

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ АНАЛИЗЕ РЕЗУЛЬТАТОВ УЗКОПОЛОСНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ АСТЕРОИДОВ

А.Л. Гаврик, Ю.А. Гаврик
ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН

Получена 27 апреля 2010 г.

Аннотация. 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.

Ключевые слова: радиоизображение, радиолокация, астероиды.

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 для эллипсоида 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 $\ell_1, \ell_2, \ell_{\max}$ 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 нескольких 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 может иметь максимумы интенсивности в отдельных точках, 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 45^0 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 $\beta(\theta) \sim \cos^2 \theta$. Вычислим 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 нулевого среднего уровня.

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 показана 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.

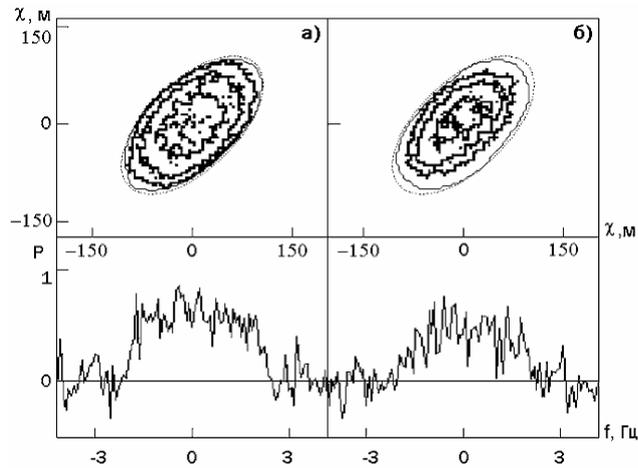


Рис. 1. Радиоизображение шероховатого эллипсоида для соотношения сигнал/шум ~ 5 .

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, протяженность спектра максимальна, когда наибольшая ось перпендикулярна линии визирования. 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, но асимметрия может маскироваться шумами. 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 объекта.

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 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. 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.

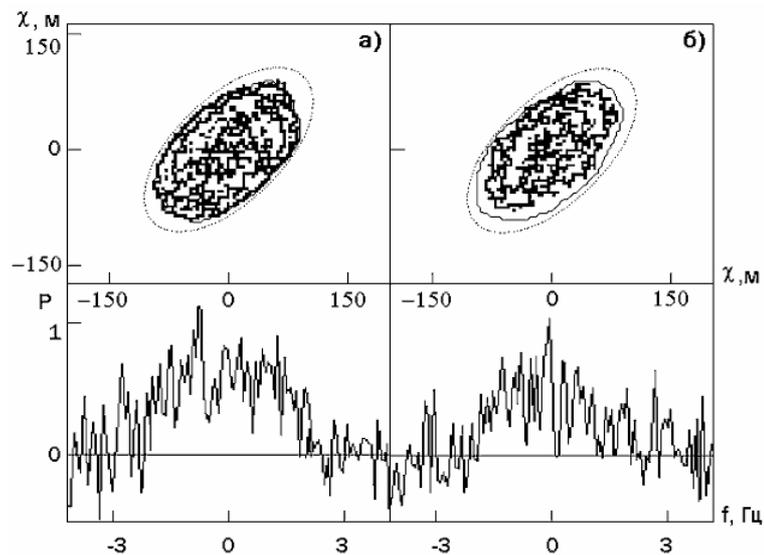


Рис. 2. Радиоизображение шероховатого эллипсоида для соотношения сигнал/шум ~ 3 .

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, выполненные при различных условиях проведения радиолокационного эксперимента (менялись мощность шума и характеристики рассеяния поверхности, варьировались изменения ракурсов объекта и количество 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 отношения 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...8%, если эхо-сигналы имеют отношение сигнал/шум > 5 , что реализуется в большинстве экспериментов по радиолокации астероидов.

Рассмотренная модель является удобным инструментом для анализа результатов радиолокационных экспериментов. Радиолокационное зондирование астероида 1998 WT24 монохроматической волной $\lambda \approx 6$ см было проведено 16 и 17 декабря 2001 г с помощью бистатической системы Евпатория–Медицина [6,9]. В качестве передающей использовалась антенна, расположенная в г. Евпатория, Украина, а в качестве приемной использовалась антенна астрономической обсерватории, г. Медицина, Италия. Излучение

Евпаторийской антенны имело левую поляризацию с номинальной частотой излучения 5010 МГц и мощностью 90 кВт, прием эхо-сигналов осуществлялся на двух ортогональных поляризациях. Более полные характеристики системы и условия проведения эксперимента опубликованы в [6,9]. Из нескольких сеансов локации астероида были выделены 6 сеансов с четко выраженным эхо-сигналом [4]. Анализ экспериментальных данных показал, что новые технологии с использованием радиоизображений позволят точнее определять форму и размеры астероида, оценивать шероховатость и другие характеристики рассеяния поверхности астероида.

Для формирования радиоизображения астероида 1998 WT24 из радиолокационных данных была получена серия радиоголограмм, каждая из которых соответствует времени синтезирования апертуры ~ 30 с. Такой интервал обеспечивает разрешение радиоизображения около 10 м при малом влиянии шума. Для увеличения отношения сигнал/шум радиоголограммы усреднили. Между соседними усредненными данными временной интервал составлял ~ 1.5 мин и соответствовал изменению ракурса астероида на ~ 0.04 рад, полное изменение ракурса за время наблюдения составило около 4 рад. Выбрали все 65 радиоголограмм из сеансов с высоким отношением сигнал/шум и 36 радиоголограмм, полученных при других ракурсах, но при отношении сигнал/шум в два раза меньше. Результаты построения радиоизображения астероида 1998 WT24 по данным ОС и SC поляризации представлены на рис. 3, на котором видно, что экваториальный силуэт астероида имеет несимметричную форму. Максимальный размер астероида достигает значения 420 м для ОС и 435 м для SC, минимальный - 380 м. Расположение осей минимального и максимального размера почти совпадает на обеих поляризациях, небольшие различия силуэтов, полученных на разных поляризациях, могут быть следствием особенностей рассеяния радиоволн вблизи границ астероида.

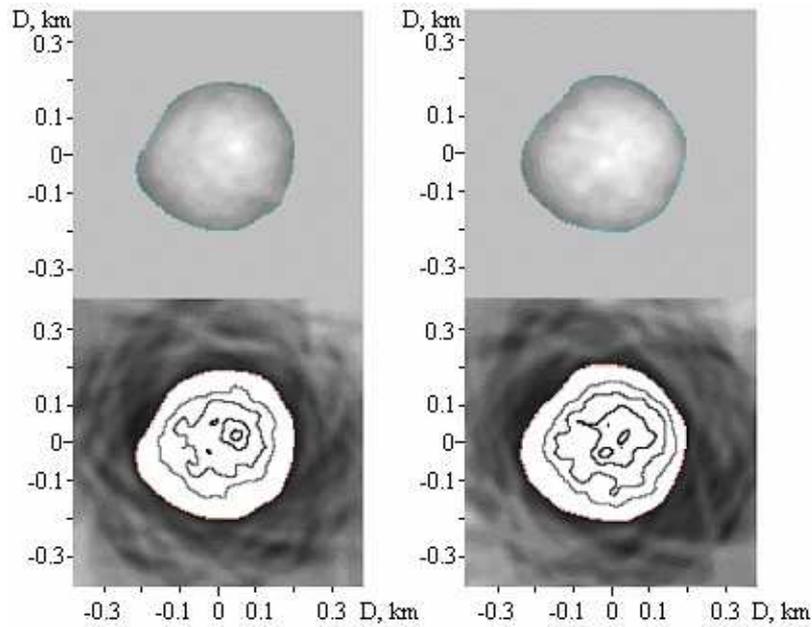


Рис. 3. Радиоизображения астероида 1998 WT24 по данным ОС (левое) и SC (правое) поляризации. Градации серого цвета соответствуют распределению яркости радиоизображения, фоновый шум устранен (верхняя часть). Более наглядным оказалось представление результатов построения радиоизображения, показанное на нижней 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.

На рис. 3 четко видно асимметрию распределения радиояркости. Контурные линии имеют неправильную форму из-за того, что максимальная яркость наблюдается не в центре радиоизображения. На радиоизображениях проявляются три области, имеющие яркость, близкую к максимальной, но взаимное расположение этих ярких областей слегка отличается для ОС и SC поляризации. Контурные линии SC заметно отличаются от данных ОС поляризации, что может быть следствием влияния крупномасштабного рельефа поверхности астероида, обнаруженного американскими исследователями по трехмерным изображениям астероида 1998 WT24. К сожалению, анализ

радиоизображений для модели неоднородно-шероховатого эллипсоида еще не закончен, исследования продолжаются и поэтому делать выводы о шероховатости по представленным радиоизображениям еще рано.

Чтобы оценить шероховатость поверхности астероида мы усреднили спектры мощности на интервале 10...20 мин и, используя полученные сведения о размерах астероида, выполнили расчеты спектров мощности эхо-сигналов от эквивалентного однородно-шероховатого эллипсоида. Оказалось, что результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными, если закон рассеяния близок к Ламбертовскому. Спектры мощности эхо-сигналов, нулевая частота которых соответствует центру масс астероида, усредненные на временном интервале (~15мин), равном половине длительности сеанса, а также результаты модельных расчетов представлены на рис. 4.

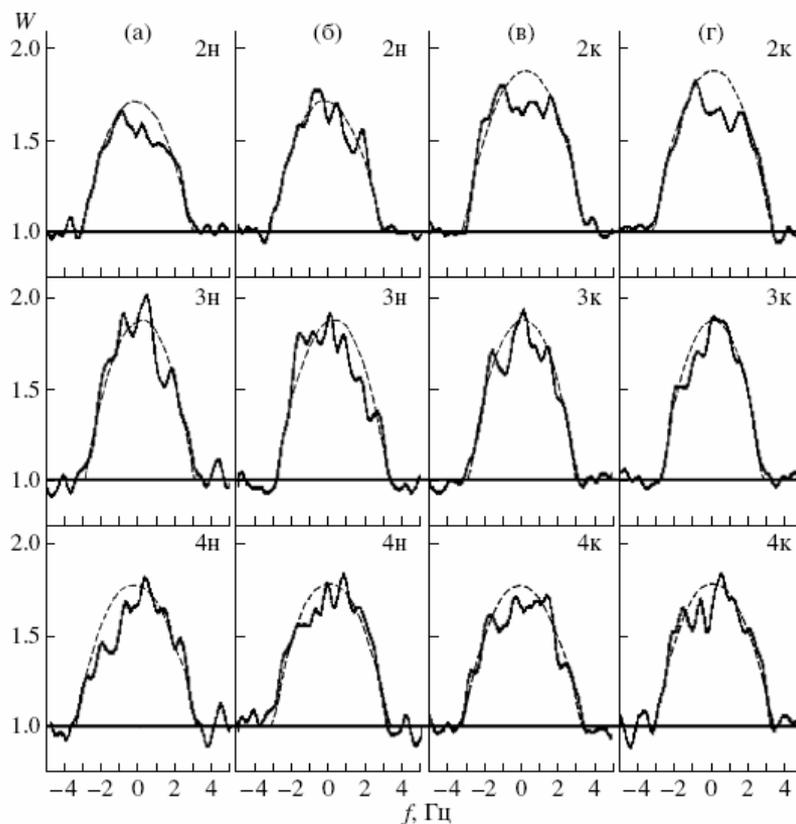


Рис. 4. Спектры мощности с разрешением по частоте 0.15 Гц для ОС (а,в) и SC (б,г) поляризации показаны сплошной кривой, цифры 2-4 соответствуют номерам сеансов, буквами н) и к) обозначены данные, полученные в начале и в

конце сеанса. Пунктирные кривые – результаты модельных расчетов для вращающегося шероховатого эллипсоида.

Характерной особенностью спектров мощности, полученных для разных поляризаций, является совпадение их границ и форм. Естественно предположить, что это указывает на диффузное рассеяние. Однако наблюдаются и различия формы спектров при изменении ракурса астероида. Например, для спектров 3к, распределение энергии почти симметричное, а для спектров 2н – несимметричное. Следовательно, рассеивающие свойства поверхности астероида существенно зависят от его ракурса, причем при определенных ракурсах на спектрах проявляются один, два или три локальных максимума энергии. Для оценки шероховатости рассмотрим результаты численного моделирования для шероховатого эллипсоида, вращающегося с периодом 3.6977 часа. В численной модели [2] функция обратного рассеяния зависит только от угла падения радиоволн на площадку θ , а диффузное рассеяние описывается законом $\cos^n \theta$. Для равномерного рассеяния $n=1$, а для рассеяния Ламберта $n=2$. Оптимальные параметры модели получались методом наименьших квадратов. Результаты моделирования представлены на рис. 4 пунктирными кривыми. Спектры мощности эхо-сигналов и модели согласуются, если в качестве осей эллипсоида взять значения (430, 380, 405) м и задать закон рассеяния $n=1.8 \pm 0.1$. На рис. 4 видно, что ниже уровня половины мощности экспериментальные данные совпадают с результатами моделирования, в то время как область максимума спектра может отличаться от модели, причем различия наблюдаются и для симметричных и для несимметричных спектров. Главная причина таких различий состоит в том, что поверхность астероида не является выпуклой и однородно шероховатой, на ней присутствуют крупномасштабные неровности рельефа. Задача определения характеристик крупномасштабных неровностей рельефа по данным монохроматической радиолокации пока не решена.

На основе анализа радиоизображений можно сделать следующие выводы. Во-первых, по радиоизображениям определяется экваториальный силуэт астероида. Во-вторых, минимальный (380 м) и максимальный (430 м) размеры астероида по радиоизображениям определяются точнее, 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 эллипсоида. Представленные результаты подтвердили наличие крупномасштабного рельефа на поверхности астероида и показали, что шероховатость его поверхности ~ 1.8 близка к Ламбертовской.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (07-02-00514-а). Авторы выражают благодарность Н.А. Арманду за обсуждение полученных результатов.

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., Konovalenko 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.
9. M.di Martino, S.Montebugnoli, G. Cevolani, et al. Results of the first Italian planetary radar experiment // Planetary and Space Science. 2004. V. 52. № 4. P. 325-330.