

УДК 551.510.535

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Л.Н. Литвиненко

RADIO INTERFEROMETRY OF SPACE DEBRIS

L.N. Litvinenko

Представлены результаты применения современных приемов радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) к новому в мировой практике методу РСДБ-локации. С поверхности Земли метод позволяет осуществлять радиозондирование планет земной группы, околоземных астероидов, объектов космического мусора. Прием отраженных от космических объектов эхо-сигналов ведется мировой сетью крупнейших радиотелескопов в интерферометрическом режиме. Важными прикладными аспектами проведенных исследований являются определение точных траекторий и текущих координат астероидов, потенциально опасных для Земли, и многочисленных фрагментов космического мусора, представляющих угрозу для функционирования различных спутниковых систем и безопасности экипажа Международной космической станции. В качестве иллюстративного материала представлены результаты, исследований полученные в Радиоастрономическом институте НАН Украины с использованием планетного радиолокатора на базе радиотелескопа РТ-70 Национального центра управления и испытаний космических средств в Евпатории. Эти исследования выполнены в широкой международной кооперации с участием крупнейших зарубежных радиоастрономических обсерваторий. В рамках международной научной программы «Низкочастотная РСДБ-сеть» (LFVN) было проведено несколько десятков успешных экспериментов по РСДБ-локации различных космических объектов.

The lecture presents the results of application of modern methods of radio interferometry with very long bases (VLBI) to the world-practice new method of VLBI-radar. From the surface, the method allows the radio sounding of the Earth group planets, near-Earth asteroids, space debris objects. The echo-signals from space objects are received by the world network of the largest radio-telescopes operating in the interferometric mode. The important applied aspects of the researches performed are determination of exact trajectories and present-position data of asteroids which are potentially dangerous for the Earth, and numerous fragments of space debris posing a threat to functioning of different satellite systems and to safety of crews of the International Space Station. As exemplary material the lecture shows the results of research efforts of the Institute of Radio Astronomy of NAS-Ukraine obtained with the use of planetary radar based on the RT-70 radio telescope of the National Control and the Test Center of Space Facilities in Eupatorium. These researches have been executed in a wide international co-operation with the largest foreign radio astronomy observatories. Several tens of successful experiments on VLBI-radar of different space objects have been carried out within the framework of the International Scientific Program «Low-Frequency VLBI-Network» (LFVN).

В середине 60-х гг. 20 века никому не приходило в голову, что космическое пространство можно засорить. Но прошло несколько десятилетий, и в ближнем космосе стало тесно от космического мусора (КМ). Этот мусор состоит из закончивших свою активную работу ИСЗ, последних ступеней ракет, разгонных блоков, обломков ракет и спутников, возникших в результате преднамеренных или аварийных взрывов. За 50 лет космической эры в геокосмос запущено около 24 тыс. космических аппаратов (КА). Почти треть из них находится на околоземных орбитах. Более 16 тыс. объектов упали на поверхность Земли (в среднем падает 1 объект в день). Фрагмент размером более 1 м падает с частотой 1 раз в неделю, причем каждый десятый – не разрушившись полностью. Фрагменты КМ движутся со скоростью порядка 10 км/с. Средняя частота столкновений КА на высоте 400 км с телом размером около 0.1 мм составляет 1 событие в сутки.

Размеры фрагментов КМ могут быть от долей миллиметра до 10 метров. Например, фрагментов размером более 10 см в геокосмосе находится около десятка тысяч. За ними ведется постоянное слежение, все данные о них занесены в специальные каталоги. На низких орбитах каталогизированы фрагменты КМ размером более 5 см. Главным источником информации о низкоорбитальном КМ размером от 5 до 30 см является американская система контроля космического пространства (СККП). Российская СККП на данный момент отслеживает объекты размером более 30 см. На высоких орбитах катало-

гизированы только объекты крупнее 1 м. Происхождение мелких объектов объясняется в основном разрушением КА и объектов КМ. Например, разрушение шести КА в 1998 г. породило более 400 фрагментов (из них каталогизирована только пятая часть). Количество частиц КМ, превышающих 1 см, оценивается на низких орбитах в несколько сотен тысяч.

Ситуация с мелкоразмерной фракцией КМ в области геостационарных орбит (ГСО) неоднозначная. Здесь каталогизированы объекты КМ размером более 1 м. Однако оптические наблюдения, проводимые Европейским космическим агентством, позволили обнаружить тысячи фрагментов размером от 10 до 50 см на ГСО и высокоэллиптических орбитах (ВЭО). Мелкие невидимые с Земли фрагменты на ГСО представляют серьезную опасность для функционирующих КА, поскольку движутся с достаточно высокой относительной скоростью порядка 200 м/с и могут вызвать серьезные повреждения КА в случае столкновения с ним. Ненаблюдаемый мелкоразмерный КМ заполняет окрестности ГСО при каждом запуске КА. Источником мусора являются также и взрывы на ГСО. 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.

Если число фрагментов размером 1–10 см превышает 300 тыс., то число более мелких частиц составляет сотни миллионов. При столкновении двух фрагментов может происходить их дробление, начиная с какого-то времени этот процесс может стать

лавинообразным. При этом небезопасные полеты могут стать невозможными. Мелкий КМ изменяет физические свойства собственно геокосмоса. Изменяется состав газа в геокосмосе, появляются чуждые ему элементы. Уже сейчас масса КМ сравнима с полной массой газа в геокосмосе на высотах $\square 450$ –500 км. Самыми «засоренными» оказались орбиты ИСЗ на высотах 500–600, 800–900, 1400–1500 км и 36–40 тыс. км. Наибольшая плотность мусора находится в диапазоне высот 800–900 км.

Можно выделить следующие основные способы получения информации о КМ.

1. Прямые эксперименты в космосе. Речь идет о возвращаемых для анализа на Земле специальных экранах (панелях), дающих представление о мелко-размерных фракциях.

2. Наземные оптические наблюдения, в том числе лазерные.

3. Наземные радиолокационные наблюдения.

Основные трудности последних двух методов связаны с большой угловой скоростью движения наблюдаемых объектов (особенно на низких орбитах). Обычные телескопы (как оптические, так и радиотелескопы) с высокой точностью сопровождают объекты со скоростями порядка 15 °/мин, а спутник с двухчасовой орбитой движется с угловой скоростью 3 °/мин, то есть в 12 раз быстрее. Для того чтобы выйти из этого положения, нужно создавать радары специального типа и повышать скорости сопровождения телескопов. Необходима также разработка эффективных методов наблюдений. Задача существенно усложняется еще и потому, что, как правило, цель нужно не только обнаружить, но и идентифицировать (распознать по каким-либо признакам или визуализировать).

Обнаружение целей, особенно с малой эффективной площадью отражающей поверхности на больших высотах (от нескольких сотен до нескольких тысяч километров), требует создания мощных высокочувствительных радаров. Одной из наиболее известных систем контроля космического пространства является специально разработанная система TIRA в ФРГ. В ней фактически совмещены два радиолокатора, использующих общую антенну каскадного типа с 34-метровым параболическим зеркалом. Один локатор предназначен для обнаружения и сопровождения целей – это очень мощный узкополосный следящий радар, работающий по моноимпульсному принципу сопровождения на частоте 1333 МГц (22,5 см) с максимальной мощностью в импульсе до 2 МВт при длине импульса 1 мс и частоте повторения не более 40 Гц. Однако даже такой радар не позволяет обнаружить цели на высоких орбитах с помощью одиночного отраженного импульса. Для улучшения отношения сигнал/шум используются варианты накопления сигнала, как правило, метод когерентной многоимпульсной обработки (под когерентным накоплением подразумевается применение быстрого преобразования Фурье в каждом строке дальности). Иногда для повышения энергетического потенциала и разрешения по дальности используется процедура сжатия импульсов. Если основной задачей этого локатора является по-

иск целей и определение параметров ее поступательного движения, то второй радар служит для построения радиолокационного изображения обнаруженного объекта. Он работает на частоте 16,7 ГГц (1,8 см), излучая импульсы длительностью 256 мкс и мощностью до 13 кВт в импульсе. Построение радиолокационных изображений движущихся объектов осуществляется с использованием принципа инверсной (обращенной) синтезированной апертуры (ИСАР). Традиционные ИСАР – когерентные радары, работающие по принципу дальности – частота Доплера, чтобы получить радиолокационное изображение объекта с требуемым разрешением. Принцип дальность – частота Доплера подразумевает, что соответствующий сигнал излучается, а отраженный сигнал обрабатывается, так чтобы определить дальность (задержку по времени) и радиальную скорость (доплеровскую частоту) каждого отражающего элемента объекта. Высокая разрешающая способность по дальности достигается путем излучения сигнала с широкой частотной полосой с последующей при приеме процедурой сжатия импульса. Доплеровское частотное разрешение, и, следовательно, разрешающая способность в поперечном к линии прямой видимости направлении тем лучше, чем больше интервал времени когерентного интегрирования. Путем анализа отраженного сигнала в терминах времени задержки (дальность) и доплеровской частоты может быть рассчитана позиция любой яркой рассеивающей точки объекта. Для этого необходимо знать расстояние до центра вращения объекта; доплеровскую частоту центра вращения объекта или скорость изменения наклонной дальности; скорость вращения объекта относительно собственного центра вращения, чтобы получить правильно масштабированное изображение объекта.

В реальных сценариях ИСАР движение цели может быть разделено на поступательное и вращательное. Только вращательное движение вносит вклад в построение изображения, тогда как поступательное должно быть точно определено и компенсировано. Во многих случаях остаточная погрешность, после того как выполнена компенсация поступательного перемещения, должна иметь порядок доли рабочей длины волны, иначе она сильно ухудшит конечное изображение. Поэтому точная компенсация поступательного перемещения – фундаментальное требование в методах ИСАР. Добавим еще, что в большинстве методов оценки скорости вращения используется либо априорное знание, либо анализ периодичности в уровне интенсивности отраженного сигнала. Разумеется, общий принцип визуализации изложен здесь очень схематично. На практике эта обратная по своей сути задача решается с использованием самых разнообразных методов обработки, позволяющих оптимизировать строящееся изображение, например, с помощью метода контрастной оптимизации изображения, основанного на минимизации функции энтропии интенсивности изображения. Однако даже весьма высокий потенциал радара (большая мощность передатчика и высокая чувствительность приемника) позволяет выполнять идентификацию крупных объектов на вы-

сотах не более нескольких сотен километров. Здесь приходит на помощь эффективный радиоастрономический метод радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Правда, в отличие от радиоастрономических применений здесь потребовалась специальная разработка метода РСДБ-локации. Рассмотрим суть этого метода.

Разрешение идеального радиотелескопа ограничено дифракционным пределом, т. е. обратно пропорционально числу длин волн, укладываемых на апертуре антенны. Для получения разрешения 0.01 угл. сек (а под таким углом виден 1-метровый объект на ГСО) размер антенны на длине волны 2 см оказывается порядка 1000 км. Очевидно, создание сплошной апертуры таких размеров практически невозможно. После разработки метода апертурного синтеза оказалось, что в этом нет необходимости. Если перемножить сигналы от двух антенн, разнесенных на расстояние D , результатом будет являться один фурье-компонент радиояркости той области неба, куда направлены антенны. Пространственная частота фурье-компонента в этом случае равна числу длин волн, укладываемых на проекции вектора базы D между двумя антеннами на плоскость, перпендикулярную направлению на объект. Очевидно, имея еще несколько антенн, в принципе, можно получить достаточный набор баз с различными длинами и ориентацией, покрывающий необходимую площадь синтезируемой апертуры. Каждая пара таких антенн работает как интерферометр, угловое разрешение которого определяется шириной интерференционного лепестка и составляет λ/D (в радианах). В РСДБ-радиоинтерферометрах используется независимая запись сигналов с жесткой временной синхронизацией на каждом из приемных пунктов (радиотелескопов). Компенсация запаздывания осуществляется задержкой в считывании сигналов при их совместной корреляционной обработке на ЭВМ в едином центре.

В 1996 г. был начат проект «Низкочастотная РСДБ-сеть». Его главной задачей являлось создание международной РСДБ-кооперации с использованием российских и украинских радиотелескопов и разработка новых оригинальных программ РСДБ-исследований. За время выполнения проекта 13 антенн – 4 российских, 2 украинских и 7 зарубежных (Литва, Польша, Испания, Италия, Индия и Китай) – были оснащены специальной приемно-регистрирующей радиоастрономической аппаратурой. К настоящему моменту сложилось несколько научных направлений проекта. Одно из основных – развитие метода РСДБ-локации для измерения параметров движения планет земной группы, сближающихся с Землей астероидов и объектов КМ. В этом методе используется мощный передатчик планетного радиолокатора РТ-70 (Евпатория, Украина). Это передатчик непрерывного действия, работающий на частоте 5010.024 МГц (длина волны около 6 см) с использованием (или без использования) ЛЧМ с полосой 512 КГц и периодом 32 мкс. Передатчик может выдавать до 200 кВт непрерывной мощности. В экспериментах по РСДБ-локации КМ отраженные сигналы принимались международной сетью радиотеле-

скопов: РТ-64 (Медвежье озеро, Россия), РТ-32 (Ното, Италия), РТ-32 (Торунь, Польша), РТ-22 (Симеиз, Украина), РТ-25 (Урумчи, Китай) и др.

Эксперименты по РСДБ-локации КМ являются исключительно сложными даже по сравнению с обычными астрономическими РСДБ-наблюдениями. Во-первых, необходимо организовать радиоподсветку объектов, а во-вторых, использовать более сложную систему обработки сигналов, учитывающую траектории объектов, координаты приемных антенн, эффект ближней зоны, движение объектов относительно геоцентра и их собственное вращение, вращение Земли и т. д. Обработка выполняется в несколько этапов. На первом этапе обработки записанных сигналов рассчитывается их автокорреляция в месте предполагаемой записи отраженных сигналов, чтобы детектировать наличие радиолокационного эха и его продолжительность по времени.

После обнаружения эхо-сигнала на втором этапе обработки путем расчетов взаимной корреляции записей излученного зондирующего радиосигнала, сделанных в Евпатории, и принятых отраженных радиосигналов получают измерения доплеровского сдвига частоты с точностью до 0.003 Гц для каждой базовой линии передающая–приемная антенны отдельно. Период вращения объектов определяется на основе анализа уровня мощности принимаемых эхо-сигналов с высоким временным разрешением.

На следующем этапе обработки получают кросскорреляционные спектры для спутниковых эхо-сигналов на приемных РСДБ-базах. Кросскорреляция между принятыми эхо-сигналами для каждой базовой линии приемных антенн вычисляется на моменты совпадения максимумов спектров корреляционных сигналов на базах передающая–приемная антенны. Расчет кросскорреляции между принятыми эхо-сигналами – это первый шаг на пути реализации прецизионных угломерных измерений и построения радиоизображений спутника (или объектов КМ).

На последнем этапе обработки осуществляется привязка положения космического объекта к положению опорных квазаров, закрепляющих радиосистему координат. Для этого во время наблюдения специально подбираются квазары, находящиеся на расстоянии порядка 5° от исследуемого объекта, и РСДБ-сеть приемных антенн последовательно наблюдает эхо-сигнал от объекта и опорный квазар. Во время обработки экспериментов получают так называемые 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 тысячных долей угловой секунды.

Но и метод РСДБ-локации неэффективен при исследовании малых частиц. Основным источником статистических данных о малоразмерной фракции КМ являются так называемые «бим-парк» эксперименты, когда передающая и приемная антенны смотрят в одну фиксированную область пространства в течение длительного периода. В «бим-парк» эксперименте обычно считается число частиц, про-

летевших через исследуемый объем в единицу времени, делается грубая оценка их размеров и траекторий движений.

Для мелких фрагментов на высоких орбитах такой подход оказался малоэффективным, и был предложен метод «бим-трек», когда диаграммы направленности передающей и приемных антенн синхронно ведутся вдоль изучаемой орбиты и исследуются все попадающие в выделенный объем пространства объекты. Исследования мелкоразмерной

фракции важны как с научной, так и с политической точек зрения, поскольку позволяют строить модели распределения популяции КМ в целом, приблизиться к пониманию причин взрывов космических кораблей и ступеней, проводить коррекцию стандартов по производству космической техники, а также определять виновников наибольшего замусоривания околоземного космического пространства.

Радиоастрономический институт НАН Украины