

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ АНАЛИЗЕ РЕЗУЛЬТАТОВ УЗКОПОЛОСНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ АСТЕРОИДОВ

А.Л. Гаврик, Ю.А. Гаврик
ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН, alg248@ire216.msk.su

Исследуется методика получения радиоизображений астероидов однопозиционным радиолокатором с узкополосным зондирующим сигналом. Выполнены расчеты спектров мощности эхо-сигналов от вращающегося шероховатого эллипсоида. Получены оценки точности определения формы астероида и степени шероховатости его поверхности по результатам анализа двумерных радиоизображений.

При облучении космического объекта радиоволнами часть энергии рассеивается, а рассеянное в обратном направлении поле является предметом радиолокационных исследований, поскольку характеристики рассеянного поля зависят как от свойств объекта, так и от вида зондирующего сигнала. В данной работе исследуется методика получения двумерных радиоизображений астероидов однопозиционным радиолокатором с узкополосным зондирующим сигналом. На примере анализа эхо-сигналов от вращающегося шероховатого эллипсоида анализируется возможность определения параметров поверхности астероида. Такая возможность основана на использовании принципа обращенного сфокусированного синтеза апертуры, в котором изменение ракурса объекта позволяет формировать его двумерное радиоизображение. Используемая модель расчетов спектров мощности эхо-сигналов позволяет исследовать связь характеристик радиоэха с параметрами поверхности объекта при интерпретации результатов радиолокации астероидов.

Рассмотрим эксперимент, в котором передающее устройство радиолокационной станции (РЛС) излучает в направлении астероида монохроматический непрерывный радиосигнал сантиметрового диапазона длин волн, а приемная антенна осуществляет непрерывный прием отраженного радиосигнала. Будем считать, что расстояние от РЛС до астероида много больше его размеров и падающее поле является плоской волной, длина волны мала по сравнению с радиусом кривизны неровностей облучаемой поверхности. Расстоянием между передающей и приемной антеннами можно пренебречь, а также можно полагать, что ось вращения астероида неподвижна относительно РЛС. Собственное вращение исследуемого астероида приводит вследствие эффекта Доплера к расширению спектральной линии эхо-сигнала. В радиолокационных экспериментах по спектрам мощности эхо-сигналов определяются некоторые характеристики рассеивающей поверхности, но существует возможность более точного исследования рассеивающих свойств поверхности с использованием методики построения двумерного радиоизображения объекта. Чтобы выяснить достоинства и ограничения такой методики воспользуемся результатами численного моделирования, а астероид заменим тестовым объектом – шероховатым эллипсоидом, т.к. для него можно получить аналитические выражения.

Соотношение для определения эффективной площади $\sigma(f)$ обратного рассеяния (ЭПР) части поверхности тела, отражающей радиоволны с частотой f , можно записать в аналитической удобной для расчетов форме:

$$\sigma(f) = ab \int_{\ell_1}^{\ell_{\max}} \frac{M(\ell, f)}{N(\ell, f)} \beta(\theta) d\ell + ab \int_{\ell_2}^{\ell_{\max}} \frac{M(\ell, f)}{N(\ell, f)} \beta(\theta) d\ell$$

Здесь a , b , c – соответствующие главные полуоси эллипсоида, $\beta(\theta)$ функция обратного рассеяния малых площадок, зависящая только от угла θ падения радиоволн. Выражения для функций $M(\ell, f)$ и $N(\ell, f)$, а также для пределов интегрирования ℓ_1 , ℓ_2 , ℓ_{\max} можно найти в публикациях [1,2].

Представленное соотношение позволяет рассчитать сглаженные оценки распределения энергии отраженного сигнала при радиолокации вращающегося шероховатого эллипсоида с произвольной ориентацией оси вращения, если задана функция рассеяния его поверхности $\beta(\theta)$. Мы рассматриваем только сильно шероховатую поверхность с большим количеством участков локального рассеяния (на каждом участке много "блестящих точек"). Для такого объекта интерференционная картина от "блестящих точек" сглаживается и, кроме того, рассматривается усредненная картина (по ансамблю). Это частный случай, в котором средняя ЭПР может быть найдена путем суммирования средних ЭПР отдельных частей поверхности, а функция обратного рассеяния малых площадок будет зависеть только от угла падения радиоволн на площадку. Именно такой случай обычно рассматривается в экспериментах радиолокации астероидов, т.к. данные анализируются на интервалах времени >1 мин. и из-за вращения астероида нерегулярная многолепестковая структура рассеянного поля сглаживается, а последующее накопление спектров мощности приводит к получению статистически усредненных оценок распределения энергии отраженного сигнала [3,4].

Представленная методика дает возможность численно определить статистически усредненные спектры мощности эхо-сигналов, поэтому данная модель является очень удобным инструментом при анализе результатов радиолокационных экспериментов. В большинстве случаев результаты радиолокации согласуются с обобщением этой модели. Если расстояния между участками локального рассеяния малы, как в рассматриваемом случае шероховатого эллипсоида, то распределение яркости радиоизображения будет определяться законом рассеяния его поверхности. Наличие на шероховатой поверхности астероида областей локального рассеяния с повышенной или пониженной отражательной способностью приведет к тому, что на радиоизображении проявятся области с высокой или низкой яркостью соответственно, но этот случай требует отдельного анализа.

В радиолокационных экспериментах по исследованию околоземных космических объектов спектры мощности эхо-сигналов определяются преобразованием Фурье радиоголограммы, которая формируется умножением опорного и отраженного от объекта радиосигналов [3-6]. При таком анализе частоты полученных Фурье-спектров прямо пропорциональны длине проекции радиуса-вектора соответствующей области рассеяния на перпендикуляр к линии визирования, а значения Фурье-спектров соответствуют радиояркости отражающей области, т.е. спектры мощности эхо-сигналов являются по сути одномерным радиоизображением исследуемого объекта. Для синтеза двумерного радиоизображения будем использовать серию последовательных спектров мощности эхо-сигналов при разных ракурсах эллипсоида [7,8]. Сумма парциальных радиоизображений является искомым двумерным радиоизображением, которое будет иметь максимумы интенсивности в отдельных точках с координатами, расположенных на пересечении лучей, соответствующих различным ракурсам наиболее ярких областей локального рассеяния объекта. Минимальная яркость будет наблюдаться на границе объекта, а вариации яркости объекта будут определяться характеристиками рассеяния его поверхности. Но большая часть изображения будет заполнена фоном с переменной интенсивностью, являющимся шумовой компонентой радиоизображения, этот фон можно устранить или уменьшить, применяя методы цифровой фильтрации изображений.

Для оценки возможностей рассматриваемой методики построения радиоизображений рассмотрим результаты численного моделирования. Будем считать, что с наземного пункта непрерывно излучается в сторону объекта монохроматический сигнал с длиной волны $\lambda \approx 4$ см, прием отраженных сигналов осуществляется непрерывно в том же самом пункте. Ось вращения небесного тела эллипсоидальной формы и его центр масс неподвижны относительно РЛС, ось вращения наклонена на 45° к направлению на РЛС, период вращения – 3 часа, главные оси равны $a=300$ м, $b=150$ м, $c=200$ м. Функции рассеяния поверхности эллипсоида различаются: в одном случае закон рассеяния равномерный $\beta(\theta) \sim \cos \theta$, в другом – закон рассеяния Ламберта $\beta(\theta) \sim \cos^2 \theta$. Сформируем спектры мощности отраженных от шероховатого эллипсоида сигналов при разных ракурсах объекта от 0 до π и построим его двумерное радиоизображение. Распределение радиояркости будем представлять в виде контурных линий, соответствующих одинаковой яркости радиоизображения, т.к. такое представление данных более наглядно и

удобно для анализа (контурные линии будут соответствовать четырем значениям яркости: 0.97, 0.9, 0.8, 0.6 от значения максимальной яркости). Информативность радиолокационных исследований существенно зависит от отношения сигнал/шум, поэтому рассмотрим влияние шума на погрешности построения радиоизображений. С этой целью к рассчитанным спектрам эхо-сигналов будем добавлять гауссовский шум, величину дисперсии которого будем варьировать. Значение среднего уровня шума вычтем из полученных спектров мощности, тогда отсутствию эхо-сигнала будет соответствовать значение 0 спектра мощности, а флуктуации шума будут наблюдаться относительно среднего уровня 0.

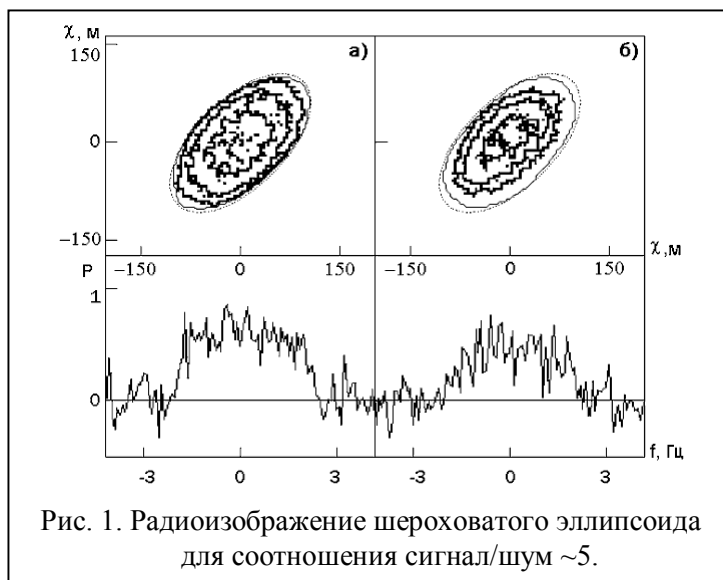


Рис. 1. Радиоизображение шероховатого эллипсоида для соотношения сигнал/шум ~ 5 .

На рис. 1 показаны два радиоизображения, представленные контурными линиями при наличии в данных гауссовского шума, величина которого характеризуется отношением сигнал/шум ≈ 5 . Рассчитанной границе радиоизображения соответствует тонкая сплошная кривая, а видимая для ракурса 45° граница заданного эллипсоида представлена пунктирной кривой. Шум за пределами радиоизображений устранен цифровой фильтрацией. В нижней части рис. 1 – результаты расчетов спектров мощности эхо-сигналов для заданного ракурса. По оси ординат отложена мощность спектральной составляющей эхо-сигнала P/P_0 , нормированная на заданную величину мощности P_0 , по оси абсцисс – доплеровское смещение частоты эхо-сигнала f , обусловленное вращением объекта.

Для равномерного закона рассеяния (рис. 1а) спектры мощности $P(f)$ должны быть симметричны относительно спектральной составляющей с максимальной интенсивностью, но максимумы спектров различаются: максимальное значение наблюдается, когда наибольшая ось эллипсоида направлена вдоль линии визирования, а минимальное значение – когда наибольшая ось перпендикулярна линии визирования. Закономерно меняются и границы спектров $P(f)$ с изменением ракурса эллипсоида. При значительных неровностях поверхности, например когда справедлив эмпирический закон рассеяния Ламберта, интегральная мощность эхо-сигналов снижается (рис. 1б), спектры мощности сигналов $P(f)$ становятся несимметричными относительно спектральной составляющей с максимальной интенсивностью. Максимальное значение спектра мощности зависит от ракурса объекта (как и в случае равномерного закона рассеяния), границы спектров также закономерно меняются. Следует отметить, что асимметрия спектров мощности, искаженная влиянием шума, может существенно испортить результаты доплеровской астрометрии в радиолокационных экспериментах, но использование предлагаемых методик моделирования при интерпретации данных радиолокации позволит корректировать результаты определения центра спектра мощности.

Закономерности изменения спектров при изменении ракурса определяют характерные черты радиоизображений, представленных на рис. 1. Для эллипсоида с равномерной функцией рассеяния (рис. 1а) эллиптичность контурных линий заметна, но форма контурных линий

сильно изрезана из-за влияния шума. Проявляются характерные черты структуры радиоизображения: положение самой яркой области размыто, но близко к центру, наблюдается определенная симметрия контурных линий, достаточно точно определяется граница радиоизображения (погрешность $\sim 5\%$) и ее близость к эллипсоидальной форме. Характерные черты радиоизображения для эллипсоида с Ламбертовской функцией рассеяния (рис. 1б) искажаются сильнее из-за влияния шума. Положение самой яркой области определяется неоднозначно, асимметрия контурных линий выражена слабо, погрешности определения степени шероховатости поверхности при интерпретации данных могут оказаться больше 20%. Тем не менее, форма границы близка к истинной эллипсоидальной и точность определения границы радиоизображения составляет $\sim 8\%$. Малая погрешность определения границы обусловлена тем обстоятельством, что при построении радиоизображений спектры суммируются с учетом изменения ракурса объекта, что обеспечивает увеличение отношения сигнал/шум почти в 2 раза вблизи границы поверхности.

Результаты расчетов позволяют сделать вывод о том, что распределение радиояркости двумерного радиоизображения зависит от свойств рассеивающей поверхности. Граница объекта определяется по радиоизображению с высокой точностью, не зависящей ни от закона рассеяния поверхности, ни от направления оси вращения, ни от скорости вращения. Построение достоверного радиоизображения шероховатого эллипсоида возможно при отношениях сигнал/шум ≥ 5 , причем погрешность такого построения не превышает 8%. Величина отношения сигнал/шум > 5 характерна для многих экспериментов радиолокации сближающихся с Землей астероидов [3-6], следовательно анализ распределений яркости радиоизображений астероидов может обеспечить надежное определение свойств рассеивающей поверхности, формы и размеров астероида. Очевидно, что с увеличением уровня шумов будет наблюдаться увеличение искажений радиоизображения.

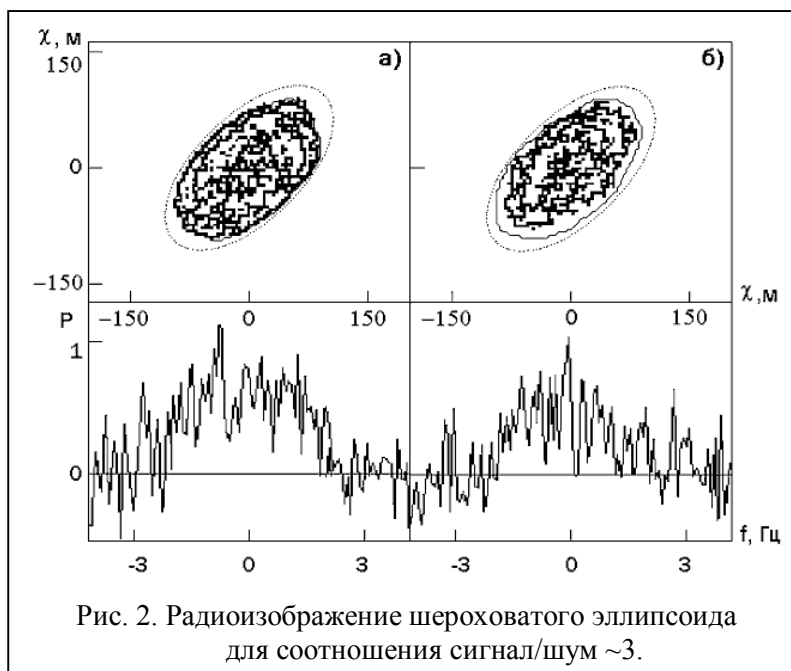


Рис. 2. Радиоизображение шероховатого эллипсоида для соотношения сигнал/шум ~ 3 .

На рис. 2а,б представлены результаты расчетов для отношения сигнал/шум ~ 3 . Контурные линии радиоизображений сильно искажены, выявить их близость к эллипсоидальной форме, симметрию или асимметрию почти невозможно, самая яркая область размыта и не имеет четких очертаний, ее положение определяется флуктуациями шума, а не степенью шероховатости поверхности. Форма границы радиоизображения близка к эллиптической (тонкая кривая), но очень сильно отличается от границы заданного эллипсоида (пунктирная кривая) – различие превышает 20%. Поэтому при анализе реальных экспериментальных данных необходимо учитывать такое уменьшение размеров, обусловленное влиянием шума и методикой

построения. Оценку корректирующих факторов можно получить с помощью рассмотренной методики моделирования. С этой целью для условий конкретного эксперимента необходимо подобрать размеры эллипсоида так, чтобы рассчитанная граница радиоизображения при отношении сигнал/шум, соответствующем экспериментальным данным, совпала с границей радиоизображения, построенного по экспериментальным данным.

При отношениях сигнал/шум < 3 радиоизображения настолько сильно искажаются шумовой компонентой, что их анализ не принесет никакой дополнительной информации. Различие между рассчитанной границей и границей заданного эллипсоида превышает 25%. Следовательно, низкие значения отношения сигнал/шум являются недопустимыми при постановке задачи построения радиоизображений, т.к. ни один параметр полученного радиоизображения не будет соответствовать действительности.

Результаты расчетов и анализ радиоизображений, выполненные при различных условиях проведения радиолокационного эксперимента (менялись мощности шума и характеристики рассеяния поверхности, варьировались изменения ракурса объекта и количество зарегистрированных ракурсов), позволяют сделать вывод о том, что рассмотренная методика перспективна для исследования астероидов, поверхность которых является статистически неровной. По радиоизображениям с высокой точностью определяется экваториальный силуэт астероида, т.к. при построении радиоизображений обеспечивается увеличение отношение сигнал/шум почти в 2 раза вблизи границы спектра мощности, что обусловлено суммированием спектров с учетом изменения ракурса объекта. Погрешности определения формы объекта составляют 5...10%, если спектры мощности эхо-сигналов имеют отношение сигнал/шум > 5 , что реализуется в большинстве экспериментов по радиолокации астероидов. Распределения яркости радиоизображения одинаковых по форме объектов существенно различаются, если они имеют разный тип шероховатостей и соответственно разные функции рассеяния. По радиоизображениям можно получить оценку степени шероховатости и другую дополнительную информацию об особенностях рассеяния поверхности исследуемых астероидов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (07-02-00514-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Jurgens R.F. Radar backscattering from a rough rotating triaxial ellipsoid with applications to the geodesy of small asteroids // *Icarus*. 1982. V. 49, P. 97-108.
2. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Секистов В.Н., Сорокин В.А. Использование радиоизображений для анализа результатов узкополосной радиолокации астероидов // *Космические исследования*. 2009. Т. 43. № 3. С. 229-237.
3. Ostro S.J. Planetary radar astronomy // *Reviews of Modern Physics*. 1993. V. 65. № 4. P. 1235-1280.
4. Гаврик Ю.А., Гаврик А.Л. Радиолокационные характеристики астероида 33342 (1998 WT24) // *Радиотехника и электроника*. 2008. Т. 53. № 10. С. 1247-1256.
5. Zaitsev A.L., Ostro S.J., Yeomans D.K. et al. Intercontinental bistatic radar observations of 6489 Golevka (1991 JX) // *Planetary and Space Science*. 1997. V. 45. № 7. P. 771-778.
6. Zaitsev A.L., Di Martino M., Konvalenko A.A. et al. Radar Detection of NEA 33342 (1998 WT24) with EVPATORIA => MEDICINA System at 6 cm // *Proceedings of Conference Asteroids, Comets, Meteors ACM-2002*. Berlin, 29 Jul- 2 Aug, 2002. P. 883-886.
7. Секистов В.Н., Гаврик А.Л., Андреев В.Ю. и др. Построение радиоизображений низкоорбитальных спутников по данным радиолокации узкополосным сигналом // *Радиотехника и электроника*. 2000. Т. 45. № 7. С. 830-836.
8. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Григорьевская М.В. Определение характеристик астероида с использованием радиоизображений, полученных по данным радиолокационного эксперимента // *Труды XXII Всероссийской конференции "Распространение радиоволн (РРВ-XXII)"*. Ростов-на-Дону, п. Лоо, 22-26 сентября, 2008. Т.1. С. 229-232.