

УДК 520.274

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РСДБ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО ЛОКАЦИИ
АСТЕРОИДА 2012 DA14 В 2013 Г.¹**

*Нечаева М. Б.², Антипенко А. А.³, Безруков В. В.⁴, Безруков Д. А.⁵,
Войтюк В. В.⁶, Дементьев А. Ф.⁷, Дугин Н. А.⁸, Екабсонс Н.⁹, Клаперс М.¹⁰,
Коноваленко А. А.¹¹, Кулишенко В. Ф.¹², Набатов А. С.¹³, Нестерук В. Н.¹⁴,
Пупильо Д.¹⁵, Резниченко А. М.¹⁶, Салерно Э.¹⁷, Тихомиров Ю. В.¹⁸,
Хуторной Р. В.¹⁹, Шкирманте К.²⁰, Шмелд И.²¹*

APPLICATION OF THE VLBI METHOD IN EXPERIMENT ON RADAR OF ASTEROID 2012 DA14
IN 2013

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

Capabilities of the Very Long Baseline Interferometry (VLBI) method are examined in reference to the problem of asteroid radar observations in the near-Earth space for the purpose of refining their trajectories. Basic features of the VLBI-radar method are analyzed on the example of the experimental observation of the asteroid 2012 DA14, carried out in February 2013. The asteroid was irradiated by the 5010.024 MHz frequency signal (radar RT-70, Evpatoria, Ukraine), whereas the echo signals were received by the radio telescopes RT-32 in Irbene (Ventspils, Latvia) and Medicina (Italy) in VLBI regime. A series of observations was implemented for different distances between the Earth and the asteroid (from 30000 km to 250000 km). The reflected signals were successfully received by the both VLBI-stations. Processing of the recorded signals allowed of measuring the Doppler frequency and interference frequency in order to improve the calculation of the radial and angular velocity of the asteroid.

Keywords: very long baseline interferometry, radar, asteroid 2012 DA14.

¹Исследования частично поддержаны Государственным космическим агентством Украины (проект «Наука — интерферометр»), РФФИ (13-02-00586-а, 13-02-97080-р-поволжье) и Городским советом г. Вентспилс (проект «Исследования в ВМРЦ с использованием радиотелескопа “Ирбене”»).

²Нечаева Мария Борисовна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского радиофизического института, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского инженерного института «Вентспилсский международный радиоастрономический центр» Вентспилсской Высшей школы; e-mail: nech@nirfi.sci-nnov.ru.

³Антипенко Александр Анатольевич, ведущий электроник Научно-исследовательского радиофизического института; e-mail: vlbi@yandex.ru.

⁴Безруков Владислав Валерьевич, научный сотрудник Научно-исследовательского инженерного института «Вентспилсский международный радиоастрономический центр» Вентспилсской Высшей школы; e-mail: vladislavsb@venta.lv.

⁵Безруков Дмитрий Алексеевич, Ph. D., науч. сотрудник Научно-исследовательского инженерного института «Вентспилсский международный радиоастрономический центр» Вентспилсской Высшей школы; e-mail: magnet155@mail.ru.

⁶Войтюк Виктор Владимирович, начальник группы антенных устройств Национального центра управления и испытаний космических средств; e-mail: w_voytyuk@mail.ru.

⁷Дементьев Александр Федорович, заведующий сектором приборостроения и обработки данных Научно-исследовательского радиофизического института; e-mail: dementiev@nirfi.sci-nnov.ru.

⁸Дугин Николай Александрович, д-р физ.-мат. наук, заведующий отделом прикладной радиоинтерферометрии и физики солнечно-земных связей Научно-исследовательского радиофизического института; e-mail: dugin@nirfi.sci-nnov.ru.

⁹Екабсон Нормундс, Ph. D., ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского инженерного института «Вентспилсский международный радиоастрономический центр» Вентспилсской Высшей школы; e-mail: normundsj@venta.lv.

¹⁰Клаперс Микс, научный сотрудник Научно-исследовательского инженерного института «Вентспилсский международный радиоастрономический центр» Вентспилсской Высшей школы; e-mail: miks.klapers@venta.lv.

При решении проблемы астероидной безопасности важной задачей является создание и развитие средств обнаружения опасных для Земли объектов и определения их орбит. Естественным дополнением к хорошо разработанным и эффективным оптическим системам наблюдений могут стать радиолокационные средства. Метод радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой, обладающей высоким угловым разрешением, в комбинации с радиолокацией (метод РСДБ-локации) может успешно использоваться для уточнения параметров орбит космических объектов, обнаруженных оптическими инструментами [1]. Этот метод позволяет одновременно определять радиальную скорость, расстояние до объекта, его угловые координаты и угловые скорости.

Ранее метод РСДБ-локации применялся в экспериментах по наблюдению объектов космического мусора в околоземном космическом пространстве [2–4]. В этих экспериментах была достигнута точность определения радиальной скорости объектов, существенно превышающая точность оптических средств. Было проведено несколько эпизодических наблюдений астероидов, находившихся на расстояниях от Земли более 400 тыс. км, но малая площадь отражающей области и большое расстояние до объектов не позволили сделать точные оценки траекторий движения.

Пролет астероида 2012 DA14 в непосредственной близости от Земли стал зна-

чительным астрономическим событием 2013 г. и предоставил уникальную возможность для отработки оптических и радиоастрономических методов исследования характеристик малых небесных тел и оценки параметров их движения, включая метод РСДБ-локации. 15 февраля 2013 г. в 19:24 UT астероид 2012 DA14, размеры которого оцениваются величинами от 30 до 80 м, приблизился к Земле на минимальное расстояние 27700 км. В момент пролета астероида было осуществлено большое число оптических наблюдений и радиолокационных экспериментов с использованием локаторов Голдстоуна, Хайстека и EISCAT [5–8]. Авторами настоящей работы был проведен эксперимент по локации астероида с применением метода РСДБ. Методические основы эксперимента по РСДБ-локации и основные соотношения, описывающие корреляционные и спектральные характеристики выходного сигнала РСДБ, были рассмотрены ранее в [1]. В данной статье описывается процедура обработки РСДБ-данных на примере эксперимента по локации астероида 2012 DA14, приводятся полученные результаты.

1. Постановка эксперимента

Международный эксперимент по РСДБ-локации астероида 2012 DA14 состоялся в период с 19:30 UT 15-го февраля до 06:15 UT 16 февраля 2013 года. Локация объекта осуществлялась с помощью передающе-

¹¹Коноваленко Александр Александрович, д-р физ.-мат. наук, академик НАН Украины, заместитель директора по научной работе Радиоастрономического института НАН Украины, e-mail: akonov@rian.kharkov.ua.

¹²Кулишенко Владислав Федорович, заведующий научно-исследовательской группой Радиоастрономического института НАН Украины, e-mail: kulish@rian.kharkov.ua.

¹³Набатов Александр Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией Радиоастрономического института НАН Украины, e-mail: asna@ukr.net.

¹⁴Нестерук Владимир Николаевич, начальник группы Национального центра управления и испытаний космических средств; e-mail: nesteruk2007@rambler.ru.

¹⁵Пуцилло Джузеппе, Ph. D., Post-doc Researcher, INAF – Istituto di Radioastronomia, Stazione Radioastronomica di Medicina; e-mail: g.pupillo@ira.inaf.it.

¹⁶Резниченко Александр Михайлович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Радиоастрономического института НАН Украины; e-mail: alex_rez@ukr.net.

¹⁷Салерно Эмма, Ph. D., Post-doc Researcher, INAF – Istituto di Radioastronomia, Stazione Radioastronomica di Medicina; e-mail: esalerno@ira.inaf.it.

¹⁸Тихомиров Юрий Васильевич, старший научный сотрудник Научно-исследовательского радиотехнического института; e-mail: tikhomirov@nirfi.sci-nnov.ru.

¹⁹Хуторной Руслан Владимирович, заместитель начальника Центра дальней космической связи радиотелескопа РТ-70; e-mail: mesh_72@mail.ru.

²⁰Шкирманте Карина, Mg. Sc. Comp., ассистент Научно-исследовательского инженерного института «Вентспилский международный радиоастрономический центр» Вентспилской Высшей школы, Латвия, e-mail: karina.krinkele@venta.lv.

²¹Шмелд Ивар, Ph. D., ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского инженерного института «Вентспилский международный радиоастрономический центр» Вентспилской Высшей школы; e-mail: ivarss@venta.lv.

го комплекса РТ-70, Евпатория (Украина), в режиме непрерывного излучения на частоте 5010,024 МГц. Прием сигналов, отраженных от астероида, выполнялся 32-метровыми радиотелескопами в Медичине (Италия) и Ирбене (Латвия). Эфемериды астероида для расчета предварительных параметров обработки и целеуказания для передающей и приемных антенн рассчитывались с помощью web-интерфейса HORIZONS, NASA (<http://ssd.jpl.nasa.gov>, soln. ref. = JPL#49). Запись сигналов осуществлялась в полосе 2 МГц в Ирбене с помощью систем регистрации ТН16 (НИРФИ) и МК5В, в Медичине — МК5А. Основной задачей эксперимента являлось измерение частот Доплера для определения радиальной скорости астероида и частоты интерференции для оценки его угловой скорости.

Расписание эксперимента включало шесть сеансов локации астероида, в которых предусматривались временные интервалы излучения на несущей частоте и интервалы излучения ЛЧМ-сигнала с девиацией 512 кГц и переменным периодом (4, 16, 32 мс). Мощность передатчика достигала 70 кВт. В данном эксперименте передатчик РТ-70 работал в нестандартном режиме: ширина спектра составляла 15 Гц и несущая частота плавно изменялась во времени. В большинстве сеансов локации в передающем пункте выполнялась запись излученного сигнала, которая в дальнейшем использовалась для устранения частотных эффектов при обработке. В промежутках между сеансами локации наблюдались калибровочные радиисточники для уточнения наведения передающей антенны. В начале первого сеанса излучения (20:00:00 UT) астероид находился на расстоянии от Земли около 33 тыс. км; к концу последнего сеанса расстояние достигло 254 тыс. км. На протяжении эксперимента радиальная скорость астероида изменялась от 1,8 км/с до 6,5 км/с, что соответствовало частотным сдвигам Доплера от 60 до 210 кГц. Отклик от астероида уверенно обнаружен в сигналах, зарегистрированных на обеих антеннах.

2. Результаты обработки экспериментальных данных

Обработка экспериментальных данных осуществлялась в Научно-исследовательском радиофизическом институте (Нижний

Новгород) на программном корреляторе «НИРФИ-4» и в Вентспилском международном радиоастрономическом центре. Процедура обработки состоит из нескольких этапов: 1) автокорреляция сигналов, зарегистрированных в каждом приемном пункте, 2) перемножение излученного сигнала и принятого сигнала (для каждой приемной антенны) с предварительной компенсацией временного и частотного сдвигов (режим бистатической локации), 3) перемножение сигналов, зарегистрированных радиотелескопами в Медичине и Вентспилсе (режим РСДБ). Все указанные операции были применены к измеренным сигналам и показали наличие откликов на каждом этапе обработки. Далее приводятся результаты только для первых трех сеансов излучения (15 февраля), в которых благодаря более мощному отклику получены достоверные значения искоемых параметров — частотных сдвигов Доплера и частоты интерференции.

На первом этапе осуществлялась автокорреляция сигнала, зарегистрированного в каждом РСДБ-пункте. Спектральный анализ автокорреляционного сигнала позволял проконтролировать наличие отраженного сигнала от лоцируемого объекта на расчетной частоте в каждом из сеансов локации. Частотное разрешение спектрального анализа сигнала определяется временем накопления и на этой стадии обработки было достаточно грубым (240–500 Гц), так как увеличение времени накопления было нецелесообразным из-за размывания автокорреляционного спектра при высокой скорости движения астероида. На рис. 1 приведена временная зависимость изменения амплитуды автокорреляционного отклика. Уменьшение амплитуды от сеанса к сеансу обусловлено удалением астероида от Земли, а 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.

На втором этапе обработки выполнялось перемножение сигнала передатчика и эхо-сигнала, принятого в каждом приемном пункте (режим бистатической локации) с предварительной компенсацией частотного

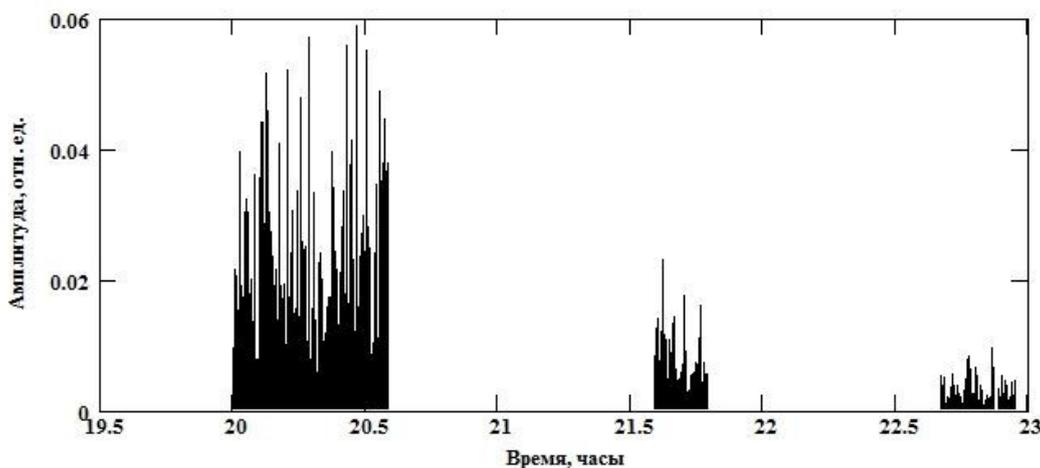


Рис. 1. Временная зависимость амплитуды максимума автокорреляционного спектра, измеренного на РТ-32 Ирбене. 15 февраля 2013 г., 20:00:00-22:57:00 UT

сдвига и времени распространения сигнала на трассе «передатчик – астероид – приемник». Вместо сигнала передатчика для ускорения процесса обработки использовался искусственно смоделированный цифровой монохроматический сигнал с частотой в полосе регистрации. Результатом спектрального анализа результирующего сигнала являлась частота максимума спектрального отклика, которая соответствует частотному сдвигу Доплера и зависит от радиальной скорости движения объекта.

В ходе обработки были получены ряды частотных сдвигов Доплера и проведено сравнение с частотами, рассчитанными по данным оптических измерений. На рис. 2 приведены временные зависимости частотных сдвигов Доплера, измеренных по сигналам РТ-32 Ирбене, и их расчетные значения. График демонстрирует одинаковый характер кривых.

Частотное разрешение спектрального анализа зависит от времени интегрирования и выбиралось равным 0,1, 0,125 и 0,5 Гц в зависимости от амплитуды принятого сигнала. Разрешение по частоте, равное 0,1 Гц, соответствует точности определения радиальной скорости движения объекта 0,003 м/с при частоте передатчика 5 ГГц и свидетельствует о высокой точности метода. Несмотря на высокое частотное разрешение, общая погрешность измерения сдвигов Доплера в данном эксперименте была значительно хуже (от 0,6 до 2 Гц) из-за уширенного спектра сигнала

передатчика. На рис. 3 приведен спектр мощности кросс-корреляционного сигнала, построенного по данным РСДБ-пункта Медичина. Структура спектра и его ширина повторяют характер излученного сигнала и не связаны с вращением астероида. При обработке корреляционный отклик определялся на двух основных частотах, разнесенных примерно на 10 Гц в пределах спектра излученного сигнала. Дальнейшие оценки проводились для более мощной составляющей.

На рис. 4 представлена разность расчетных частот Доплера и частот Доплера, измеренных в эксперименте, после исключения линейного дрейфа несущей частоты. Из графика следует, что в момент 20:00:00 UT, при наименьшем расстоянии астероида от Земли, расхождение измеренных и расчетных частот Доплера достигало 125 Гц и уменьшалось с удалением объекта до 0–2 Гц в течение трех часов наблюдений. Оценки показывают, что ошибка в частоте Доплера в 100 Гц соответствует ошибке в определении радиальной скорости 3 м/с (около 0,2%) для данного измерения.

На третьем этапе обработки выполнялось перемножение сигналов, отраженных от астероида и зарегистрированных в РСДБ-пунктах Ирбене и Медичина (режим РСДБ).

Для уточнения угловых координат необходимо измерение геометрической задержки, равной разности времени распространения сигнала от астероида до приемных антенн. В интерферометрических эксперимен-

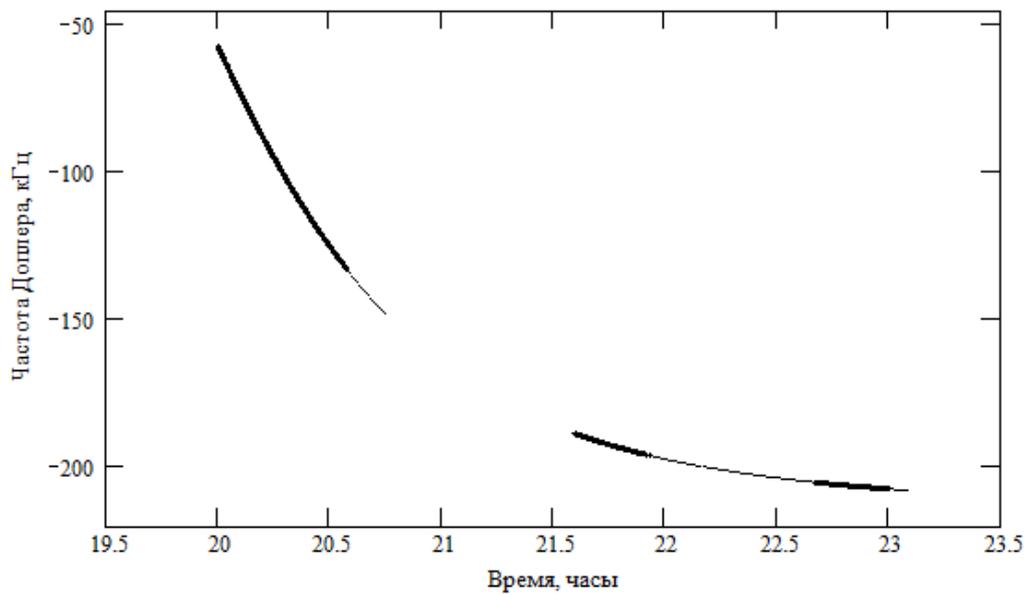


Рис. 2. Зависимость частоты Доплера от времени, измеренная по результатам спектрального анализа отклика интерферометра Евпатория (излученный сигнал) — Ирбене (принятый сигнал) (жирная кривая) и расчетная зависимость, полученная из предварительных данных (тонкая кривая). 15 февраля 2013 г., 20:00:00-23:05:00 UT

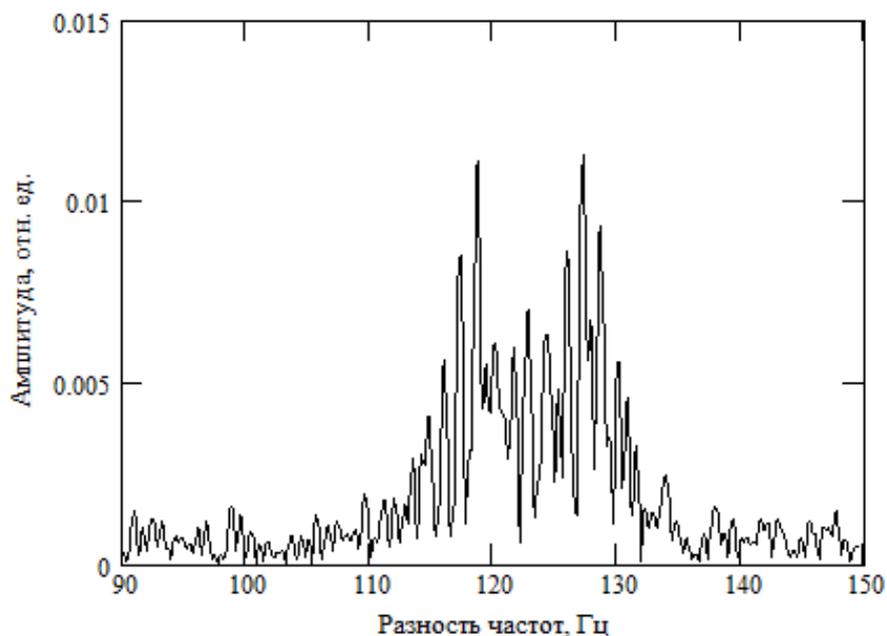


Рис. 3. Спектр мощности результата перемножения излученного сигнала и сигнала, зарегистрированного в РСДБ-пункте РТ-32 Медичина. По горизонтальной оси отложена разность между измеренной частотой Доплера и расчетной. Частотное разрешение 0,1 Гц. 15 февраля 2013 г., 20:00:30 UT

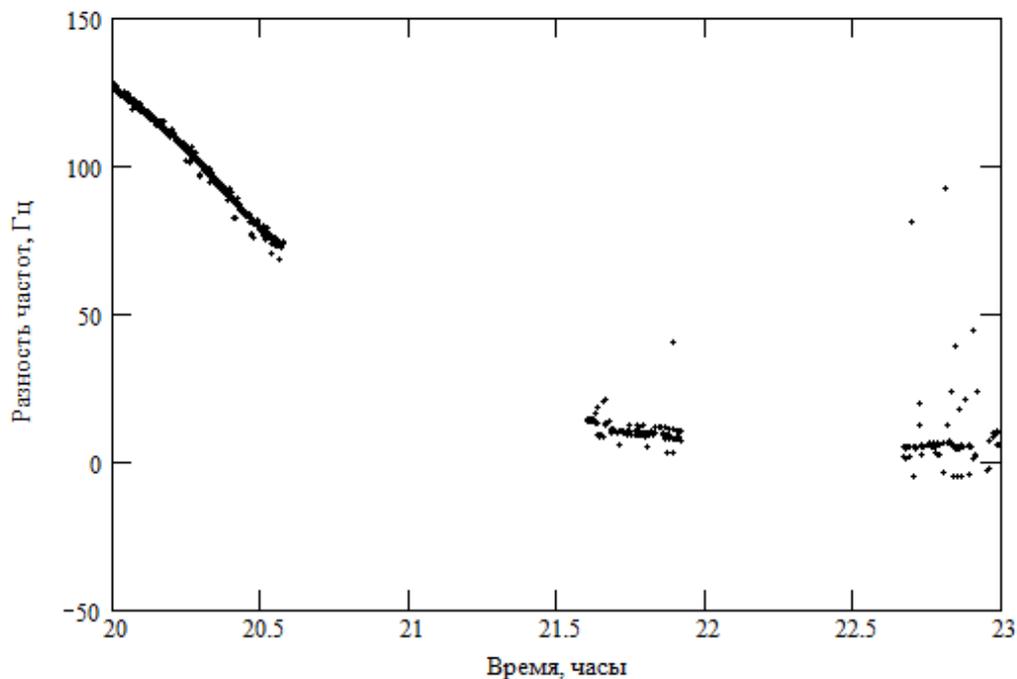


Рис. 4. Зависимость разности экспериментально измеренных частот Доплера и расчетных. РТ-32 Ирбене, 15 февраля 2013 г., 20:00:00-23:05:00 UT

тах задержка измеряется по максимуму взаимной корреляционной функции принятых шумовых сигналов. В расписание эксперимента для измерения задержки были включены короткие (длительностью 5-10 минут) сеансы излучения ЛЧМ-сигнала (с квазишумовым спектром). На данный момент обработка ЛЧМ-сигналов, требующая длительного времени накопления при корреляции, не дала достоверных результатов из-за сложной структуры отраженного сигнала.

Частота интерференции, которая используется для уточнения угловой скорости движения объекта, измерялась по частоте максимума спектра выходного сигнала. При данном варианте обработки исключался частотный дрейф, связанный с режимом работы передатчика. Пример спектра мощности выходного сигнала интерферометра для одного из моментов наблюдений приведен на рис. 5. Частотное разрешение спектрального анализа выбиралось равным 0,125 и 0,5 Гц (время интегрирования 8 с и 2 с), что соответствует минимальной погрешности определения угловой скорости астероида 0,01 угл.сек/с. На рис. 6 представлен график временной зависимости разности расчетной и измеренной частот интерференции, который позволяет про-

вести уточнение угловой скорости движения объекта. На первом интервале наблюдений поправка составила 2,5 Гц (0,2 угл.сек/с для угловой скорости), в последующих сеансах поправка уменьшилась до 0,5 Гц.

Заключение

Рассмотрен эксперимент по РСДБ-локации астероида 2012 DA14, который можно считать одним из самых успешных экспериментов по локации астероида с применением метода РСДБ, проведенных авторами работы. В работе последовательно описана процедура обработки данных локационного эксперимента, которая выполнялась с применением нового программного обеспечения коррелятора «НИРФИ-4».

Значительный размер астероида и малое расстояние до него обеспечили высокий уровень принимаемого эхо-сигнала, что позволило получить достоверные данные на всех этапах обработки. Впервые в эксперименте по РСДБ-локации получена взаимная корреляция сигналов двух РСДБ-пунктов (в предыдущих экспериментах по локации более удаленных астероидов взаимной корре-

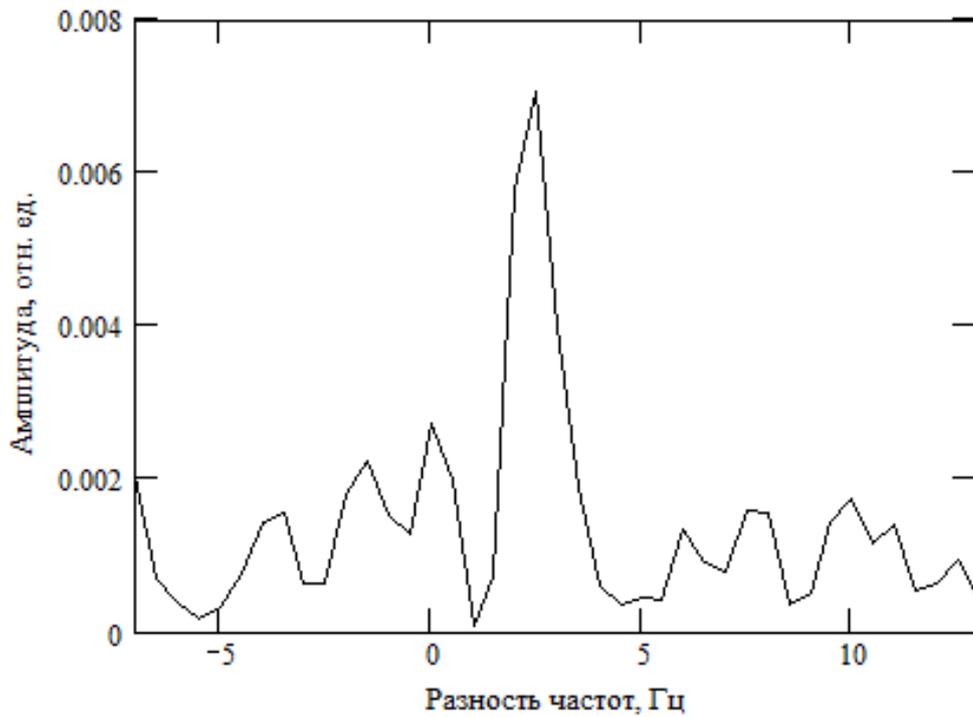


Рис. 5. Спектр мощности кросс-корреляционного сигнала интерферометра Медичина – Ирбене. По горизонтальной оси отложена разность между измеренной частотой Доплера и расчетной. Частотное разрешение составляет 0.5 Гц. 15 февраля 2013 г., 20:00:54 UT

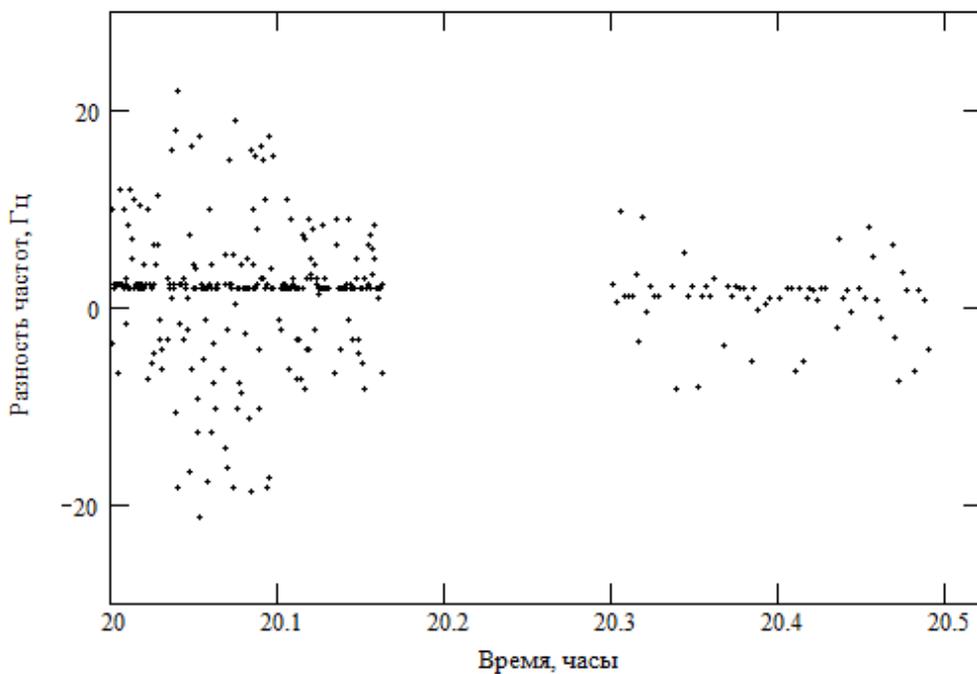


Рис. 6. Временная зависимость разности измеренной и расчетной частоты интерференции. База Медичина – Ирбене. 15 февраля 2013 г. 20:00:00-20:32:00 UT

ляции сигнала в режиме РСДБ не было обнаружено).

Показано, что при достаточной чувствительности приемных систем достигаются высокие точности измерения частот Доплера и частот интерференции, необходимых для уточнения радиальной и угловых скоростей движения астероида. 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.

Таким образом, данный эксперимент подтвердил, что метод РСДБ-локации может успешно применяться для уточнения параметров движения астероидов, потенциально опасных для Земли, и дополнять или заменять оптические средства наблюдений.

Литература

1. Нечаева М. Б., Дугин Н. А., Шмелд И. К. Метод РСДБ в приложении к задаче радиолокации объектов в околоземном космическом пространстве // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М. Ф. Решетнева. 2011. Вып. 6 (39). С. 196–200.
2. Molotov I., Nechaeva M., Falkovich I., Konovalenko A., Agapov V., Tuccari G., Pupillo G., Montebugnoli S., Kharlamov G., Benner L., Fateev V., Burtsev Y., Volvach A., Liu X., Oreshko V., Shmelds I., Bolli P., Dementiev A., Antipenko A., Dugin N., Jazykov V., Bezrukov D. Astrometry of the Solar System Bodies with VLBI Radar // “Measuring the Future”, Proceedings of the Fifth IVS General Meeting, A. Finkelstein, D. Behrend (Eds.). StPb: Nauka, 2008. P. 30–36.
3. Нечаева М. Б., Антипенко А. А., Дементьев А. Ф., Дугин Н. А., Снегирев С. Д., Тихомиров Ю. В. РСДБ-исследования в Научно-исследовательском радиофизическом институте. // Изв. ВУЗов «Радиофизика», 2007. Т. 50, №7. С. 577–592.
4. Nechaeva M., Antipenko A., Bezrukovs V., Bezrukov D., Dementjev A., Dugin N., Konovalenko A., Kulishenko V., Liu X., Nabatov A., Nesteruk V., Pupillo G., Reznichenko A., Salerno E., Shmeld I., Shulga O., Sybiryakova Y., Tikhomirov Yu., Tkachenko A., Volvach A., Yang W.-J. An Experiment on Radio Location of Objects in the Near-Earth Space with VLBI in 2012 // Baltic Astronomy. 2013. Vol. 22. No. 1. P. 35–41.
5. Benner L. 2012 DA14 Goldstone Radar Observations Planning. 2013. http://echo.jpl.nasa.gov/asteroids/2012DA14/2012DA14_planning.html.
6. Vierinen J. DA14 Flyby. 2013. http://kaira.sgo.fi/2013_02_01_archive.html.
7. de León J., Ortiz J.L., Pinilla-Alonso N., Cabrera-Lavers A., Alvarez-Candal A., Morales N., Duffard R., Santos-Sanz P., Licandro J., Pérez-Romero A., Lorenzi V., Cikota S. Visible and near-infrared observations of asteroid 2012 DA14 during its closest approach of February 15, 2013 // Astronomy & Astrophysics, 2013. Vol. 555. Id. L2. 5 pp. DOI: 10.1051/0004-6361/201321373
8. Gary Bruce L. Asteroid 2012 DA14 Rotation Light Curve // The Minor Planet Bulletin (ISSN 1052-8091). Bulletin of the Minor Planets Section of the Association of Lunar and Planetary Observers. 2013. Vol. 40. No. 3. P. 122–124.

Ключевые слова: радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой, радиолокация, астероид 2012 DA14.

Статья поступила 8 октября 2013 г.

Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород

Научно-исследовательский инженерный институт «Вентспилский международный радиоастрономический центр» Вентспилской Высшей школы, Латвия, г. Вентспилс

Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Москва

Национальный центр управления и испытаний космических средств, Украина, г. Евпатория

Радиоастрономический институт НАН Украины, Украина, г. Харьков

Istituto di Radioastronomia, Stazione Radioastronomica di Medicina, Италия, г. Медичина

Центр дальней космической связи радиотелескопа РТ-70, Украина, г. Евпатория

© Нечаева М. Б., Антипенко А. А., Безруков В. В., Безруков Д. А., Войтюк В. В., Дементьев А. Ф., Дугин Н. А., Екабсонс Н., Клаперс М., Коноваленко А. А., Кулишенко В. Ф., Набатов А. С., Нестерук В. Н., Пупильо Д., Резниченко А. М., Салерно Э., Тихомиров Ю. В., Хуторной Р. В., Шкирманте К., Шмелд И., 2013