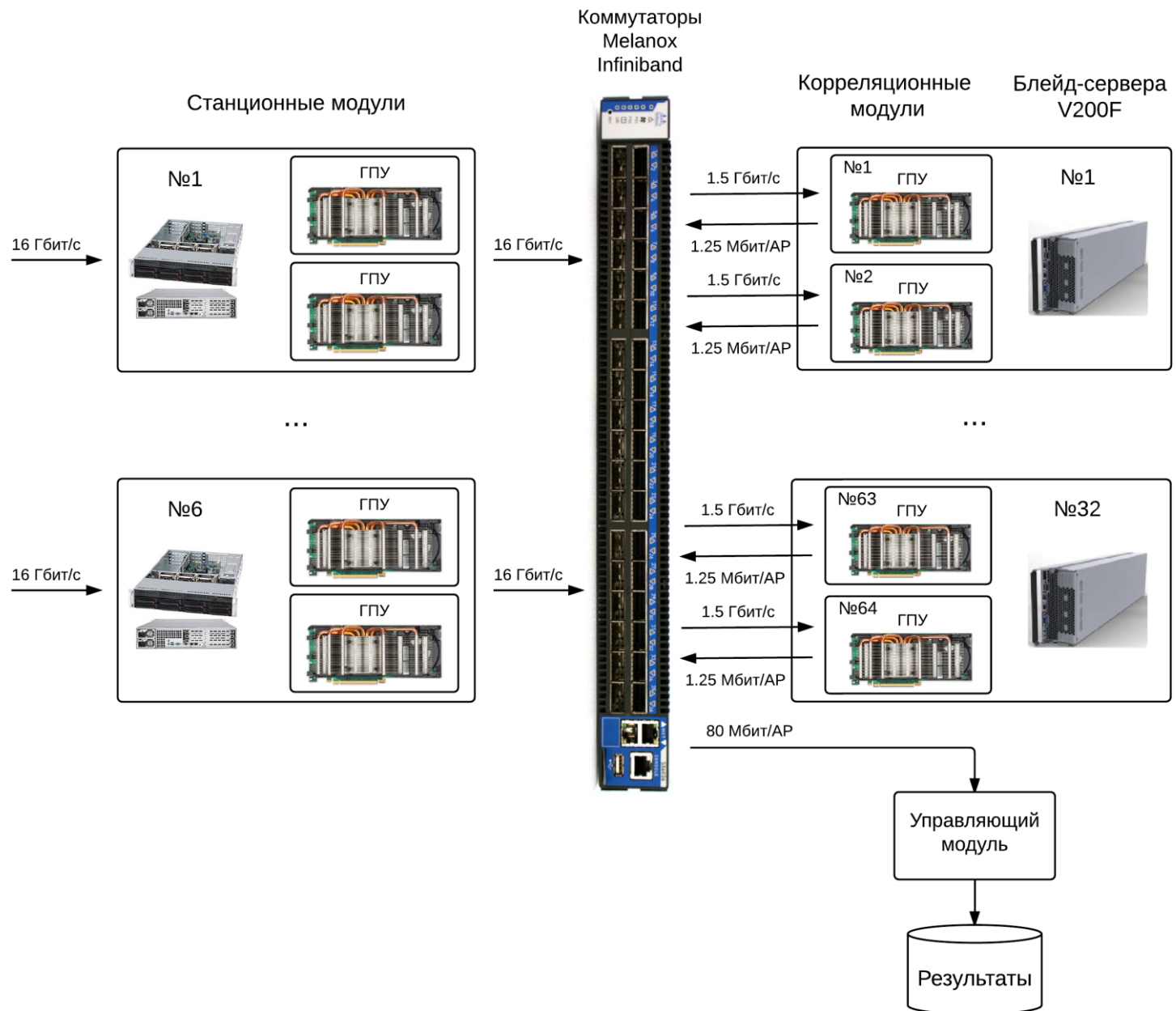
Коррелятор АРК

- Создан в 2009 г.
- Обработывает данные РТ-32
- Способен одновременно обрабатывать данные от 6 станций, по 1 Гбит/с от каждой, суммарный входной поток до 1 Гбит/с
- Реализация аппаратная, на ПЛИС

Коррелятор RASFX

- Создан в 2014 г.
- Универсальный, обрабатывает данные PT-32 и PT-13
- Способен одновременно обрабатывать данные от 6 станций, по 16 Гбит/с от каждой, суммарный входной поток до 96 Гбит/с
- Программный, аппаратное обеспечение
 - процессорный кластер из 40 серверов
 - каждый сервер содержит 2 процессора Intel по 8-ядер и 2 графических процессорных устройства NVIDIA TESLA
 - связь между серверами по сети стандарта Infiniband, 56 Гбит/с между любыми двумя абонентами
 - входные потоки данных поступают по сети стандарта 10 Gbps Ethernet, по 2 порта на каждый из 8 серверов работающих на вход
- Основные математические операции выполняются на ГПУ
- Схема обработки – распределенная конвейерная
- Программа выполнена на C++, использованы функции MPI, pthread, Qt

Схема потока данных коррелятора RASFX



Спасибо за внимание

