

УДК 52-17

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗЕРКАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ С УЧЕТОМ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОТРАЖЕНИЯ

Класс Е. В.¹, Бадюк К. В.², Ульянов С. А.³, Шаховский В. В.⁴

SIMULATION OF THE SPECULAR COMPONENT WITH THE ROUGHNESS OF THE REFLECTING SURFACE

Klass E. V., Badyuk K. V., Ulyanov S. A., Shahovsky V. V.

The calculation of reflectance from 3D object with rough surface is presented. To simulate brightness the geometric optics is complemented with coherent component of wave optics. The effect of roughness is considered in the simulations.

Keywords: rough surface, geometric and wave optics, method Monte Carlo.

Введение

К настоящему времени разработано достаточно много методик и программ, позволяющих оценивать блеск космических объектов на основе информации об отражающих свойствах их поверхностей. Для этого обычно используют спектральные двунаправленные функции отражения (ДФО), которые характеризуют дифференцированное по длине волны свойство поверхности из того или иного материала, облучаемого со стороны источника, отражать световое излучение в направлении детектора. Указанные функции получают либо в результате экспериментальных исследований, которые проводятся в лабораторных условиях, либо теоретическими методами.

В космическом пространстве под воздействием различных повреждающих факторов происходит деградация внешних покрытий, которая, в свою очередь, приводит к изменению их отражающих свойств. Исследования состояния поверхности материалов после длительного пребывания в космосе показы-

вают наличие эрозий и изъязвлений в виде кратеров размерами 0,5, . . . , 10 мкм. Степень зеркальности солнечных батарей в результате длительного пребывания в космосе может снизиться на 30, . . . , 60%.

Для учета влияния шероховатостей на ДФО применяются различные методы. Это либо полуэмпирические подходы [1], либо экспериментальные исследования, либо разработка расчетных моделей. Последнее направление активно развивается благодаря широкому использованию ДФО в компьютерной графике. Среди физически обоснованных отметим модели с использованием формализма волновой оптики (ВО), представленные в работах [2, 3], основой которых послужили классические работы Бекманна [4, 5]. Дуалистическая природа оптического излучения позволяет развивать модели в приближении геометрической оптики (ГО), которое успешно работает в области длин волн, величина которых меньше размеров неоднородностей. Реальная поверхность объекта представляется в них в виде зеркально отражающих микрограней [6].

¹Класс Елена Викторовна, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Центрального научно-исследовательского Института химии и механики; e-mail: elenaklass@yandex.ru.

²Бадюк Ксения Владимировна, младший научный сотрудник Центрального научно-исследовательского Института химии и механики; e-mail: kbaduk@mail.ru.

³Ульянов Сергей Алексеевич, заместитель начальника управления Центрального научно-исследовательского Института химии и механики; e-mail: ulyanov_sergey@gmail.com.

⁴Шаховский Валентин Владимирович, канд. техн. наук, заместитель начальника НИЦ нанотехнологий Центрального научно-исследовательского Института химии и механики, доцент кафедры автоматизированных биотехнических системы Московского физико-технического института (Государственного университета); shah_289@mail.ru.

В задачах оценки блеска чаще всего применяются различные модели ГО, поскольку модели ВО достаточно трудоемки в своем использовании. Например, в программе TASAT используется модель микрограней [7]. В работе [8] для моделирования изображения объектов с реальной деградацией поверхности использован подход на базе анизотропной модели микрограней [9]. В одной из недавних работ [10] описана методика, включающая при расчете зеркального отражения модель микрограней [6].

В настоящей работе представлена модель ГО, в которой учет шероховатости проводится непосредственно в процессе расчета отражения излучения от трехмерного объекта методом Монте-Карло. Для этого используется описание объекта на двух уровнях. На макро-уровне решается задача отражения от всего объекта целиком, а учет шероховатости проводится на уровне микро-геометрии. Для оценки блеска от зеркальной составляющей расчет по модели ГО дополняется расчетом когерентной составляющей модели ВО.

1. Учет шероховатости в моделях волновой оптики

Модели ВО опираются на решения однородного волнового уравнения Гельмгольца для случайно шероховатой поверхности. Вычисление интегралов проводится с использованием метода касательной плоскости. Основные допущения состоят в следующем. Рассеивающая поверхность должна быть настолько гладкой, чтобы в каждой ее точке волновое поле можно было представить в виде суммы падающего поля и поля, отраженного по законам геометрической оптики от плоскости, касательной к поверхности в указанной точке. Локальный радиус кривизны поверхности должен превышать длину волны. Принимается, что падающая и отраженная волна являются плоскими. Решение ищется для случайно шероховатой поверхности, т.е. поверхности, для которой высоты отклонения от среднего уровня распределены по нормальному закону. Для характеристики указанной поверхности достаточно следующих параметров: средней высоты h над плоскостью $z = 0$, среднеквадратичного отклонения (дисперсии) высот относительно среднего уровня σ^2 и корреляционной функции $W(x_1, x_2)$. Последняя величина определяется как среднее от произведения высот

в двух пространственно разнесенных точках поверхности x_1 и x_2 .

Итоговое решение волнового уравнения представляется в виде суперпозиции двух составляющих, одна из которых, когерентная, отвечает за отражение в зеркальном направлении, а другая, некогерентная, за поле, рассеянное вокруг направления зеркального отражения. Некогерентная составляющая часто называется диффузно-направленной.

Для когерентной составляющей вероятность отражения $\rho(\theta_i, \lambda)$ определяется только величиной σ . Ее зависимость от угла падения излучения θ_i и длины волны λ имеет достаточно простой вид, часто называемый соотношением Бекманна–Спицино [4]

$$\rho(\theta_i, \lambda) \approx F(\theta_i, \lambda) \exp \left\{ - [4\pi(\sigma/\lambda) \cos \theta_i]^2 \right\} \quad (1.1)$$

где $F(\theta_i, \lambda)$ — коэффициент Френеля для гладкой поверхности.

Некогерентная составляющая представляется в виде суммы бесконечного ряда, в котором, наряду с параметрами σ , θ_i и λ присутствуют члены, содержащие Фурье преобразование корреляционной функции поверхности W . Выражение для вероятности некогерентного отражения здесь не приводится ввиду его большой сложности. Подробное изложение можно найти в работах [2, 3], где окончательные формулы получены с учетом поляризации излучения и анизотропии поверхности, соответственно.

2. Предлагаемая модель учета шероховатостей в рамках приближения геометрической оптики

В работе [11] была представлена математическая модель расчета блеска космического объекта и ее реализация в виде комплекса программ РОКС на основе метода Монте-Карло. Физика взаимодействия оптического излучения с материалами включала в себя идеализированные процессы зеркального и диффузного (ламбертовского) отражений. Указанный подход достаточно традиционный, но в ряде случаев не позволяет корректно описать реальную индикатрису отражения.

Для учета влияния шероховатости на отражающие свойства трехмерного объекта была предложена и реализована в рамках

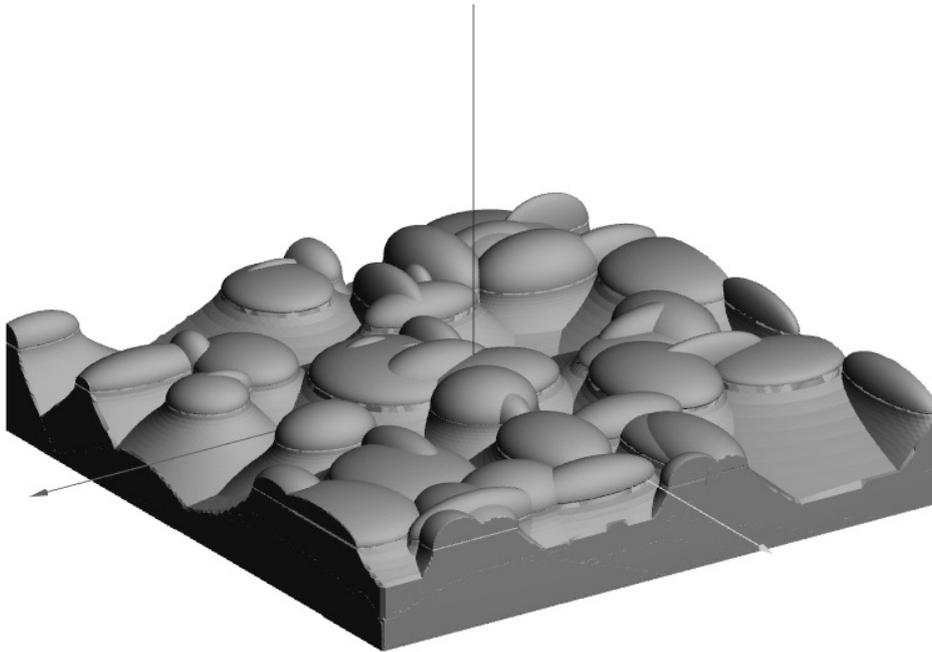


Рис. 1. Пример визуализации расчетной геометрии микроуровня

программы РОКС следующая математическая модель. Геометрия объекта представляется на двух уровнях: макро и микро. На макроуровне моделируемый объект задается целиком в виде совокупности зон, описываемых уравнениями поверхностей второго порядка. При попадании частицы на поверхность макрогеометрии осуществляется переход на микроуровень, геометрия которого моделирует искомую шероховатость. На микроуровне траектория частицы прослеживается до тех пор, пока не покинет его пределы. В акте взаимодействия, происходящем на микроуровне, разыгрывается зеркальное отражение. Далее производится возврат на макроуровень и продолжается моделирование траектории в макрогеометрии. Идея изложенного подхода близка к способу расчета в работе [12], где для модели микроуровня использовали тетраэдрическую «яму». Нами было предложено модель микроуровня задавать в виде совокупности тел второго порядка, размещенных на подложке. Это позволяет корректно учесть эффекты многократного отражения, что невозможно в модели [12], где переход между «ямами» не предусмотрен. Степень шероховатости поверхности моделируется формой и параметрами фигур. Подробное описание предложенной модели и

ее верификация представлены в [13, 14]. Пример геометрии микроуровня представлен на рис. 1.

3. Комбинированная модель учета шероховатости при расчете блеска объекта

Модель учета шероховатостей, изложенная в предыдущем пункте, применима для расчетов шероховатых поверхностей, в которых $\sigma > \lambda$. В тех случаях, когда деградация поверхности более слабая, необходимо пользоваться формулами из моделей ВО, которые также содержат множитель, учитывающий эффекты само и взаимного затенения шероховатой поверхности. Для его оценки используют идеи работы Бекманна [5], который исходил из геометрических соображений о вероятности пересечения луча со случайной поверхностью. Эффект затенения в этом случае определяется величиной, равной проекции площади, которая видна как со стороны источника, так и со стороны детектора. При расчете отражения излучения по программе РОКС методом, изложенном в п. 2, фактор затенения учитывается автоматически.

В работе [15] было показано, что при $\sigma < 0,025$ диффузно-направленным

отражением можно пренебречь, т.е. можно ограничиться расчетом только когерентной составляющей зеркального отражения. Для этого диапазона высот шероховатостей было предложено проводить оценку когерентной составляющей с использованием программы РОКС. При моделировании траектории частиц их веса корректируются с использованием соотношения (1.1).

С ростом высоты шероховатостей зеркальная составляющая уменьшается, а роль диффузно-направленной растет. В пределе $\sigma \gg \lambda$ когерентная составляющая практически равна нулю. Оценки [15] показывают, что ее вкладом в амплитуду отражения можно пренебречь для всех углов падения излучения при $\sigma/\lambda > 1,5$. Некогерентная составляющая в этом предельном случае зависит от длины волны только через коэффициент отражения Френеля, а зависимость от параметров поверхности выражается через отношение σ/τ , где τ корреляционная длина, характеризующая для гауссовой поверхности расстояние, на котором корреляционная функция W поверхности уменьшается в e раз. В [15] также показано, что модель ГО [6] хорошо аппроксимирует диффузно-направленную компоненту, что позволяет использовать модели ГО в качестве верхней оценки указанной компоненты.

В промежуточном диапазоне соотношения между когерентной и некогерентной составляющими не так очевидны. Согласно результатам теории возмущений для малых шероховатостей можно отметить следующее. Неровности с корреляционной длиной, большей длины волны, рассеивают преимущественно в зеркальном направлении. Если корреляционная длина существенно меньше длины волны, то рассеяние будет преимущественно диффузным.

Исходя из изложенных закономерностей поведения когерентной и некогерентной составляющих, можно предложить приближенную оценку степени деградации поверхности наблюдаемого объекта. Если наблюдаемая спектральная зависимость отражающей способности поверхности объекта заметно отличается от соответствующей зависимости коэффициентов Френеля для гладкой поверхности, то шероховатости небольшие и их высоту можно определить по соотношению (1.1). Если спектр отражения близок к спектральной зависимости коэффициентов

Френеля, то высота шероховатостей больше длины волны регистрируемого излучения.

4. Примеры учета шероховатости

В качестве реального объекта с измеренной кривой блеска рассмотрим спутник IMAGE [16], который находился в космическом пространстве порядка 6 лет. Спутник имел эллиптическую орбиту ($1640 \text{ км} \times 45230 \text{ км} \times 90^\circ$) и восьмигранную форму. Измерения блеска были проведены с фильтром, который охватывает диапазон $0,74, \dots, 0,88 \text{ мкм}$, создавая пик фотометрических откликов вблизи $0,78 \text{ мкм}$.

Рассмотрим, как меняется индикатриса отражения в предположении степени деградации поверхности солнечных батарей со следующими параметрами: $\sigma = 0,1 \text{ мкм}$, $\sigma/\tau = 0,02$ и $\sigma/\tau = 0,1$. На рис. 2 показаны рассчитанные по программе РОКС зависимости индикатрисы отражения излучения для $\lambda = 0,78 \text{ мкм}$ при падении солнечного света под углом 30° к нижней торцевой поверхности объекта для когерентной составляющей ВО и в приближении ГО. Там же показано максимальное значение зеркальной составляющей для гладкой поверхности. Видно, что индикатриса когерентной компоненты при выбранном значении σ снижается примерно в 50 раз по сравнению с оценкой, выполненной для гладкой поверхности. Индикатриса отражения, полученная в приближении ГО, при увеличении отношения σ/τ также значительно уменьшается по амплитуде и при этом существенно уширяется.

На рис. 3 представлены кривые блеска для спутника, полученные для различных способов учета шероховатостей в сопоставлении с данными наблюдений [16]. Следует отметить, что при проведении оценок использовалась упрощенная модель спутника в виде восьмигранной призмы с плоскими гранями и дифференциацией отражающих материалов на арсенид-галлиевые батареи и теплозащитное покрытие. В интересах данной задачи внешние выпуклые элементы, размещенные на боковых гранях спутника, которые дают большие пики на наблюдаемой кривой блеска, не учитывались. Для более регулярной части кривой блеска, которая обусловлена отражением от плоских элементов, видно, что расчет для гладкой поверхности дает завышение примерно на $0,5, \dots, 1$ звездную величину, а учет шероховатости позволяет до-

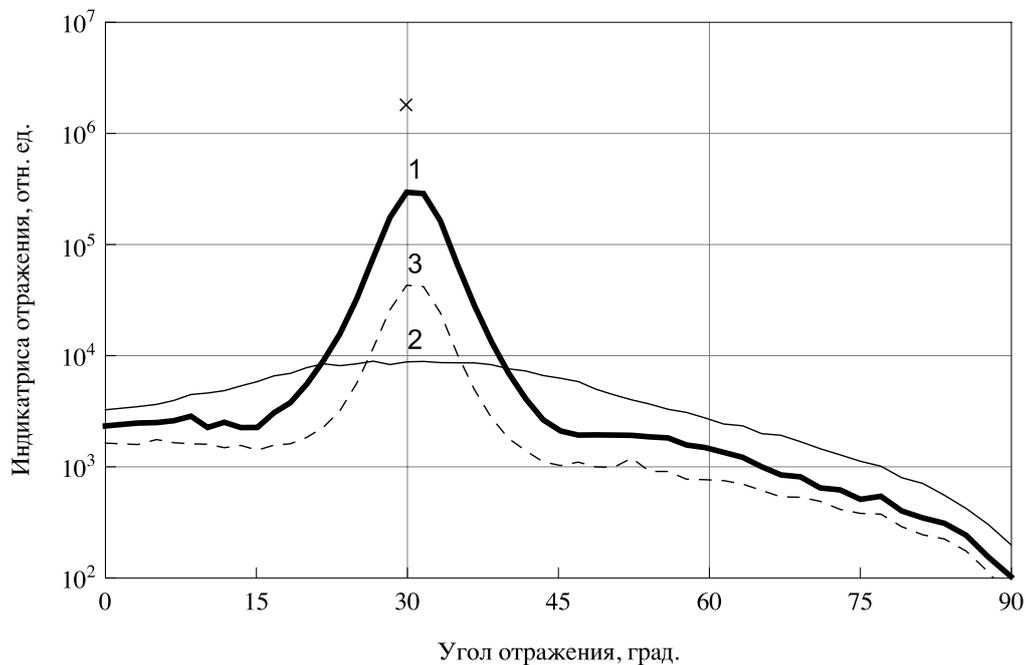


Рис. 2. Индикатриса отражения для различных поверхностей. Гладкая поверхность — x (максимальная амплитуда); шероховатая поверхность: 1, 2 — приближение ГО, $\sigma/\tau = 0,02$ и $0,1$, соответственно, 3 — когерентная составляющая ВО для $\lambda = 0,78$ мкм и $\sigma = 0,1$ мкм

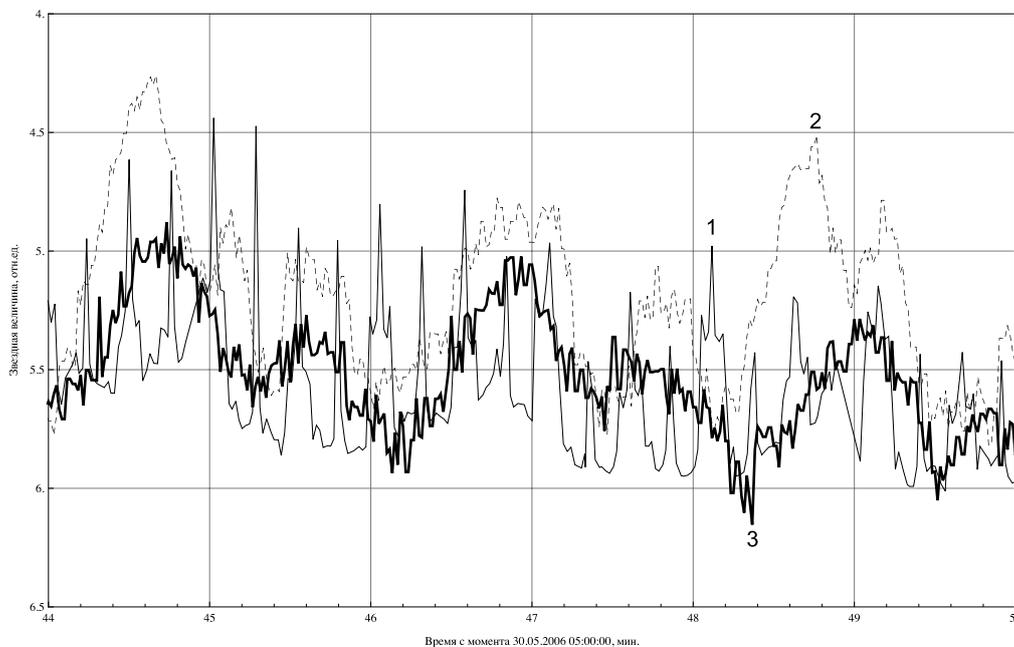


Рис. 3. Кривая блеска: 1 — по данным наблюдений [16]; 2 — расчет по РОКС без учета шероховатостей; 3 — когерентная составляющая для $\sigma = 0,1$ мкм

статочно близко описать наблюдаемую кривую блеска.

Выводы

Представлен реализованный в программе РОКС методом Монте-Карло в приближении ГО способ расчета зеркального отражения излучения от трехмерного объекта с учетом шероховатости его поверхностей, использующий описание объекта на макро и микро уровнях. Показано, что программа РОКС может использоваться для оценки когерентной составляющей модели ВО для поверхностей со слабой шероховатостью. Продемонстрировано влияние учета шероховатостей на модельных задачах и на примере определения кривой блеска для спутника IMAGE.

Литература

1. Анфимов Н. А., Копяткевич Р. М. и др. Дистанционная диагностика характеристик и технического состояния КА с помощью телескопов // Тезисы докладов конференции «Околосемная астрономия XXI века», Звенигород, Май, 21–25, 2001 г.
2. He X. D., Torrance K. E., Sillion F. X., Greenberg D. P. A comprehensive physical model for light reflection // Computer Graphics. In Proceedings of SIGGRAPH-91. July 1991. Vol. 25. P. 175–186.
3. Stam J. Diffraction shaders // In Proceedings of SIGGRAPH 99. Aug. 1999. Computer Graphics Proceedings. Annual Conference Series. P. 101–110.
4. Beckmann P., Spizzichino A. The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces. Pergamon Press, 1963. 81 p.
5. Beckmann P. Shadowing of Random Rough Surfaces // IEEE Trans. AP-13. 1965. No. 3. P. 384–388.
6. Cook R. L., Torrance K. E. A reflectance model for computer graphics // Computer Graphics. August 1981. No. 15(3). P. 307–316.
7. Maxwell J. R., Beard J., Weiner S., Ladd D., Ladd S. Bidirectional reflectance model validation and utilization. Tech. rep. AFAL-TR-73-303, Environmental Research Institute of Michigan (ERIM). October 1973.
8. Stryjewski J., Hand D., Tyler D. et al. Microfacet Scattering Model for Pulse Polarization Ranging // 2009 AMOS Technical Conference. Wailea. Maui. Hawaii. September 2009.
9. Ashikhmin M., Shirley P. An Anisotropic Phong light Reflection Model // Journal of Graphics Tools. Vol. 5. No 2. 2000. P. 25–32.
10. Holzinger M. J., Alfriend K. T., Wetterer C. J., Luu K. K., Sabol C., Hamada K., Harms A. Y. Attitude estimation for unresolved agile space objects with shape model uncertainty // 13th annual Advanced Maui Optical and Space Surveillance (AMOS) Technologies Conference on September 11-14 2012. Maui.
11. Класс Е. В., Ульянов С. А., Шаховский В. В. Моделирование блеска искусственных объектов на орбите Земли // Вестник СибГАУ. Вып. 6(39) (по материалам международной конференции «Околосемная астрономия-2011»). Красноярск. 2011. С. 142–147.
12. Hanssen L. M., Prokhorov A. V. A procedural model of reflection from random rough surfaces // Proc. SPIE. Vol. 7065. 7065W. 2008. P. 1–12.
13. Badyuk K. V., Klass E. V., Shahovski V. V. Monte Carlo simulation of optical reflection from a tree-dimensional rougned model // ICOM-2012. Books of abstracts, Belgrade, Serbia, September 3rd, September 6rd, 2012. Agencija FORMAT, 2012. 182 c.
14. Класс Е. В., Шаховский В. В., Бадюк К. В., Ульянов С. А. Учет шероховатости при расчете отражения оптического излучения в трехмерном объекте. В печати, принята редакцией Оптического журнала 23.04.2013 г.
15. Nayyar S. K., Ikeuchi K., Kanade T. Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. Vol. 13. No. 7. July 1991. P. 611–634.
16. Hall D., Africano J., Archambeault D., Birge B., Witte D., Kervin P. AMOS Observations of NASA's IMAGE Satellite. Proc. AMOS Conference, 2006, Maui, HI.

Ключевые слова: шероховатая поверхность, геометрическая и волновая оптика, метод Монте-Карло.

Статья поступила 4 ноября 2013 г.

Центральный научно-исследовательский Институт химии и механики, г. Москва
 Московский физико-технический институт (Государственный университет), г. Москва

© Класс Е. В., Бадюк К. В., Ульянов С. А., Шаховский В. В., 2013