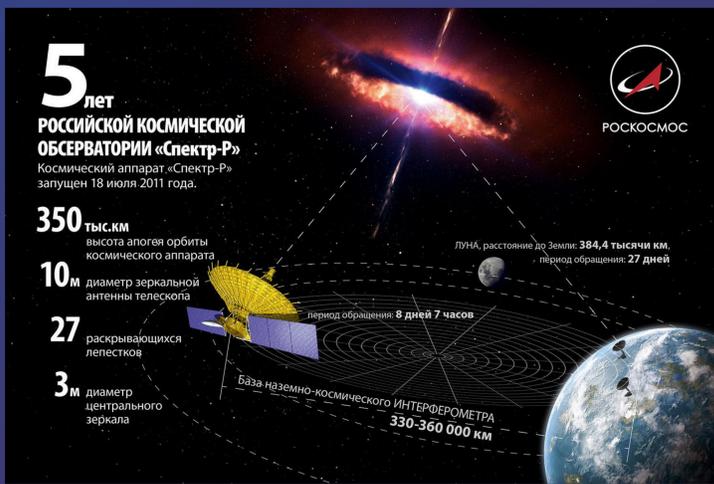


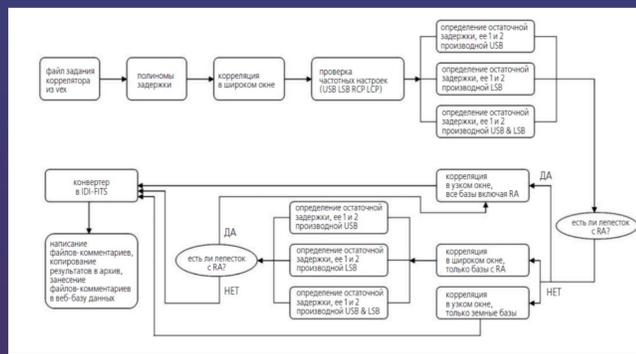
Программа LineViewer пакета ASTRO SPACE LOCATOR (ASL) для построения и обработки усредненных спектров Щуров М. А., Рудницкий А. Г.



Международный проект «Радиоастрон»

Международный проект «Радиоастрон» был разработан в АКЦ ФИАН, автор и руководитель проекта – Н. С. Кардашев. Проект Радиоастрон был создан для изучения астрономических объектов различных типов, таких как квазары, пульсары и мазеры, с беспрецедентно высоким угловым разрешением. 10-ти метровый космический радиотелескоп (КРТ), установленный на спутнике, работал в режиме интерферометра вместе с наземными антеннами. Это позволяло проводить наблюдения со сверхвысоким разрешением, рекорд 7 угловых микросекунд. Максимальное разрешение, достижимое на Земле в сантиметровом диапазоне – 218 угловых микросекунд - ниже более чем в 31 раз.

Обсерватория работала в четырёх диапазонах от метровых до сантиметровых длин волн:
P – 92 см, L – 18 см, C – 6.2 см, K – 1.3 см

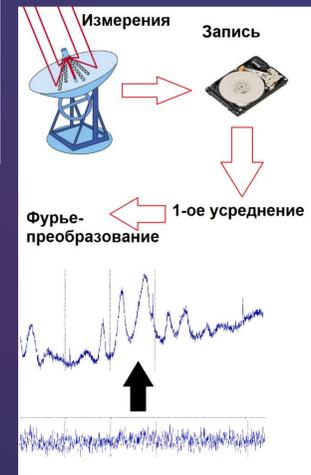


Порядок обработки на корреляторе для данных, полученных на интерферометре

Данные с КРТ и наземных телескопов, полученные в результате наблюдений проекта «Радиоастрон», обрабатываются с помощью коррелятора АКЦ ФИАН в Астрокосмическом центре Физического института им. Лебедева РАН, снабжённого собственным программным обеспечением, созданным также в АКЦ ФИАН. Как можно видеть из приведённой блок-схемы – процедура поиска корреляции представляет из себя нетривиальную задачу. В частности, стоит отметить, что самым трудоёмким процессом здесь является непосредственно запуск коррелятора. Он занимает 90% процессорного времени относительно всех задач, выполняемых в процессе корреляционной обработки. Именно для оптимизации этого процесса, то есть **снижения количества циклов запуска коррелятора** при обработке мазерных наблюдений и была создана программа LineViewer.



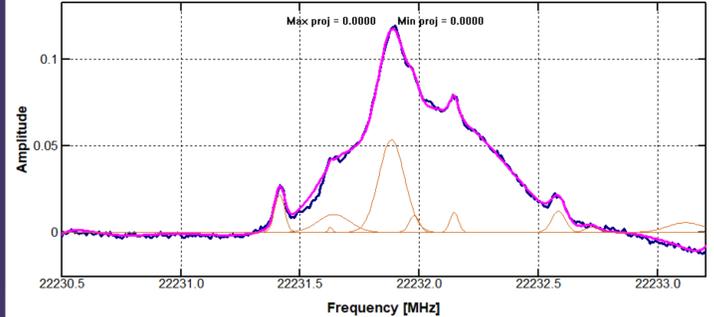
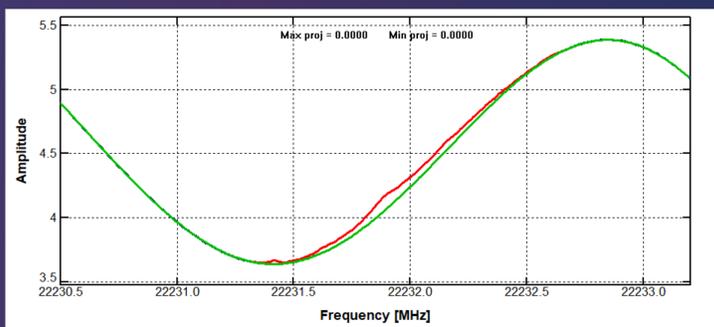
Коррелятор АКЦ уникален.
В Астрокосмическом центре хранятся первичные, не прокоррелированные, данные телескопов. Это позволяет произвести переобработку данных наблюдений с другими параметрами в любой момент. За счёт этого факта было открыто такое транзитное явление, как быстрые радиовсплески (FRB).



Работа с данными интерферометра – это сложно?

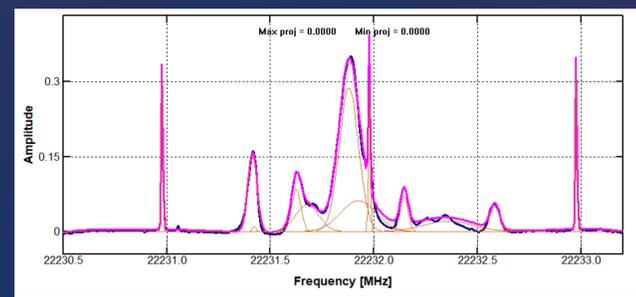
Интерферометр – это массив телескопов, который, работая как единое целое, производит запись наблюдений на каждом телескопе с точнейшей синхронизацией этих наблюдений по времени для некоторой полосы частот (в нашем случае 32 МГц). На телескоп приходит излучение от источника (электромагнитная волна), оно фиксируется на носителе. Чтобы построить спектр полосы телескопа (32 МГц) с разрешением по частоте на 2048 каналов при времени интегрирования 0.125 сек для временного интервала 10 минут, необходимо

Усреднить эти мгновенные измерения на интервалы времени по 0.125 сек, после взятия для каждого такого измерения амплитуды Фурье-преобразованием, превратив зависимость амплитуды сигнала от частоты в зависимость амплитуды от частоты (мгновенный спектр), а далее усреднить эти спектры на интервал времени 10 минут. При этом важно помнить, что мы работаем с данными, занимающими большой объём, например, при озвученных параметрах данные измерений только с одного телескопа занимают объём более 3.5 Гбайт. С увеличением количества телескопов количество их пар растёт по квадратичному закону. Это означает, что программа, работающая с данными от интерферометра, должна обладать хорошей оптимизацией и быстродействием.



Корректировка формы полосы

Первая из возможностей программы LineViewer – корректировка полосы телескопа. На этапе первичной обработки данных от наблюдений космических мазеров крайне важно знать, в каких каналах (или на каких частотах/скоростях) телескоп зафиксировал мазерное излучение. На приведённых рисунках выше показаны несколько возможностей программы LineViewer, которые необходимы при обработке сеансов мазерных наблюдений. Сверху представлен автоспектр источника NGC 2071 IRS 1 на станции «Калезина» (PT-64). Присутствие линий мазерного излучения в этом спектре неочевидно. Для этого участка спектра был построен полином, которым была скорректирована форма его полосы. На рисунке снизу видно, как она выглядит после корректировки. Для скорректированного автоспектра была запущена процедура поиска Гауссиан, также предусмотренная в программе. Гауссианы, обозначенные оранжевым цветом, обнаруживаются программным алгоритмом с уровнем надёжности более 5σ. Как можно видеть из рисунка, эта весьма полезная возможность в поиске линий в спектре источника может быть применена к довольно сильно искажённым данным. Также в программе LineViewer предусмотрена возможность исправления формы полосы по измерениям непрерывного излучения квазара.



Поиск Гауссиан в спектре

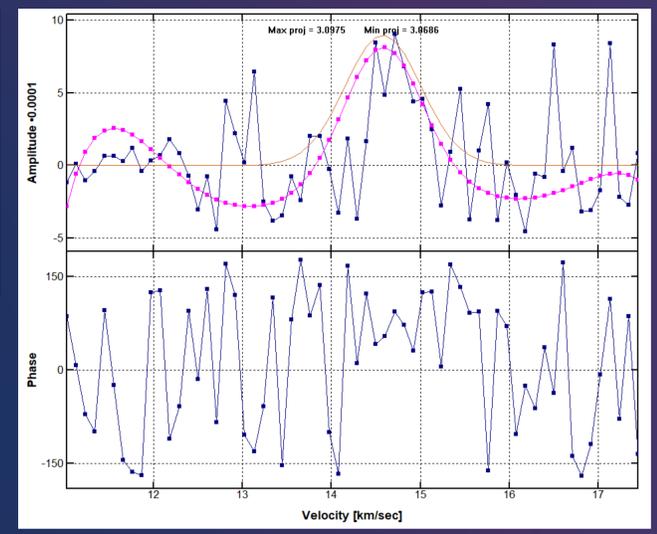
Необходимо отметить особенность алгоритма поиска Гауссиан, реализованного в программе LineViewer. Его главным отличием от алгоритмов, реализованных в ряде других программ (например, CLASS), является отсутствие необходимости вносить первоначальные значения положения, интенсивности или ширины линий. Алгоритм устроен таким образом, что подбирает некоторое оптимальное число Гауссиан, в количестве меньшем или равном указанному M. Подбор происходит за счёт минимизации функционала $f(M, x_1, \dots, x_N, y_1, \dots, y_N)$ следующего вида

$$f(M, x_1, \dots, x_N, y_1, \dots, y_N) = \text{Min} \left(\sum_{i=1}^N \left[y_i - \sum_{j=1}^M g_{i,j}(A_j, \mu_j, \sigma_j, x_i) \right]^2 \right)$$

где

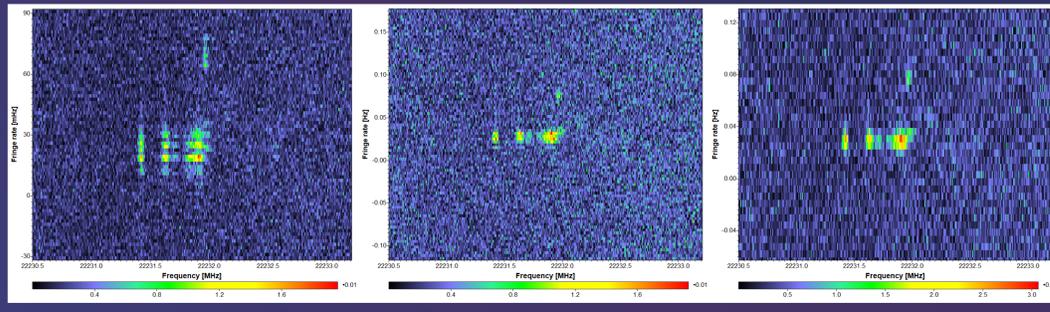
$$g_{i,j}(A_j, \mu_j, \sigma_j, x_i) = A_j \cdot \text{Exp} \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i - \mu_j}{\sigma_j} \right)^2 \right)$$

т.е. функция Гаусса, A_j – её амплитуда, μ_j – положение её максимума по оси абсцисс, σ_j – характеристика её ширины, M – количество Гауссиан, N – количество аппроксимируемых точек $(x_1, \dots, x_N, y_1, \dots, y_N)$. Минимизация происходит за счёт подбора величин A_j, μ_j, σ_j и M. Т.е. возможен случай, что при минимизации данного функционала будет найдено лучшее решение, соответствующее количеству Гауссиан меньше указанного M. На рисунке показан пример такой аппроксимации суммой Гауссиан для скорректированного участка спектра NGC 2071 IRS 1 на станции «Медичина» (PT-32). В данном случае в программе было указано найти не более 20-ти компонентов. Алгоритм сошёлся на решении в 13 компонентов, из которых 3 однозначно являются аппроксимацией шумов самой станции.



Поиск слабой корреляции в программе «LineViewer»

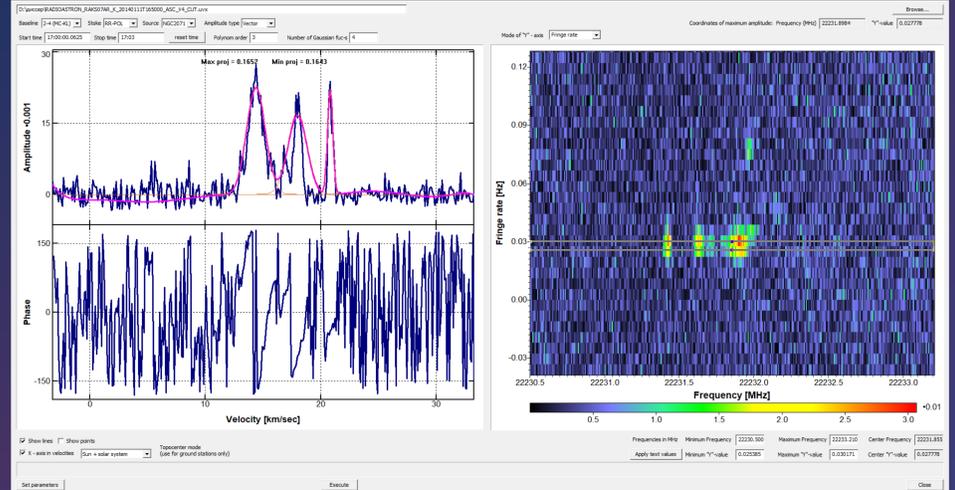
При помощи возможностей программы «LineViewer» на этапе предварительной обработки при помощи как визуального анализа зависимости (амплитуда-частота) и «фаза-частота», так и программными методами можно успешно находить слабую корреляцию, что свойственно наземно-космическим базам. Например, как в случае мазерных наблюдений источника NGC 2071 IRS 1 от 11.01. 2014 г. На рисунке показана корреляция на базе «Радиоастрон-Торунь» на скорости $V_{LSR} \sim 14.3$ км/с для этих наблюдений, найденная в программе «LineViewer». По результатам обработки этого сеанса написана и отправлена в печать статья.



Кросс-корреляционный отклик и время накопления

В соответствии процедурой обработки данных наблюдений на интерферометре, предполагающей обнаружение кросс-корреляционного отклика на различных базах, программа «LineViewer» предоставляет возможность искать корреляцию на всех базах интерферометра как программным поиском максимума отклика на диаграмме «fringe rate – Frequency», так и при помощи визуального анализа этой диаграммы. В процессе обработки автоспектров станций в сеансе наблюдений gaks07aг источника NGC 2071 IRS 1 от 2014 г. был найден промежуток частот, в которых присутствует мазерное излучение. Рассмотрим корреляционный отклик для наземной базы «МС-Кл». Поскольку измерения проводились на частоте 22 ГГц, то характерное время когерентности для таких наблюдений может составлять до 10-ти минут. Временем когерентности называется время, в течение которого может наблюдаться интерференционная картина электромагнитной волны, измеренной на разных телескопах. Однако, в силу не идеальных условий наблюдений на телескопах, различных погрешностей в измерениях, вносимых искажениями атмосферы и ошибками в компенсации геометрической задержки, это характерное время уменьшается до 5-ти и менее минут. На слайде показано наглядно, вид корреляционного отклика системы при изменении времени усреднения сигнала.

То есть программа позволяет быстро и наглядно осуществить подбор оптимального времени усреднения сигнала для кросс-корреляционных спектров методом визуального анализа этих диаграмм.



Главное окно программы

Здесь представлено главное окно программы. В правой его части можно наблюдать упомянутую ранее диаграмму «fringe rate – Frequency», на которой прямоугольником выбрана группа деталей на одной частоте интерференции. В левой части окна представлен кросс-спектр для данной группы корреляционных откликов, сверху – амплитуда, снизу – фаза. Видно, что по оси абсцисс данного кросс-спектра отложены скорости на луче зрения V_{LSR} в км/с. Они рассчитываются в программе «LineViewer» при помощи библиотеки SOFA.

Программа LineViewer написана на языке C++ и предназначена:

- 1) для корректировки полосы пропускания сигнала,
- 2) для построения и анализа усреднённых по времени и частоте интерференции спектров мазерных источников.
- 3) отождествления мазерных спектральных линий и поиска корреляции сигналов.

Важным достоинством и очевидным успехом использования данной программы стало существенное сокращение количества промежуточных циклов запуска коррелятора, что обеспечило более быстрый доступ пользователей к анализу астрофизических результатов. Она была успешно применена на практике при обработке сеансов наблюдений в рамках проекта «Радиоастрон» на корреляторе АКЦ ФИАН. При помощи LineViewer для ряда мазерных сеансов визуально оценивалось качество поправок, определялось соотношение «сигнал / шум», фаза сигнала (т.е. присутствие корреляции), и была найдена корреляция как на наземных, так и на наземно-космических базах.