

Построение радиоизображения астероида Голевка по данным радиолокации

Ю.А. Гаврик, А.Л. Гаврик, Е.А. Кулешов, А.А. Смыслов

Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук, 141190, г. Фрязино, Московская обл., пл. Б.А. Введенского, д.1, e-mail: alg248@ire216.msk.su

Апробирована методика построения двумерного радиоизображения астероида по данным радиолокации монохроматическим сигналом. Представлены результаты анализа эхо-сигналов, зарегистрированных при радиолокации астероида Голевка.

A method of obtaining two-dimensional image of asteroid from radar with the monochromatic signal is tested. The results of analysis of the echo signals detected during radar sounding of asteroid Golevka are presented.

Первая радиолокация астероидов сближающихся с Землей (АСЗ) с участием российских ученых была выполнена в 1992 году с помощью бистатической системы Евпатория (Украина) → Эффельсберг (Германия), излучавшей непрерывную монохроматическую радиоволну диапазона 6 см к астероиду 4179 Таутатис [1]. Радиолокация следующего АСЗ – астероида 6489 Голевка (1991 JX) состоялась в 1995 году с использованием бистатической системы Голдстоун (США) → Евпатория (Украина) [2,3]. В первой межконтинентальной радиолокации небесного тела излучали радиоволну постоянной частоты 8510 МГц (длина волны 3.5 см) антенной Голдстоуна (диаметр 70 м), приём эхо-сигналов планировали в Евпатории и в Голдстоуне второй антенной (диаметр 34-м) для контроля и последующего сопоставления результатов. В радиолокационных сеансах 13, 14 и 15 июня 1995 года эхо-сигналы устойчиво принимали в Евпатории и Голдстоуне, а 15 июня – в Кашиме (Япония). В честь трёх радиолокационных станций в Голдстоуне, Евпатории и Кашиме, где были обнаружены эхо-сигналы, Международный астрономический союз в 1996 году утвердил имя "Голевка" для астероида 1991 JX.

Зарегистрированные в Евпатории эхо-сигналы содержат сведения о размерах, вращении, строении, а также плотности, диэлектрической проницаемости и других параметрах поверхностного слоя астероида Голевка [2,3]. Современные технологии анализа эхо-сигналов позволяют извлекать из радиолокационных данных более точную информацию об исследуемых объектах. В частности, специальный анализ эхо-сигналов, использующий метод обращенного синтезирования апертуры, позволяет формировать двумерное радиоизображение АСЗ [4,5], что увеличивает информативность узкополосных радиолокационных средств, облучающих космический объект непрерывной монохроматической радиоволной.

В данной работе апробирована методика получения двумерного радиоизображения астероида по данным радиолокации непрерывным монохроматическим сигналом. На примере анализа эхо-сигналов от астероида Голевка рассмотрена возможность определения параметров его поверхности.

Характеристики эхо-сигналов от астероида Голевка

В работе представлены результаты радиолокации, полученные из эхо-сигналов, зарегистрированных в Евпатории (Украина), при облучении астероида Голевка из Голдстоуна (США) монохроматической радиоволной диапазона 3.5 см. Описание этого эксперимента, полученные результаты и физические характеристики астероида Голевка представлены в работах [2,3].

В эксперименте радиолокации прямое восхождение астероида Голевка составляло 21.3 час, склонение $+39^\circ$, дальность ~ 6.0 млн. км, фазовый интервал движения подлокаторной точки 322-153°, угол между лучом астероид-локатор и осью вращения астероида 31° , запаздывание сигнала 40 секунд и доплеровский сдвиг 270 кГц [9,10]. Фазовый интервал и угол зрения вычисляли по известным элементам вектора сидерического вращения: период 6.0289 часов, эклиптические долгота и широта - 340° и 20° , соответственно [6]. Нулевой меридиан Голевки был определён как лежащий в плоскости, содержащей ось вращения и луч из центра астероида в точку весеннего равноденствия на эпоху J2000.0 (JD2451545.0). Отсчёт фазы вращения проводился от момента пересечения этой плоскости с центром Земли.

Для получения статистически усредненных оценок распределения энергии отраженного сигнала спектры мощности вычисляли с помощью преобразования Фурье и суммировали на временном интервале 1 мин, полученные спектры мощности для левой круговой поляризации представлены на рис. 1 в виде радоновского образа [7]. При таком представлении горизонтальная ось времени соответствует изменению ракурса астероида вследствие его вращения, вертикальная ось показывает изменение частоты эхо-сигнала: 0 – соответствует отражению от центра масс, уширение спектра монохроматического сигнала обусловлено разной скоростью движения областей поверхности астероида относительно оси вращения. Мощность эхо-сигнала показана градацией цвета от белого (минимум) до черного (максимум). Значение среднего уровня шума устранено из спектров мощности, поэтому отсутствию эхо-сигнала соответствует значение 0 спектра мощности, а флуктуации относительно этого уровня характеризуют шум.

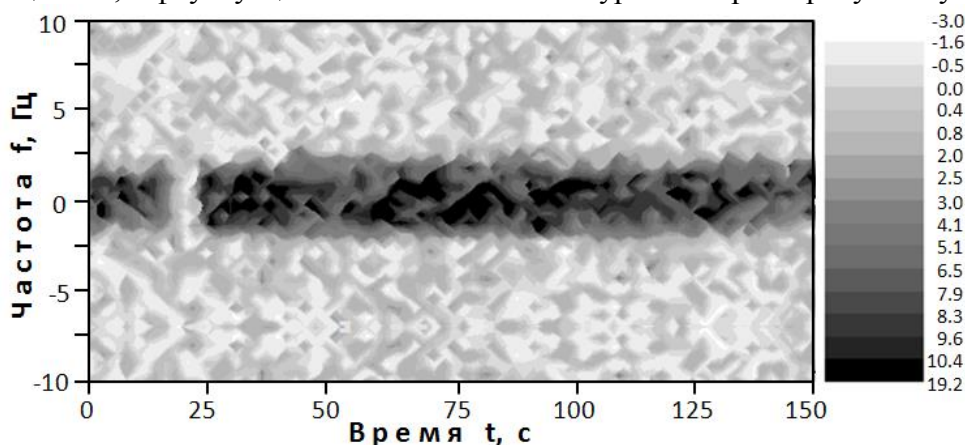


Рис. 1. Сигнатура зеркальной компоненты эхо-сигналов. Белый цвет соответствует минимальной, черный цвет – максимальной спектральной мощности эхо-сигнала. По оси абсцисс – время от начала сеанса радиолокации.

Сигнатура эхо-сигналов на рис. 1 свидетельствует о том, что отраженный астероидом сигнал надежно обнаружен и уширение спектра мощности не превышает ~ 6 Гц. На рис. 1 видно, что при изменении ракурса астероида происходит перераспределение энергии эхо-сигнала и даже заметен участок пропадания эхо-сигнала на 20-ой минуте сеанса из-за неточного наведения антенны в Евпатории. На правой круговой поляризации мощность сигнала была в 5 раз ниже, чем на левой, поэтому эхо-сигналы с правой круговой поляризацией (сигнал/шум < 4) не представлены в данной работе.

Радиоизображение астероида Голевка

Методика получения силуэта астероида из ряда одномерных доплеровских спектров мощности, соответствующих разным ракурсам на интервале, превышающем половину оборота астероида вокруг собственной оси, был развит в работе [8] и впервые применен для астероида 433 Эрос [9]. Поскольку эта методика не учитывает индивидуальные особенности и форму каждого спектра, а использует лишь информацию о ширине спектра, был разработан и апробирован метод построения двумерного радиоизображения, использующий спектры эхо-сигналов с учетом их ракурса [4,5].

В радиолокационном эксперименте спектры мощности эхо-сигналов получены преобразованием Фурье радиоголограммы, которая создана умножением опорного и отраженного от объекта сигналов [4,5]. Частоты таких Фурье-спектров прямо пропорциональны длине проекции радиус-вектора соответствующей области рассеяния на перпендикуляр к линии визирования, а значения Фурье-спектров соответствуют радиояркости отражающей области, т.е. спектры мощности являются по сути одномерным парциальным радиоизображением исследуемого объекта. Сумма парциальных радиоизображений с учетом их ракурса определяет искомое двумерное радиоизображение [10], которое может иметь максимум интенсивности в отдельной точке, расположенной на пересечении лучей, соответствующих различным ракурсам области с высоким коэффициентом отражения. На границе объекта яркость минимальная, а вариации яркости на изображении характеризуют отражательные свойства поверхности астероида.

Для построения радиоизображения астероида Голевка мы использовали 154 спектра с частотным разрешением $\sim 0,244$ Гц и временем накопления 60 с. За 1 минуту астероид, имеющий период вращения чуть больше 6 часов, поворачивается на 1 градус. Доплеровский сдвиг из-за движения центра масс астероида полностью устранён, поэтому вариации левой и правой границ спектров относительно центральной частоты обусловлены асимметрией формы астероида. Результат реконструкции радиоизображения астероида 6489 Голевка представлен на рис. 2.

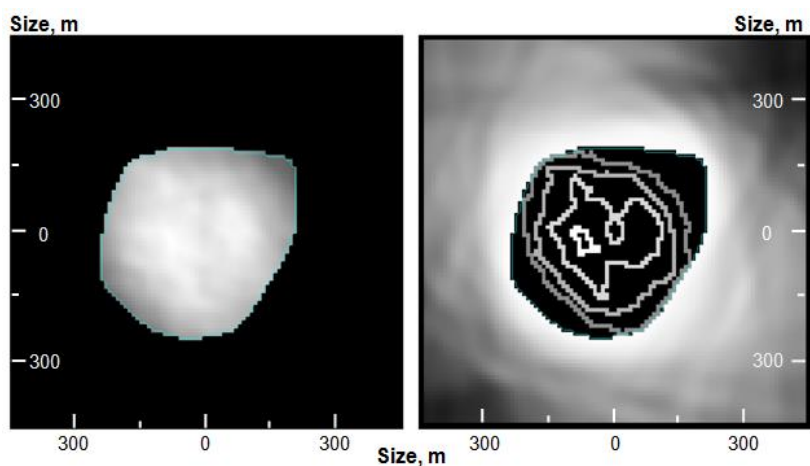


Рис. 2. Радиоизображение астероида Голевка по данным зеркальной компоненты эхо-сигнала. Градации серого цвета соответствуют распределению яркости изображения, фоновый шум устранен (левая панель). На правой панели вместо распределения яркости нарисованы контурные линии, соответствующие одинаковой яркости, а градации серого за пределами радиоизображения демонстрируют нормированное значение шума, величина которого тем больше, чем темнее область.

Двумерное радиоизображение на рис. 2. позволяет определить выпуклый экваториальный силуэт исследуемого объекта и измерить размеры объекта, а также предоставляет дополнительную возможность анализировать сведения о характеристиках рассея-

ния его поверхности. Наличие на шероховатой поверхности астероида областей с повышенной или пониженной отражательной способностью приводит к тому, что на радиоизображении появляются области с высокой или низкой яркостью соответственно. Контурные линии на рис. 2 (правая панель), соответствующие четырем значениям яркости 0.97, 0.9, 0.8, 0.6 от максимального значения, имеют неправильную форму, что может быть следствием влияния крупномасштабного рельефа поверхности астероида, обнаруженного американскими исследователями по трехмерному изображению.

На основе анализа радиоизображений рис. 2. можно сделать следующие выводы. Во-первых, по радиоизображениям определяется экваториальный силуэт астероида. Во-вторых, минимальный (430 м) и максимальный (580 м) размеры астероида по радиоизображениям определяются более точно, чем по спектрам мощности эхо-сигналов. В-третьих, распределения радиояркости являются дополнительными сведениями о характеристиках рассеяния поверхности, но для анализа необходимо выполнить сравнение радиоизображений с результатами моделирования шероховатого эллипсоида. Полученные нами характеристики астероида согласуются с данными широкополосной радиолокации, по результатам которой создана трехмерная модель астероида Голевка с разрешением 30 м, представленная в работе [3]. Наш интерес к разработке предложенного метода обработки эхо-сигналов обусловлен тем, что без существенной модернизации многие действующие в России радиолокационные станции могли бы получить новое качество: способность формирования двумерных радиоизображений искусственных спутников Земли и сближающихся с Землей астероидов при радиолокации узкополосными радиосигналами.

Работа выполнена при частичной поддержке программы ПРАН № 22 "Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы".

Литература

1. Зайцев А. Л. и др. Радиолокационные исследования астероида 4179 Таутатис на волне 6 см // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38. № 10. С. 1842-1850.
2. A.L. Zaitsev et al. Intercontinental bistatic radar observations of 6489 Golevka (1991 JX) // Planetary and Space Science. 1997. V. 45. № 7. P. 771-778.
3. R.S. Hudson et al. Radar observations and physical model of asteroid 6489 Golevka // Icarus. 2000. V. 148. P. 37-51.
4. В.Н. Секистов и др. Построение радиоизображений низкоорбитальных спутников по данным радиолокации узкополосным сигналом // Радиотехника и электроника. 2000. Т. 45. № 7. С. 830-836.
5. Гаврик А.Л. и др. Использование радиоизображений для анализа результатов узкополосной радиолокации астероидов // Космические исследования. 2009. Т. 43. № 3. С. 229-237.
6. Hudson, S. R. and S. J. Ostro. Radar-based physical models of Earth-crossing asteroids // Bull. Am. Astron. Soc. 1995. V. 27. P. 1062-1063.
7. Гаврик Ю.А., Гаврик А.Л. Радиолокационные характеристики астероида 33342 (1998 WT24) // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 10. С. 1247-1256.
8. S. J. Ostro, R. Connelly and L. Belkora. Asteroid shapes from radar echo spectra: A new theoretical approach // Icarus. 1988. V. 73. P. 15-24.
9. S. J. Ostro, K. D. Rosema and R. F. Jurgens. The shape of Eros // Icarus. 1990. V. 84. P. 334-351.
10. Гаврик Ю.А., Гаврик А.Л. Радиолокационные характеристики астероида 33342 (1998 WT24) // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 10. С. 1247-1256.