О ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ МАЛЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ ПРИ ИХ РАДИОЛОКАЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ШИРОКОПОЛОСНЫМИ СИГНАЛАМИ: ТРЕХМЕРНАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ АСТЕРОИДА

З. А. Денисов
Волгоградский государственный университет

В докладе приводятся результаты численного моделирования отражения радиолокационного сигнала от поверхности свободно вращающегося малого небесного тела. Учитывается возможность сложного вращения (кувыркание). Рассматриваются оцифрованные модели поверхности с разным пространственным разрешением (от 1 400 до 10^5 точек на всю поверхность). Показано, что вариации ширины доплеровских спектров могут объясняться изменением ориентации мгновенной оси вращения тела. Утверждается, что можно повысить разрешение трехмерного изображения в направлении вдоль луча зрения при использовании широкополосных сигналов. Показана принципиальная возможность повышения разрешения в картинной плоскости за счет построения фазовых изображений с применением технологий зондирования средствами сингулярной оптики (геликоидальные волны).

ON THE POSSIBILITY OF INCREASING THE RESOLUTION OF IMAGES OF SMALL CELESTIAL BODIES IN THE PROCESS OF THEIR RADAR SOUNDING WITH BROADBAND SIGNALS: A THREE-DIMENSIONAL COMPUTER MODEL OF THE ASTEROID

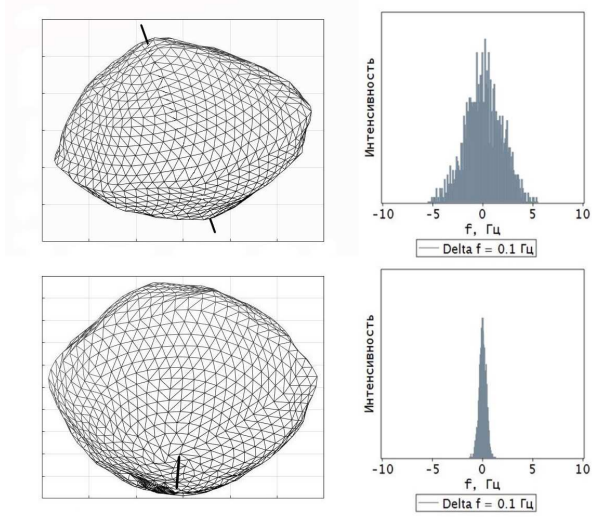
Z. A. Denisov
Volgograd State University

The report presents the results of numerical simulation of the reflection of a radar signal from the surface of a freely rotating small celestial body. The possibility of complex rotation (tumbling) is taken into account. Digitized surface models with different spatial resolutions (from 1 400 to 10^5 points for the entire surface) are considered. It is shown that variations in the width of the Doppler spectra can be explained by a change in the orientation of the instantaneous axis of rotation of the body. It is claimed that it is possible to increase the resolution of a 3D image in the direction along the line of sight by using broadband signals. The fundamental possibility of increasing the resolution in the plane of the sky by constructing phase images using sounding technologies using singular optics (helicoidal waves) is shown.

Введение

Одна из важнейших задач, стоящих перед радиолокационной астрономией, — повышение пространственного разрешения изображений удаленных космических объектов при их радиолокационном зондировании с Земли [1]. В настоящее время при зондировании околоземных астероидов достигнуто разрешение в 7.5 м на дальности $\sim$ 7 млн км [2, 3] и 3.75 м на дальности $\lesssim$ 4 млн км [4]. Оценки показывают, что при использовании сверхразрешающих сигналов дальность при указанном разрешении может быть увеличена до $\sim$ 200 млн км [5] либо можно потенциально повысить пространственное разрешение на более коротких дистанциях почти на порядок.

© Денисов З. А., 2023



Результаты компьютерного моделирования сложно вращающегося астероида с поворачивающейся мгновенной осью вращения. В качестве примера астероида выпуклой формы использована геометрическая модель поверхности астероида Бенну. Различным ракурсам соответствуют различные по ширине доплеровские спектры

Прямая задача радиолокационного зондирования астероида. Компьютерная модель

Для подтверждения возможностей достижения указанного сверхвысокого разрешения требуется выполнение расчетов отражения зондирующего сигнала от поверхности астероида (решение прямой задачи зондирования) и отладка алгоритмов восстановления рельефа поверхности астероида по его радиолокационному портрету (решение обратной задачи зондирования). В настоящей работе выполнено построение доплеровских спектров и радиолокационных портретов вращающегося астероида в трехмерной компьютерной модели астероида в рамках решения прямой задачи зондирования. Использовались модели малых небесных тел принципиально разной геометрии: объект выпуклой формы — на примере цифровой модели астероида Бенну и объект невыпуклой формы — на примере цифровой модели ядра кометы Чурюмова — Герасименко. Тестировались модели с различным пространственным разрешением (1 400, 25 000 и 100 000 вершин в цифровой модели поверхности). Сами модели построены на основе детального картографирования поверхностей данных небесных тел аппаратами OSIRIS-REx и Rosetta и выставлены на сайты лиц, аффилированных с NASA и JPL. Положение тела в пространстве, величина мгновенной угловой скорости и мгновенная ориентация оси вращения рассчитывались путем решения системы уравнений свободно вращающегося асимметричного волчка с трехосным эллипсоидом инерции. В ходе моделирования продемонстрировано периодическое изменение ширины доплеровского спектра астероида вследствие изменения ориентации его мгновенной оси вращения при сложном вращении (см. рисунок).

Моделирование обратного рассеяния при зондировании астероида геликоидальными волнами

Кроме того, большой интерес у специалистов вызывают возможности повышения разрешения при построении фазовых изображений. Согласно [6] критерий разрешения по Рэлею основан на распределении интенсивности в изображении точечного источника и не может быть буквально распространен на фазовые изображения. Как показано в [6], когерентная фазовая микроскопия позволяет повысить разрешение до 5 раз. Чтобы получить такой эффект в радиолокации, необходимо обеспечить высокую степень когерентности сигнала на больших расстояниях, что технически проблематично на данном уровне развития технологий. В настоящей работе выполнена проверка этого эффекта методом численного моделирования. В качестве зондирующего сигнала использовался вихревой пучок (геликоидальная волна), обладающий орбитальным угловым моментом. Расчет отражения вихревого пучка от поверхности астероида производился для чистого оптического вихря — пучка, радиальное распределение поля в котором задается гипергеометрической функцией. Чистый вихрь имеет более предпочтительные свойства для применения в радиолокации по сравнению с другими типами пучков (бесселевы, гауссовы и тому подобное) — его пятно убывает с расстоянием z от источника поля как $\sqrt{z}$ [7], что гораздо медленнее, чем расширение пучка в оптике ($\sim z$) или такое же растяжение ($\sim z$) импульса за счет дисперсии среды в радиолокации.

В радиодиапазоне использование вихревых пучков может дать эффект при зондировании целей сложной формы. В перспективе следует ожидать повышения разрешения в плоскости, перпендикулярной направлению излучения, а также повышения отношения сигнал-шум при измерении параметров отраженного сигнала. Автору неизвестно, используется ли в настоящее время в радиолокационной астрономии зондирование геликоидальными сигналами. Из-за гораздо большей длины волны в радиодиапазоне создание пространственных модуляторов электромагнитного излучения (вихревых масок или транспарантов) для генерации многомодовых вихревых пучков затруднительно по сравнению с оптическим диапазоном, однако есть сообщения о создании прототипов таких радиоантенн [8].

Аппроксимационные функции обратного рассеяния для астероидов

Проведен анализ соответствия наблюдательных данных для реальных альбедо малых небесных тел альбедо, рассчитываемому по различным теоретическим моделям функции обратного рассеяния [9]. В [9] приведены наблюдательные данные зависимости альбедо астероида 1998 CS_1 от угла рассеяния и их аппроксимация пятью различными аппроксимирующими функциями. Утверждается, что наилучшей по методу наименьших квадратов является аппроксимация распределением Хэгфорса, однако степень точности аппроксимации в числовой мере не указана. По массиву наблюдательных данных [9] нами проведена оценка величины относительной невязки для всех пяти аппроксимаций. Результаты приведены в таблице. Действительно, распределение Хэгфорса демонстрирует наименьшую невязку, при этом показано, что одна из самых простых и часто используемых в моделировании функций обратного рассеяния — степенная зависимость от косинуса угла рассеяния [10], демонстрирует высокую точность аппроксимации наблюдательных данных и может применяться в компьютерном моделировании.

Название функции	Значение невязки
Косинус в степени n, $1 \leq n \leq 2$	0.0342
Экспоненциальная функция	0.0963
Распределение Гаусса	0.0642
Распределение Хэгфорса	0.0273
Распределение Брэгга	0.0665

Библиографические ссылки

[1] *Ostro S. J., Hudson R. S., Benner L. A. M. et al.* Asteroid Radar Astronomy // Asteroids III. — 2002. — P. 151—168.

[2] *Marshall Sean E., Howell Ellen S., Brozović Marina et al.* Potentially Hazardous Asteroid (85989) 1999 JD6: Radar, Infrared, and Lightcurve Observations and a Preliminary Shape Model // AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #47 : AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts. — 2015. — Vol. 47. — P. 204.09.

[3] *Taylor P. A., Richardson J. E., Rivera-Valentin E. G. et al.* Radar Observations of Near-Earth Asteroids from Arecibo and Goldstone // 47th Annual Lunar and Planetary Science Conference : Lunar and Planetary Science Conference. — 2016. — P. 2772.

[4] *Brozović Marina, Benner Lance A. M., Busch Michael W. et al.* Recent Goldstone radar observations of selected near-Earth asteroids less than 140 m in diameter // Asteroids: New Observations, New Models / ed. by S. R. Chesley, A. Morbidelli, R. Jedicke, D. Farnocchia. — 2016. — Vol. 318. — P. 160—169.

[5] *Захарченко В. Д., Коваленко И. Г., Пак О .В., Рыжков В. Ю.* Фундаментальные ограничения по когерентности зондирующих сигналов в задаче достижения максимальных разрешения и дальности при стробоскопической локации астероидов // Космич. исслед. — 2018. — Т. 56, № 3. — С. 209—217.

[6] *Тычинский В. П.* Сверхразрешение и сингулярности в фазовых изображениях // УФН. — 2008. — Т. 178, № 11. — С. 1205—1214.

[7] *Котляр А. В., Ковалев А. А., Хонина С. Н.* Вращающиеся вихревые лазерные пучки. — М. : Физматлит, 2021. — 240 с.

[8] *Yu, S., Li, L., Shi, G. et al.* Generating multiple orbital angular momentum vortex beams using a metasurface in radio frequency domain // Appl. Phys. Lett. — 2016. — Vol. 108, id 241901.

[9] *Zambrano-Marin Luisa F., Virkki Anne K., Marshall Sean E., Rivera-Valentin Edgard G.* Scattering functions fits for Arecibo Observatory Planetary Radar data // EPSC-DPS Joint Meeting 2019. — 2019. — Vol. 2019. — P. EPSC–DPS2019–1077.

[10] *Зайцев А. Л.* Радиолокационные исследования астероидов, сближающихся с Землей : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Фрязино, 1997. — 70 с.