

УДК 520.274

ПЕРСПЕКТИВЫ МУЛЬТИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ МОНИТОРИНГА АСТЕРОИДНОЙ ОПАСНОСТИ¹

Дугин Н. А.², Петелин М. И.³, Коноваленко А. А.⁴, К. вант Клостер⁵, Пупильо Д.⁶, Шмелд И.⁷

PROSPECTS FOR MULTI-STATIC MILLIMETER-WAVE RADAR TO MONITOR THE ASTEROID DANGER

Dugin N. A., Petelin M. I., Konovalenko A. A., van't Klooster K., Pupillo G., Shmeld I.

Along with the optical methods, the space debris and asteroids may be tracked with interferometric radar systems composed of high-power transmitters and high-sensitivity receivers, both being matched with high-gain antennas. Such a configuration has been realized in experiments where a 5 GHz transmitter is based on the Eupatoria RT-70 antenna (Ukraine) and receivers are situated in Europe, Russia and China. Extension of the frequency band to the millimeter-wave band transparency windows and enlargement of the number of transmit-receive stations would enlarge the efficiency of the multi-static radar.

Keywords: radiotelescopes, radiointerferometry, radar, asteroid danger, frequency range.

События февраля 2013 г., когда на Землю за считанные дни упало несколько метеоритов, а крупный астероид пролетел на минимальном расстоянии в 30 тыс. км (внутри геостационарной отбиты), привлекли всеобщее внимание, в том числе к проблеме создания системы предупреждения астероидно-кометной опасности. Были проведены совещания на высоком уровне по разработке систем мониторинга околоземного космического пространства [1, 2].

С точки зрения экономических затрат оптические системы, ведущие непрерывный

глобальный обзор неба, в том числе, для выявления объектов, представляющих угрозу для Земли, пока остаются наиболее эффективными, однако, они имеют ряд недостатков, а именно: 1) обзор неба может проводиться только ночью; 2) оптические системы не являются всепогодными; 3) объекты, приближающиеся к Земле со стороны Солнца, оптическими средствами трудно обнаружить. Т.е. для создания надежной системы слежения за опасными для Земли объектами необходимо дополнение оптических систем наблюдений радиолокационными средствами

¹Исследования поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 13-02-00586-а и 13-02-97080-р-поволжье) и Государственным космическим агентством Украины (проект «Наука-Интерферометр»).

²Дугин Николай Александрович, д-р физ.-мат. наук, заведующий отделом прикладной радиоинтерферометрии и физики солнечно-земных связей Нижегородского Научно-исследовательского радиофизического института; e-mail: dugin@nirfi.sci-nnov.ru.

³Петелин Михаил Иванович, профессор Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, заведующий лабораторией электронной оптики и СВЧ электродинамики Института прикладной физики РАН; e-mail: petelin@appl.sci-nnov.ru.

⁴Коноваленко Александр Александрович, д-р физ.-мат. наук, академик НАН Украины, заместитель директора по научной работе Радиоастрономического института Национальной академии наук Украины; e-mail: akonov@rian.kharkov.ua.

⁵Кис вант Клостер (Cornelis Gerardus (Kees) van 't Klooster), Ir. MSc., ESA Estec; e-mail: kees.van.t.klooster@esa.int.

⁶Пупильо Джузеппе, Ph. D., Post-doc Researcher, INAF-Istituto di Radioastronomia, Stazione Radioastronomica di Medicina; e-mail: g.pupillo@ira.inaf.it.

⁷Шмелд Ивар, Ph.D., ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского инженерного института «Вентспилсский международный радиоастрономический центр» Вентспилсской Высшей школы, Латвия; e-mail: ivarss@venta.lv.

в диапазоне 1–1000 ГГц, особенно в периоды максимального сближения небесных тел.

К настоящему времени достаточно регулярные локационные эксперименты объектов в ближнем космосе проводятся, в основном, с применением моностатических локационных систем в Голдстоуне и Хэйстеке [3, 4] и многопунктовой радиоинтерферометрической системы с передатчиком РТ–70 в Евпатории (Украина) и приемными пунктами в Европе, России и Китае [5, 6].

Антенна в Евпатории работает в режиме бистатической локации, в том числе с использованием метода РСДБ-локации, т.е. с приемом сигналов, излученных локатором и отраженных от объекта, сетью наземных пунктов, работающих в режиме радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ). 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; также проводились эпизодические наблюдения астероидов, находившихся на расстояниях от Земли более 400 тыс. км [7]. В этих экспериментах была достигнута точность определения радиальной скорости объектов космического мусора, примерно на порядок превышающая точность оптических средств.

В феврале 2013 года астероид 2012 DA14 успешно лоцировали в США [3], Европе [8] и на международном комплексе по РСДБ-локации [9]. В последнем эксперименте облучение астероида также проводилось передатчиком РТ–70 в Евпатории (Украина) на частоте 5 ГГц. Прием отраженных сигналов осуществлялся 32-метровыми радиотелескопами в Медичине (Италия) и Ирбене (г. Вентспилс, Латвия), обработка данных проводилась в Нижнем Новгороде (Россия) и в Вентспилсе. Было проведено шесть сканов облучения общей длительностью 75 мин. и получены отклики от астероида, находившегося на расстояниях от 35 до 260 тыс. км. Основываясь на этом фактически первом опыте РСДБ-локации близкого небесного тела была проанализирована возможность применения высокочастотных радиолокационных систем в задаче предупреждения астероидной опасности [10].

Основной результат проведенных экспериментов по локации астероида состоит в том, что отраженный сигнал имел по амплитуде нерегулярный квазипериодический ха-

рактер с моментами практически полного затухания и, кроме того, был крайне мал для объекта с размерами в несколько десятков метров. Эти эффекты могут быть обусловлены неровностью отражающей поверхности вращающегося небесного тела и малым коэффициентом отражения вещества, из которого оно состоит, в рабочем частотном диапазоне используемого передатчика. При этом в разнесенных приемных пунктах зависимость амплитуды эхо-сигнала от времени была разная. Такой сигнал неудобен для решения задачи обнаружения объекта.

Тем не менее очевидно, что по крайней мере в пределах лунной орбиты многопунктовые системы РСДБ-локации с антеннами больших диаметров могут быть использованы для точного измерения параметров движения астероидов, обнаруженных оптическими средствами. При переходе в мм-диапазон дальность слежения может быть увеличена в несколько раз за счет применения мощных генераторов излучения и антенн с высоким коэффициентом усиления. Запас времени от момента начала слежения до предельного сближения объекта с Землей составит от нескольких часов до нескольких суток. Этого времени достаточно для точного определения возможного места падения, предупреждения населения или передачи данных системам противодействия.

Основная проблема в работе существующей кооперации обсерваторий по проведению сеансов РСДБ-локации — это физическое старение передатчиков на 5 ГГц планетного локатора РТ–70 (Евпатория), с которым были проведены все исследования по данной проблеме. Кроме того, при работе по астероидам с неизвестными свойствами отражающей поверхности необходимо наблюдение объекта на как можно большем числе рабочих частот. Миллиметровый диапазон позволяет существенно увеличить разрешение, а также и дальность действия за счет применения сверхмощных гироклистронов.

Наименее затратный и быстрый путь развития новых приемо-передающих комплексов мм-диапазона — использование существующих приемных сетей РСДБ и дальней космической связи (ДКС), имеющих большие антенны и высокочувствительную аппаратуру.

Возможны два варианта разработки радиолокационной системы:

а) модернизация приемных комплексов под готовый передатчик большой мощности,

Таблица 1. Радиоастрономическая (европейская) сеть РСДБ (ESA)

Пункт	Антенна, диаметр (м)	Диапазон, частота (ГГц)	Полоса частот (ГГц)
Эффельсберг, Германия	100	4,992, 22,230 43,214	21,700–24,300
Медичина, Италия	32	5,05 6,1 ; 6.7 8,58 22,3	4,30–5,80 5,90–7,10 8,18–8,98 18–26,5
Ното, Италия	32	4,875 8,58 22,150 42,5	4,65–5,15 8,18–8,98 21,90–22,40 37–48
Робледо, Испания	70 (DSS–63) 34 (DSS–65) 34 (DSS–54)	22,230 43,214	18,100–26,500
Торунь, Польша	32	4,992, 22,230	22,000–22,500
Вестерборк, Нидерланды	Nx25	4,992, 22,230	
Йебес, Испания	40	4,992, 22,230	18,000–26,000
Джодрел Бэнк, Великобритания	76 25	4,992, 22,230	22,180–22,280
Мецахови, Финляндия	14	4,992, 22,230	21,980–22,480
Онсала, Швеция	25 20	4,992, 22,230 4,992, 22,230, 43,214	19,000–26,000
Шанхай, Китай	25	4,992, 22,230	22,100–22,600
Урумчи, Китай	25	4,992, 22,230	22,100–24,000
Ветцель, Германия	20	4,992, 22,230	
КВАЗАР, Россия	32	4,992, 22,230	22,020–22,520
Арсибо, Пуэрто-Рико	305	4,992, 22,230	
Хартебесток, ЮАР	26	4,992, 22,230	21,400–24,100
Евпатория, Украина	70	4,9, 22	
Вентспилс, Латвия	32	4,9, (15,362)	
Симеиз, Украина	22	4,9, 22	
Калязин, Россия	64	4,8, 22	
Медвежьки Озера, Россия	64	4,9, 22	
Пушино, Россия	22	5, 22	
Корейская РСДБ сеть	20	22	21,250–23,250
Уссурийск, Россия	70		
Кашима, Япония	26	НЧ 8480	200–2320 МГц 8,160–8,800

б) изготовление передатчиков на рабочие частоты приемной сети.

В табл. 1, 2 приведены основные сведения об имеющихся в мире приемных и передающих антеннах, взятые с соответствующих сайтов Интернета.

Из табл. 2 видно, что задача согласования рабочих частот для максимально большого числа пунктов глобальной сети представляется достаточно сложной. Но для уверенного измерения параметров движения объекта достаточно использовать 3–4 приемных пункта.

Предварительный план проведения работ по созданию радиолокационной системы пре-

дупреждения астероидной опасности можно разбить на несколько этапов.

1. Развитие метода РСДБ-локации объектов «космического мусора» и астероидов на частоте 5 ГГц с использованием планетного локатора РТ-70 в Евпатории (Крым, Украина) на основе опыта проведения таких исследований в 2001–2013 гг. с привлечением максимально возможного числа приемных пунктов для создания прочной кооперации участников проекта (с планированием сеансов и обработкой данных в России (НИРФИ), Вентспилсе или в европейских радиоастрономических центрах). Этапы работ:

Таблица 2. Сеть дальней космической связи (EISCAT) (основные пункты + дополнительные, работающие в этих диапазонах)

Пункт	Антенна, диаметр (м)	Диапазон, частота (ГГц)	Полоса частот (ГГц)	Передачик, частота (ГГц)
Реду, Белгия	15 13,5	8,5 31,8–32,3		8,5
Зебрерос, Испания	35	8,5, 32,1	31,8–32,3	34,2–34,7
Маспаламас, Испания	15	2,23, 8,5		2,23
Виллафранка, Испания	15	2,23		2,23
Кируна, Швеция	15 13	2,23, 8,5 2,23, 8,5		2,23 2,23
Санта Мария, Португалия	5,5	2,23, 8,5		
Нью Норсия, Австралия	15 35	2,23, 8,5 32,1	31,8–32,3	2,23, 8,5 34,2–34,7
Перт, Австралия	15	2,23, 8,5		2,23, 8,5
Куру, Фр. Гвиана	15	2,23, 8,5		2,23, 8,5
Маларгю, Аргентина	35	8,5, 26, 32,1	31,8–32,3 25,5–27	34,2–34,7
Робледо, Испания	70 (DSS–63) 34 (DSS–65) 34 (DSS–54)	22230 43214		
Сантьяго, Чили	12	2,23 1,4, 8,5		2,23
Свалбард, Норвегия	13	2,23, 8,5		2,23
Симеиз, Украина	22	36,8, 85–115		
Пушино, Россия	22	36,6		
Дмитров, Россия	7	34		34
Нобеяма, Япония	45	9,8 23,0	36–49 70–90 85–115	

– полная обработка данных прошлых экспериментов для выработки оптимальных методик экспериментов;

– модернизация или замена передатчика;

– проведение экспериментов по РСДБ-локации (1–3 в год) с привлечением приемных пунктов в Вентспилсе (РТ–32, Латвия), Ното и Медичине (РТ–32, Италия), Урумчи (РТ–25, Китай), Калязине и Медвежьих Озерах (РТ–64, Россия), а также других участников, обладающих приемной аппаратурой на диапазон 5 ГГц (Симеиз, Торунь, Онсала, Шанхай, система ИПА РАН «Квазар» и др. по табл. 1).

– обработка данных новых серий экспериментов по РСДБ-локации для получения максимально полной информации об исследуемых объектах и разработки проекта системы РСДБ-локации на частоты 22–32–43–90 ГГц.

2. Модернизация приемных комплексов под готовый передатчик большой мощности.

Сеть ДКС имеет приемные пункты с антеннами 5–35 м диаметром. Передача сигнала на КА ведется в частотном диапазоне 34,2–34,7 ГГц, прием — в диапазоне 31,8–32,3 ГГц (табл. 2). Режим приема — одиночными антеннами, по-видимому, со спецприемниками, сделанными под сигнал КА.

При изготовлении передатчика на частоту 32 ГГц возможна работа сети на прием при следующих условиях: 1) анализ возможности подключения приемных субблоков РСДБ к штатной аппаратуре, 2) анализ возможности сети по РСДБ-локации астероидов и фрагментов «космического мусора» в мм-диапазоне, 3) установка приемников РСДБ на пунктах сети, 4) отладка работы сети в режиме РСДБ.

ИПФ РАН (Россия) обладает огромным опытом в создании мощных генераторов излучения (гироклистронов) в мм-диапазоне длин волн. В настоящее время существует гироклистрон на частоту 34 ГГц мощностью до 0,5 МВт, который, однако, потребует определенной модернизации для ввода в действие и

возможности установки на одной из европейских антенн или в России.

Простейший тестовый радиоинтерферометрический эксперимент на миллиметровых волнах может быть осуществлен с применением этого или других существующих гироклистронов Ка-диапазона. Передающий и приемные пункты могут быть расположены, например, на телескопах в Германии и на семиметровых антеннах МВТУ в г. Дмитров в России (возможность подключения сети ДКС к работе на частоте 34 ГГц проблематична).

В дальнейшем подобные эксперименты могут выполняться на антеннах большего диаметра. Проведение контрольных экспериментов по локации объектов «космического мусора» на небольшом числе пунктов может стать первым этапом по отработке методик наблюдений в мм-диапазоне.

3. Изготовление передатчика на рабочую частоту приемной сети.

Европейская сеть РСДБ имеет приемные пункты с антеннами 20–100 м диаметром. Прием сигналов, в основном естественных радиостанций, ведется в нескольких диапазонах, из которых наиболее близкие к задачам проекта — диапазоны 4990 МГц, 21,75–22,85 и 23,35–24,45 ГГц, 43 ГГц и выше (табл. 1).

Необходимо изготовление новых передатчиков на частоты 5, 22 и 43 ГГц, а в дальнейшем и выше, хотя повышение частоты приведет к ограничению возможностей сети, подобных оптическим (прозрачность атмосферы, погодные условия и т.д.). Поэтому предпочтителен вариант развития сети мм-диапазона с последовательным повышением частоты с учетом опыта предыдущих экспериментов. Важна также задача выбора антенн, на которых должны быть установлены передатчики на частоты выше 5 ГГц.

На частотах ниже 30 ГГц передатчики могут быть созданы на стандартных клистронах, которые могут быть сделаны в США, Европе, Японии или России.

На частотах выше 30 ГГц наибольшие мощности могут быть достигнуты с применением гироклистронов. В 1990-ые годы два 0,5 МВт импульсных гироклистронов Ка-диапазона использовались в радиолокаторах «Руза» А. А. Толкачева [11]. В настоящее время, импульсные гироусилители W-диапазона мощностью около 0,1 МВт разрабатываются в NRL и CPI [12]. Потенциал будущих передатчиков миллиметрового диапазона может быть проиллюстрирован свобод-

но генерирующими гиротронами: для международного проекта ITER разработан 170 ГГц гиротрон с мощностью непрерывного излучения 1 МВт [13].

Режим работы сети для слежения за близкими небесными объектами не будет напряженным, необходимо проведение контрольных экспериментов по РСДБ-локации «космического мусора» для отработки методик и согласования работы многих пунктов. Достаточно двух–трех сеансов в год по 3–5 дней длительностью несколько часов по взаимному согласованию. Естественно, наиболее напряженными будут сеансы по локации близких астероидов, но как показывает практика, такие события проходят один раз в несколько лет.

В перспективе представляется целесообразным пригласить в глобальную антиастероидную радиоинтерферометрическую сеть лаборатории из разных стран, обладающие соответствующими инструментами.

Авторы выражают благодарность А.В. Лапинову и М.Б. Нечаевой за помощь в работе.

Литература

1. Шустов Б. М., Рыжова Л. В. О концепции комплексной программы «создание российской системы противодействия космическим угрозам (2012–2020)» // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. 2011. Вып. 6 (39). С. 4–8.
2. Роскосмос заказал систему слежения за космическим мусором // Технологии tyt.by. 26 ноября 2012. <http://it.tut.by/322326>.
3. 2012 DA14 Goldstone Radar Observations Planning // Asteroid Radar Research. 2013. [URL] http://echo.jpl.nasa.gov/asteroids/2012DA14/2012DA14_planning.html/.
4. Haystack Radio Telescope // Haystack Observatory of the Massachusetts Institute of Technology (MIT). 2013. <http://www.haystack.mit.edu/obs/haystack>.
5. Молотов И. Е., Нечаева М. Б., Коноваленко А. А., Туккари Дж., Люб Ш., Деметьев А. Ф., Антипенко А. А., Дугин Н. А., Пушкарев А. Б., Агапов В. М., Титенко В. В., Шишов В. А., Степаньянц В. А., Фалькович И. С., Вольвач А. Е., Горшенков Ю. Н., Харламов Г. Ю., Орешко В. В., Языков В. П. Развитие метода РСДБ-локации в проекте LFNV // Изв. ГАО в Пулковке. 2006. Т. 218. С. 402–414.
6. Nechaeva M., Antipenko A., Bezrukova 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.
7. 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 // *Proc. of the Fifth IVS General Meeting*. A. Finkelstein, D. Behrend (Eds.). St. Pb: Nauka, 2008. P. 30.
 8. Vierinen J. 2012 DA14 Flyby // KAIRA (Kilpisjärvi Atmospheric Imaging Receiver Array). 2013. http://kaira.sgo.fi/2013_02_01_archive.html
 9. Nechaeva M., Antipenko A., Bezrukov D., Bezrukov V., Dementjev A., Dugin N., Jakobsons N., Khutornoy R., Klapers M., Konovalenko A., Kulishenko V., Nabatov A., Nesteruk V., Pupillo G., Reznichenko A., Salerno E., Shmeld I., Skirmante K., Tikhomirov Yu., Voytyuk V. First results of VLBI-experiment on radar of asteroid 2012 DA14 // *Baltic Astronomy*, 2013 (принято в печать).
 10. Дугин Н. А., Антипенко А. А., Дементьев А. Ф., Нечаева М. Б., Тихомиров Ю. В., Чагунин А. К. Проблемы использования многопунктовых радиолокационных систем для мониторинга астероидной опасности // *Труды XVII научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения В. С. Троицкого (14–15 мая 2013 г., Нижний Новгород)*. (В печати).
 11. Tolkachev A., Levitan B., Solovjev G., Veytsel V., Farber V. A Megawatt Power Millimeter-Wave Phased-Array Radar // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2000. Vol. 15. No. 7. P. 25–31.
 12. Linde G., Ngo M., Danly B., Cheung W., Gregers-Hansen V. WARLOC: A High-Power Coherent 94 GHz Radar // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2008. Vol. 44. No. 3. P. 1102–1117.
 13. van't Klooster K., Petelin M., Thumm M., Aloisio M. Ka-band groundstation antenna aspects for deep space telecommunication and radar // *7th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP 2013)*, Gothenburg, Sweden, April 8–12, 2013. A06-7.

Ключевые слова: радиотелескопы, радиоинтерферометрия, локация, астероидная опасность, частотный диапазон.

Статья поступила 1 октября 2013 г.

Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород

Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, г. Харьков

ESA Estec (Европейское космическое агенство), Нидерланды, г. Нордвик

INAF-Istituto di Radioastronomia (Институт радиоастрономии), Stazione Radioastronomica di Medicina, Италия, г. Медичина

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

© Дугин Н. А., Петелин М. И., Коноваленко А. А., К. вант Клоостер, Пупилио Д., Шмелд И., 2013