

УДК 520.274

РСДБ-ЛОКАЦИЯ АСТЕРОИДА 2012 DA14

*М. Б. Нечаева*¹, *Н. А. Дугин*^{1*}, *А. А. Антипенко*¹, *Д. А. Безруков*², *В. В. Безруков*²,
*В. В. Войтюк*³, *А. Ф. Деметьев*¹, *Н. Екабсонс*², *М. Клаперс*², *А. А. Коноваленко*⁴,
*В. Ф. Кулишенко*⁴, *А. С. Набатов*⁴, *В. Н. Нестерук*³, *Д. Пупильо*⁵, *А. М. Резниченко*⁴,
*Э. Салерно*⁵, *С. Д. Снегирев*¹, *Ю. В. Тихомиров*¹, *Р. В. Хуторной*³, *К. Шкирманте*²,
*И. Шмелд*², *А. К. Чагунин*¹

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

² Научно-исследовательский инженерный институт «Вентспилсский международный радиоастрономический центр» Вентспилсской высшей школы, г. Вентспилс, Латвия

³ Национальный центр управления и испытания космических средств, д. Витино, Крым

⁴ Радиоастрономический институт НАНУ, г. Харьков, Украина

⁵ Istituto di Radioastronomia INAF, Bologna, Italia

15–16 февраля 2013 года проведён эксперимент по РСДБ-локации астероида 2012 DA14 в момент его сближения с Землёй. В эксперименте принимали участие научные коллективы из Харькова (РИ НАНУ), Евпатории (НЦУИКС), Нижнего Новгорода (НИРФИ), Болоньи (Istituto di Radioastronomia INAF) и Вентспилса (ВМРЦ). Астероид облучался планетным локатором РТ-70 (г. Евпатория) на частоте 5 ГГц, отражённый сигнал принимался 32-метровыми радиотелескопами в Медичине (Италия) и Ирбене (Латвия) в радиоинтерферометрическом режиме. Измерены частотные сдвиги Доплера и частоты интерференции в режиме со сверхдлинной базой, оценена точность метода при определении радиальной и угловой скорости движения астероида.

ВВЕДЕНИЕ

Метод локации космических объектов, сочетающий радиолокацию с радиоинтерферометрией со сверхдлинной базой (РСДБ), был предложен специалистами НИРФИ в конце 1990-х годов и прошёл успешную апробацию в большой серии международных экспериментов по наблюдению объектов космического мусора в околоземном космическом пространстве [1–5]. В кооперацию исследователей входили радиоастрономические обсерватории Европы, России и Китая. Основу экспериментальной базы составляли планетный локатор РТ-70 в Евпатории (Крым) и большие (с диаметром от 22 до 64 м) приёмные радиотелескопы, разнесённые на сотни и тысячи километров. Этот метод позволяет одновременно определять радиальную скорость, расстояние до объекта, его угловые координаты и угловые скорости и может успешно использоваться для обнаружения и определения орбит космических объектов. По результатам проведённых экспериментов были уточнены параметры движения различных каталогизированных фрагментов «космического мусора», что позволило получить параметры орбит с точностью, на порядок превышающей точность оптических средств.

Кроме исследования «мусора» в околоземном пространстве, в программы прошлых наблюдений по методу РСДБ-локации включалась локация планет и нескольких астероидов, находившихся за пределами лунной орбиты. Однако слабые отражённые сигналы позволили измерить частоты Доплера только на очень коротких интервалах времени (несколько минут), и кросскорреляционная обработка в режиме РСДБ не дала результатов.

Подготовка экспериментов по локации астероидов в радиодиапазоне наталкивается как минимум на две основные проблемы, приводящие к неопределённости оценки величины отражённого

* dugin@nirfi.sci-nnov.ru

от объекта сигнала. Во-первых, неизвестен коэффициент отражения вещества небесного тела в различных диапазонах радиоволн. Если придерживаться сравнения с данными о параметрах лунного грунта [6], коэффициент отражения вещества астероидов в радиодиапазоне не будет превышать $7 \div 10\%$. Однако известно, что ряд метеоритов состоит из пород, близких к металлам, т. е. отражение от них будет существенно больше. Этот вопрос требует экспериментального исследования отражательных характеристик метеоритных пород на разных радиочастотах с одновременным сравнением с оптическим спектром, что позволит проводить предварительную оценку коэффициента отражения по оптическим данным для потенциально опасных астероидов [7]. Во-вторых, сложная форма и сильная неровность поверхности астероидов могут приводить к существенным потерям «полезного» отражённого сигнала даже для тел больших размеров.

Пролёт астероида 2012 DA14 в феврале 2013 года на минимальном расстоянии от Земли в пределах геостационарной орбиты предоставил уникальную возможность для апробации различных методов и методик исследования характеристик малых небесных тел и оценки параметров траекторий их движения. В момент пролёта астероида 2012 DA14 15 и 16 февраля 2013 года было осуществлено большое число оптических и радиолокационных наблюдений (см., например, [8–11]), в том числе с помощью локаторов Голдстоуна и Хэйстэка. В результате наблюдений было установлено, что астероид имеет неправильную вытянутую форму, размер астероида по длинной оси составляет около 40 м. Оценки периода вращения астероида совпали по данным оптических и локационных экспериментов и составили около 9 ч. Минимальное расстояние астероида до Земли составило 27 700 км.

Авторами данной работы был подготовлен и проведён международный эксперимент по РСДБ-локации астероида 2012 DA14. Эксперимент проходил по отработанной в предыдущих работах схеме: излучение проводилось передающим комплексом РТ-70 в г. Евпатория (НЦУИКС, Крым) на частоте 5 ГГц, отражённые от астероида сигналы принимались 32-метровыми радиотелескопами в Медичине (Istituto di Radioastronomia INAF, Италия) и Ирбене (Вентспилсский международный радиоастрономический центр, Латвия) в полосе 2 МГц. Длина базы интерферометра Ирбене—Медичина составляла 1 613 км. Расстояние между антеннами в Медичине и Евпатории равно 1 699 км, между антеннами в Ирбене и Евпатории — 1 581 км. Экспериментальные данные обрабатывались в Научно-исследовательском радиофизическом институте (Нижний Новгород) на программном корреляторе «НИРФИ-4» и в Вентспилсском международном радиоастрономическом центре на программном корреляторе «КАНА». Координаты астероида для наведения передающей и приёмных антенн, а также для вычисления предварительных параметров обработки рассчитывались с помощью сервиса NASA HORIZONS [12].

Эксперимент состоялся в период с 19:30 UT 15 февраля до 06:15 UT 16 февраля 2013 года. План эксперимента включал шесть сеансов локации, в которых предусматривались достаточно длительные временные интервалы излучения на несущей частоте и короткие интервалы излучения сигнала с линейной частотной модуляцией. Мощность передатчика достигала 70 кВт. В промежутках между сеансами локации наблюдались калибровочные радиоисточники для уточнения наведения передающей антенны. В начале первого сеанса облучения (20:00÷20:35 UT 15.02.2013) астероид вошёл в зону видимости всех пунктов сети: его угол места превысил 12° для Медичины, 19° для Ирбене и 28° для Евпатории. В этот сеанс излучения астероид находился на расстоянии от Земли около $33 \cdot 10^3$ км. Далее локация проводилась в периоды 21:35÷21:55, 22:40÷23:00 UT 15.02.2013 и 03:45÷04:00, 04:50÷05:10, 05:55÷06:10 UT 16.02.2013. В третьем сеансе локации угол места астероида достиг максимальных значений (69° для антенны в Ирбене) и начал уменьшаться. Расстояние до объекта к концу последнего сеанса достигло $254 \cdot 10^3$ км. Отражённые сигналы от астероида уверенно обнаружены на обеих антеннах в сеансах 15 февраля, в сеансах 16 февраля отражённые сигналы были хорошо видны только в Медичине, т. к. из-за применения неохлада-

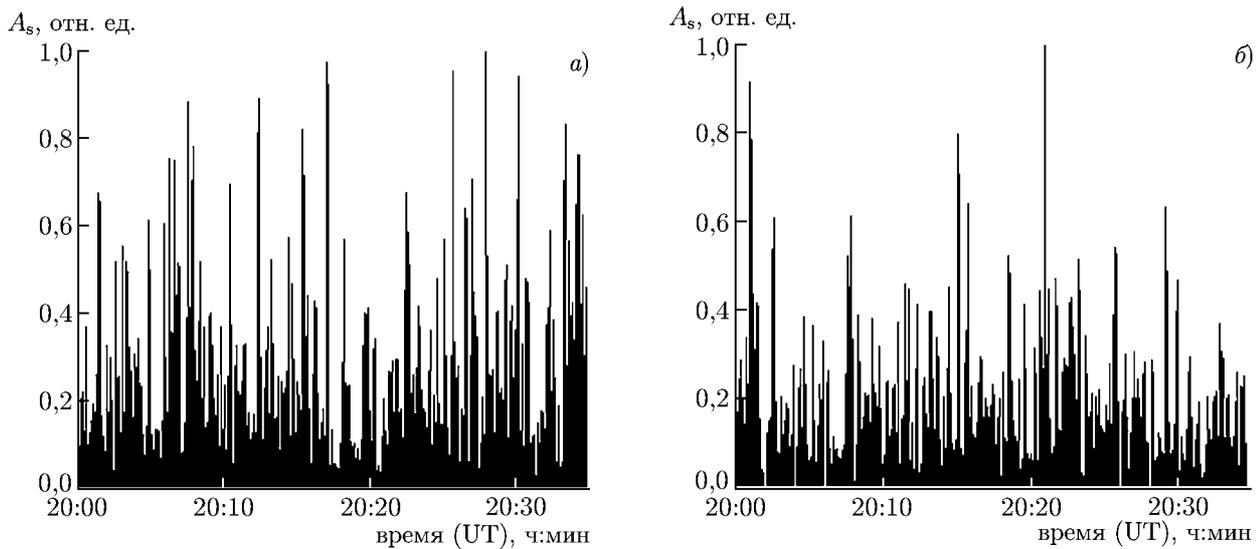


Рис. 1. Временная зависимость амплитуды A_s спектрального максимума автокорреляционного сигнала для Медицины (а) и Ирбене (б) в период 20:00:00÷20:34:00 UT 15 февраля 2013 года

емых усилителей на радиотелескопе РТ-32 в Ирбене эффективность пункта была в несколько раз ниже.

Предварительные результаты проведённого эксперимента опубликованы в работах [13, 14]. Методические основы РСДБ-локации и основные соотношения, описывающие корреляционные и спектральные характеристики выходного сигнала РСДБ, рассмотрены в [15]. В данной работе проводится обобщение полученных результатов и сделаны основные выводы.

1. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Основной задачей эксперимента являлось измерение Доплеровского сдвига частоты для определения радиальной скорости астероида и частоты интерференции для оценки его угловой скорости. Рассмотрим последовательно результаты трёх основных этапов обработки данных в экспериментах по РСДБ-локации: автокорреляции сигналов, зарегистрированных в каждом приёмном пункте, перемножения излучённого сигнала с принятым каждой приёмной антенной (режим бистатической локации), перемножение сигналов приёмных пунктов (режим РСДБ). Кроме того, после анализа первых зарегистрированных откликов от объекта была отмечена необычная временная зависимость амплитуды отражённого сигнала. Поэтому значительное внимание было уделено анализу этого эффекта.

Главная задача автокорреляционной обработки — контроль наличия отражённого от лоцируемого объекта сигнала на расчётной частоте в каждом из сеансов локации. На данном этапе вычислялась автокорреляционная функция сигнала, принятого в каждом РСДБ-пункте, и выполнялось её фурье-преобразование. Частота максимума спектра сравнивалась с расчётной частотой отклика приёмной системы на отражённый от астероида сигнал.

В данном эксперименте интервал усреднения, на котором вычислялась автокорреляционная функция, выбирался равным 2048 и 4096 мкс, что определило частотное разрешение спектрального анализа — 488 и 244 Гц соответственно. Повышение спектрального разрешения было нецелесообразным из-за размывания спектра при высокой скорости движения астероида, а также существенного увеличения времени, затрачиваемого на расчёт автокорреляционной функции. Таким образом, частота отклика на данной стадии обработки определялась достаточно грубо.

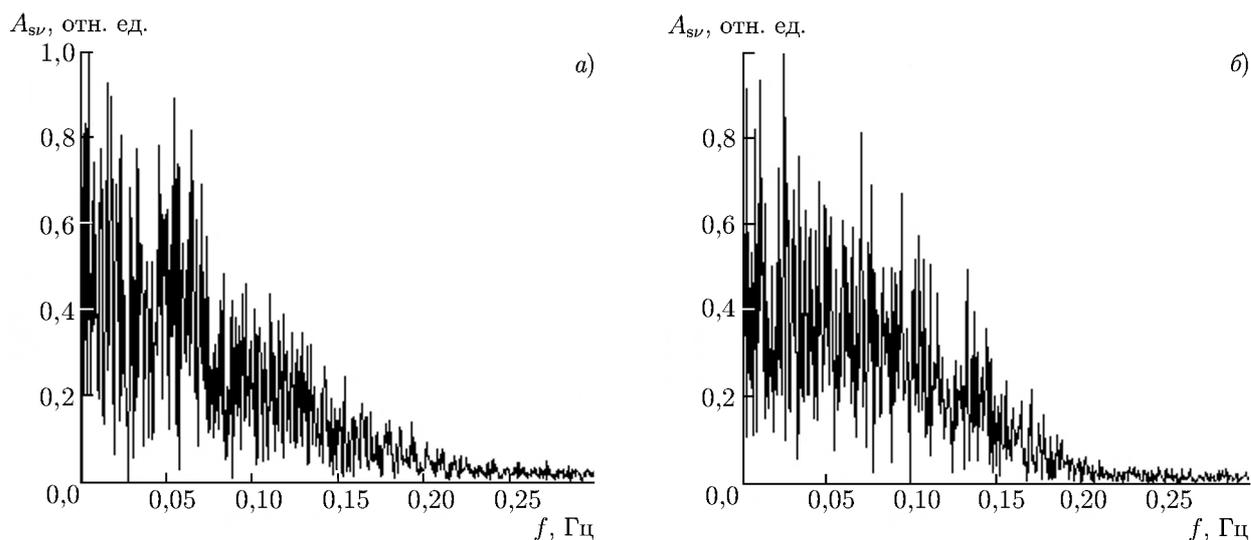


Рис. 2. Спектры вариаций амплитуды A_s спектрального максимума автокорреляционных сигналов, зарегистрированных в Медичине (а) и Ирбене (б) в период 20:00:00÷20:34:00 UT 15 февраля 2013 года

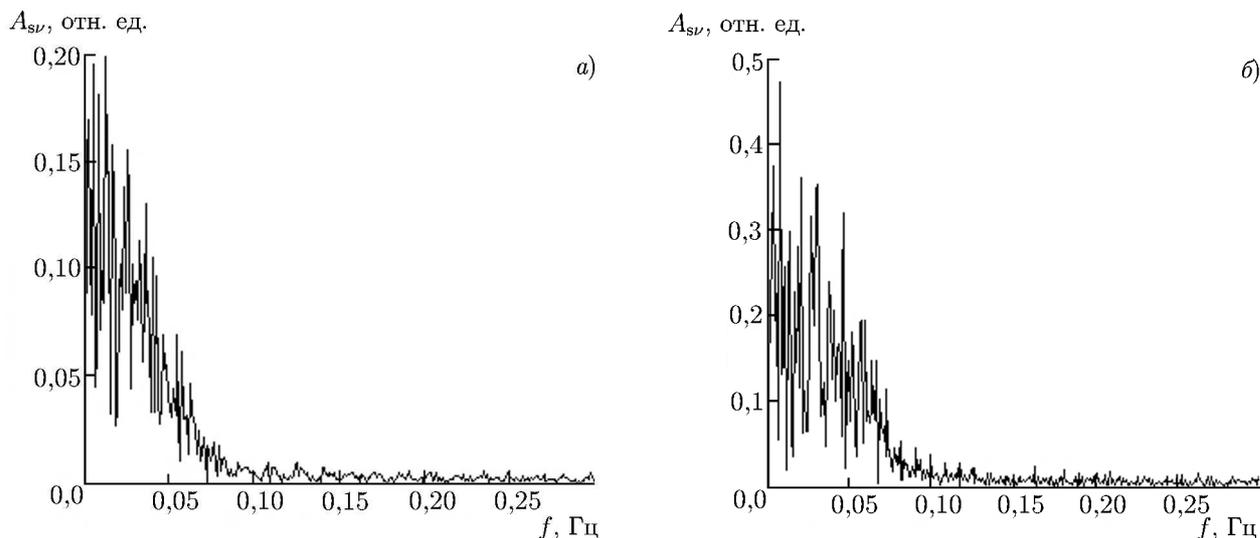


Рис. 3. Спектры вариаций амплитуды A_s спектрального максимума автокорреляционных сигналов, зарегистрированных 15 февраля 2013 года в Медичине в 22:40:01÷22:56:51 UT (а) и в Ирбене в 22:40:02÷22:59:54 UT (б)

Был проведён анализ временной зависимости максимума спектра автокорреляционного сигнала. На рис. 1 приведены эти зависимости для двух приёмных пунктов на интервале времени 20:00÷20:35 UT 15.02.2013. Сильные вариации амплитуды спектрального максимума можно объяснить интерференцией сигналов от нескольких отражающих областей на поверхности небесного тела при изменении взаимного расположения астероида и наземных пунктов. Видно также, что пики в двух точках приёма не совпадают по времени. Эти эффекты ухудшают точность измерений в моменты резкого уменьшения амплитуды сигнала; особенно сильно они сказываются при кросскорреляционной обработке сигналов двух приёмных пунктов.

С целью выявления характерного времени повторения максимумов отражённого сигнала выполнено преобразование Фурье временной зависимости максимума спектра автокорреляционного

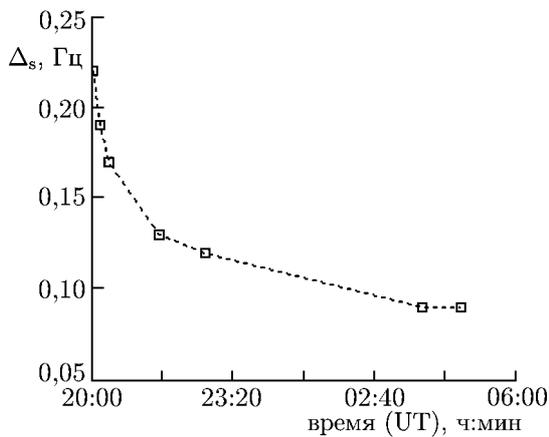


Рис. 4. Ширина Δ_s спектра вариаций сигнала в Медичине в зависимости от времени 15–16 февраля 2013 года

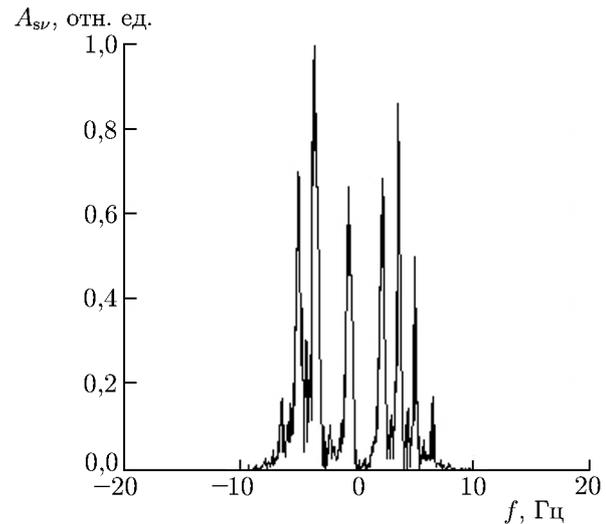


Рис. 5. Спектр мощности сигнала передатчика РТ-70 в Евпатории в 20:00:00 UT 15 февраля 2013 года

сигнала. На рис. 2 и 3 приведены полученные спектры для двух интервалов наблюдений. Видно, что в спектрах нет выделенных частот, соответствующих определённым периодам повторения максимумов. Спектры постепенно сужаются по мере удаления астероида от Земли (рис. 4).

Обработка в режиме бистатической локации заключалась в перемножении сигнала передатчика и отражённого сигнала, принятого в каждом приёмном пункте, и дальнейшем спектральном анализе. Частота максимума спектра в этом режиме соответствует частотному сдвигу Доплера и определяется радиальной скоростью движения объекта. Вместо сигнала передатчика для ускорения процесса обработки использовался искусственно смоделированный цифровой монохроматический сигнал с постоянной частотой в полосе регистрации.

В данном эксперименте излучённый сигнал передатчика РТ-70 имел ширину спектра около 15 Гц, а несущая частота плавно изменялась во времени, что затруднило обработку экспериментальных данных. В первых четырех сеансах локации выполнялась эпизодическая запись излучённого сигнала в Евпатории. На основе этой записи строилась функция, описывающая дрейф несущей частоты, которая учитывалась при обработке и позволила получить точные данные о частотных характеристиках отражённых сигналов. На рис. 5 приведён спектр мощности излучённого сигнала, записанного в Евпатории в первом сеансе излучения. В спектре явно просматриваются несколько пиков, из которых два наиболее мощных располагаются по краям спектра. Примеры спектра выходного сигнала интерферометра в режиме бистатической локации для каждого из приёмных пунктов представлены на рис. 6. Из рисунков видно, что характер сигналов идентичен; выделяются две основные частоты, разнесённые примерно на 10 Гц, между которыми распределяется основная мощность излучения. Это обстоятельство привело к уменьшению дальности локации и недостоверности части данных в последних сеансах излучения, когда сигнал передатчика не записывался.

В начале эксперимента расчётная радиальная скорость астероида относительно передающей антенны составляла 1,8 км/с, что соответствовало частотным сдвигам Доплера 60 кГц, в конце сеанса скорость была равна 6,5 км/с (частотный сдвиг Доплера 210 кГц).

Для первых четырёх интервалов наблюдений получены динамические спектры мощности выходного сигнала интерферометра. В задачи обработки входило определение Доплеровских сдвигов частоты и сравнение их с аналогичными величинами, рассчитанными по данным оптических

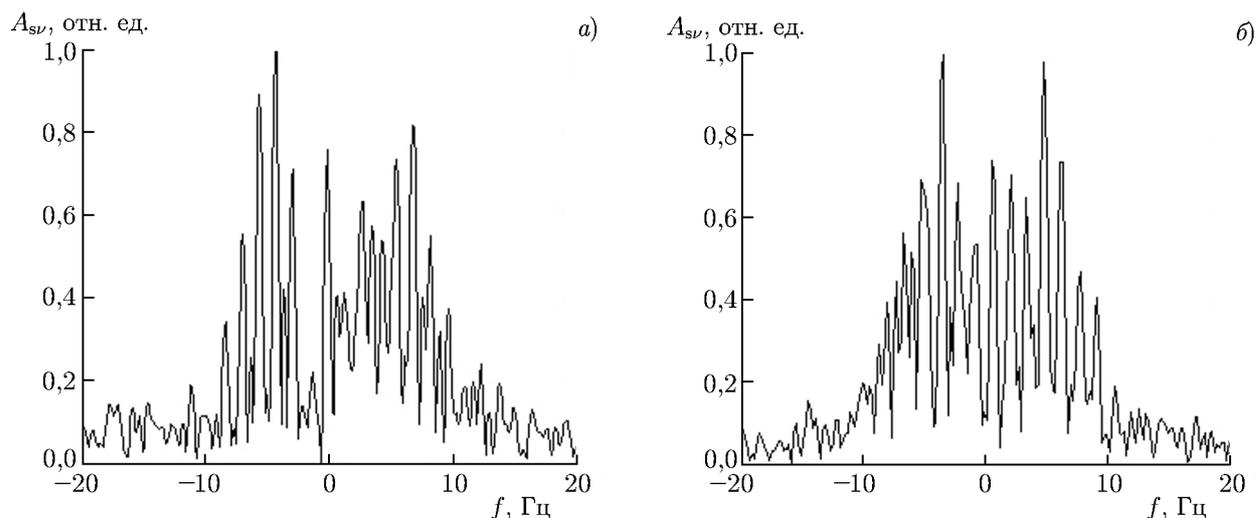


Рис. 6. Спектры мощности сигналов интерферометров Евпатория—Медичина (а) и Евпатория—Ирбене (б) в режиме бистатической локации в 20:00:12 UT 15 февраля 2013 года

измерений. Частотные сдвиги Доплера определялись по частоте максимума спектров в бистатическом режиме. В целом отмечается хорошее совпадение экспериментальных и расчётных значений, однако выделяются некоторые особенности. На рис. 7 для первого интервала измерений приведена временная зависимость разности экспериментального и расчётного доплеровских сдвигов частоты. В кривой просматривается чёткий разброс частот в соответствии с основными составляющими спектра излученного сигнала. Дальнейшие оценки проводились для более мощной составляющей.

На рис. 8 представлена разность расчётных и экспериментальных доплеровских сдвигов частоты для четырёх сеансов локации. Из графика следует, что в 20:00:00 UT (при наименьшем расстоянии астероида от Земли) расхождение измеренных и расчётных значений достигало 125 Гц. С удалением объекта расхождение постепенно уменьшалось примерно до 2 Гц в течение трёх часов наблюдений и далее сохранялось постоянным для первого сеанса 03:45 UT 16 февраля, когда была сделана последняя запись излучаемого сигнала.

Частотное разрешение спектрального анализа зависит от времени интегрирования и при выборе времён усреднения 10; 8 и 2 с (в зависимости от амплитуды принятого сигнала) было равным 0,1; 0,125 и 0,5 Гц соответственно. Разрешение по частоте 0,1 Гц соответствует потенциальной точности определения радиальной скорости движения объекта 0,003 м/с при частоте передатчика 5 ГГц и свидетельствует о высокой точности метода. Но несмотря на высокое частотное разрешение, общая погрешность измерения сдвигов Доплера в данном эксперименте была значительно выше (от 0,6 до 2 Гц) из-за уширенного спектра сигнала передатчика и нестабильности

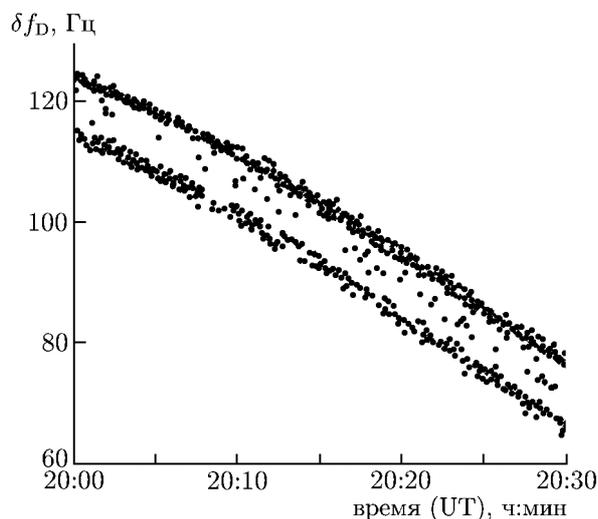


Рис. 7. Разность δf_D измеренного и расчётного доплеровских сдвигов частоты для РСДБ-пункта в Медичине в период 20:00:00÷20:32:00 UT 15 февраля 2013 года

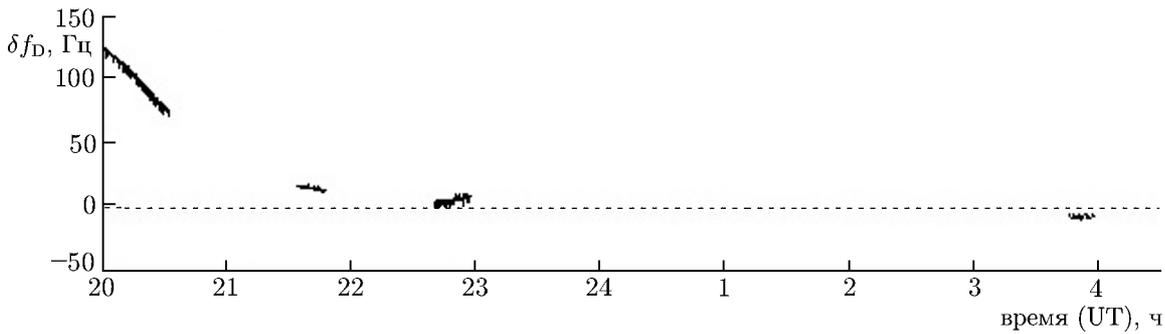


Рис. 8. Разность δf_D измеренного и расчётного доплеровских сдвигов частоты для РСДБ-пункта в Мединине в период от 20:00:00 UT 15 февраля 2013 года до 03:56:25 UT 16 февраля 2013 года

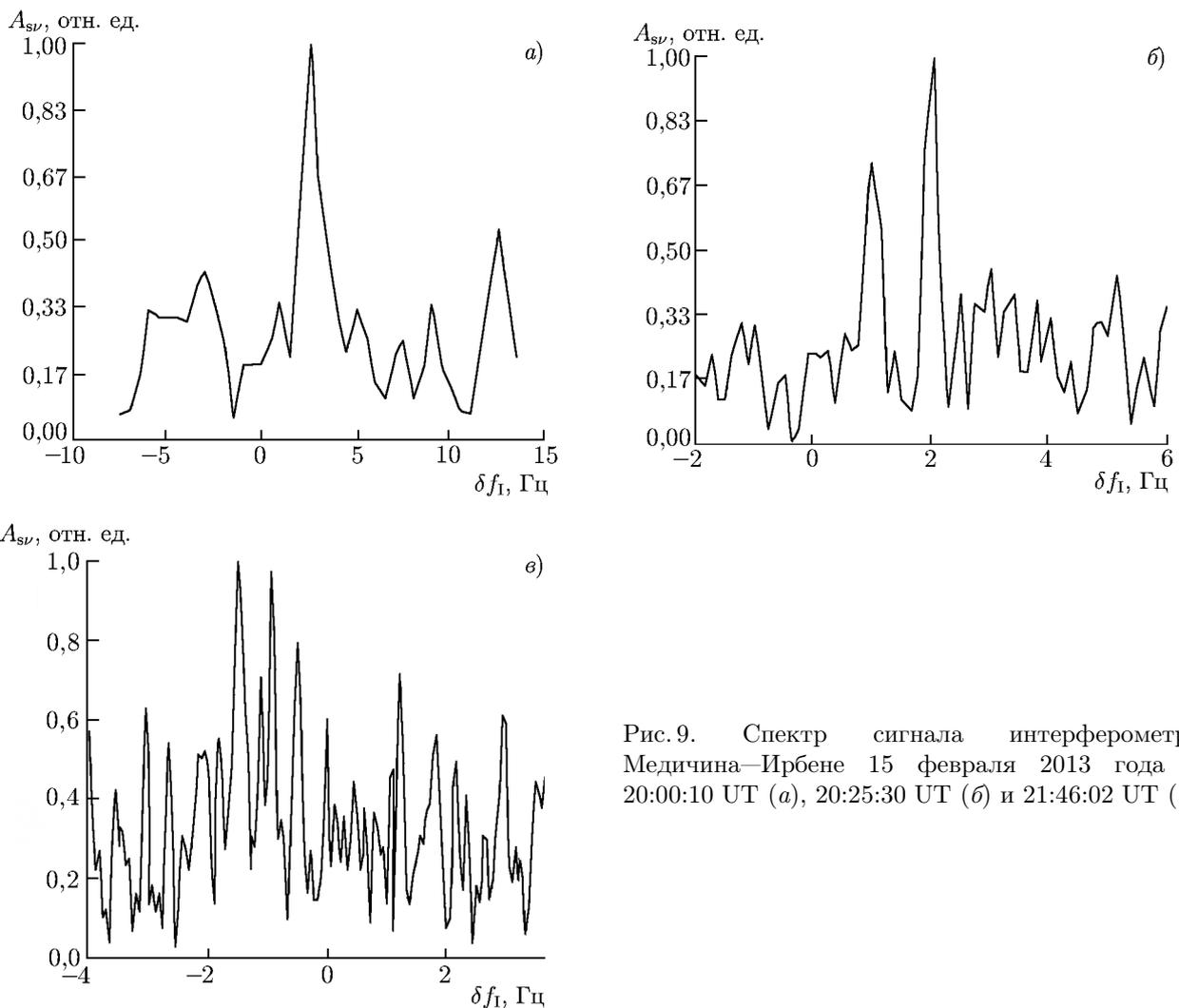


Рис. 9. Спектр сигнала интерферометра Мединина—Ирбене 15 февраля 2013 года в 20:00:10 UT (а), 20:25:30 UT (б) и 21:46:02 UT (е)

распределения мощности по частотам внутри спектра.

Процедура обработки в режиме РСДБ состояла в перемножении сигналов, отражённых от астероида и зарегистрированных в двух приёмных РСДБ-пунктах, для определения частоты интерференции, которая используется для уточнения угловой скорости движения объекта. При

данном варианте обработки исключается частотный дрейф, связанный с режимом работы передатчика, и существенно ослабляется влияние временного профиля излучённого сигнала. Примеры спектров мощности выходного сигнала интерферометра с базой Ирбене—Медичина интерференции, которая используется для уточнения угловой скорости движения объекта. При данном варианте обработки исключается частотный дрейф, связанный с режимом работы передатчика, и существенно ослабляется влияние временного профиля излучённого сигнала. Примеры спектров мощности выходного сигнала интерферометра с базой Ирбене—Медичина для некоторых моментов наблюдений приведены на рис. 9. На рис. 10 представлен график временной зависимости разности δf_I расчётной и измеренной частот интерференции, который позволяет уточнить угловую скорость движения объекта. При построении графика не учитывались значения, при которых амплитуда сигнала была меньше выбранного порога (15 % от максимальной амплитуды). На первом интервале наблюдений поправка к расчётной частоте интерференции составила 2,5 Гц ($0,2''$ для угловой скорости), в последующих сеансах поправка постепенно уменьшалась до 0,5 Гц. Несмотря на сложную структуру отражённого сигнала, частота интерференции определяется с достаточно высокой точностью: частотное разрешение спектрального анализа выбиралось равным 0,125 и 0,5 Гц, что соответствует потенциальной точности определения угловой скорости астероида до $0,01''$ с^{-1} .

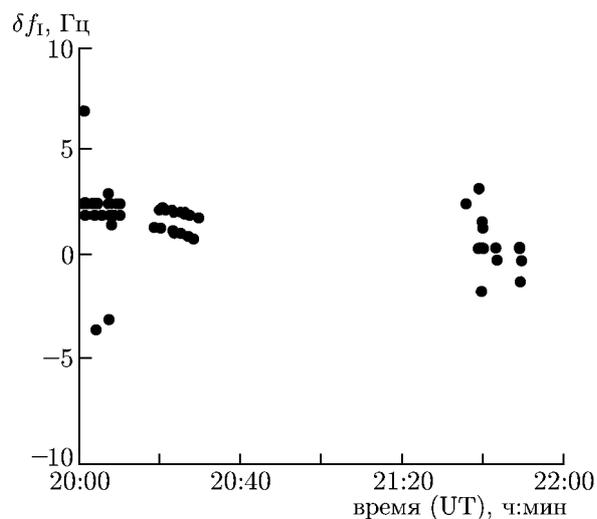


Рис. 10. Разность δf_I измеренных и расчётных частот интерференции, полученных для интерферометра Медичина—Ирбене в период 20:00:00÷21:48:42 UT 15 февраля 2013 года

2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперимент по РСДБ-локации астероида 2012 DA14 можно считать самым успешным из проведённых авторами работы экспериментов по локации астероидов с применением метода РСДБ. Приняты уверенные отражённые сигналы на значительных временных интервалах, что позволило получить достоверные данные на всех этапах обработки. Впервые в эксперименте по РСДБ-локации астероида получена взаимная корреляционная функция сигналов двух РСДБ-пунктов. Измерены параметры отражённого сигнала для объекта неопределённой формы.

Оценки показали, что ошибка в частоте Доплера в 100 Гц соответствует ошибке в определении радиальной скорости 3 м/с (около 0,2 %) для данных измерений. Разрешение по частоте, равное 0,1 Гц, соответствует точности определения радиальной скорости движения объекта 0,003 м/с при частоте передатчика 5 ГГц. Минимальная погрешность определения угловой скорости астероида составила $0,01''$ с^{-1} при времени интегрирования 8 с, т. е. при частотном разрешении спектрального анализа 0,125 Гц. Эти оценки свидетельствуют о высокой точности метода.

При общем хорошем совпадении экспериментально измеренных параметров отражённого сигнала с предварительно рассчитанными по данным оптических наблюдений, обнаружено увеличение расхождения экспериментальных и расчётных величин в момент наибольшего сближения астероида с Землей. Следует отметить, что по данным других исследовательских групп, в том числе оптиков, при наибольшем сближении небесных тел также наблюдались определённые ано-

малии в движении объекта (см., например, [10, 11]).

Таким образом, метод РСДБ-локации может успешно использоваться для уточнения параметров орбит космических объектов, дополняя или заменяя оптические системы наблюдений, что является важным для решения проблемы астероидной безопасности.

Представленные результаты получены на основе наблюдений с помощью радиотелескопов РТ-70 (Евпатория, НЦУИКС, Крым), РТ-32 (Ирбене, Вентспилсский международный радиоастрономический центр, Латвия), РТ-32 (Медицина, Istituto di Radioastronomia INAF, Италия). Авторы выражают благодарность сотрудникам этих организаций за помощь в проведении эксперимента.

Исследования частично поддержаны Государственным космическим агентством Украины (проект «Наука — интерферометр»), РФФИ (проекты 13-02-97080-р_поволжье_a и 13-02-00586-a) и Городским советом г. Вентспилс (проект «Исследования в ВМРЦ с использованием радиотелескопа «Ирбене»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В. А., Липатов Б. Н., Резникова В. Э. // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43, № 8. С.675.
2. Нечаева М. Б., Антипенко А. А., Дементьев А. Ф. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 7. С. 577.
3. Молотов И. Е., Нечаева М. Б., Коноваленко А. А. и др. // Изв. Главн. астрон. обсерв. 2006. Т. 218. С. 402.
4. Nechaeva M., Antipenko A., Bezrukovs V., et al. // Baltic Astronomy. 2013. V. 22, No. 1. P. 35.
5. Molotov I., Nechaeva M., Falkovich I., et al. // Measuring the Future: Proc. 5th IVS General Meeting. St.-Petersburg: Nauka, 2008. P. 30.
6. Hagfors T. // Radio Sci. 1970. V. 5, No. 2. P. 189.
7. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Под ред. Б. М. Шустова, Л. В. Рыхловой. М.: Физматлит, 2010. 384 с.
8. Benner L. http://echo.jpl.nasa.gov/asteroids/2012DA14/2012DA14_planning.html.
9. Vierinen J. http://kaira.sgo.fi/2013_02_01_archive.html.
10. de Leon J., Ortiz J. L., Pinilla-Alonso N., et al. // Astron. Astrophys. 2013. V. 555. Art. no. L2.
11. Gary B. L. // Minor Planets Bull. 2013. V. 40, No. 3. P. 122.
12. Horizons Web-Interface. <http://ssd.jpl.nasa.gov>, soln. ref.=JPL#49.
13. Нечаева М. Б., Антипенко А. А., Безруков Д. А. и др. // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества (ЧЭС). 2013. Т. 2, № 4. С. 116.
14. Nechaeva M., Antipenko A., Bezrukov D., et al. // Baltic Astronomy. 2013. V. 22. P. 341.
15. Нечаева М. Б., Дугин Н. А., Шмелд И. К. // Вест. Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. 2011. Вып. 6 (39). С. 196.

Поступила в редакцию 27 февраля 2014 г.; принята в печать 7 апреля 2014 г.

VLBI RADAR OF THE 2012 DA14 ASTEROID

M. B. Nechaeva, N. A. Dugin, A. A. Antipenko, D. A. Bezrukov, V. V. Bezrukov, V. V. Voytyuk, A. F. Dementjev, N. Jekabsons, M. Klapers, A. A. Konovalenko, V. F. Kulishenko, A. S. Nabatov, V. N. Nesteruk, D. Pupillo, A. M. Reznichenko, E. Salerno, S. D. Snegirev, Yu. V. Tikhomirov, R. V. Khutornoy, K. Skirmante, I. Shmeld, and A. K. Chagunin

An experiment on VLBI radar of the 2012 DA14 asteroid was carried out on February 15–16 2011 at the time of its closest approach to the Earth. The research groups of Kharkov (Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine), Evpatoria (National Space Facilities Control and Test Center), Nizhny Novgorod (Radiophysical Research Institute), Bologna (Institute of Radio Astronomy (INAF)), and Ventspils (Ventspils International Radioastronomy Center) took part in the experiment. The asteroid was irradiated by the RT-70 planetary radar (Evpatoria) at a frequency of 5 GHz. The reflected signal was received using two 32-m radio telescopes in Medicina (Italy) and Irbene (Latvia) in radiointerferometric mode. The Doppler frequency shifts in bi-static radar mode and interference frequency in VLBI mode were measured. Accuracy of the VLBI radar method for determining the radial and angular velocities of the asteroid were estimated.