

Радиолокационные РСДБ-исследования с использованием радиотелескопа РТ-70

А. А. Коноваленко, И. С. Фалькович, Л. Н. Литвиненко,
А. С. Набатов, А. Г. Петренко, А. П. Федоров¹, А. Б. Камелин¹,
С. В. Малевинский², И. Е. Молотов³, А. Ф. Дементьев, Б. Н. Липатов,
М. Б. Нечаева⁴, Дж. Туккари⁵, Ш. Лю⁶, Ю. Н. Горшенков⁷, В. М. Агапов⁸

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: akonov@ira.kharkov.ua, falk@ira.kharkov.ua*

¹*Национальное космическое агентство Украины, Киев, Украина*

²*Национальный центр управления и испытаний космических средств, Евпатория, Украина*

³*Главная астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*

⁴*Научно-исследовательский Радиофизический институт, Нижний Новгород, Россия*

⁵*Институт радиоастрономии, Ното, Италия*

⁶*Астрономическая обсерватория, Урумчи, Китай*

⁷*Особое конструкторское бюро Энергетического института, Москва, Россия*

⁸*Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва, Россия*

Статья поступила в редакцию 2 сентября 2005 г.

Описаны результаты применения методов радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) к новому в мировой практике методу РСДБ-локации. Метод позволяет осуществить радиозондирование с Земли планет земной группы, околоземных астероидов, объектов “космического мусора” и прием отраженных эхо-сигналов сетью радиотелескопов в режиме РСДБ. Важными прикладными аспектами проведенных исследований являются определение точных траекторий астероидов, потенциально опасных для Земли, и фрагментов “космического мусора”. С использованием планетного радиолокатора на базе РТ-70 Национального центра управления и испытаний космических средств в Евпатории и международной кооперации РСДБ-станций “Низкочастотная РСДБ-сеть (LFVN)” было проведено 9 экспериментов по РСДБ-локации.

Введение

В настоящее время радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ) является самой передовой радиоастрономичес-

кой техникой, используемой в различных областях научных исследований. Основные принципы РСДБ заключаются в следующем. Космические объекты или явления наблюдаются по единой программе одновременно

на нескольких радиотелескопах (антеннах), расположенных на расстояниях от нескольких десятков до многих тысяч километров друг от друга. Радиосигналы от объектов когерентно принимаются в необходимом диапазоне частот высокочувствительными радиоприемниками, требуемые частотные полосы вырезаются видеоконверторами в зависимости от ширины полосы принимаемого радиосигнала, оцифровываются и записываются на магнитную ленту, видеокассеты, жесткие диски или транслируются по каналам связи вместе со шкалой времени пункта наблюдения. Все частотные преобразования приемного тракта на радиотелескопе привязываются к опорному водородному стандарту частоты. Шкала времени формируется также от водородного стандарта и синхронизируется по сигналам глобальной спутниковой системы радиоопределения GPS или телевизионным сигналам. Затем записанные сигналы подвергаются процедуре корреляционной обработки на спецпроцессорах (корреляторах) и вторичная обработка позволяет извлечь различную информацию в зависимости от поставленной задачи. Таким образом, для проведения РСДБ-наблюдений необходимо иметь несколько радиотелескопов, оснащенных однотипными радиоприемниками и системами регистрации, и центр корреляционной обработки.

Десятки специализированных радиотелескопов круглосуточно работают в РСДБ-режиме. Существует множество национальных (в США, Японии, Австралии), международных (Европейская, Глобальная, Геодезическая, Низкочастотная) и наземно-космических РСДБ-сетей, а также центров корреляционной обработки (в США, Голландии, Канаде, Японии и Австралии). Область применения методов РСДБ чрезвычайно обширна – от астрофизики до геодинамики и навигации межпланетных космических аппаратов. В 1996 г. был начат проект “Низкочастотная РСДБ-сеть (LFVN)” [1, 2]. Его главными задачами являлись создание международной РСДБ-кооперации с участием российских и украинских радиотелескопов и разработка новых оригинальных направлений РСДБ-исследований [3], чтобы иметь возможность по-

лучать научные результаты самого высокого уровня и занять достойное место в мировом РСДБ-сообществе. За время проекта 13 антенн – 4 российских (РТ-64, Медвежья Озера; РТ-22, Пушкино; РТ-15, Зименки; РТ-14, Старая Пустынь), 2 украинских (РТ-70, Евпатория; РТ-22, Симеиз) и 7 зарубежных (РТ-32, Вентспилс; РТ-32, Ното; РТ-14, Торунь; РТ-45 Пуне; 500×30, Ути; РТ-25, Урумчи; РТ-25, Шанхай) – были дооснащены приемно-регистрирующей радиоастрономической аппаратурой [4]. Организован 21 РСДБ-эксперимент с использованием в разных комбинациях радиотелескопов Англии, Индии, Италии, Канады, Китая, Латвии, Польши, России, США, Украины, Южной Африки и Японии, а также центров корреляционной обработки в Канаде, России и США. “Низкочастотная РСДБ-сеть (LFVN)” использует в качестве РСДБ-регистраторов устаревший терминал регистрации Mk-2 с полосой записи 2 МГц (центр корреляционной обработки НИРФИ-3 в Нижнем Новгороде) [5, 6], более современный канадский терминал S2 с полосой записи до 64 МГц (до последнего времени S2-эксперименты обрабатывались на корреляторе в Пентиктоне, Канада) [7-9] и терминал квази-реального времени NRTV для записи сигналов с полосой до 48 МГц на жесткие диски компьютера или трансляции их в сеть Интернет с центром корреляционной обработки в Ното (Италия) [10-12].

К настоящему моменту сложились три основных научных направления проекта “Низкочастотная РСДБ-сеть (LFVN)”. Развитие нового метода РСДБ-локации для измерений параметров движения планет земной группы, сближающихся с Землей астероидов, и т. н. объектов “космического мусора” (КМ) [13-16]. Развитие оригинального метода РСДБ-исследований солнечной короны и солнечного ветра, а также микровспышек – “спайков” [6, 17-19]. Освоение методов картографирования внегалактических радиоисточников [20-22].

Развитие метода РСДБ-локации

В настоящее время метод РСДБ является наиболее точным в астрометрии [23]. Начало совместной работы РТ-70 в Евпатории с про-

ектом “Низкочастотная РСДБ-сеть (LFVN)” позволило в 1998 г. открыть программу исследования околоземного пространства совершенно новым в мировой практике методом РСДБ-локации, сочетающим радиозондирование с Земли планет земной группы, околоземных астероидов, объектов КМ и прием отраженных эхо-сигналов сетью радиотелескопов в режиме РСДБ [13]. Эти работы направлены на создание методической, технической и программной базы для решения задач фундаментальной астрометрии: определения параметров векторов собственного вращения небесных тел, включая их короткопериодические (внутриорбитальные) вариации, а также определение методом дифференциальных координатных РСДБ-измерений [24] точного положения центров масс небесных тел (траекторий их движения) в квазиинерциальной системе координат, опирающейся на внегалактические радиоисточники, – имея конечной целью установление точной взаимной связи динамической барицентрической и радио- систем координат. Похожие исследования по изучению возможностей применения РСДБ-локации для визуализации поверхности небесных тел ведутся учеными США и Японии [25].

Важным прикладным аспектом проводимых исследований является определение точных траекторий астероидов, потенциально опасных для Земли, и фрагментов КМ. С использованием планетного радиолокатора на базе РТ-70 (Евпатория) Национального центра управления и испытаний космических средств (НЦУИКС) и международной кооперации РСДБ станций “Низкочастотная РСДБ-сеть (LFVN)” [1-4] было проведено 9 экспериментов по РСДБ-локации [13-16].

Подготовка и планирование экспериментов проводились совместно РИ НАНУ (Харьков, Украина) и ГАО РАН (Санкт-Петербург, Россия) с привлечением специалистов НЦУИКС (Евпатория, Украина), НИРФИ (Нижний Новгород, Россия) и ИПМ им. Келдыша (Москва, Россия) в рамках деятельности Российско-украинского научно-технического совета, который был организован космическими агентствами и академиями наук России и Украины в 1997 г. для формирования научной программы работ на РТ-70 в Евпатории (см. рис. 1).

Эта антенна имеет мощный передатчик непрерывного действия в 6 см диапазоне,



Рис. 1. Передающая 70-метровая антенна вблизи г. Евпатория

который используется для радиолокации планет и связи с межпланетными космическими аппаратами. Передача обычно осуществляется на частоте 5010.024 МГц с использованием и без использования линейной частотной модуляции (ЛЧМ) полосой 512 кГц и периодом 32 мкс. По паспорту передатчик может выдавать до 200 кВт непрерывной мощности, но на сегодня из-за отсутствия достаточного количества клистронов (уси-

лительных ламп) мощность не поднимается выше 75 кВт.

В экспериментах по РСДБ-локации отраженные эхо-сигналы принимались международной сетью радиотелескопов с участием приемных антенн РТ-64 (Медвежье Озеро, Россия), РТ-32 (Ното, Италия), РТ-32 (Торунь, Польша), РТ-25 (Шанхай, Китай), РТ-25 (Урумчи, Китай), РТ-22 (Симеиз, Украина) и др. (см. рис. 2 и таблицу 1). При этом ис-

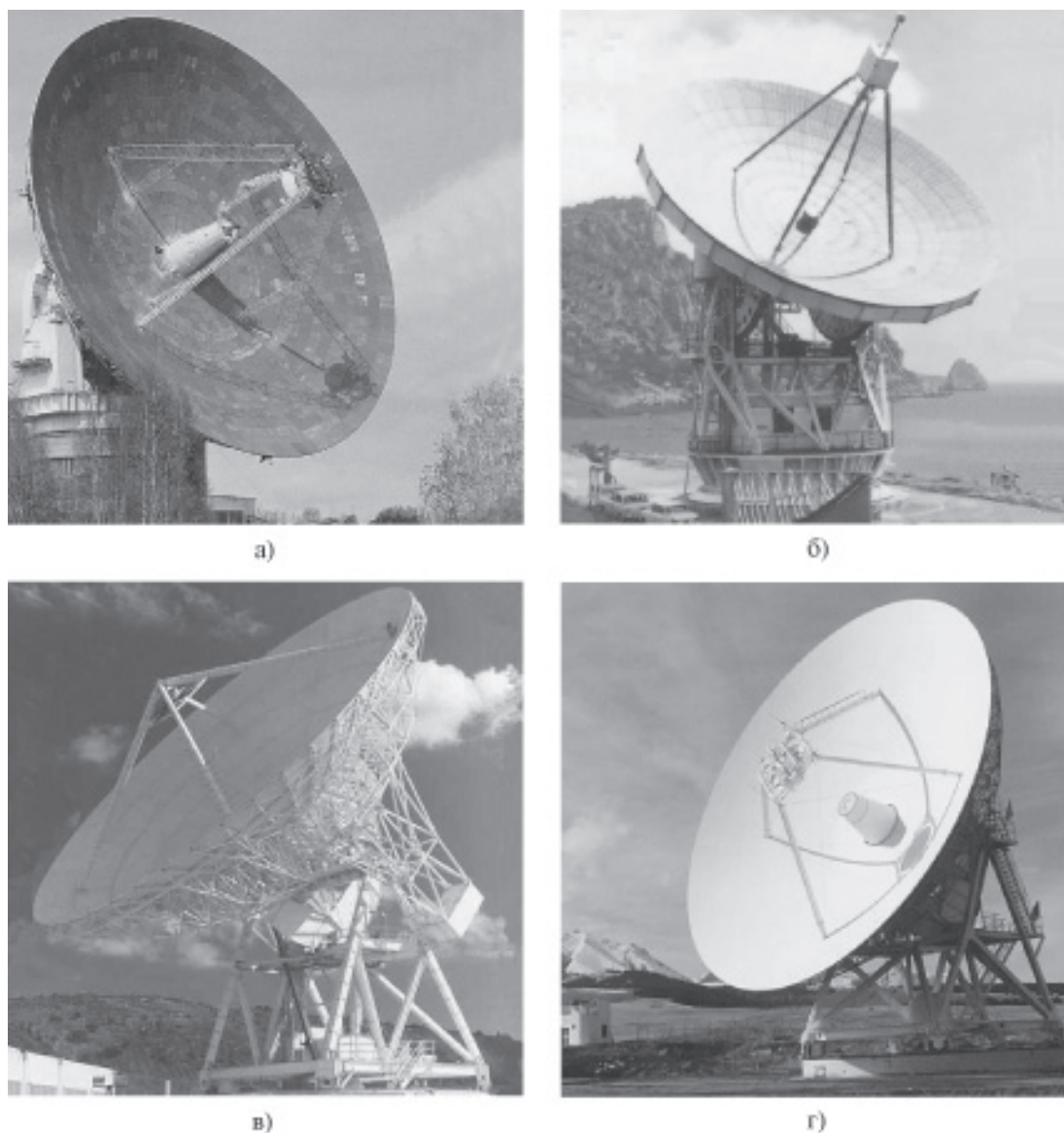


Рис. 2. Приемные антенны, участвующие в экспериментах по радиолокации: а) РТ-64 (Медвежье Озеро, Россия), б) РТ-22 (Симеиз, Украина), в) РТ-32 (Ното, Италия), г) РТ-25 (Урумчи, Китай)

Таблица 1. Эксперименты по РСДБ-локации

Название	Даты проведения	Исследуемые объекты	Участвующие радиотелескопы	Место обработки
VLBR99.1	02-08.06.1999	Венера, Марс	Евпатория, Светлое, Шанхай, Урумчи, Торунь, Кашима	ИПА, НИРФИ, CRL
VLBR00.2	03-09.09.2000	Венера, Меркурий, астероиды Митра и 2000CE59	Евпатория, Светлое, Шанхай, Урумчи, Торунь, Медвежьи Озера	DRAO, НИРФИ
VLBR01.1	23-29.05.2001	Венера, Меркурий, астероид 1999KW4, 7 ГСО-объектов	Евпатория, Светлое, Шанхай, Кашима, Ното, Урумчи, Торунь, Медвежьи Озера, MERLIN	DRAO, АКЦ ФИАН, НИРФИ
VLBR01.2	14-19.12.2001	Астероид 1998WT24, 5 ГСО-, 4 ВЭО-объекта, пробный “бим-парк” на ГСО	Евпатория, Светлое, Шанхай, Урумчи, Торунь, Калязин, Зеленчук, Алгонкуин	DRAO, ИПА, НИРФИ
VLBR02.1	23-29.07.2002	Астероид 2000PH5, Венера, 7ГСО-, ВЭО-, ПСО-объекта	Евпатория, Медвежьи Озера, Калязин, Ното, Шанхай, Урумчи	НИРФИ, АКЦ ФИАН
VLBR03.1	23-29.07.2003	Астероид 2000PH5, Марс, 10 ГСО-, ВЭО-, ПСО-объектов, пробный “бим-парк” на НО	Евпатория, Медвежьи Озера, Ното, Урумчи, Симеиз	НИРФИ, РИ НАНУ
VLBR04.1	21-25.06.2004	Астероид Итокава, объекты на ГСО, ВЭО и ПСО, “бим-парк”, пробный “бим-трек”	Евпатория, Медвежьи Озера, Ното, Симеиз	НИРФИ, РИ НАНУ
VLBR04.2	23-29.07.2004	Астероид 2000PH5, Венера, 18 ГСО-, ВЭО-, ПСО-объектов, “бим-парк”, “бим-трек”	Евпатория, Медвежьи Озера, Ното, Симеиз	НИРФИ, РИ НАНУ
VLBR04.3	29.09-5.10.2004	Астероид Таутатис, Венера, Луна, объекты на ГСО, ВЭО и ПСО, “бим-парк”, “бим-трек”	Евпатория, Медвежьи Озера, Ното, Симеиз	НИРФИ, РИ НАНУ

пользовалась имеющаяся кооперация и аппаратура проекта “Низкочастотная РСДБ-сеть (LFVN)”.

Первые эксперименты (см. таблицу 1) проводились с канадской системой регистрации S2, поскольку тогда уже не работал центр корреляционной обработки Mk-2 (коррелятор Блок-2 Калифорнийского тех-

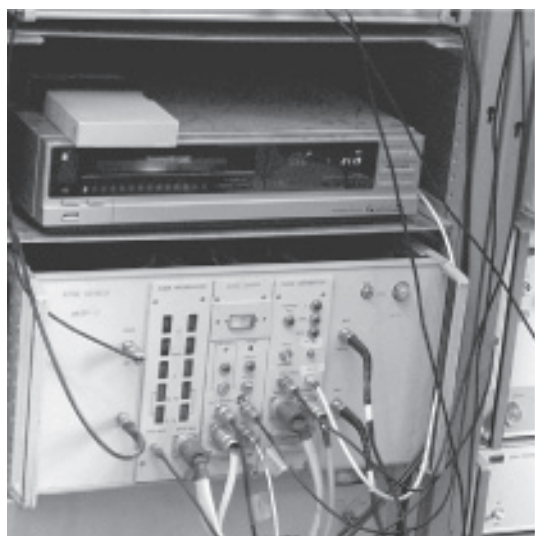
нологического института в США был неожиданно остановлен в конце 1998 г.). Затем началось создание Mk-2 коррелятора НИРФИ-3 в Нижнем Новгороде (см. рис. 3) [5]. Одновременно терминалы регистрации Mk-2 (рис. 4, а) из аппаратурных комплексов РТ-70 в Евпатории и РТ-64 в Медвежьих Озерах (см. рис. 5) были модерни-



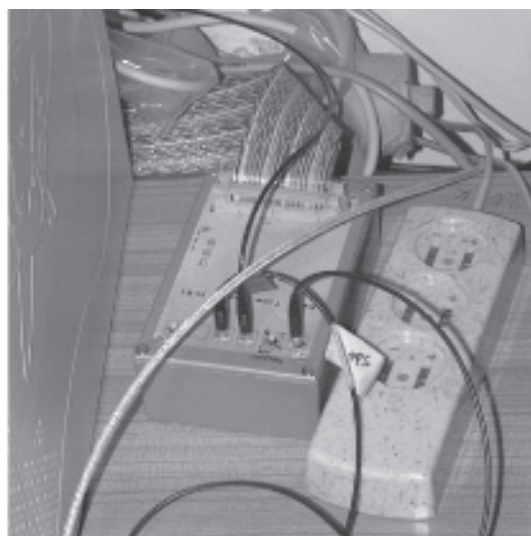
Рис. 3. Центр корреляционной обработки формата Мк-2 в НИРФИ (Нижний Новгород)

зированы (установлены более новые видеомагнитофоны и видеоконверторы). На следующем этапе все радиотелескопы, участвующие в экспериментах РСДБ-локации, были дооснащены системой регистрации NRTV (рис. 4, б). Центр корреляционной обработки NRTV-формата создается в Ното (Италия).

Таким образом, в рамках работ по РСДБ-локации параллельно развиваются две РСДБ-подсистемы – обычного и квазиреального времени. Обычная система РСДБ базируется на использовании систем записи РСДБ-сигналов с однобитным квантованием на видеокассеты (формат Мк-2) и центра корреляционной обработки в НИРФИ (Нижний Новгород). Записанные видеокассеты со всех антенн пересылаются в ГАО РАН, а затем передаются в Нижний Новгород для корреляционной обработки, которая длится от трех недель до нескольких месяцев (в штатном режиме обработка может осуществляться в течение нескольких



а)



б)

Рис. 4. Терминалы РСДБ-регистрации: а) Терминал РСДБ-регистрации Мк-2 в Медвежьих Озерах. Данные, поступающие в видеополосе, оцифровываются и форматируются в кадры записи форматом (нижний блок) и регистрируются на видеокассеты с помощью видеомагнитофона. б) Терминал РСДБ-регистрации NRTV в Медвежьих Озерах. Данные, поступающие в видеополосе, оцифровываются, группируются в файлы записи и регистрируются на жесткие диски компьютера, а затем транслируются в сеть Интернет для передачи в центр обработки



а)



б)

Рис. 5. Комплексы РСДБ-аппаратуры в Медвежьих Озерах (а) и Евпатории (б)

дней). Система квазиреального времени использует терминалы NRTV [10-12], которые позволяют записывать РСДБ-сигналы на жесткие диски компьютера, а потом транслировать их по сети Интернет в центр корреляционной обработки в Ното (Италия) в квазиреальном времени. Каждый NRTV-терминал укомплектовывается внешним жестким диском объемом 120 Гбт, на который записываются РСДБ-данные, причем каждая минута записи разбивается на две части: 10 с и 50 с. 10-секундные интервалы данных передаются по сети Интернет на коррелятор в Ното в квазиреальном времени (с этой целью аппаратурная комната в Медвежьих Озерах была подключена к сети Интернет оптическим кабелем, а аппаратурная комната в Евпатории – радиорелейным каналом). Основная часть данных остается на жестких дисках, которые перевозятся в Москву, и через высокоскоростной Интернет-выход в ИМП им. Келдыша РАН данные перекачиваются в Италию.

Во время экспериментов по РСДБ-локации отрабатываются задачи получения координатной и некоординатной информации по трем классам объектов:

1) планеты земной группы (Венера, Марс, Меркурий) – предполагается исследовать короткопериодические вариации собственного вращения планет, уточнять ориентацию оси вращения, а также измерять траектории планет в квази-инерциальной системе координат;

2) астероиды, сближающиеся с Землей, (АСЗ) – предполагается уточнять траектории опасных астероидов, а также получать информацию об их форме, вращении и составе поверхности;

3) объекты КМ на различных типах орбит, РТ-70 находится на 33.19° в. д., поэтому может обеспечить дугу контроля $> 120^\circ$ (23° з. д. – 97° в. д.) – предполагается уточнить траектории движения объектов на геостационарной (ГСО), высокоэллиптических (ВЭО) и полусуточных (ПСО) орбитах, определять параметры их вращения, получать информацию об их размерах и форме; другим направлением исследований является

отработка методов обнаружения мелко-размерной фракции КМ на низких орбитах, а также ГСО и ВЭО.

Во время обработки в НИРФИ на базе предварительной модели движения объекта, с учетом координат антенн и времени измерений рассчитывается зависимость задержки сигнала от времени в форме полинома 3-й степени. Эти вычисления принимают во внимание эффект ближней зоны, движение объекта относительно геоцентра и вращение Земли. В свою очередь такой полином используется для вычисления закона изменения сдвига фазы от времени, который вводится в принимаемый эхо-сигнал во время корреляции.

РСДБ-локация планет земной группы и околоземных астероидов

Одним из аспектов применения метода РСДБ-локации является определение параметров вектора собственного вращения планет. Традиционные методы определения этих параметров с помощью обычной радиолокации требовали проведения многолетних экспериментов и подразумевали получение усредненных за периоды наблюдений значений. Так, по наблюдениям в течение восьмилетнего интервала [26] была сделана оценка периода вращения Венеры, который составил (243.06 ± 0.05) суток. Ориентация оси вращения не уточнялась, углы наклона оси принимались равными $\alpha = 273^\circ$, $\delta = 66^\circ$ (по данным [27]).

Метод РСДБ-локации дает возможность получения “почти мгновенной”, усредненной лишь на мерном интервале в несколько месяцев, величины угловой скорости и ориентации оси вращения.

Идея определения элементов вращения небесного тела состоит в следующем. Результаты картографирования планет радиолокационным способом свидетельствуют о наличии на их поверхности малоразмерных областей с аномальными отражающими характеристиками (светлых и темных участков). Выберем такой участок поверхности, чтобы его видимые угловые размеры были близ-

ки к максимальному разрешению интерферометра по углу. Таких участков может быть несколько. Они дадут аномальные выбросы или впадины в спектре отраженного интерференционного сигнала и такие же эффекты в корреляционной огибающей. Предлагается отслеживать перемещение этих аномалий с течением времени.

В семи экспериментах по РСДБ-локации проводились наблюдения Венеры, Марса и Меркурия. Пробная корреляционная обработка записей формата S2 эксперимента VLBR99.1, организованная на корреляторе ИПА РАН (Санкт-Петербург), позволи-

ла обнаружить корреляционные отклики на всех трех базовых линиях эксперимента Евпатория – Светлое – Шанхай [28]. Пример полученного кросс-спектра мощности интерференционного отклика см. на рис. 6.

К сожалению, обработка в ИПА РАН не была доведена до конца (до конкретных цифр). Тем не менее она продемонстрировала принципиальную возможность подобных измерений. На следующем этапе была сделана ставка на S2 корреляторы в Пентиктоне (Канада) и АКЦ ФИАН (Россия). Но в итоге они так и не были доработаны для анализа сигналов ближней зоны (клас-

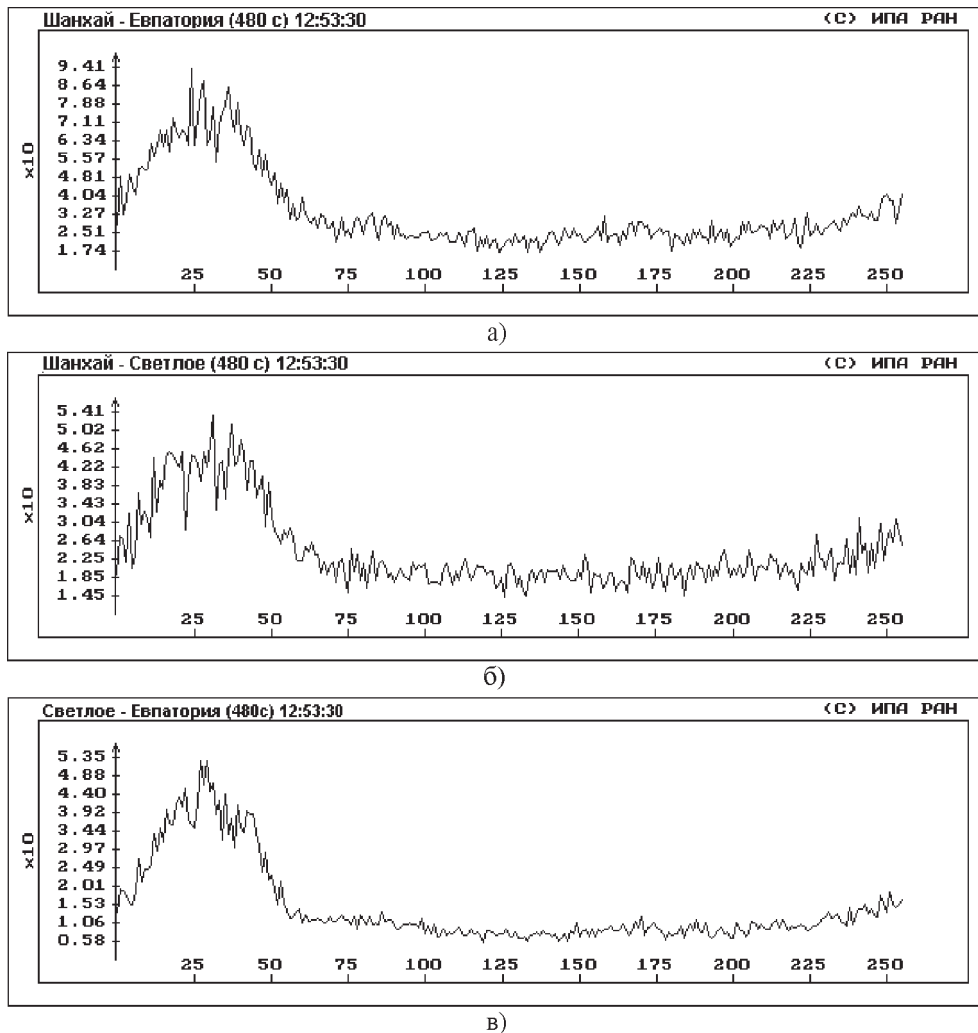


Рис. 6. Кросс-спектры мощности интерференционного отклика на эхо-сигнал, отраженный планетой Венера, для базовых линий Шанхай – Евпатория (а), Шанхай – Светлое (б) и Светлое – Евпатория (в)

сические астрономические корреляторы рассчитаны только для работы с сигналами дальней зоны, когда приходящая радиоволна от сверхдаленных радиоисточников имеет плоский фронт). Мк-2 коррелятор НИРФИ-3 [6], который начал создаваться в 2000 г., получил первые результаты обработки только в 2002 г. (удалось скоррелировать сигналы от квазаров на базовой линии Евпатория – Медвежьих Озера). В 2003 г. было подготовлено специальное программное обеспечение для работы с эхосигналами планет, которое сейчас проходит отладку. Поэтапно из-за возникающих поломок были заменены все блоки терминалов регистрации Мк-2 (а в Медвежьих Озерах – еще и синтезаторы частот, используемые для работы с видеоконвертором).

В эксперименте VLBR02.1 (23-29 июля 2002 г.) эхосигналы от планеты Венера были зарегистрированы с помощью РСДБ-терминала Мк-2, а в VLBR03.1 (23-29 июля 2003 г.) были записаны эхосигналы от планеты Марс (см. рис. 7, 8). В настоящее время записи обрабатываются в НИРФИ (Нижний Новгород).

В последнее время мировая общественность начала осознавать проблему астероидной опасности. Падение астероида на Землю является событием с низкой вероятностью, но чрезвычайными последствиями и един-

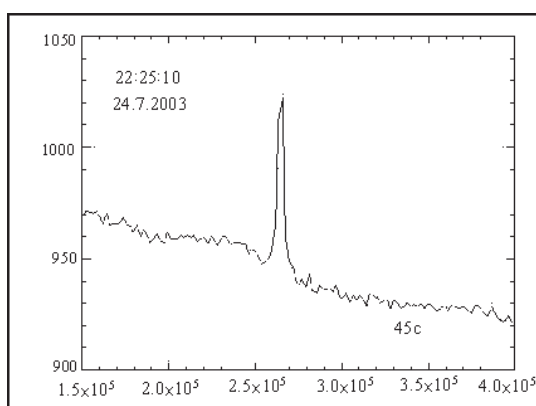


Рис. 7. Эхо-сигнал от планеты Марс. Автокорреляционный спектр, станция в Медвежьих Озерах. Запись на NRTV-терминал

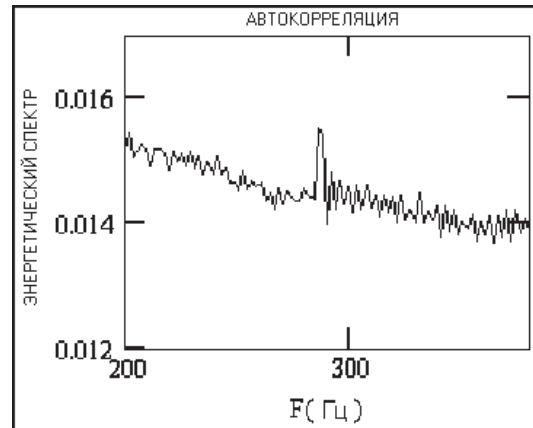


Рис. 8. Эхо-сигнал от планеты Венера. Автокорреляционный спектр, станция в Медвежьих Озерах. Запись на Мк-2 терминал

ственным примером естественной опасности, способной уничтожить человеческую цивилизацию (в зависимости от размеров, оно может вызвать локальную, региональную или глобальную катастрофу). Анализ статистики открытий АСЗ и изучение лунных кратеров позволяет предположить наличие еще порядка 1 млн неизвестных объектов размером от 50 м до 1÷2 км. Поэтому задачи оперативного уточнения орбит новых обнаруженных АСЗ (для предсказаний моментов опасных сближений с Землей) и определения физико-минералогических свойств АСЗ (для прогноза возможных последствий столкновения с Землей) являются важнейшей частью любого комплекса мер защиты Земли. Даже единичное радиолокационное измерение улучшает знание орбиты настолько, что позволяет предотвратить “потерю” открытого астероида или кометы, поскольку на порядок и более уменьшает неопределенность угловых координат по сравнению с предварительной орбитой, построенной на основе только оптической астрометрии. В течение последнего десятилетия неопределенность “оптических” (т. е. построенных только на основе оптических данных) орбит “новых” околоземных астероидов удавалось снижать со 100000 до 100 км именно радиолокационными методами. Потенциально ме-

тод РСДБ-локации позволяет определять параметры траектории движения центров масс небесных тел в квазиинерциальной системе координат с точностью до $0.01''$ за единичное измерение (или до $0.001''$ за серию измерений). За время выполнения программы было проведено 8 попыток РСДБ-локации астероидов. Пробная обработка записанных магнитных лент показала, что существующая конфигурация коррелятора НИРФИ-3 имеет недостаточную разрешающую способность, чтобы выделить чрезвычайно слабый и узкополосный сигнал (единицы Гц). Поэтому в Италии начата разработка нового коррелятора для формата NRTV с возможностью сверхтонкой фильтрации радиосигналов.

РСДБ-локация спутников и объектов КМ

Техногенное загрязнение околоземного пространства КМ является прямым следствием человеческой активности в космосе. Количество фрагментов КМ в околоземном пространстве достигло фантастических величин, представляя серьезную опасность для пилотируемых орбитальных станций, ракет, функционирующих спутников, а также для жизни людей и экологии Земли. Вокруг Земли уже вращается около 13500 каталогизированных объектов и сотни тысяч мелких частиц. Дальнейшее освоение околоземного пространства невозможно без контроля текущей ситуации, анализа источников и закономерностей эволюции КМ. Особенно сложная ситуация складывается на ГСО: каталогизирован только КМ крупнее 1 м, тогда как происходящие взрывы объектов (уже доказано 13 взрывов) должны были дать облака невидимых с Земли фрагментов (на ГСО это особенно опасно, поскольку здесь не имеется механизма самоочищения, как на низких орбитах, за счет торможения в атмосфере).

Мощный передатчик РТ-70 в Евпатории предоставляет уникальную возможность осуществлять радиолокацию космических объектов на ГСО и ВЭО. Кроме того, узкополосный отраженный сигнал от крупных

орбитальных объектов гораздо больше подходит для отработки метода РСДБ-локации. Поэтому с 2001 г. начались пробные эксперименты по радиолокации спутников и объектов КМ на различных типах орбит (см. таблицу 1). В настоящее время на Мк-2 и NRTV терминалы уже записаны эхо-сигналы от более 50 объектов размером от 50 см до 100 м на ГСО, ВЭО и ПСО, что дало возможность тщательно отработать все этапы корреляционной обработки и получить интересные научные результаты [15, 29-31].

На первом этапе обработки записанных магнитных лент делается автокорреляция сигналов в месте предполагаемой записи отраженных эхо-сигналов, чтобы детектировать наличие радиолокационного эха и его продолжительность по времени (см. рис. 9).

После обнаружения эхо-сигналов путем взаимной корреляции записей излученного зондирующего радиосигнала, сделанных в Евпатории, и принятых отраженных радиосигналов получают измерения доплеровского сдвига частоты с точностью до 0.003 Гц одновременно из трех пунктов (Медвежьи Озера, Ното, Урумчи) для каждой базовой линии передающая – приемная антенны отдельно (см. рис. 10-12).

Сравнение результатов доплеровских измерений, полученных в двух пунктах в двух сеансах РСДБ-локации, и оптических наблюдений показано на примере уточнения орбиты объекта “Космос-1366”. Измерения радиальной скорости были обработаны совместно с оптическими измерениями прямого восхождения и склонения объекта. В целом интервал измерений охватывает период с июля 2002 г. по июль 2003 г. Для сравнения уточнение орбиты “Космос-1366” было получено только по оптическим измерениям. Результаты апостериорной оценки точности определения элементов орбиты в каждом из этих случаев приведены в таблице 2.

Как видно из этой таблицы, привлечение измерений радиальной скорости обеспечивает существенное повышение точности определения орбиты рассматриваемого объекта.

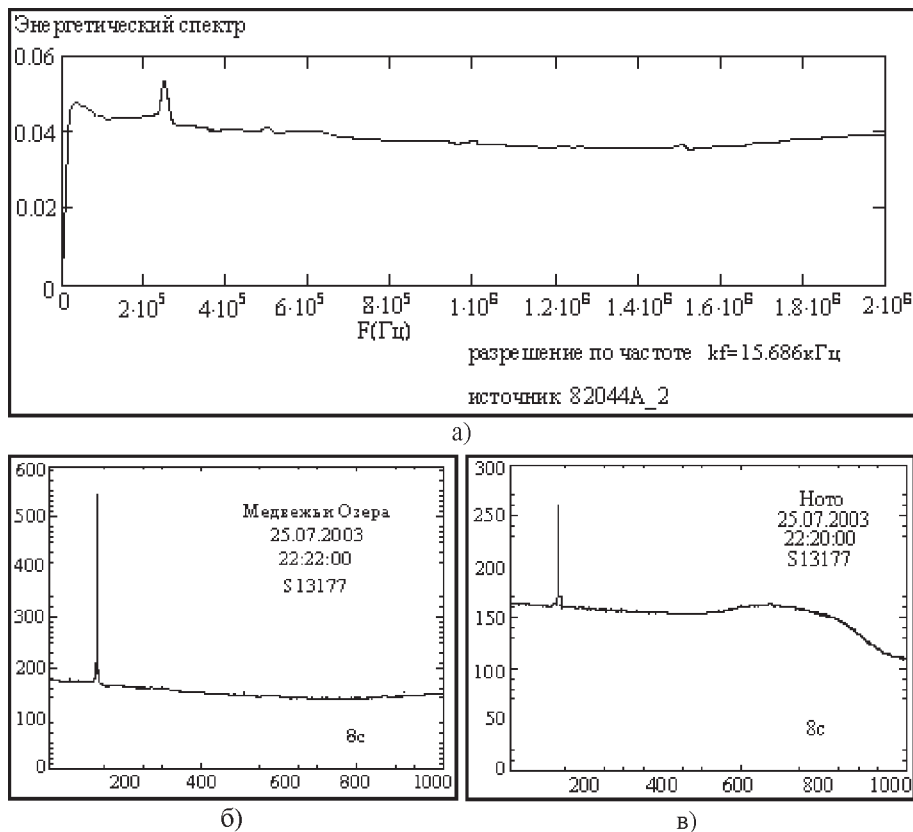


Рис. 9. Примеры детектирования эхо-сигналов от объекта “Космос-1366”:

а) – на корреляторе НИРФИ-3 в Нижнем Новгороде по Мк-2 записи из Медвежьих Озер, б) – по NRTV записи в Медвежьих Озерах, в) – по NRTV записи в Ното

На рис. 13 представлены рассогласования измеренных и расчетных значений оптических и радиолокационных измерений. По оси абсцисс отложено время, отсчиты-

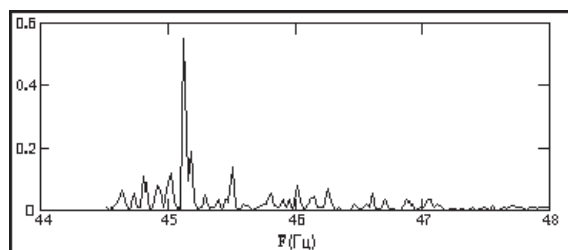


Рис. 10. Спектр интерферометрического сигнала на базовой линии Евпатория (переданный сигнал) – Медвежьих Озера (принятое эхо) для ГСО-объекта “Космос-1366” (1991-054D). Коррелятор НИРФИ-3 (Нижний Новгород), 13:20 UT, время накопления – 33.24 с, частотное разрешение – 0.03 Гц, доплеровский сдвиг – 22.585 Гц

ваемое в сутках от 1 января 2003 г. По оси ординат – отклонения измеренных значений от их расчетных аналогов. Отклонения оптических измерений (треугольники) приведены в угловых секундах. Отклонения измерения радиальной скорости (черные и серые квадраты) в мм/с.

Период вращения объектов определяется на основе анализа записи уровня мощности принимаемых эхо-сигналов с высоким временным разрешением (полоса частот 2 МГц после квадратичного детектора с периодом 16 мс), которая осуществляется в пункте в Медвежьих Озерах (см. рис. 14). На следующем этапе обработки получают данные о размерах отражающих областей вращающихся объектов, дающих отчетливое периодическое импульсное отражение, с учетом (при ряде ограничений) того, что форма импульсов описывает развертку во времени зависимости диаграммы рассеяния по мощности отражающих областей

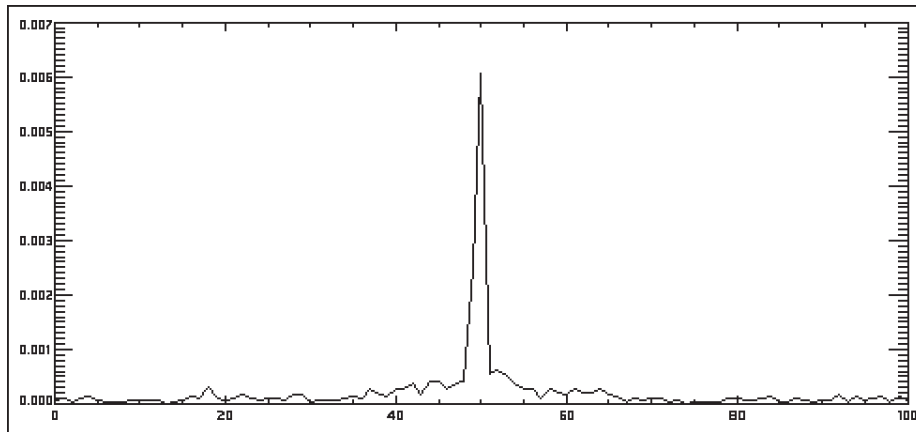


Рис. 11. Спектр интерферометрического сигнала на базовой линии Евпатория (зондирующий сигнал) – Ното (принятое эхо) для ГСО-объекта. NRTV-коррелятор (Ното, Италия). Копия зондирующего сигнала передана в Италию по сети Интернет

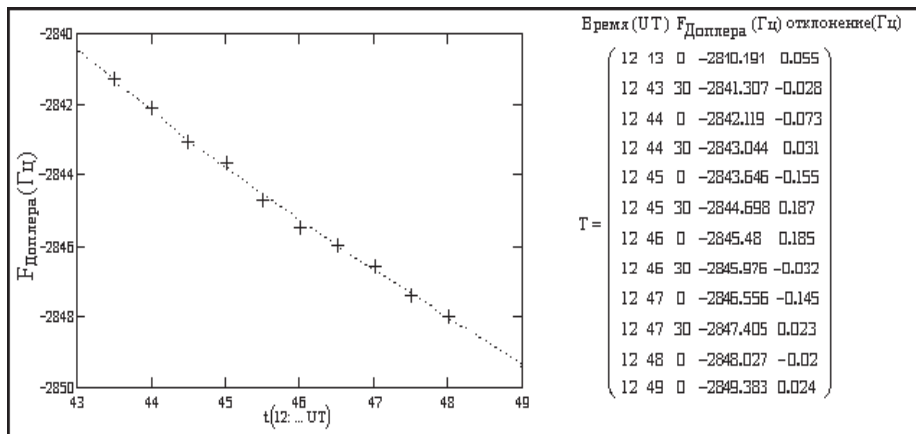


Рис. 12. Среднеквадратические отклонения измерений доплеровского смещения частоты. Доплеровский сдвиг для эхо-сигнала от объекта “Космос-1366” в зависимости от времени и его отклонение от аппроксимирующего сглаживающего полинома. При совместной обработке доплеровских данных двух пунктов (Медвежьи Озера и Ното) с результатами оптических наблюдений невязки орбиты уменьшились в 7 раз по сравнению с результатами обработки только оптических наблюдений

Таблица 2. Результаты апостериорной оценки точности определения элементов орбиты для объекта “Космос-1366” по результатам только оптических измерений и по совместным оптическим и радиолокационным данным

Параметр	Ошибка определения только по оптическим измерениям	Ошибка определения по оптическим измерениям и измерениям РСДБ
Период, с	0.00039	0.00016
Эксцентриситет	0.000001289	0.00000011
Наклонение, градус	0.0000397	0.0000385
Долгота узла, градус	0.0001523	0.0001443
Аргумент перицентра, градус	0.3186443	0.0553811
Время перицентра, с	0.08468	0.03756

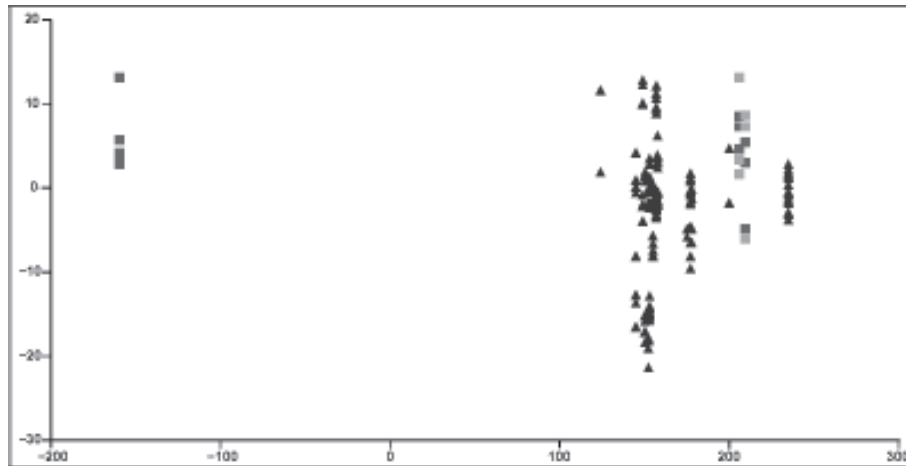


Рис. 13. Рассогласования измеренных и расчетных значений оптических и радиолокационных измерений для объекта “Космос-1366”

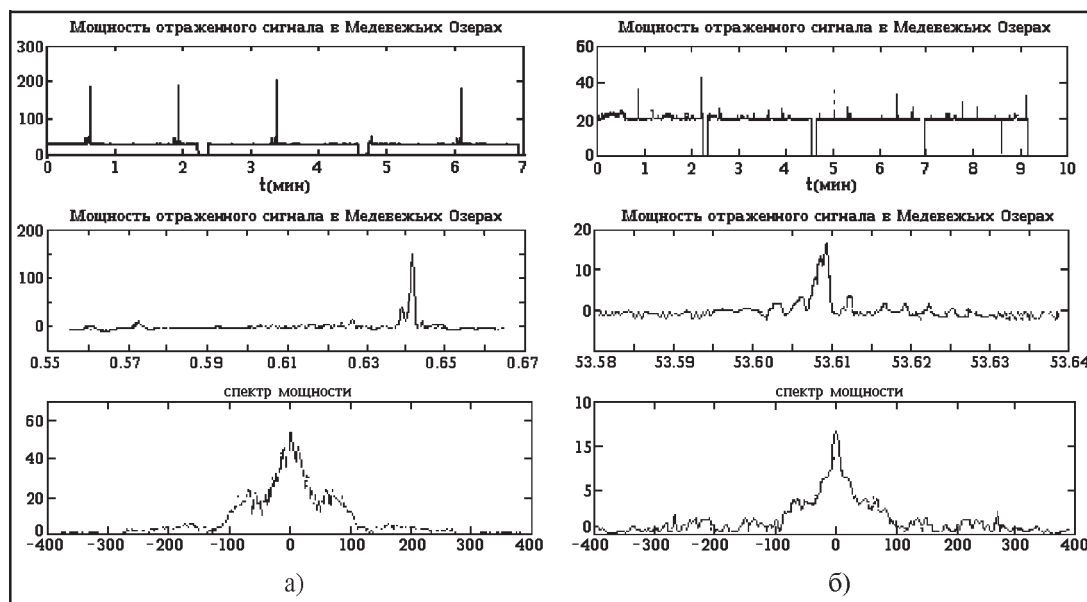


Рис. 14. Оценки периода вращения и размеров космических объектов: а) – ГСО-объект “Радуга-9”. Период вращения 81.813 с. На фоне общего размера блика $500 \div 600$ см выделяются два более ярких пятна по $150 \div 200$ см. б) – ГСО-объект “Горизонт-3”. Период вращения 82.422 с. Обищий размер объекта 450 см, внутри выделяется один яркий блик размером $45 \div 50$ см

этих объектов от угла. (Зная период вращения объекта легко перейти от времени к углу.) Диаграмма направленности (рассеяния) по полю связана с распределением тока по отражающей области преобразованием Фурье. И в этом случае задача определения одномер-

ного (вдоль плоскости вращения объекта) стрип-распределения тока решается однозначно. Поскольку мы имеем диаграмму по мощности (а не по полю), в нашем случае можем получить лишь свертку пространственного распределения тока самого с собой.

Тем не менее на основе фурье-анализа записей интенсивности определенная информация о размерах сильно отражающих областей может быть извлечена (см. рис. 14). Пробные исследования динамики доплеровских сдвигов частоты позволили получить оценки общих размеров объектов (см. таблицу 3).

Оценки периода вращения могут уточняться по результатам доплеровских измерений. На рис. 15 представлены измерения для объекта "Радуга-9". Измерения, выполненные в Медвежьих Озерах по записи интенсивности эхо-сигнала (рис. 15, а), дают период вращения объекта около 83 с. Зави-

Таблица 3. Результаты измерений в экспериментах по РСДБ-локации высокоорбитальных космических объектов

Международное обозначение объекта, дата измерений	Время измерений; сдвиг Доплера, Гц			Медвежьи Озера	
	Медвежьи Озера	Урумчи	Ното	Период вращения, с	Размеры элементов/общие, м
1976-107А Экран 1, 28.07.03	20:30:00 +2286.703 20:31:00 +2296.946 20:32:00 +2306.633	20:30:00 +2235.195 20:31:00 +2243.070 20:32:00 +2251.639		166.75	4.0/(9÷10)×4.5
1977-092А Экран 2, 29.07.03	23:50:00 +3768.594 23:51:00 +3769.716 23:52:00 +3770.720	23:50:00 +3315.859 23:51:00 +3316.054 23:52:00 +3316.422			
1979-105А Горизонт 3, 29.07.03	05:10:00 +1561.565 05:11:00 +1548.997 05:12:00 +1537.116	05:10:00 +1451.803 05:11:00 +1442.197 05:12:00 +1433.341		82.422	4.5,0.5/(9÷10)×4.5
1981-069А Радуга-9, 25.07.02	11:30:00 -2535.140		11:30:00 -2054.500	61.09	
1981-069А Радуга-9, 25.07.03	21:40:00 +2714.477 21:41:00 +2723.652 21:42:00 +2733.005	21:40:00 +2559.217 21:41:00 +2570.585 21:42:00 +2579.379		81.813	6.0,1.5/(9÷10)×4.5
1981-069А Радуга-9, 28.07.03	19:50:00 +1599.789 19:51:00 +1612.946 19:52:00 +1627.336	19:50:00 +1612.462 19:51:00 +1623.152 19:52:00 +1635.551		83.539	6.0,1.5/(9÷10)×4.5
1982-044А Космос-1366, 25.07.02	12:44:00 -2842.119 12:45:00 -2843.646 12:46:00 -2845.480		12:44:00 -2306.723 12:45:00 -2308.451 12:46:00 -2310.000		
1982-044А Космос-1366, 25.07.03	22:22:00 +3047.243 22:22:58 +3053.114 22:24:00 +3059.083	22:22:00 +2849.140 22:23:00 +2853.369 22:24:00 +2857.373		189.833	2.4/3.0×2.0
1982-044А Космос-1366, 29.07.03	03:50:00 +1212.257 03:51:00 +1199.414 03:52:00 +1186.991	03:50:00 +2001.639 03:51:00 +1090.792 03:52:00 +1080.341			
1988-095А Радуга 22, 28.05.01				21.9	
1989-081А Горизонт 19, 25.07.03	23:39:43 +1330.406 23:40:42 +1337.620 23:41:41 +1344.806	23:40:00 +1261.068 23:41:00 +1267.582 23:42:00 +1273.778			
1990-061D Протон 4-я ст. 27.05.01				5.93	

Таблица 3. Продолжение

Международное обозначение объекта, дата измерений	Время измерений; сдвиг Доплера, Гц			Медвежья Озера	
	Медвежья Озера	Урумчи	Ното	Период вращения, с	Размеры элементов/общие, м
1991-054D IUS-15SRM-2, 25.07.02	13:20:00 -14.060		13:20:00 -17.997		
1994-056C LAPS АКМ, 26.07.02			17:15:00 -73601.820		
1994-056C LAPS АКМ, 29.07.03	00:30:00 -54791.475 00:31:00 -54550.784 00:32:00 -54343.947	00:30:00 -53996.129 00:31:00 -53800.778 00:32:00 -53598.217		4.95	
1999-033D Протон 4-я ст. 23.07.02					
1999-033D Протон 4-я ст. 28.07.03	19:10:00 -18211.962 19:11:00 -17986.546 19:12:00 -17768.602	19:10:00 -18981.314 19:11:00 -18761.371 19:12:00 -18549.234		5.772	1.1,1.0/6.0×6.0
1989-001C Космос-1989, 29.07.03	03:10:00 +10154.778 03:11:00 +9884.539 03:12:00 +9614.148	03:11:00 +10839.649 03:12:00 +10663.603			

зависимость максимума скоррелированного сигнала на базовой линии Евпатория – Медвежья Озера дают схожую картину (рис. 15, б). В то же время зависимость максимума скоррелированного сигнала на базовой линии

Евпатория – Урумчи показывает, что реальный период вращения объекта в два раза больше, т. е. 166 с.

Это может объясняться наличием на объекте симметричных структур (например,

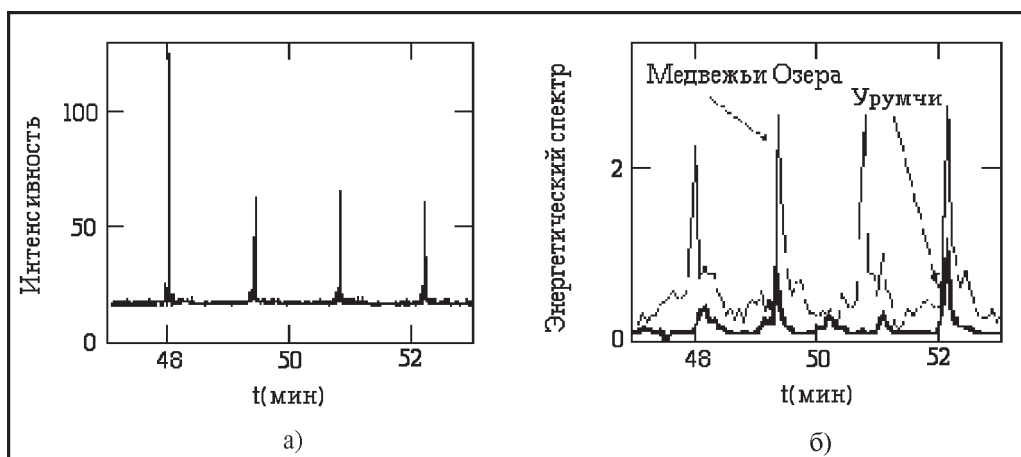


Рис. 15. Измерения периода вращения для объекта “Радуга-9”

панелей солнечных батарей), которые видны из Медвежьих Озер и Урумчи под разными углами зрения.

На следующем этапе обработки получают кросскорреляционные спектры для спутниковых эхо-сигналов на РСДБ-базах Медвежьего Озера – Ното – Урумчи (см. образец на рис. 16.) Кросс-корреляция между принятыми эхо-сигналами для каждой базовой линии приемных антенн вычисляется на моменты совпадения максимумов спектров корреляционных сигналов на базах передающая – приемная антенны (см. рис. 15, б).

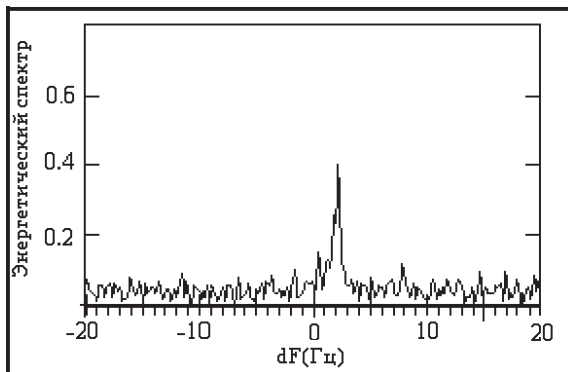


Рис. 16. Кросс-спектр для эхо-сигнала от объекта “Космос-1366” на базовой линии двух приемных антенн Медвежьего Озера – Урумчи

Получение кросс-корреляции между принятыми эхо-сигналами – это первый шаг на пути реализации прецизионных угломерных измерений и построения радиоизображений спутников.

Зависимость максимума спектра от времени для кросскорреляционных сигналов, измеренных на базах Медвежьего Озера – Ното, Медвежьего Озера – Урумчи, Ното – Урумчи, для эхо-сигнала объекта “Радуга-9” приведены на рис. 17.

Сдвиг максимума спектра для трех баз относительно начальной точки отсчета $t_0 = 22:23:11$ составляет -3.35 с для базы Медвежьего Озера – Ното, $+1.65$ с для базы Медвежьего Озера – Урумчи, -5.5 с для базы Ното – Урумчи. Соответственно относительно пункта в Медвежьих Озерах сигнал в Ното приходит раньше на 2.15 с, а в Урумчи – с отставанием на 5 с. Этот результат можно интерпретировать следующим образом. Диаграмма рассеяния объекта может быть достаточно узкой (если считать, что отношение размера отражающей плоскости к длине волны порядка 100, диаграмма направленности должна составить несколько градусов). При вращении максимум излучения последовательно захватывает приемные пункты, что можно использовать для определения направления оси вращения аппарата.

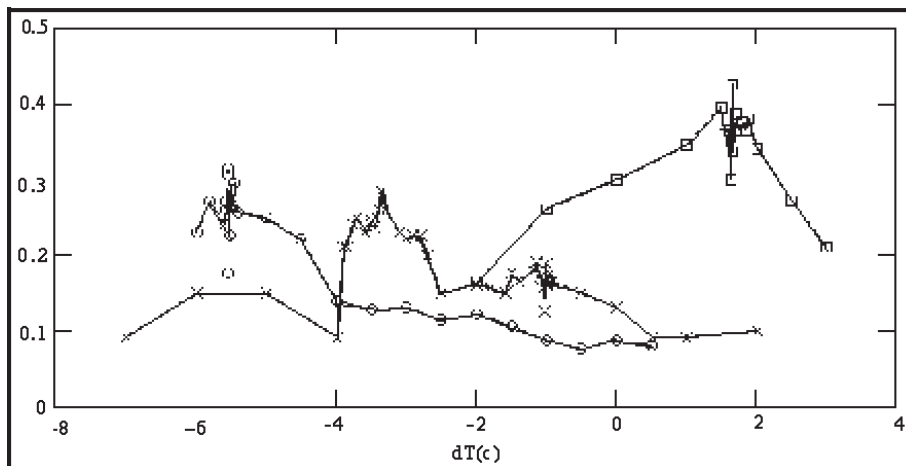


Рис. 17. Зависимость максимума спектра от времени для кросс-корреляционных сигналов, полученных на базах Медвежьего Озера – Ното (– × –), Медвежьего Озера – Урумчи (– □ –), Ното – Урумчи (– ○ –) для эхо-сигнала от объекта “Радуга-9”

На последнем этапе обработки осуществляется привязка положения космического объекта к положению опорных квазаров, закрепляющих радиосистему координат. Для этого во время наблюдений специально подбираются квазары, находящиеся на расстоянии порядка 5 градусов от исследуемого объекта, и РСДБ-сеть приемных антенн последовательно наблюдает эхо-сигнал от объекта и опорный квазар.

Во время обработки эксперимента получают т. н. дифференциальные пары – частота интерференции и задержка по эхо-сигналу и по сигналу опорного квазара. Последующее вычисление разницы между этими величинами позволяет получить угловые координаты космического объекта с точностью до 0.001 угловой секунды. Получение кросс-корреляции по опорным квазарам на базе передающая – приемная антенны позволяет вычислить разницу шкал времени этих двух пунктов, чтобы перейти к измерению дальности до объекта с использованием ЛЧМ-зондирующего сигнала.

Пробные радиолокационные эксперименты по обнаружению мелких фрагментов КМ

Оптические и радиолокационные наблюдения, эксперименты непосредственно в космосе доказали существование сотен тысяч мелких фрагментов КМ на всех типах орбит, представляющих наибольшую опасность для всех видов пилотируемых космических кораблей и автоматических аппаратов, поскольку столкновения именно с мелкими частицами происходят наиболее часто. Эти фрагменты не отслеживаются с Земли, и их столкновения с космическими аппаратами (КА) не могут быть предсказаны. Средняя относительная скорость таких фрагментов на орбитах ниже 2000 км равна 10 км/с. Поэтому даже небольшие частицы КМ обладают значительным количеством кинетической энергии. Алюминиевая сфера диаметром 1.3 мм обладает разрушительной способностью пули 22-го калибра. Попадание 10-см фрагмента высвобождает энергию, сопоставимую с динамит-

ным взрывом. Фрагменты размером от 1 мм до 1 см могут пробить КА, попав в уязвимое место, и привести к его гибели, если поразят летный компьютер или топливный бак. Фрагменты от 1 см до 10 см пробивают оболочку большинства КА. Попадание 10-см фрагмента приводит к взрыву КА с высвобождением более 1 миллиона фрагментов размером крупнее 1 мм в виде облака КМ, чрезвычайно опасного для всех КА, имеющих близкие орбиты.

На низких орбитах каталогизированы фрагменты КМ с размерами более 5 см. Главным источником информации о низкоорбитальном КМ размером от 5 до 20 см является американская система контроля космического пространства (СККП). Российская СККП на данный момент отслеживает объекты размером более 30 см. На высоких орбитах каталогизированы только объекты крупнее 1 м. Происхождение мелких фрагментов объясняется в основном разрушением КА и объектов КМ (предполагается, что уже было более 150 разрушений). Например, разрушение шести КА в 1998 г. породило более 400 фрагментов (из них каталогизированы только 84). Количество частиц КМ, превышающих 1 см, оценивается на низких орбитах в несколько сотен тысяч.

Ситуация с мелкогабаритной фракцией КМ в области ГСО более неоднозначная. На ГСО каталогизированы объекты космического мусора размером более 1 м. Однако оптические наблюдения, проводимые Европейским космическим агентством, обнаружили тысячи фрагментов с размерами от 10 до 50 см на ГСО и ВЭО. Мелкие невидимые с Земли фрагменты на ГСО представляют серьезную опасность для функционирующих КА, поскольку движутся с достаточно высокой скоростью – 200 м/с (720 км/ч) и могут вызвать серьезные повреждения КА в случае столкновения с ними. 10-см фрагмент на ГСО несет такой же разрушительный потенциал, как 1-см фрагмент на низких орбитах, т. е. может пробить оболочку КА.

Окрестности ГСО заполнены ненаблюдаемым мелкогабаритным мусором, сопровождающим каждый запуск КА. Источником мусора являются также взрывы на ГСО.

Однако число взорвавшихся объектов до сих пор считается спорным, поскольку не существует надежного критерия для определения реальности взрыва, кроме непосредственного наблюдения этого события. Такие события наблюдались всего дважды, поэтому формально взорвавшимися объектами считаются 68081e Transtage 13 (США) и 77092А Экран 2 (Россия). Каждый взрыв порождает облако фрагментов, которые сталкиваются с другими объектами КМ, вызывая изменения в скорости их дрейфа. К настоящему времени по таким изменениям вычислено еще 11 объектов.

Основным источником статистических данных о мелкоразмерной фракции КМ являются т. н. “бим-парк” эксперименты, когда передающая и приемные антенны смотрят в одну фиксированную область пространства в течение длительного периода. Все частицы КМ, размеры которых больше некоторого, определяемого чувствительностью конкретной станции, попавшие в облучаемую область пространства, фиксируются. При этом антенны должны быть расположены как можно ближе друг к другу (но вне пределов прямой видимости, чтобы избежать прямых помех от передатчика) – чем ближе антенны, тем больше область пересечения их диаграмм направленности и, следовательно, больше частиц будут доступны для изучения. В “бим-парк” эксперименте обычно считается количество частиц, пролетевших через исследуемый объем за единицу времени, делается грубая оценка их размеров и траектории движения. Короткое время нахождения внутри облучаемой области не позволяет построить точную орбиту объекта, однако возможно получить достаточно корректные оценки наклона, долготы восходящего узла и высоты орбиты (в предположении малого эксцентриситета). Параллельно с радиолокаторами иногда в таких экспериментах привлекаются оптические средства, что позволяет получить оценки характеристик наблюдаемых объектов в различных спектральных диапазонах.

Исследования мелкоразмерной фракции важны также с научной и политической

точек зрения, поскольку позволяют строить модели распределения популяции КМ в целом, приближаться к пониманию причин взрывов космических кораблей и ступеней, а также определять виновников наибольшего замусоривания околоземного космического пространства. Изучение популяции именно мелких фрагментов является сейчас приоритетной задачей для всех стран, занимающихся исследованиями КМ. Становится престижным участвовать в наблюдательных кампаниях, организуемых Международным межагентским комитетом по космическому мусору, по небольшим объектам и их кластерам. Участие в таких программах свидетельствует о высоком научно-техническом потенциале страны.

Во время первой пробной попытки с использованием системы Евпатория – Медвежьи Озера в 2001 г. в течение 4-х часов облучалась область геостационарной орбиты, вырезаемая двумя коническими диаграммами направленности диаметром 40 км. Сразу же встал вопрос о принципах обработки “бим-парк”. Специализированной аппаратуры в СНГ нет, стандартные методы корреляционной обработки тут не работают, поскольку предполагают знание предварительной орбиты объектов. В результате была предложена концепция обнаружения неизвестных объектов путем автокорреляции записанных сигналов в широкой полосе частот с большим частотным разрешением (больше 16 тыс. каналов FFT) и различными временами накопления (поскольку скорость объектов тоже неизвестна). В результате обработки получается окно автокорреляционного анализа – зависимость частоты от времени. Предполагается, что движущиеся объекты должны “чертить” наклонную линию из-за имеющегося доплеровского сдвига. Реализовать такой способ обработки было решено на новом корреляторе “Низкочастотной РСДБ-сети (LFVN)” в Ното (Италия), поскольку он обладает большим быстродействием и большим частотным разрешением, чем Мк-2 коррелятор в Нижнем Новгороде. Поэтому для записи эхо-сигналов в экспериментах “бим-парк” использовался терминал регистрации NRTV.

Очередная попытка состоялась в июле 2003 г. с участием приемных антенн в Ното и Медвежьих Озерах, где уже были установлены терминалы NRTV-регистраторов. Опять в течение 4-х часов облучалась фиксированная область геостационарной орбиты. Но обработка эксперимента ничего не дала. В записях Ното были обнаружены “подозрительные” участки, но более детальный анализ не обнаружил изменений частоты сигнала, кроме того, в это же время отсутствовали сигналы в записях Медвежьих Озер. Поэтому было решено, что это были спорадические радиопомехи, и впервые новый метод анализа был апробирован при обработке эхо-сигналов, отраженных от планеты Марс (см. рис. 18).

В связи с тем что результаты эксперимента были отрицательные, подход к наблюдениям мелких фрагментов на ГСО был пересмотрен. Был предложен новый метод “бим-трек”, когда диаграммы направленности передающей и приемных антенн синхронно

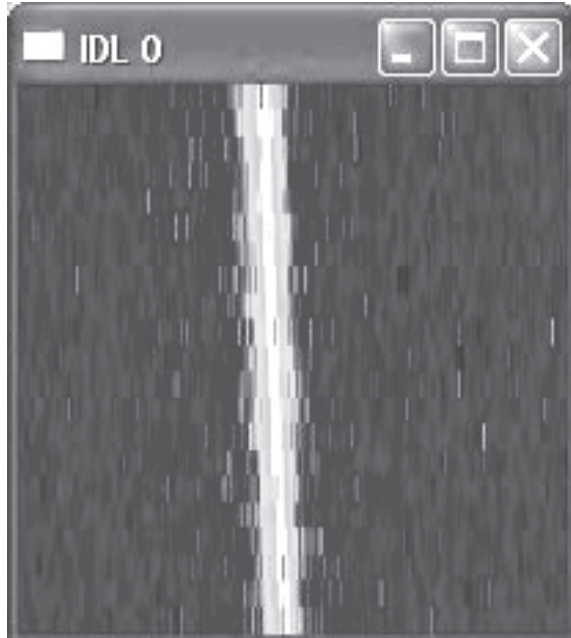


Рис. 18. Спектр эхо-сигнала от планеты Марс полученный на РТ-32 в Ното. Вертикальная ось – время с 21:52 до 22:13 209 дня, горизонтальная ось – частота в пределах $238037.11 \div 262329.11$ Гц

ведутся вдоль изучаемой орбиты и исследуются все попадающие в выделенный объем пространства объекты.

Пробные эксперименты “бим-трек” были организованы в 2004 г. в июне, июле и сентябре. В качестве приемных антенн использовались антенны в Медвежьих Озерах и Ното. Антенна в Евпатории направлялась в точку с фиксированными прямым восхождением и склонением: RA $12^{\text{h}}08^{\text{m}}43^{\text{s}}$ DE $+00^{\circ}50'45''$. Точка выбрана так, чтобы в ее окрестности прошло возможно большее число геостационарных объектов каталога. В этой области также существует повышенная вероятность прохождения неизвестных геостационарных фрагментов.

В июле 2004 г. “бим-трек” эксперимент был повторен. Все антенны наводились в точку с фиксированными геоцентрическими координатами RA $23^{\text{h}}04^{\text{m}}31^{\text{s}}$ DE $-08^{\circ}05'45''$ и геоцентрической дальностью 42164 км.

В сентябре – октябре 2004 г. был проведен еще один эксперимент “бим-трек”. Наведение производилось в точку с геоцентрическими координатами RA $05^{\text{h}}41^{\text{m}}23^{\text{s}}$, DE $+14^{\circ}26'45''$ и геоцентрическим расстоянием 42164 км.

Во время всех трех экспериментов осуществлялись попытки организации классического “бим-парк” эксперимента по наблюдению низкоорбитальных объектов. Диаграммы направленности антенн в Медвежьих Озерах, Ното и Симеизе пересекали луч диаграммы направленности передающей антенны в Евпатории в точке с высотой 960 км над поверхностью Земли. Именно на этой высоте ожидался максимум концентрации натриево-калиевых частиц, обнаруженных радиолокатором в Хейстеке. Длительность прохождения объектов через исследуемый объем луча порядка 0.1 с (против 10 с для объектов на ГСО при “бим-трек” экспериментах). Обработка “бим-трек” эксперимента, организованного в июле 2004 г., началась в Ното в середине октября. Первые результаты обработки с временем накопления сигнала 45 с представлены на рис. 19, 20.

На рисунках приведен общий спектр сигнала за время с 22:08 до 22:59 UT, на котором четко видны “подозрительные” выбросы

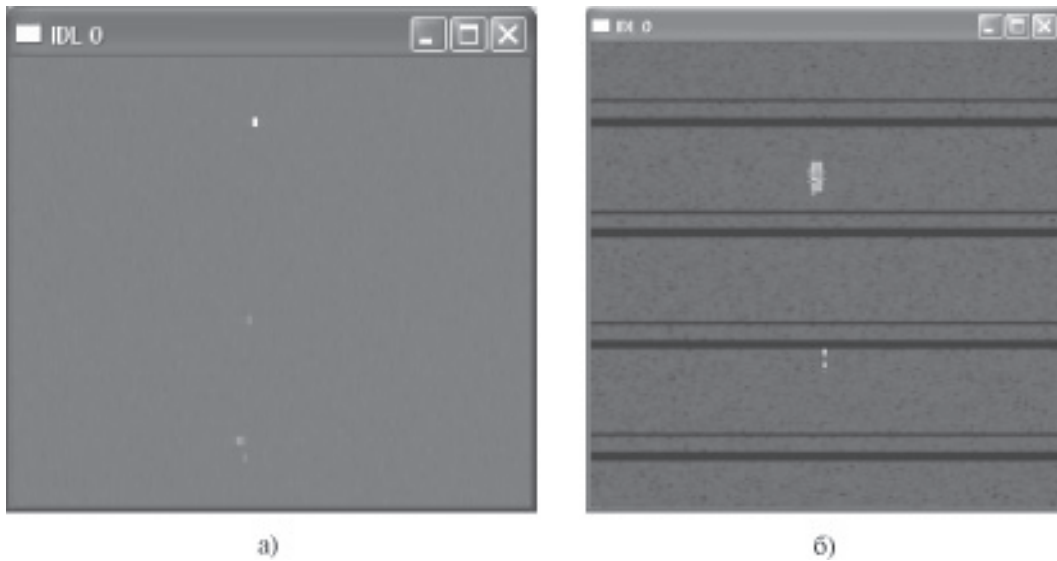


Рис. 19. Автокорреляционный спектр сигнала, записанного на NRTV терминал в Ното в июльском эксперименте “бим-парк”:

а) вертикальная ось – время с 22:08 до 22:59 UT 23 июля; горизонтальная ось – диапазон частот $244140.6250 \div 268554.6875$ Гц;

б) вертикальная ось – время с 22:12:31 до 22:16:41 UT 23 июля; горизонтальная ось – диапазон частот $247802.734 \div 362451.172$ Гц. Черные полосы – это разрывы между регистрируемыми блоками данных

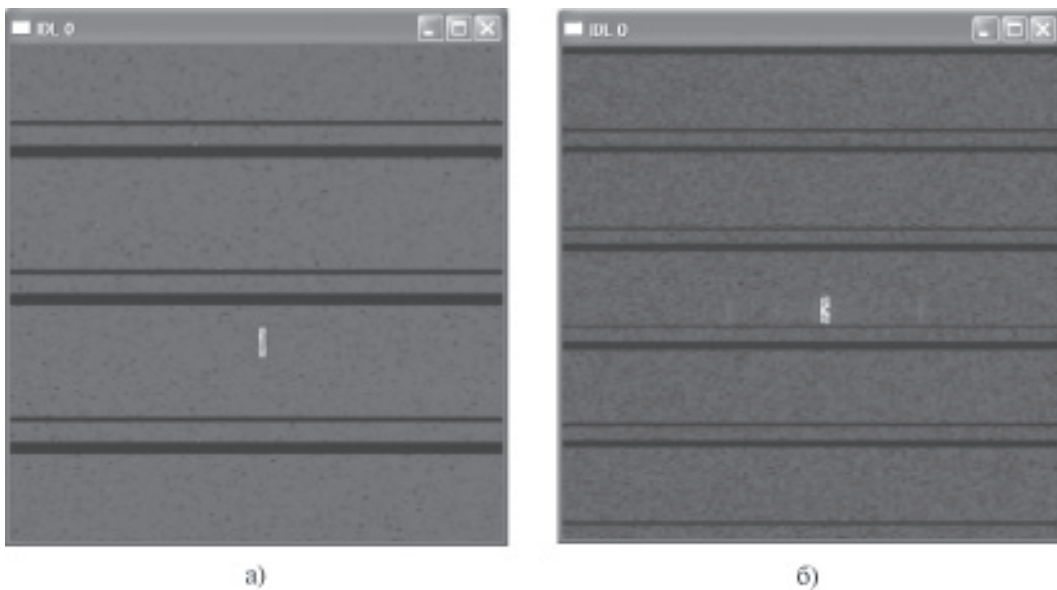


Рис. 20. Автокорреляционный спектр сигнала, записанного на NRTV терминал в Ното в июльском эксперименте “бим-парк”:

а) вертикальная ось – время с 22:28:21 до 22:31:41 UT 23 июля; горизонтальная ось – диапазон частот $247802.734 \div 262451.172$;

б) вертикальная ось – время с 22:50:01 до 22:55:01 UT 23 июля; горизонтальная ось – диапазон частот $247802.734 \div 262451.172$

Черные полосы – это разрывы между регистрируемыми блоками данных

сигнала, и эти же выбросы на отдельных картинках с более мелким масштабом. Выбросы на рис. 19, б могут быть отождествлены со спутниками Космос 1961 и TELESAT-5. Выброс на рис. 20, а близок по времени к прохождению диаграмм направленности через спутник Космос 1897.

Итак, методика проведения поисковых экспериментов “бим-трек” была разработана и успешно апробирована на известных каталогизированных объектах. Ожидается, что полная обработка всех трех экспериментов 2004 г., а также экспериментов типа “бим-парк” позволит обнаружить небольшие некаталогизированные объекты.

Заключение

1. Начавшееся сотрудничество между РТ-70 в Евпатории и проектом “Низкочастотная РСДБ-сеть (LFVN)” является успешным и очень плодотворным. Проект является единственной РСДБ-сетью, в которой все этапы от планирования до первичной и вторичной обработки данных осуществляются совместно украинскими и российскими учеными. Антенна РТ-70 обеспечивает радиозондирование околоземных космических объектов, а также улучшает параметры РСДБ-сети (чувствительность, заполнение U, V -плоскости и т.д.).

2. Совместными усилиями проводится целый ряд уникальных работ:

- исследование возможностей метода РСДБ-локации,
- отработка техники РСДБ квазиреального времени с передачей РСДБ-сигналов на коррелятор по сети Интернет,
- развитие РСДБ-методов изучения среднемасштабных неоднородностей солнечного ветра и тонкой структуры пространственно-временной солнечных микровспышек-спайков.

3. Практически закончена отработка метода РСДБ-локации для координатных и некоординатных измерений по высокоорбитальным космическим объектам, а также методика поисковых “бим-парк” и “бим-трек” экспериментов. Получены ценные научные результаты, подготовлено большое количество публикаций.

4. Получены первые результаты по РСДБ-измерениям солнечного ветра. Организован замкнутый цикл построения РСДБ-изображений компактных внегалактических радиисточников.

5. Работы по РСДБ-локации позволили сохранить и улучшить методику дифференциальных РСДБ-измерений, и после того как РТ-70 в Евпатории и РТ-64 в Медвежьих Озерах были оснащены приемниками S/X диапазонов, возможно проведение украинско-российско-европейских сеансов навигационных РСДБ-измерений с использованием европейских межпланетных КА и антенн в Евпатории, Медвежьих Озерах и двух 34-м антенн ЕКА в Австралии и Испании.

Литература

1. Молотов И. Е., Лихачев С. Ф., Чуприков А. А., Липатов Б. Н., Деметьев А. Ф., Антипенко А. А., Горшенков Ю. Н., Попереченко Б. А., Саурин В. П., Снегирев С. Д., Нечаева М. Б., Резникова В. Э., Самодуров В. А., Коваленко А. В., Коноваленко А. А., Фалькович И. С., Шмелд И. К., Стангхеллини К., Анантакришнан С., Лю Ш., Хонг Ш., Кас А. Новый отечественный РСДБ-проект LFVN // Тезисы докладов российской конференции памяти А. А. Пистолькорса “Радиотелескопы 2002 (антенны, аппаратура, методы)”. – Пушино. – 2002. – С. 81-82.
2. Molotov I. E., Likhachev S. F., Chuprikov A. A., Dementiev A., Lipatov B., Nechaeva M., Snegirev S., Dugin N., Ananthakrishnan S., Balasubramanian V., Benz A., Mantovani F., Liu X., Hong X., Kus A., Molotov E. P., Ignatov S. P., Poperechenko B. A., Gorshenkov Y. N., Konovalenko A. A. Low Frequency VLBI Project. // The Universe at Low Radio Frequencies, Proceedings of IAU Symposium. – Pune, India. – 1999. – P. 492-493.
3. Molotov I., Likhachev S., Chuprikov A., Lipatov B., Dementiev A., Gorshenkov Yu., Kovalenko A., Konovalenko A., Stanghellini C., Tuccari G., Hong X., Dougherty S., Shanks R., Liu X., Zhang J., Kus A., Borkowski K., Quick J., Nicolson G., Ananthakrishnan S., Sankararaman M., Shmeld I., Bervalds E. Goals and results of the ad-hoc VLBI activity with Russian antennas // Proceedings of the 6th European VLBI Network Symposium. – Bonn, Germany. – 2002. – P. 19-20.
4. Molotov I., Kovalenko A., Samodurov V., Lipatov B., Dementiev A., Antipenko A., Snegirev S., Nechaeva M., Reznikova V., Altunin V., Benz A.,

- Mantovani F., Stanghellini C., Tuccari G., Konovaleiko A., Falkovich I., Gridin A., Ananthakrishnan S., Balasubramanian V., Sankararaman M., Hong X., Huang X., Shiguang L., Dougherty S., Del Rizzo D., Fink A., Liu X., Na W., Zhang J., Kus A., Borkowski K., Quick J., Nicolson G., Shmeld I., Koyama Y., Sekido M., Gorshenkov Yu., Poperechenko B., Saurin V., Ozolins G., Bezrukov D., Zhang X. International Low-Frequency Very-Long-Baseline Interferometry Network Project Milestones // *Astron. Astrophys. Trans.* – 2003. – Vol. 22, No. 4-5. – P. 743-752.
5. Антипенко А. А., Дементьев А. Ф., Князев Н. А., Липатов Б. Н., Молотов И. Е., Нечаева М. Б., Резникова В. Э., Окмянский В. А. Система обработки MARK-2 с высоким временным разрешением для низкочастотной РСДБ-сети LFBVN // Всероссийская астрономическая конференция. Тезисы заявленных докладов. – СПб.: НИИХ СПбГУ. – 2001. – С. 7.
 6. Липатов Б. Н., Алтунин В. И., Андреев В. Е., Антипенко А. А., Бенц А. О., Бервалдс Э. Я., Горшенков Ю. Н., Гридин А. А., Дементьев А. Ф., Игнатов С. П., Коваленко А. В., Коноваленко А. А., Лихачев С. Ф., Молотов И. Е., Молотов Е. П., Нестерук В. Н., Нечаева М. Б., Попереченко Б. А., Резникова В. Э., Снегирев С. Д., Томилин Ю. Г., Фалькович И. С., Чибисов А. В., Шмелд И. К. Мк-2 подсистема Низкочастотной РСДБ-сети LFBVN для исследования солнечный спайков и плазмы солнечного ветра // Всероссийская астрономическая конференция. Тезисы заявленных докладов. – СПб.: НИИХ СПбГУ. – 2001. – С. 111.
 7. Молотов И. Е., Голубовский А. А., Горшенков Ю. Н., Грачев В. Г., Дементьев А. Ф., Ипатов А. В., Кольцов Н. Е., Липатов Б. Н., Лихачев С. Ф., Рахимов И. А., Самодуров В. А., Смоленцев С. Г., Чуприков А. А., Янгалов А. К. S2 эксперименты международной РСДБ-сети с участием трех российских радиотелескопов в рамках проекта LFBVN // Всероссийская астрономическая конференция. Тезисы заявленных докладов. – СПб.: НИИХ СПбГУ. – 2001. – С. 128.
 8. Molotov I., Likhachev S., Chuprikov A., Lipatov B., Dementiev A., Cannon W., Dougherty S., Del Rizzo D., Stanghellini C., Trigilio C., Hong X., Huang X., Shiguang L., Quick J., Nicolson G. Prospect for VLBI Network extension: the first results of an ad-hoc S2 array experiments. *Galaxies and their constituents at the highest angular resolutions // ASP IAU Symposia Series.* – 2001. – Vol. 20, No. 205. – P. 420-421.
 9. Molotov I., Chuprikov A., Likhachev S., Salter C., Ghosh T., Ghigo F., Dougherty S. First VLBI observations with Arecibo in an International S2 ad-hoc array // *Single-dish radio astronomy: techniques and applications, ASP conference proceedings.* – 2002. – Vol. 278. – P. 507-510.
 10. Молотов И. Е., Туккари Дж., Зиновьев А. Н., Дементьев А. Ф., Горшенков Ю. Н., Коноваленко А. А., Фалькович И. С., Вольвач А. Е., Буттачио С., Самодуров В. А., Лю Ш., Хонг Ш., Шмелд И. К., Пушкарев А. Б., Дугин Н. А. E-LFBVN: Низкочастотная РСДБ-сеть квази-реального времени с передачей данных через Интернет // Тезисы докладов на всероссийской астрономической конференции ВАК-2004 “Горизонты Вселенной”. Труды Государственного астрономического института им. П. К. Штенберга. – 2004. – Т. 75. – С. 25.
 11. Tuccari G., Molotov I., Buttacio S., Nicotra G., Dementiev A., Konovaleiko A., Zinoviev A., Gorshenkov Y., Xiang L., Xiaou H., Volvach A. A Near Real Time e-Radar VLBI Network // *IVS 2004 General Meeting Proceedings.* – 2004. – P. 225-228.
 12. Tuccari G., Molotov I., Nechaeva M., Volvach A., Xiang L., Hong X., Buttaccio S., Gorshenkov Y. & Nicotra G.. E-LFBVN – An Internet Based VLBI Network // *Proceedings of 7th European VLBI Network Symposium on VLBI Scientific Research & Technology.* – Toledo, Spain. – 2004. – P. 331-332.
 13. Молотов И. Е., Абросимов В. М., Агапов В. М., Антипенко А. А., Гарингтон С., Горшенков Ю. Н., Грачев В. Г., Дементьев А. Ф., Игнатов С. П., Колюка Ю. Ф., Коноваленко А. А., Красинский Г. А., Липатов Б. Н., Литвиненко Л. Н., Малевинский С. В., Молотов Е. П., Набатов А. С., Попереченко Б. А., Снегирев С. Д., Туккари Дж., Фалькович И. С., Финкельштейн А. М. Исследования динамики планет Земной группы, астероидов, сближающихся с Землей, и космического мусора методом РСДБ-локации // Всероссийская астрономическая конференция. Тезисы заявленных докладов. – СПб.: НИИХ СПбГУ. – 2001. – С. 128.
 14. Липатов Б. Н., Молотов И. Е., Горшенков Ю. Н., Коноваленко А. А., Молотов Е. П., Агапов В. М., Кояма Я., Туккари Дж., Лю Ш., Хонг Ш., Кас А., Доугхерти Ш., Сика З. К., Дементьев А. Ф., Фалькович И. С., Антипенко А. А., Самодуров В. А., Шишов В. А., Саурин В. П., Чибисов А. В., Смирнов А. И. Экспериментальное развитие метода РСДБ-локации в проекте LFBVN // Тезисы докладов российской конференции памяти А. А. Пистолькорса “Радиотелескопы 2002 (антенны, аппаратура, методы)”. – Пушино. – 2002. – С. 75-76.
 15. Молотов И. Е., Вольвач А. Е., Коноваленко А. А., Фалькович И. С., Литвиненко Л. Н.,

- Негода А. А., Федоров О. П., Липатов Б. Н., Горшенков Ю. Н., Агапов В. М., Туккари Дж., Лю Ш. Международные эксперименты по исследованию околоземных объектов с помощью метода РСДБ-локации // *Космическая наука и технология*. – 2004. – Т. 10, №1. – С. 1-9.
16. Дементьев А. Ф., Молотов И. Е., Коноваленко А. А., Туккари Дж., Лю Ш., Горшенков Ю. Н., Вольвач А. Е., Агапов В. М., Сочилина А. С., Фалькович И. С., Нечаева М. Б., Антипенко А. А., Шишов В. А., Саурин В. П., Зиновьев А. Н., Пушкарев А. Б., Цюх А. М., Нестерук В. Н., Шмелд И. К., Степаньянц В. А., Сика З. К. Экспериментальные исследования возможностей использования метода РСДБ-локации для измерения параметров движения тел Солнечной системы // *Тезисы докладов на всероссийской астрономической конференции ВАК-2004 “Горизонты Вселенной”*. Труды Государственного астрономического института им. П. К. Штенберга. – 2004. – Т. 75. – С. 225-226.
17. Алексеев В. А., Алтунин В. И., Дементьев А. Ф., Князев Н. А., Липатов Б. Н., Мельников В. Ф., Молотов И. Е., Нечаева М. Б., Окмянский В. А., Резникова В. Э., Снегирев С. Д., Тихомиров Ю. В. Возможности РСДБ-исследований короны и сверхкороны Солнца по спектральному составу интерферометрических откликов от космических радиоисточников // *Тезисы докладов XXVII радиоастрономической конференции*. – С.-Петербург. – 1997. – С. 178-179.
18. Алексеев В. А., Алтунин В. И., Дементьев А. Ф., Князев Н. А., Липатов Б. Н., Мельников В. Ф., Молотов И. Е., Нечаева М. Б., Окмянский В. А., Резников В. Э., Снегирев С. Д., Тихомиров Ю. В. РСДБ-метод исследования неоднородной структуры короны и солнечного ветра // *Труды конференции “Достижения и проблемы солнечной радиоастрономии”*. – С.-Петербург. – 1998. – С. 7-10.
19. Нечаева М. Б., Гавриленко В. Г., Горшенков Ю. Н., Лю Ш., Молотов И. Е., Пушкарев А. Б., Туккари Дж., Шенкс Р. Результаты РСДБ-экспериментов по исследованию плазмы солнечного ветра методом радиопросвечивания // *Тезисы докладов на всероссийской астрономической конференции ВАК-2004 “Горизонты Вселенной”*. Труды Государственного астрономического института им. П. К. Штенберга. – 2004. – Т. 75. – С. 60.
20. Гирин И. А., Дементьев А. Ф., Липатов Б. Н., Лихачев С. Ф., Молотов И. Е., Нечаев М. Б., Снегирев С. Д., Тихомиров Ю. В., Чуприков А. А. Радиointерферометрические исследования тонкой структуры сверхкомпактных внегалактических источников и космических сред в дециметровом диапазоне длин волн // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 1999. – Т. XLII, №12. – С. 1127-1135.
21. Pushkarev A., Kovalev Y. Y., Molotov I., Tuccari G., Hong X., Quick J., and Dougherty S. Bl Lacs and Quasars in Global S2 18-cm VLBI Experiment // *Abstract of JENAM 2003*. – Budapest, Hungary. – 2003. – P. 34.
22. Pushkarev A., Molotov I., Nechaeva M., Gorshenkov Yu., Tuccari G., Stanghellini C., Hong X., Liu X., Quick J. & Dougherty S. LFBV observations of active galactic nuclei // *Proceedings of 7th European VLBI Network Symposium on VLBI Scientific Research & Technology*. – Toledo, Spain. – 2004. – P.161-162.
23. Бродерик Д. Д., Виткевич В. В., Джонси Д. Л., Ефанов А. В., Келлерманн К. И., Кларк Б. Г., Коган Л. Р., Костенко В. И., Кохен М. Х., Матвеев Л. И., Моисеев И. Г., Пейни Дж., Хассон Б. Наблюдения компактных радиоисточников на радиointерферометре ГРИН БЭНК – Крым // *Астрономический журнал*. – 1970. – Т. 47. – С. 784.
24. Алексеев В. А., Антипенко А. А., Липатов Б. Н., Дементьев А. Ф., Окмянский В. А. и др. Длиннобазовая узкополосная радиointерферометрия для космической навигации. 1. Межпланетные аппараты; измерения координат АМС “Vega” // *Космические исследования*. – 1989. – Т. XXVI. – С. 447-453.
25. Margot J. L., Nolan M. C., Radar Interferometric Imaging of Near-Earth Asteroids // *American Astronomical Society, DPS meeting*. – 1999. – P. 31.
26. Головкин В. К., Кузнецов Б. И., Петров Г. М., Хасянов А. Ф. Вариации отражательной способности экваториальной области поверхности Венеры // *Астрономический журнал*. – 1976. – Т. 53, №2. – С. 411-417.
27. Введение в радиоастрометрию / В. С. Губанов, А. М. Финкельштейн, П. А. Фридман / Под ред. А. Ф. Дравских. – М.: Наука, 1983.
28. Грачев В. Г., Ипатов А. В., Кайдановский М. Н., Климов С. Д., Рахимов И. А., Смоленцев С. Г., Финкельштейн А. М., Фролов В. Н., Яковлев В. А., Игнатов С. П., Молотов Е. П., Зайцев А. Л., Молотов И. Е., Алексеев В. А., Липатов Б. Н., Коноваленко А. А., Литвиненко Л. Н., Фалькович И. С., Лебедь В. И., Чмиль В. М. Радиолокационные РСДБ-наблюдения Венеры и Марса на волне 6 см в стандарте S-2/MarkIII // *Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века*. – СПб.: ИПА РАН. – 2000. – С. 350-351.
29. Molotov I., Konvalenko A., Agapov V., Sochilina A., Lipatov B., Gorshenkov, Molotov E., Tuccari G., Buttaccio S., Liu X., Zhang J., Hong X., Huang X., Kus A., Borkowski K., Sika Z., Abro-

- simov V., Tsyukh A., Samodurov V., Falkovich I., Litvinenko L., Stepaniants V., Dementiev A., Antipenko A., Snegirev S., Nechaeva M., Volvach A., Saurin V., Pushkarev A., Deviatkin A., Guseva I., Sukhov P. Radar interferometer measurements of space debris using the Evpatoria RT-70 transmitter // *Advances in Space Research*. – 2004. – Vol. 34, No. 5. – P. 884-891.
30. Molotov I. E., Konovalenko A. A., Lipatov B. N., Tuccari G., Agapov V. M., Sochilina A. S., Falkovich I. S., Gorshenkov Y. N., Molotov E. P., Stepaniants V. A., Liu X., Zhang J., Volvach A. E., Fedorov O. P., Bukreev A. N., Tsyukh A. M., Nesteruk V. N., Malevinsky S. V., Dementiev A. F., Antipenko A. A., Buttaccio S., Nicotra C., Stepka I. D., Zinoviev A. N., Saurin V. P., Pushkarev A. B., Nechaeva M. B., Sika Z. K., Shmeld I. K. First results of the space debris radar observations using Evpatoria RT-70 transmitter and low frequency VLBI network // *Proceedings of fifth US/Russian Space Surveillance Workshop*. – Central Astronomical Observatory at Pulkovo. – 2003. – P. 294-304.
31. Molotov I., Tuccari G., Nechaeva M., Dugin N., Konovalenko A., Falkovich I., Gorshenkov Y., Liu X., Volvach A., Agapov V., Pushkarev A., Titenko V., Buttaccio S., Rumyantsev V. & Shmeld I. First results of European VLBI radar observations of space objects // *Proceedings of 7th European VLBI Network Symposium on VLBI Scientific Research & Technology*. – Toledo, Spain. – 2004. – P. 329-330.

Радіолокаційні РНДБ-дослідження з використанням радіотелескопу РТ-70

**О. О. Коноваленко, І. С. Фалькович,
Л. М. Литвиненко, А. С. Набатов,
А. Г. Петренко, А. П. Федоров,
А. Б. Камелін, С. В. Малевінський,
І. Е. Молотов, А. Ф. Демент'єв,
Б. Н. Ліпатов, М. Б. Нечаєва,
Дж. Туккарі, Ш. Лю,
Ю. Н. Горшенков, В. М. Агапов**

Описано результати застосування методів радіоінтерферометрії з наддовгими базами до нового у світовій практиці методу РНДБ-локації. Метод дозволяє реалізувати

радіозондування з Землі планет земної групи, навколосемних астероїдів, об'єктів “космічного сміття” та приймати ехо-сигнали мережею радіотелескопів в режимі РНДБ. Важливими прикладними аспектами проведених досліджень є знаходження точних траєкторій астероїдів, потенційно небезпечних для Землі, і фрагментів “космічного сміття”. З використанням планетного радіолокатора на базі РТ-70 Національного центру керування та випробувань космічних засобів в Євпаторії і міжнародної кооперації РНДБ-станцій “Низькочастотна РНДБ-мережа (LFVN)” було проведено 9 експериментів з РНДБ-локації.

Radar VLBI Investigations Using RT-70 Radio Telescope

**O. O. Konovalenko, I. S. Falkovich,
L. M. Lytvynenko, A. S. Nabatov,
A. G. Petrenko, A. P. Fedorov,
A. B. Kamelin, S. V. Malevinskyi,
I. E. Molotov, A. F. Dement'ev,
B. N. Lipatov, M. B. Nechaeva,
J. Tukkari, Sh. Lu,
Yu. N. Gorshenkov, V. M. Agapov**

The results of the VLBI method application in the world-new VLBI-location method are described. The method allows Earth-based sounding of planets, asteroids, “space debris” objects and reception of echo signals with the radio telescope network in VLBI-mode. The precise trajectory determination of the potentially Earth-dangerous asteroids and fragments of “space debris” is an important applied aspect of the investigations carried out. 9 VLBI-location experiments have been made with the use of the RT-70-based planet locator of the National Space Facility Control and Test Center (NS-FCTC) in Evpatoria and through the international cooperation with the VLBI-stations of the “Low-frequency VLBI net (LFVN)”.