

РСДБ-исследования в НИРФИ и ВМРАЦ в 2010-2014

М.Б. Нечаева^{1,2}, Н.А. Дугин¹, И.К. Шмелд², В.В. Безруков²



1) Научно-исследовательский радиофизический институт (ФГБНУ НИРФИ), Россия

2) Вентспилсский международный радиоастрономический центр (ВМРАЦ), Латвия

Целью совместных работ является развитие радиоинтерферометрических методов для решения ряда научных и прикладных задач, разработка аппаратуры и программного обеспечения для приёма, регистрации и обработки информации.

Экспериментальные работы в 2010-2014 г.г.

Осуществлено 23 совместных РСДБ-экспериментов, в программу которых включены следующие работы:

1) приём сигналов НКА для решения задач:

- уточнение положения КА,

- калибровка базы интерферометра, состоящего из малых антенн,

2) исследование ионосферы в спокойном и искусственном возмущенном состоянии при зондировании ее сигналами НКА и радиоизлучением естественных радиисточников;

3) РСДБ-локация объектов в околоземном космическом пространстве:

- объектов космического мусора,

- астероидов, сближающихся с Землей.

4) разработка РСДБ-метода исследования коротких всплесков солнечного радиоизлучения.

Эксперименты осуществлялись с участием антенн НИРФИ и зарубежных радиотелескопов: РТ-32 Ирбене (Латвия), РТ-70 Евпатория (Крым), РТ-32 Медичина (Италия), РТ-25 Урумчи (Китай).

РСДБ-эксперименты по приёму сигналов навигационных космических аппаратов



Преимущества выбора НКА в качестве объектов наблюдения для указанных задач:

- ❑ **известные параметры орбиты,**
- ❑ **мощный излучаемый сигнал** позволяет получить высокое отношение сигнал/шум для приёмных антенн с малой эффективной площадью,
- ❑ **постоянное наличие нескольких КА в совместной зоне видимости,**
- ❑ **широкополосный сигнал: 10 МГц (GPS), 20 МГц (ГЛОНАСС),**
- ❑ **отсутствие помех в РСДБ-пунктах в дециметровом диапазоне излучения:**
F= 1.575 ГГц (GPS), 1.603 ГГц (ГЛОНАСС)

Приёмные пункты:

РТ-14 (Ст.Пустынь),
РТ-15 (Зименки),
РТ-70 (Евпатория)

В 2012 году РСДБ-сеть была расширена за счёт оснащения антенн приемной аппаратурой на диапазон **1.6 ГГц**

РТ-32 (Ирбене),
РТ-2 (ННГУ),
РуА (НИРФИ),
РТ-1.5 (Ст.Пустынь)

В 2014 г. введен в действие РСДБ-пункт НИРФИ

РТ-8 (Васильсурск)

РСДБ-пункт РТ-32 Ирбене (ВМРАЦ, Латвия)

57.553° N, 21.855°E



Ventspils International Radio Astronomy Center (VIRAC)

Рабочие диапазоны:

327 МГц, 1.6, 5 ГГц

6-9, 12 ГГц

(4.5-8.8 ГГц – вводится в действие)

Система регистрации:

DBBC+МК5В,

ТН-16

Система синхронизации:

водородный стандарт частоты

«Кварц» Ч-75А с привязкой

шкалы времени по GPS

РСДБ-пункты НИРФИ:

Старая Пустынь РТ-14, РТ-1.5,

Васильсурск РТ-8

Зименки (РТ-15) (выведен из строя)

Диаметры антенн: 14, 15, 8, 1.5 м

Длины баз: РТ-14 - РТ-1.5 100 м,
РТ-14-РуА (НИРФИ) 78 км



Старая Пустынь
(РТ-14, РТ-1.5),
55.655° N, 43.631° E



Васильсурск РТ-8
56.139° N, 46.074° E

Рабочие диапазоны:

327, 610, 1600 МГц (РТ-14, РТ-8)

1600 МГц (малые антенны)

Система регистрации: ТН-16

Система синхронизации:

VCH-1005, VCH-311 + GPS

Полоса регистрации: 8 МГц

РСДБ-пункт НИРФИ (Нижний Новгород)

Диаметры антенн:

НИРФИ РуА 20 см (рупор), П6-23А

Длины баз: **РТ-14-РТ-1.5 100 м,**
РТ-14-РуА (НИРФИ) 78 км

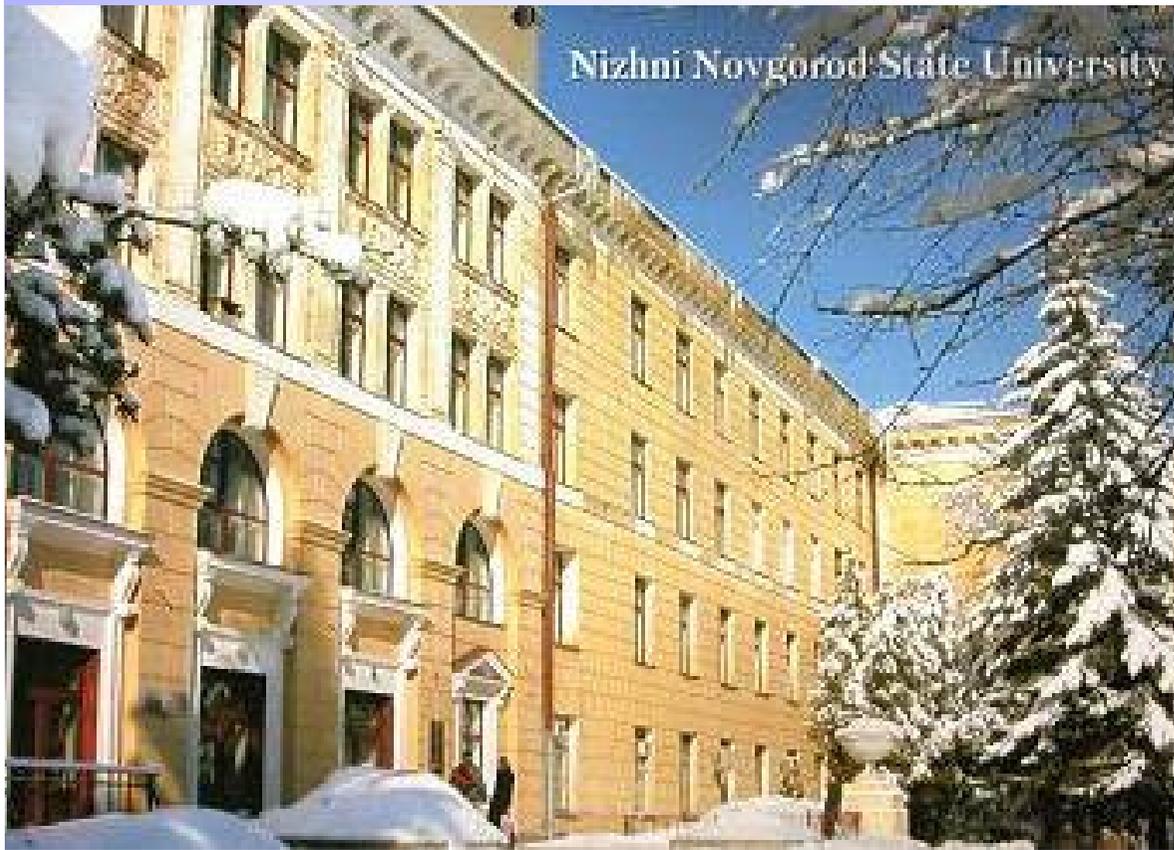
Рабочие диапазоны: **1600 МГц**

Система регистрации: **ТН-16**

Система синхронизации: **VCH-1005 + GPS**

Полоса регистрации: **8 МГц**

*Обработка
экспериментальных
данных
осуществляется на
программном
корреляторе
НИРФИ-4*



РСДБ-пункт ННГУ РТ-2 (Нижний Новгород)

Диаметр антенны: **2 м**

Рабочий диапазон: **1.6 ГГц**

Система регистрации: **ТН-16**

Система синхронизации:

VCH-311 + GPS

Полоса регистрации: **8 МГц**

РСДБ-эксперименты по приёму сигналов навигационных космических аппаратов

- приём сигналов НКА с целью **калибровки базы интерферометра** и решения обратной задачи - **уточнения положения КА (1600 МГц)**;
- исследование **ионосферы Земли** в спокойном (естественном) состоянии при зондировании ее излучением естественных радиоисточников и сигналами НКА и **(327 и 1600 МГц)**;
- исследование **искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ)**, созданной нагревным стендом «Сура» **(327 и 1600 МГц)**.

Радиокомплекс (нагревный стенд) «Сура» ФГБНУ НИРФИ)

Стенд «Сура» предназначен для мониторинга верхней атмосферы Земли на основе контролируемых воздействий на нее коротковолновым радиоизлучением.

Основу радиокомплекса составляют

три коротковолновых радиопередатчика ПКВ-250 с диапазоном частот 4 - 25 МГц и мощностью 250 кВт каждый и трёхсекционная приёмо-передающая антенна ППАДД размером 300 x 300 (кв.м) (на фото), с полосой частот 4.3 - 9.5 МГц, коэффициент усиления антенны $G=200\div 380$.

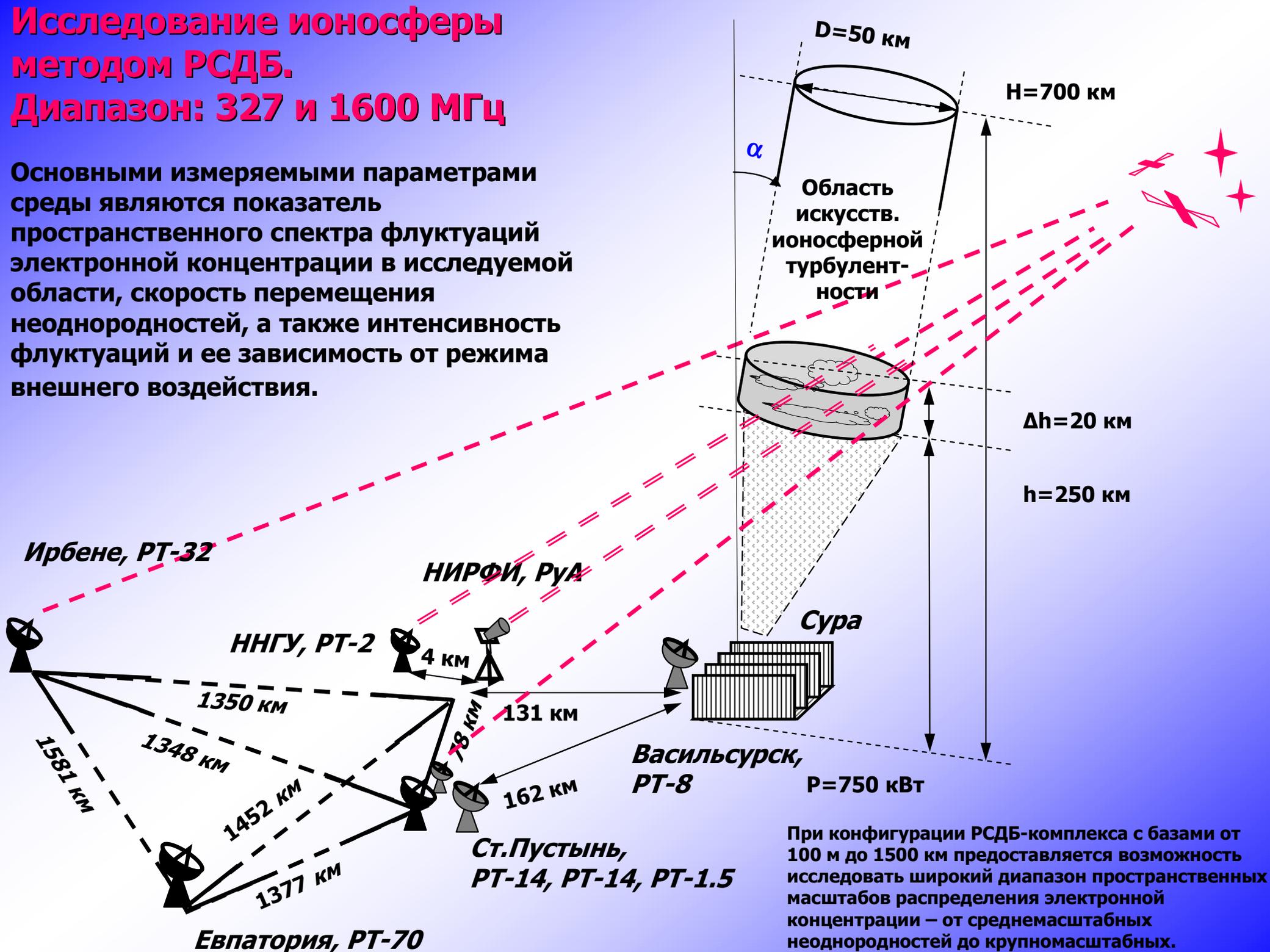
Радиокомплекс оснащён рядом диагностических установок (станция ионосферного зондирования, установка многочастотного доплеровского зондирования ионосферы, приёмный пункт для регистрации широкополосного КВ радиоизлучения и т.д.)

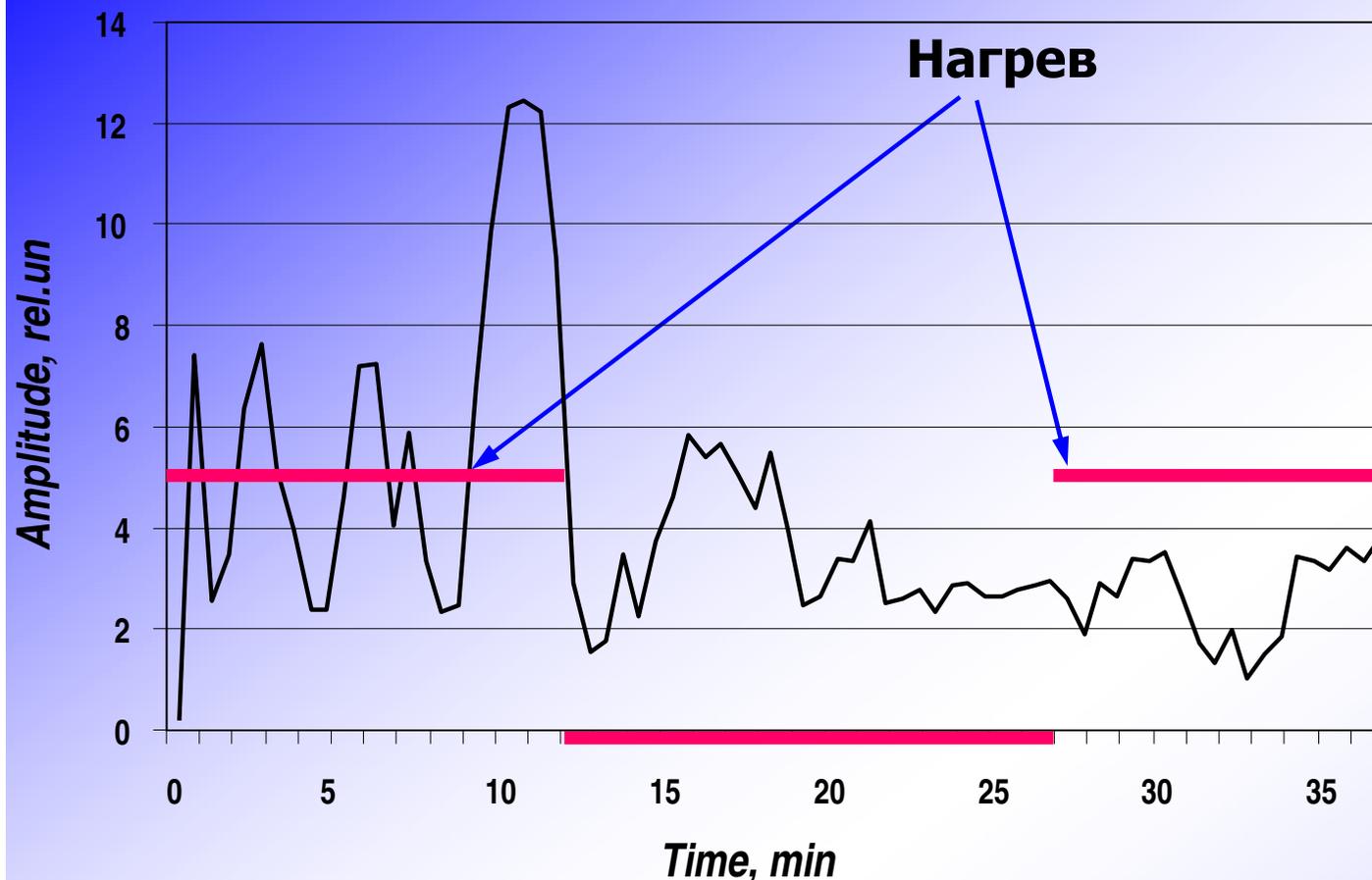
<http://sura.nirfi.sci-nnov.ru/indexe.html>



Исследование ионосферы методом РСДБ. Диапазон: 327 и 1600 МГц

Основными измеряемыми параметрами среды являются показатель пространственного спектра флуктуаций электронной концентрации в исследуемой области, скорость перемещения неоднородностей, а также интенсивность флуктуаций и ее зависимость от режима внешнего воздействия.





Начало временной оси соответствует первому включению передатчика. При начале воздействия на ионосферу увеличиваются амплитудные флуктуации спектра мощности более, чем в 6 раз. После окончания излучения заметно снижение колебаний почти до минимума. При следующем включении станда «Сура» аппарат уже находится вне зоны повышенной турбулентности, и влияние возмущенной среды на сигнал не сказывается.

Исследование характера выходного сигнала интерферометра от режима воздействия на ионосферу.

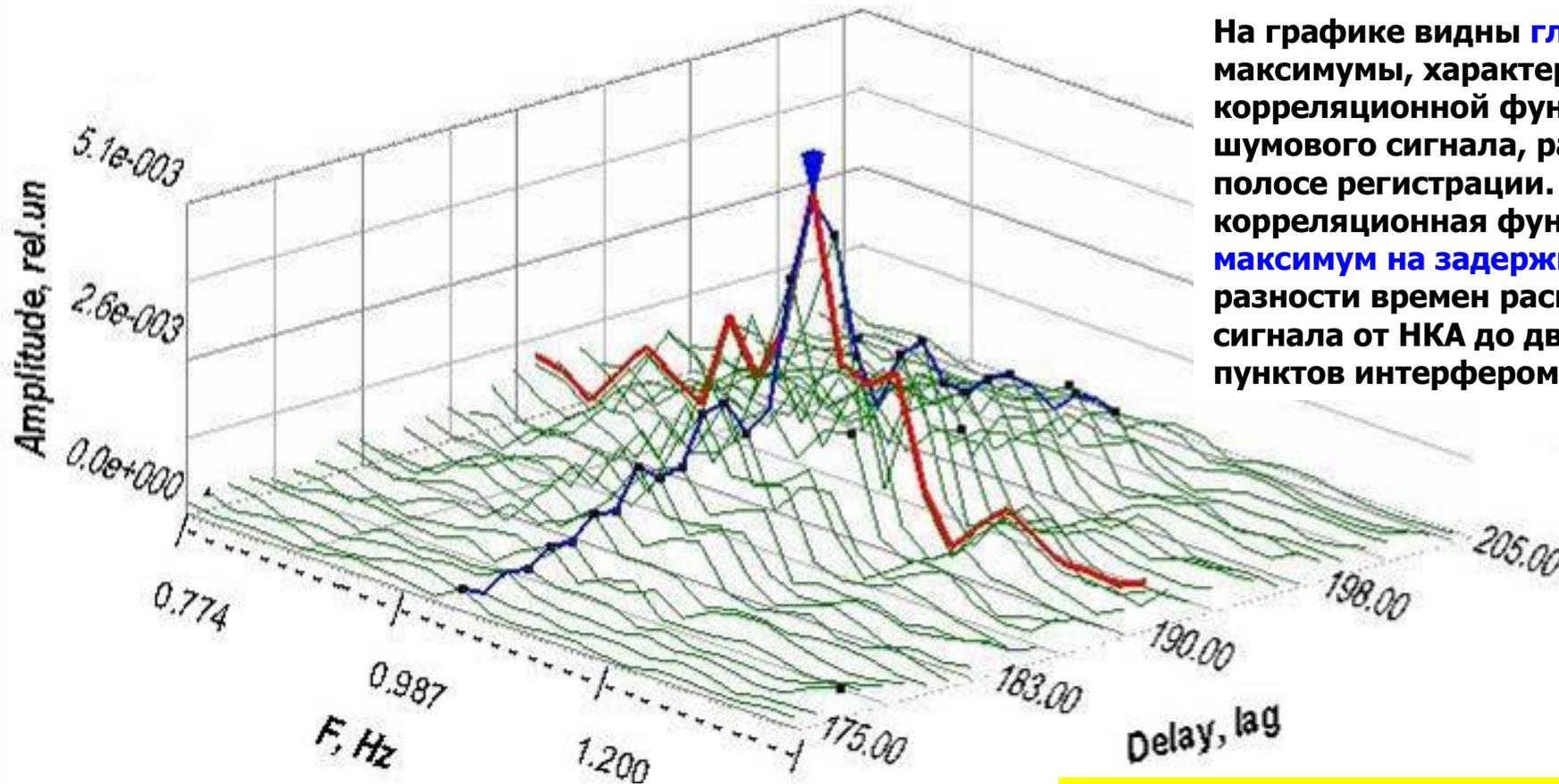
Зависимость амплитуды выходного сигнала интерферометра от режима работы нагревного стенда во время прохождения НКА GPS 26605 в течение 40 минут через зону повышенной турбулентности.

Красной линией показаны интервалы работы передатчика.

Дата: 23 марта 2012. База: ННГУ – НИРФИ

Пример выходного сигнала интерферометра в зависимости от задержки и частоты:

Системы регистрации – ТН-16, МК5В;
полоса регистрации 2 и 8 МГц.
Коррелятор НИРФИ-4.



На графике видны **главный и боковые максимумы**, характерные для корреляционной функции при приеме шумового сигнала, равномерного в полосе регистрации. Кросс-корреляционная функция **имеет максимум на задержке**, равной разности времен распространения сигнала от НКА до двух приемных пунктов интерферометра.

GPS BIIR-6 (PRN 14)26605;
база ННГУ-НИРФИ, 23.03.2012 г., 06:00:30 UT.

Основные измеряемые параметры в задаче определения положения КА и калибровки базы — **задержка и частота интерференции**.

Достигнута точность измерений **задержки 4 нс (1м) и частоты интерференции 0,03%** за время наблюдения КА в течение 20 мин.

РСДБ-эксперименты по локации объектов в околоземном космическом пространстве – объектов космического мусора и астероидов

- исследование объектов методом РСДБ-локации с целью измерения сдвигов Допплера, задержки и частоты интерференции для уточнения параметров движения;**
- определения периода вращения и размеров объектов**

VLBR 10.1

30 июня 2010

космический мусор в режиме beam-park

Debris 2012

17-20 апреля 2012

aster2013 (2012 DA14)

15-16 февраля 2013

РСДБ-локация астероида 2012 DA14

Космический мусор: в качестве объектов исследования выбраны ступени ракет-носителей, отработавшие ресурс космические аппараты, фрагменты разрушения объектов Iridium-Cosmos, Fengyun.

44.520° N, 11.647°E



Источник фотографии: IRA:
<http://www.med.ira.inaf.it>

**Медицина, РТ-32
(Италия)**

В экспериментах принимали участие следующие радиотелескопы (в различных комбинациях):

приемный комплекс:

Ирбене РТ-32 (Латвия)
Урумчи РТ-25 (Китай)
Медицина РТ-32 (Италия)
Симеиз РТ-22 (Украина)

локатор:

Евпатория РТ-70 (Украина)

*Излучение:
F=5010.024 МГц;
режим несущей,
режим ЛЧМ*

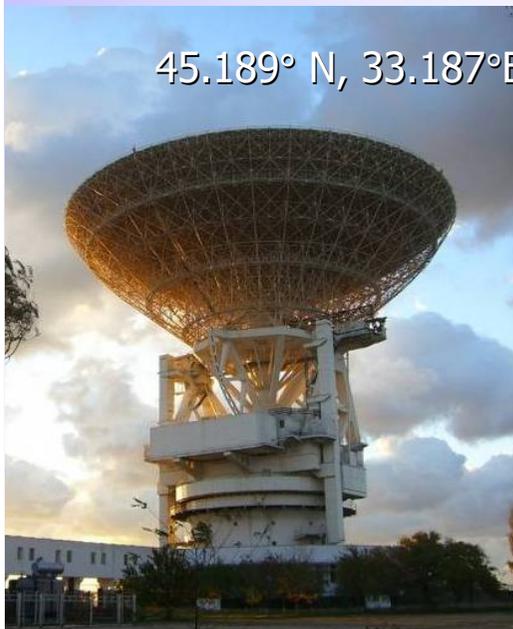
Обработка экспериментальных данных осуществлялась на корреляторе НИРФИ-4 и частично на корреляторе ВМРАЦ.

57.553° N, 21.855°E



**Ирбене, РТ-32
(Латвия)**

45.189° N, 33.187°E



**Евпатория, РТ-70
(Украина)**

43.442° N, 87.178°E



Источник фотографии XAO:
http://english.xao.ac.cn/ga/201103/t20110325_66870.html

**Урумчи, РТ-25
(Китай)**

Схема эксперимента по РСДБ-локации

Во время сеансов планетным локатором излучается сигнал (монохроматический или модулированный), РСДБ-комплексом принимается сигнал, отраженный от исследуемого объекта.

Обработка выполняется в несколько этапов:

- автокорреляция в каждом приемном пункте**
- корреляция переданного и принятого сигналов (режим бистатической локации)**
- корреляция двух принятых сигналов (режим РСДБ)**

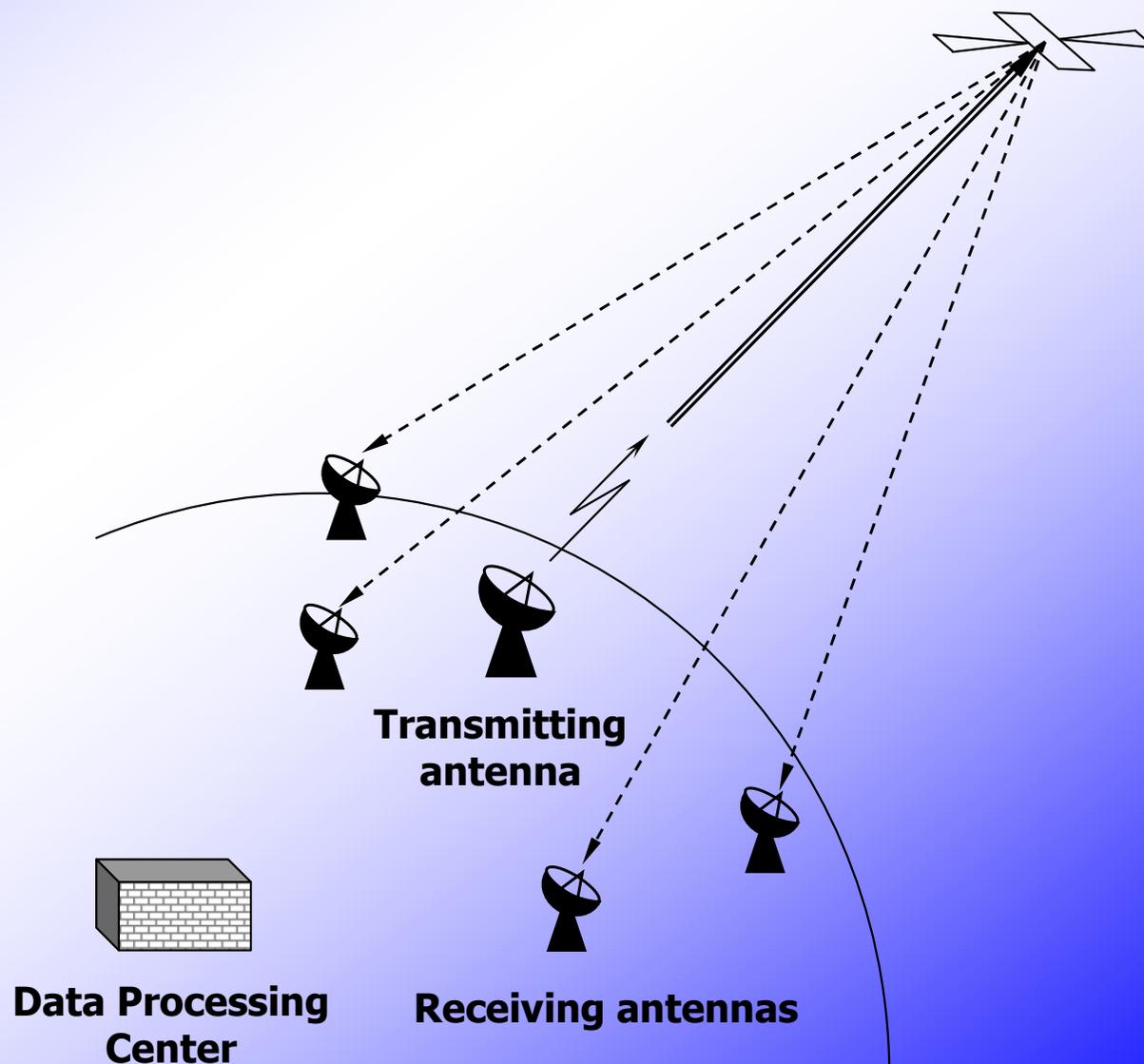
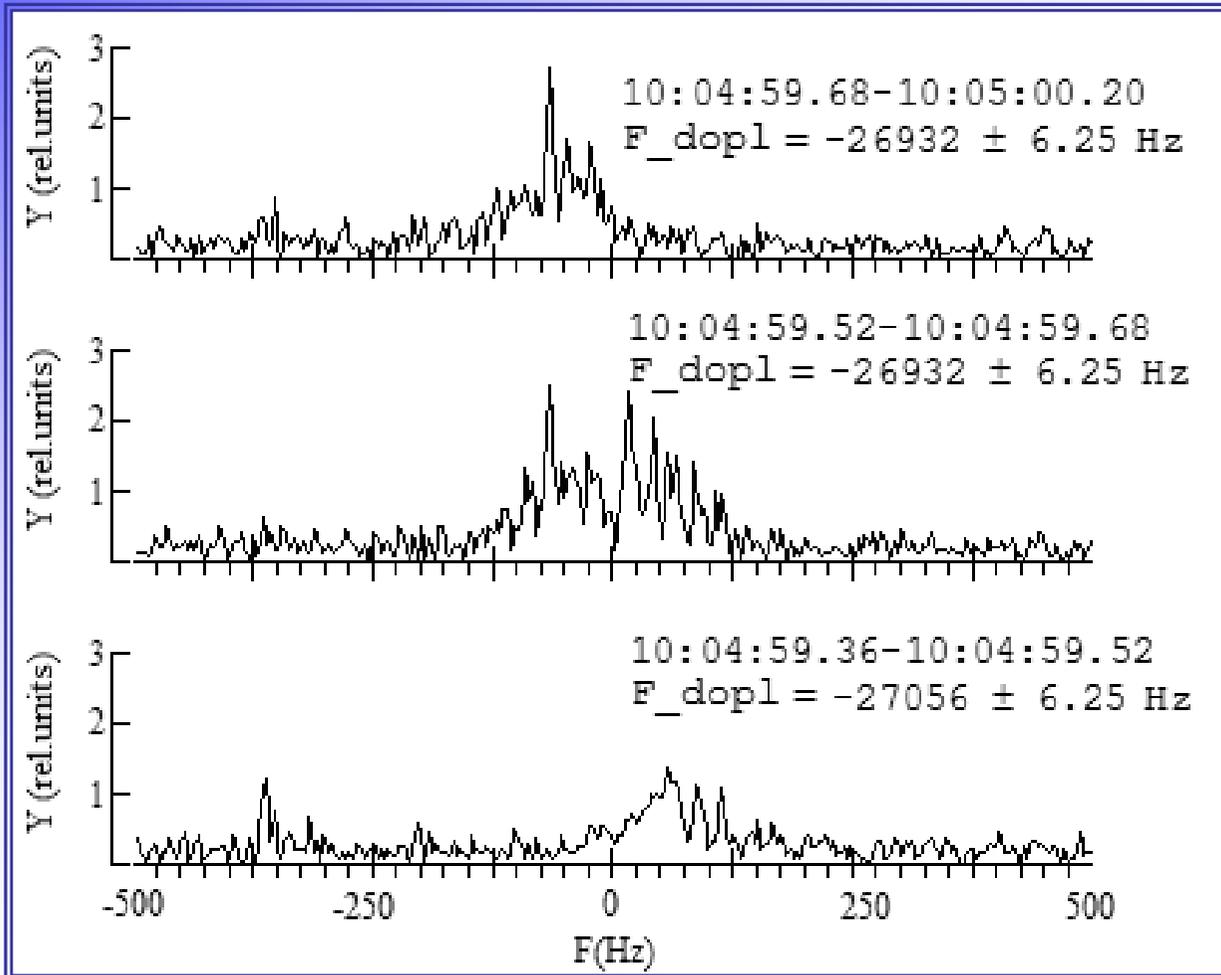


Схема процедуры обработки РСДБ-данных



VLBR2010. 30 июня 2010 г.: эксперимент beat-park



**Пример спектра
мощности в режиме
бистатической
локации**

**на базе Евпатория –
Ирбене.**

Объект 35303.

**Частота Допплера
рассчитывается из
измерений частоты
максимума спектра.**

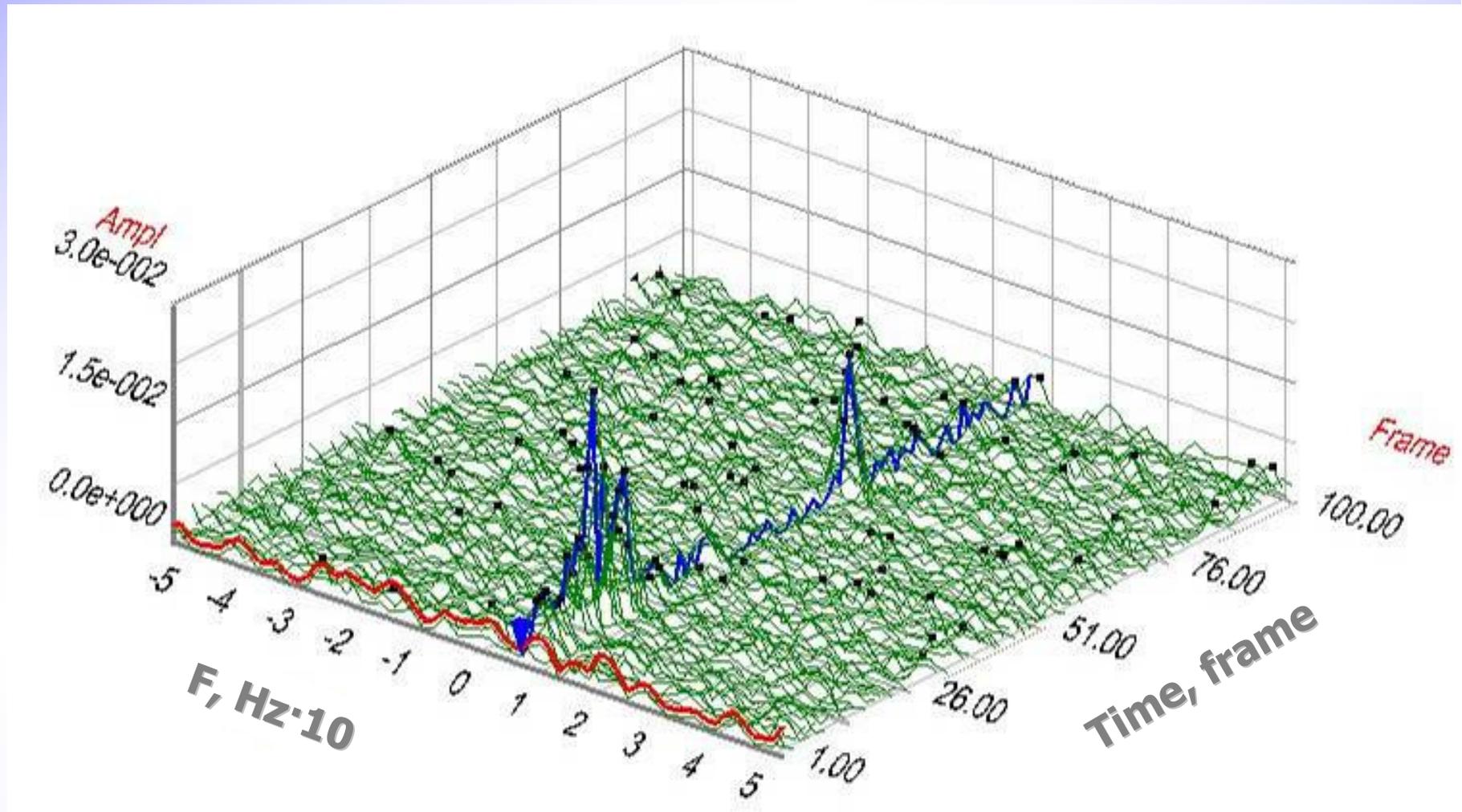
Debris2012. Апрель, 2012 г.

режим бистатической локации

Динамический спектр мощности в режиме бистатической локации на базе Евпатория – Урумчи

Излучение - монохроматический сигнал $F=5010.024$ МГц

Объект 09503, 20 апреля 2012 г., 13:46:01 UT.

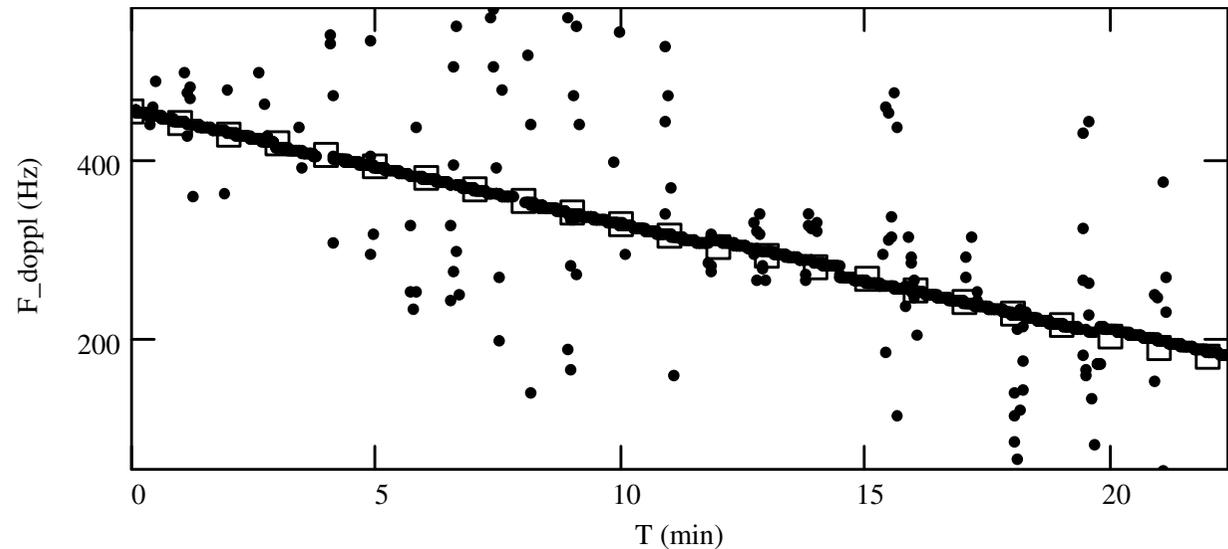


**Примеры
зависимости
частоты Допплера
от времени.**

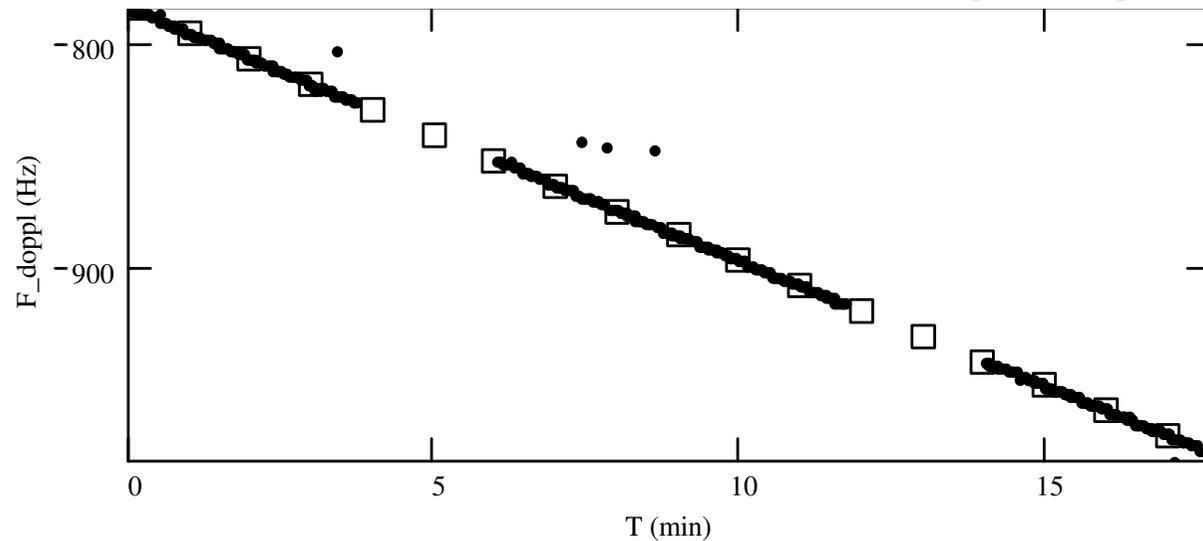
**Эксперимент
Debris2012.**

**Квадратами показаны
предварительно
рассчитанные
значения частоты
Допплера,
точками -
экспериментально
полученные значения**

Объект 12618, 20.04.2012, 11:16 UT, Евпатория-Ирбене

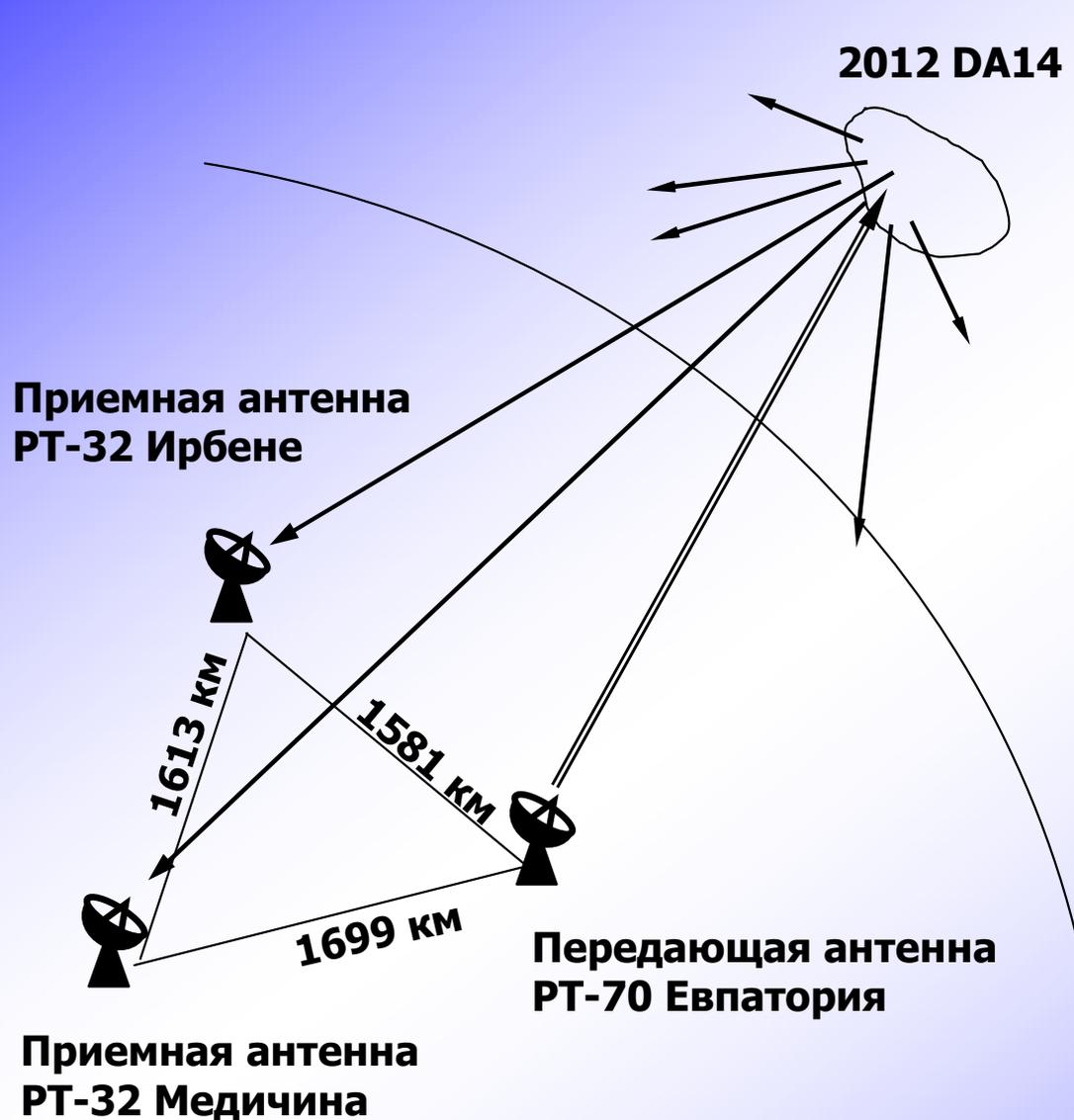


Объект 12309, 20.04.2012, 12:06 UT, Евпатория-Ирбене



В результате обработки экспериментальных данных для всех наблюдаемых объектов получены значения доплеровских сдвигов частоты, несущих информацию о радиальной скорости

Эксперимент по РСДБ-локации астероида 2012 DA14, 15-16.02.2013



Астероид 2012 DA14

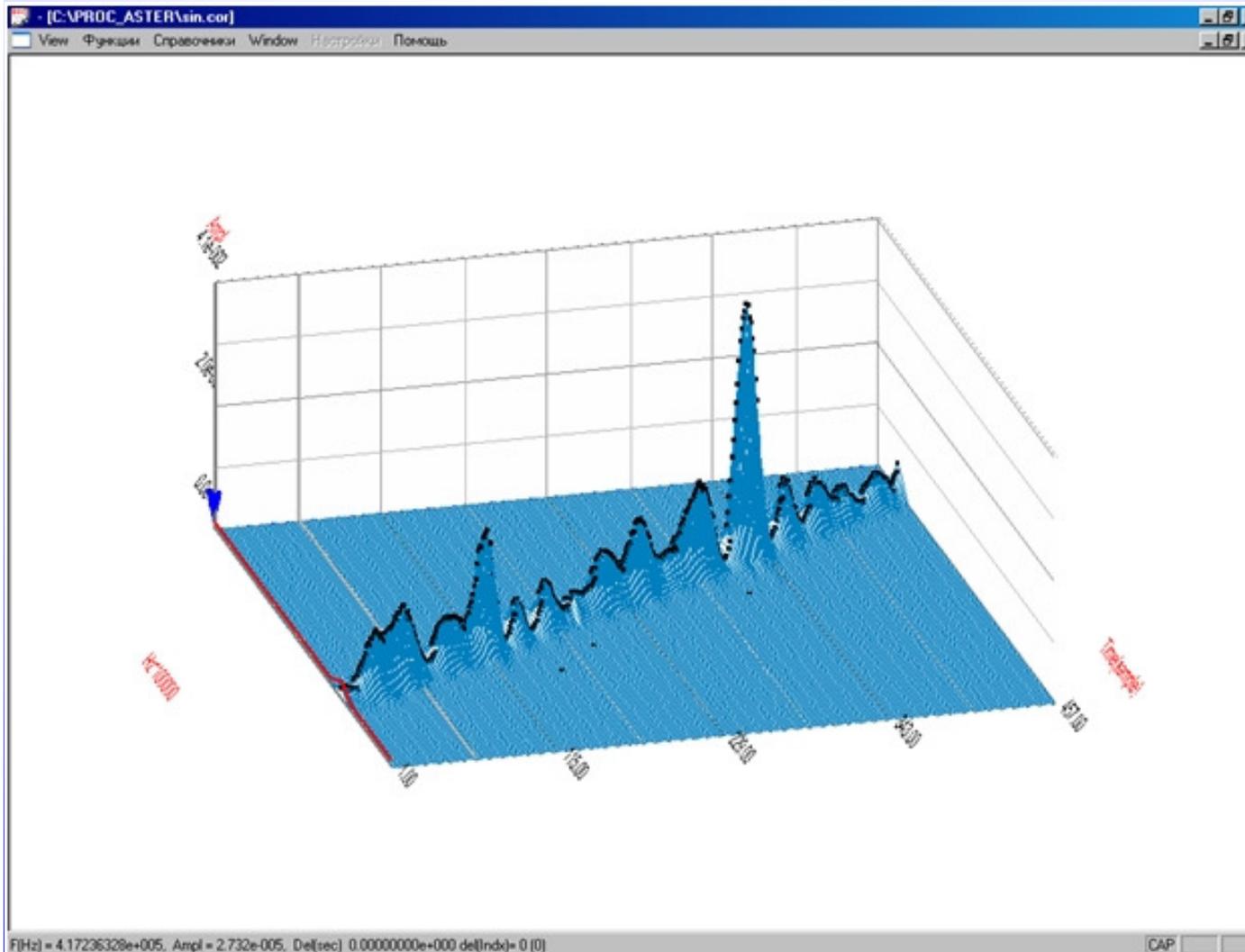
Момент сближения с Землей:
15 февраля 2013 г, 19:24 UT
расстояние **27700 км**,
размеры **40 м**,
период вращения – **ок. 9 часов**

Значительный размер астероида и малое расстояние до него **обеспечили высокий уровень принимаемого эхо-сигнала**, что позволило получить достоверные данные на всех этапах обработки.

Автокорреляция

Амплитуда автокорреляционного сигнала
как функция частоты и времени

(разрешение $dt=0.125$ с, $df=244$ Гц). 15.02.2013, 20:00 UT, Медицина



Изрезанный характер временной зависимости амплитуды эхо-сигнала объясняется интерференцией сигналов от нескольких отражающих областей на поверхности астероида при изменении взаимного расположения объекта и наземных пунктов.

Этот эффект носит негативный характер, так как приводит к ухудшению точности измерений в моменты резкого уменьшения амплитуды сигнала.

Взаимная корреляция излученного сигнала и принятого сигнала. Перемножение сигналов (режим бистатической локации)

Разность экспериментальных значений частот Допплера и значений, рассчитанных из предварительных данных

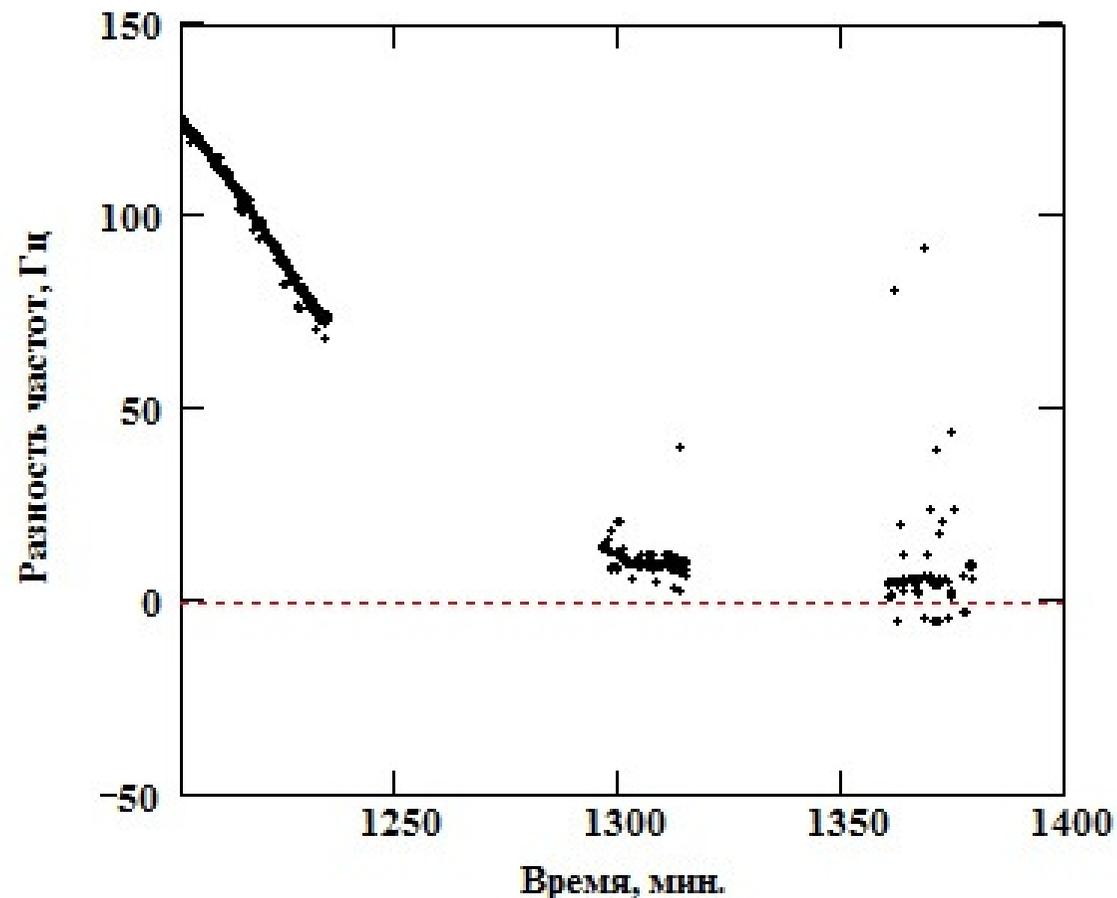
Точность измерения частоты в режиме бистатической локации в данном эксперименте составляла:

0.1, 0.125 и 0.5 Гц

При $df=0.1$ Гц

погрешность определения радиальной скорости

$dV=0.003$ м/с



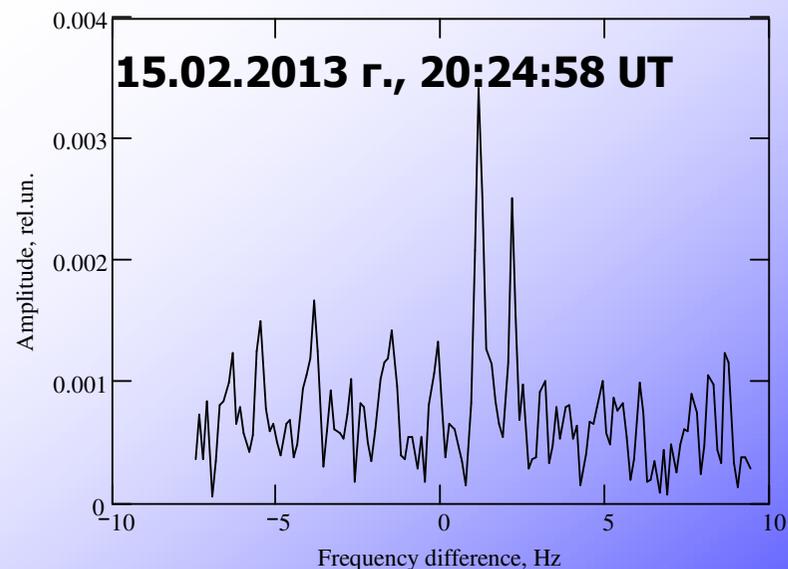
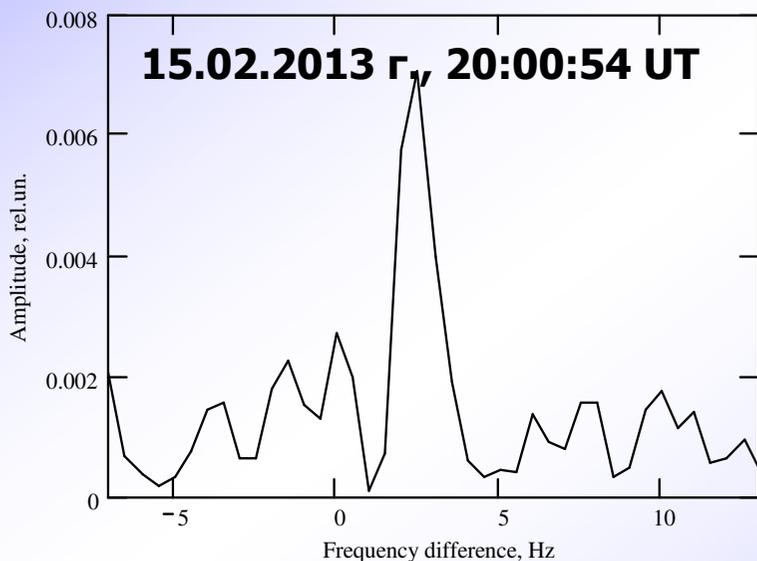
База Евпатория (излученный сигнал) — Ирбене (принятый сигнал), 15.02.2013 г.

В целом, получено хорошее совпадение экспериментально измеренных параметров отраженного сигнала с предварительно рассчитанными по данным оптических наблюдений. Тем не менее, наблюдается увеличение расхождения экспериментальных и расчетных величин в момент наибольшего сближения астероида с Землей.

Взаимная корреляция принятых сигналов. Перемножение сигналов (режим РСДБ)

Впервые в эксперименте по РСДБ-локации астероида получена взаимная корреляция сигналов двух РСДБ-пунктов (в предыдущих экспериментах по локации более удаленных астероидов взаимной корреляции сигнала в режиме РСДБ не было обнаружено).

Спектр мощности сигнала на базе **Медицина – Ирбене.**



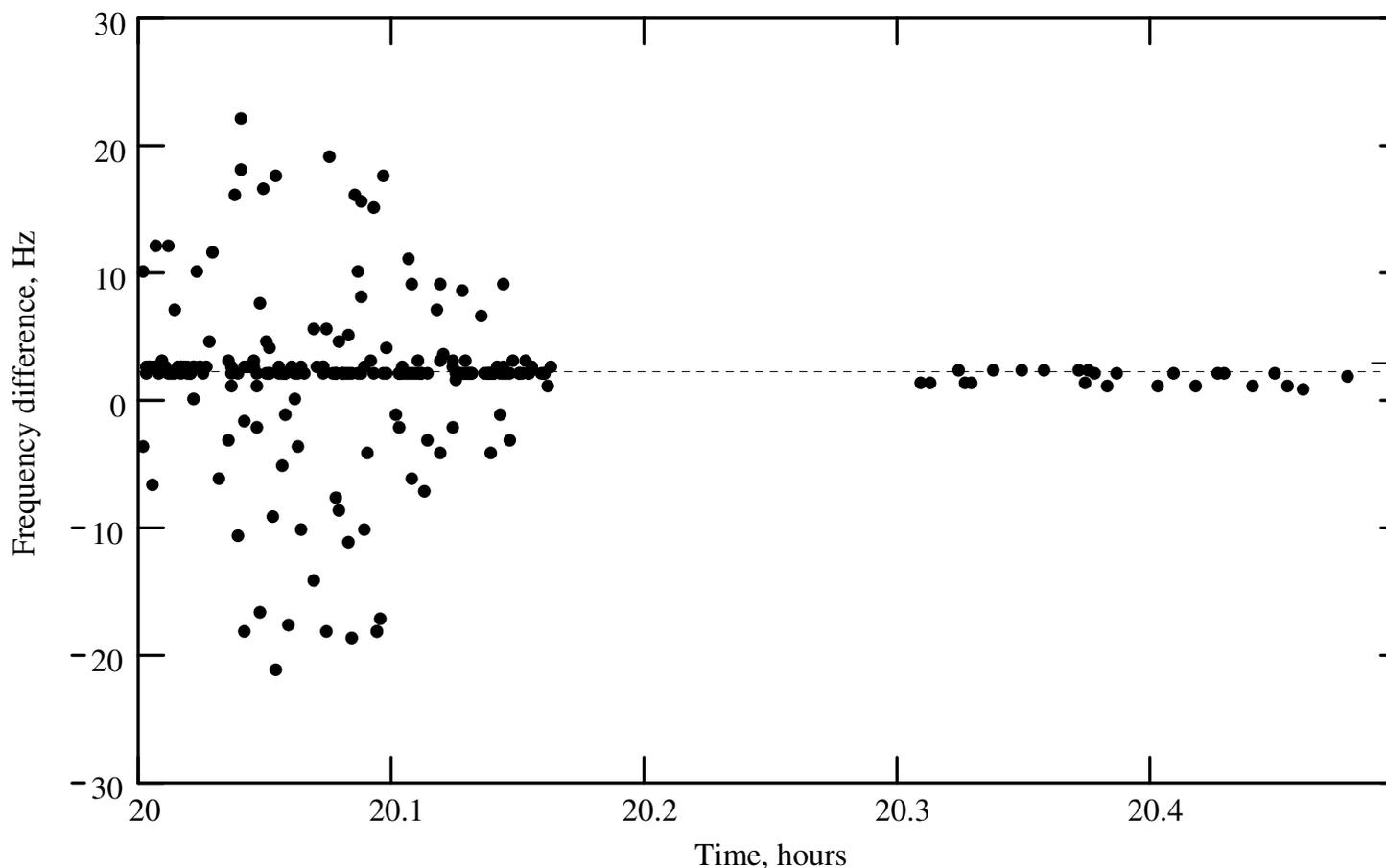
Временная зависимость разности измеренной и расчетной частоты интерференции.

режим РСДБ

База Медицина — Ирбене.

15 февраля 2013 г. 20:00:00–20:32:00 UT.

Проведенный эксперимент показал, что при достаточной чувствительности приемных систем достигаются высокие точности измерения частот Доплера и частот интерференции



Точность измерения частоты в режиме РСДБ в данном эксперименте составляла: **0.125 и 0.5 Гц**

При $df=0.125$ Гц

погрешность определения угловой скорости $dV=0.01$ угл.сек/с

Исследование коротких вспышек солнечного радиоизлучения методом РСДБ

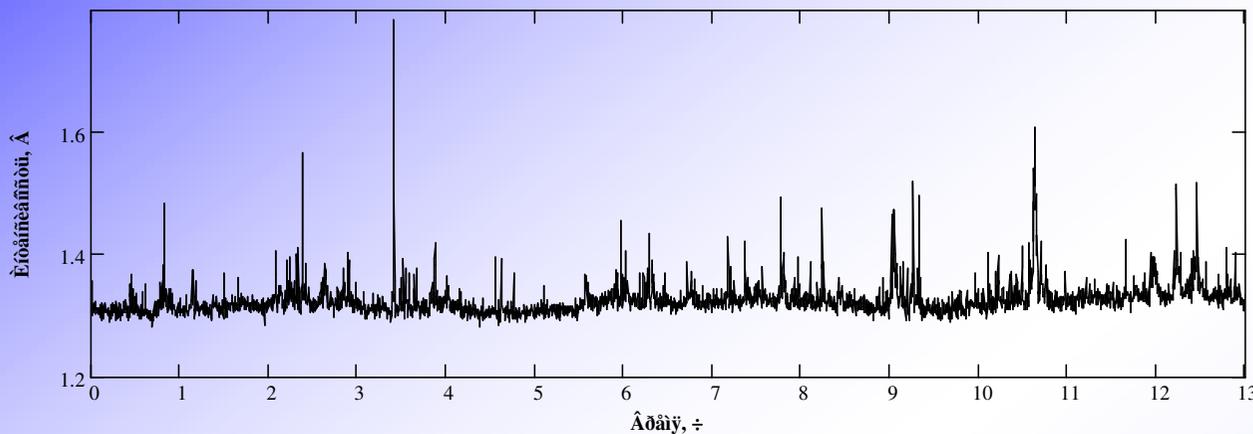
Одним из научных направлений, развиваемых в НИРФИ, является исследование микроволнового вспышечного радиоизлучения Солнца. Особый интерес представляет изучение спайков и спайкоподобных событий – короткоживущих радиовсплесков микроволнового излучения Солнца.

Частотная полоса:	2 – 12 МГц
Время существования:	1 – 100 мс
Скорость перемещения:	1000 – 100 000 км/с
<u>Масштабы области генерации всплесков:</u>	менее 1"

Экстремальные характеристики спайков отражают физические условия во вспышечной плазме и, в частности, фрагментацию в пространстве и во времени как самого процесса энерговыделения, так и области распространения ускоренных частиц.

Для обнаружения спайков необходим радиоинтерферометр, обладающий разрешающей способностью по обеим угловым координатам и позволяющий регистрировать интерференционный отклик за времена в несколько мсек. Для этих целей предложено использование методов РСДБ.

Проанализированы возможности трехэлементного интерферометрического комплекса как элементарной ячейки более многоэлементных систем в задаче исследования спайков. Получены выражения, описывающие взаимно-корреляционную функцию и спектр мощности сигнала интерферометра при приеме излучения протяженного импульсного источника с заданным распределением радиояркости.



Запись интенсивности сигнала при наблюдении Солнца, выполненная в РСДБ-пункте Ирбене в эксперименте NIRFI 11.1.

Проведен ряд экспериментов на частоте 327 МГц, в том числе с минимальной базой 100 м. На малой базе получен корреляционный сигнал от спайкоподобных всплесков.

В дальнейшем для получения более полной информации о спайкоподобных событиях (размерах, количестве одновременно возникающих источников в ограниченной области, расстоянии между ними и скорости их движения) предполагается проведение экспериментов на комплексе с максимально возможным набором базовых линий.

Заключение

В ходе сотрудничества НИРФИ и ВМРАЦ созданы элементы приемной аппаратуры на частоты **327 и 1600 МГц** и системы регистрации ТН-16;

создан коррелятор **НИРФИ-4**;

разработан **коррелятор ВМРАЦ**, предназначенный для обработки данных радиолокационных экспериментов;

проведено 23 РСДБ-эксперимента по различным задачам.

ВМРАЦ получил средства на оснащение радиотелескопа Ирбене МШУ на диапазон **4.5-8.8 ГГц**, реконструкцию несущей конструкции антенны и замену системы наведения.

В НИРФИ в 2014 г. введен в действие новый РСДБ-пункт **Васильсурск РТ-8**.

По результатам совместных работ НИРФИ и ВМРАЦ по РСДБ-тематике в 2012 году была организована международная конференция "Ventspils International Radioastronomy Conference-2012". Опубликовано 20 совместных научных статей в рецензируемых журналах.

Представленные результаты получены на основе наблюдений с помощью следующих радиотелескопов:

- Евпатория РТ-70 (НЦУИКС, Крым)**
- Ирбене РТ-32 (Вентспилсский международный радиоастрономический центра (ВМРЦ), Латвия),**
- Медичина РТ-32 (INAF - Istituto di Radioastronomia, Италия)**
- Урумчи РТ-25 (Xinjiang Astronomical Observatory, Китай)**
- ННГУ РТ-2 (Нижегородский госуниверситет, Россия)**
- радиотелескопов НИРФИ**
- уникальной установки стенд «Сура» (НИРФИ, Россия)**

Исследования поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (09-02-01078, 10-02-00875, 13-02-97080, 13-02-00586).

Список статей

- 1. M. Nechaeva, A. Antipenko, V. Bezrukovs, D. Bezrukov, A. Dementjev, N. Dugin, A. Konovalenko, V. Kulishenko, X. Liu, A. Nabatov, V. Nesteruk, G. Pupillo, A. Reznichenko, E. Salerno, I. Shmeld, O. Shulga, Y. Sybiryakova, Yu. Tikhomirov, A. Tkachenko, A. Volvach, W.-J. Yang. An Experiment on Radio Location of Objects in the Near-Earth Space with VLBI in 2012//Baltic Astronomy, 2013. V.22, N.1 P.35-41.**
- 2. М.Б. Нечаева, А.А. Антипенко, Д.А. Безруков, В.В. Безруков и др.. Применение метода РСДБ в эксперименте по локации астероида 2012 DA14 в 2013 г. // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2013. №4. Т.2. С.116-123.**
- 3. N. Dugin, A. Antipenko, V. Bezrukovs, V. Gavrilenko et all. Radio interferometric research of ionosphere by signals of space satellites. // Baltic Astronomy, 2013. V. 22, N. 1. P.25-33.**
- 4. Дугин Н.А., Гавриленко В.Г., Антипенко А.А., Дементьев А.Ф. и др. Радиоинтерферометр с независимым приемом ННГУ – НИРФИ – Ирбене. Первые результаты. // Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (раздел "Радиофизика"). 2013. №1 (1). С. 79-85.**
- 5. Дугин Н.А., Антипенко А.А., Дементьев А.Ф., Нечаева М.Б., Тихомиров Ю.В. Особенности работы радиоинтерферометра с независимым приемом по сигналам навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС и НАВСТАР.//Труды XVII Международной научно-технической конференции «Радиолокация навигация связь».12-14 апреля 2011г.Воронеж.НПФ САКВОЕЕ.2011. Т.3. С.1858.**
- 6. М.Б. Нечаева, Н.А. Дугин, А.А. Антипенко, Д.А. Безруков, В.В. Безруков, В.В. Войтюк, А.Ф. Дементьев, Н. Екабсонс, М. Клаперс, А.А. Коноваленко, В.Ф. Кулишенко, А.С. Набатов, В.Н. Нестерук, Д. Пупильо, А.М. Резниченко, Э. Салерно, С.Д. Снегирев, Ю.В. Тихомиров, Р.В. Хуторной, К. Шкирманте, И. Шмелд, Чагунин А.К. РСДБ-локация астероида 2012 DA14. // Изв.ВУЗов. Радиофизика, 2014. Т. 57, № 10 (в печати).**