

Оценка шероховатости поверхности астероида по радиолокационным сигналам

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

Представлена методика оценки шероховатости поверхности астероида при радиолокации монохроматическим сигналом. Предложена модель расчетов спектра мощности эхо-сигнала для исследования связи между параметрами поверхности и характеристиками радиоэха. A method of estimation of surface roughness in the asteroid radar with the monochromatic signal is given. Model to calculate the power spectrum of the echo signal is used to study the connection between the parameters of the asteroid's surface and the characteristics of the radio echoes.

При облучении космического объекта радиоволнами часть энергии рассеивается, а рассеянное в обратном направлении поле является предметом радиолокационных исследований. Российские радиолокационные средства часто используют монохроматические зондирующие радиосигналы, поэтому актуальным является развитие адекватных методов анализа эхо-сигнала, позволяющих извлекать информацию о свойствах поверхности исследуемого астероида.

В докладе представлена методика оценки шероховатости поверхности астероида при однопозиционной радиолокации монохроматическим зондирующим сигналом сантиметрового диапазона длин волн. Предложена модель расчетов спектров мощности эхо-сигналов, позволяющая исследовать связь между характеристиками радиоэха и параметрами поверхности при интерпретации результатов радиолокации астероидов. На примере анализа эхо-сигналов от вращающегося шероховатого эллипсоида анализируется возможность определения параметров поверхности астероида 1998 WT24.

Моделирование эхо-сигнала от шероховатого эллипсоида

Рассмотрим эксперимент, в котором в направлении астероида излучается монохроматический непрерывный радиосигнал сантиметрового диапазона длин волн, а приемный комплекс аппаратуры осуществляет непрерывную регистрацию эхо-сигналов. Будем считать, что расстояние от радиолокационной станции (РЛС) до астероида много больше его размеров и падающее поле является плоской волной, длина волны мала по сравнению с радиусом кривизны неровностей облучаемой поверхности. Полагаем также, что ось вращения астероида неподвижна относительно РЛС и расстояние между передающей и приемной антеннами незначительное.

Собственное вращение астероида приводит вследствие эффекта Доплера к расширению спектральной линии эхо-сигнала. Ширина спектра мощности эхо-сигнала B зависит от ракурса астероида, его размеров и скорости вращения:

$$B = \frac{4\pi D}{\lambda T} \cos \delta,$$

где λ – длина волны,

D – диаметр астероида,

T – период его вращения,

δ – угол между осью вращения и плоскостью, перпендикулярной линии Земля-астероид.

Спектр мощности эхо-сигнала находится из соотношения:

$$W(f) = \frac{P_i G_i A_r}{(4\pi L^2)^2} \sigma(f),$$

где P_i – мощность излучаемого сигнала,

G_i – усиление излучающей антенны,

A_r – эффективная площадь приемной антенны,

L – расстояние от РЛС до объекта,

$\sigma(f)$ – эффективная площадь обратного рассеяния (ЭПР) части поверхности тела, отражающей радиоволны на частоте f .

В радиолокационных экспериментах по спектрам мощности эхо-сигналов определяются характеристики рассеивающей поверхности.

Для шероховатого эллипсоида можно рассчитать ЭПР, если воспользоваться идеями работ [1,2]. Полагается, что интенсивность поля, рассеянного на шероховатой криволинейной поверхности, представляется в виде суперпозиции полей, отраженных от большого количества малых шероховатых плоских поверхностей площадью s , касательных к средней поверхности. Рассматривается только частный случай, в котором средняя ЭПР может быть найдена путем суммирования средних ЭПР отдельных частей тела, а функция обратного рассеяния $\beta(\theta)$ малых площадок s зависит только от угла θ падения радиоволн на площадку. Именно такой случай обычно реализуется 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 характеризует статистически усредненные оценки распределения энергии отраженного сигнала.

Соотношение для определения эффективной площади $\sigma(f)$ обратного рассеяния (ЭПР) части поверхности эллипсоида, отражающей радиоволны на частоте f , можно получить в аналитической удобной для расчетов форме:

$$\sigma(f) = ab \int_{l_1}^{l_{\max}} \frac{M(l, f)}{N(l, f)} \beta(\theta) dl + ab \int_{l_2}^{l_{\max}} \frac{M(l, f)}{N(l, f)} \beta(\theta) dl.$$

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 $M(l, f)$ и $N(l, f)$, а также для пределов интегрирования l_1, l_2, l_{\max} можно найти в публикациях [2,3].

Представленное соотношение позволяет рассчитать сглаженное распределение энергии отраженного сигнала при радиолокации вращающегося шероховатого эллипсоида с произвольной ориентацией оси вращения, если задана функция рассеяния его поверхности $\beta(\theta)$. Мы рассматриваем сильно шероховатую поверхность с большим количеством участков локального рассеяния (на каждом участке много "блестящих точек"), когда интерференционная картина от "блестящих точек" сглаживается. 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 дает в результате статистически усредненные по ансамблю распределения энергии отраженного сигнала [3,4].

Модель шероховатого эллипсоида является удобным инструментом при анализе результатов радиолокационных экспериментов. В большинстве случаев результаты ра-

диолокации согласуются с обобщением этой модели. Если расстояния между участками локального рассеяния малы, как в рассматриваемом случае шероховатого эллипсоида, то распределение энергии эхо-сигнала будет определяться законом рассеяния его поверхности. Наличие на шероховатой поверхности астероида нескольких областей локального рассеяния со повышенной или пониженной отражательной способностью приведет к тому, что на спектрах мощности эхо-сигналов проявятся крупномасштабные вариации энергии, но этот случай требует отдельного анализа.

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными

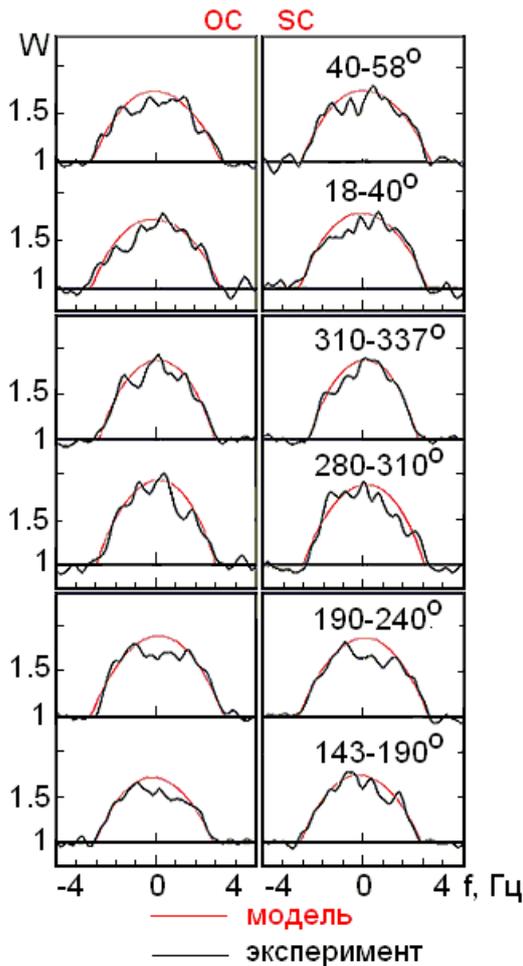


Рис. 1. Сравнение спектров мощности $W(f)$ эхо-сигналов для различных ракурсов астероида WT24 с результатами моделирования эхо-сигналов от шероховатого эллипсоида.

Сплошной черной линией показаны экспериментальные спектры мощности на двух поляризациях эхо-сигнала $\lambda \approx 6$ см (согласованная SC и ортогональная OC). Спектры $W(f)$ усреднялись для увеличения отношения сигнал/шум, цифрами указан диапазон углов поворота астероида WT24 за время усреднения.

Красной линией показаны результаты моделирования. В качестве модели использовался шероховатый эллипсоид, вращающийся с периодом 3.7 часа, главные оси которого соответствуют оценкам минимального и максимального размеров астероида WT24. В модели функция обратного рассеяния малых площадок поверхности зависит только от угла падения радиоволн на площадку. Диффузное рассеяние описывается законом $d\sigma/dA \sim \cos^n \theta$, где σ – радиолокационное поперечное сечение, A – площадь поверхности, θ – угол между направлением радиоволн и нормалью к поверхности, n – степень шероховатости (для равномерного рассеяния $n = 1$, а для рассеяния Ламберта $n = 2$).

Оптимальные параметры модели подбирались с использованием метода наименьших квадратов. Угол поворота эллипсоида был согласован с ракурсом астероида, размер осей эллипсоида (430, 380, 405) варьировался в пределах 10 м относительно среднего значения, угол наклона оси вращения δ варьировался от 0° до 45° , но вариации угла δ не оказали существенного влияния на результаты моделирования, т.к. отличие эллипсоида от сферы незначительно (меньше 15%). При подборе параметров больший вес имели экспериментальные спектры с симметричным распределением энергии, т.к.

сильная асимметрия экспериментальных распределений (как показали расчеты) обусловлена крупномасштабными особенностями строения рассеивающей поверхности.

Спектры мощности эхо-сигналов и модели согласуются, если в качестве осей эллипсоида взять значения (430, 380, 405) м и задать закон рассеяния с параметром $n = 1.8 \pm 0.1$. На рис. 1 видно, что ниже уровня половины мощности все экспериментальные данные совпадают с результатами моделирования, в то время как область максимума спектра может сильно отличаться от модели, причем различия наблюдаются и для симметричных и для несимметричных спектров.

При анализе шероховатости поверхности можно предположить, что совпадение границ и формы спектров мощности, полученных для разных поляризаций, указывает на диффузное рассеяние от поверхности. Однако при определенных ракурсах на экспериментальных спектрах мощности $W(f)$ проявляются локальные экстремумы энергии, а результаты расчетов $W(f)$ для шероховатого эллипсоида демонстрируют расхождения с экспериментальными данными. Все это свидетельствует о том, что на поверхности астероида присутствуют крупномасштабные особенности рельефа, рассеивающие свойства которых зависят от ракурса астероида. Изображения астероида WT24, полученные в работе [5], четко показывают его строение, похожее на двойной астероид, и сложную структуру его поверхности. Результаты нашего моделирования подтверждают наличие сложной конфигурации поверхности астероида, а также свидетельствуют о сильной шероховатости его поверхности, близкой к закону Ламберта, в то время как у большинства астероидов и планет значение шероховатости n лежит между 1 и 1.5 [6].

Результаты измерений радиолокационного альбеда [4] и шероховатости предоставляют возможность сделать некоторые выводы о свойствах материала поверхности, но следует отметить неполную достоверность таких выводов из-за ограниченной точности теории диффузного рассеяния радиоволн. Если предположить, что астероид состоит из твердых горных пород, то радиолокационное альбеда $\eta = 0.15$ можно связать с коэффициентом отражения Френеля R : $\eta = gR$, где коэффициент g зависит от ориентации астероида, его формы и неровности рельефа. Полагая далее, что для сферы с законом рассеяния $\cos^n \theta$, коэффициент g может быть найден из соотношения $g = (n+2)/(n+1)$ [7], получим, что для установленной оценки шероховатости $n = 1.8$ коэффициент $g \approx 1.36$, а коэффициент $R \approx 0.11$. Это позволяет оценить плотность грунта d_{bulk} из формулы [8]:

$$d_{bulk}(R) \approx 3.2 \ln \left[\frac{1 + \sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}} \right], \text{ г/см}^3.$$

Полученное значение плотности грунта составляет 2.3 г/см^3 и можно оценить массу астероида $m = 4/3\pi(D/2)^3 d_{bulk} \approx 7.8 \cdot 10^{10} \text{ кг}$. Зная плотность грунта и его пористость, можно также оценить плотность частиц: $d_{bulk} = (1-p)d_{solid}$. Предполагая, что пористость $p \approx 0.5 \pm 0.1$, что примерно соответствует верхнему слою лунного реголита, получим для плотности частиц $d_{solid} \approx 4.5 \text{ г/см}^3$. Для сухих пород диэлектрическая проницаемость грунта ϵ определяется из соотношения [8]:

$$d_{bulk}(R) = 2(\sqrt{\epsilon} - 1).$$

Следовательно, диэлектрическая проницаемость $\epsilon \approx 4.5$, но полученное значение диэлектрической проницаемости является усредненным параметром для поверхностного слоя на глубину проникновения радиоволн. Кроме того, надо учитывать, что в сантиметровом диапазоне волн вещества с разным значением ϵ могут иметь близкие диаграммы рассеяния, а это существенно уменьшает точность полученных оценок.

Работа выполнена при частичной поддержке программы ПРАН № 22.

Литература

1. Jurgens R.F. // Icarus. 1982. V. 49. P. 97.
2. Гаврик А.Л. и др. // Космические исследования. 2009. Т. 43. № 3. С. 229-237.
3. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А. // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 4. С. 1-15.
<http://jre.cplire.ru/jre/apr10/4/text.pdf>
4. Ю.А. Гаврик, А.Л. Гаврик // Радиотехника и электроника. 2008. Т.53. №10. С.1247-1256.
5. Busch, M. W. et al. // Icarus. 2008. V. 195 (2). P. 614-621.
6. Steven J. et al. // Icarus. 1999. V. 137. P. 122-139.
7. Benner L. M. et al. // Icarus. 1999. V. 139. № 2. P. 309(19).
8. Heiken G.H. et al. Lunar Sourcebook. Cambridge Univ. Press. New York. USA. 1991.