УДК 621.396

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОКОЛОЗЕМНОЙ АСТРОНОМИИ[1]

Алешин В. П.[2]

MODELING AND RESTORATION OF OPTICAL IMAGES IN NEAR-EARTH ASTRONOMY

Aleshin V. P.

This paper discusses the physical model of the visible and near-IR wave scattering by 3D space objects. The modern computer graphics (induced virtual environment technology) performs the prognosis of optical images. The algorithms for reconstruction of optical images based on generalized Stein estimates use this prognosis as a point of "shrinkage".

Keywords: radiation scattering, rough surface, bispectral processing, "myopic" deconvolution, Stein estimation.

Введение

Основными объектами околоземной астрономии в видимом и ближнем ИК диапазоне являются локализованные 3D объекты без заметного собственного излучения. Подсветка объектов осуществляется Солнцем и/или с помощью лазеров. В статье рассмотрена одна из основных физических моделей формирования оптических изображений для 3D объектов Бекманна-Торренса-Стогрина. Моделируемые в рамках этих моделей изображения используются в дальнейшем как точки «сжатия» в обобщенных оценках Стейна.

1. Физические модели отражений в оптическом и ближнем ИК диапазоне

Рассеянию электромагнитных волн на шероховатых поверхностях посвящен целый ряд монографий [1, 2]. Для гармонических полей и свободного пространства (без внешних источников) уравнения Максвелла преобразуются к волновому уравнению Гельмгольца

$$\nabla \times \nabla \times E + \omega^2 \mu \varepsilon_c E = 0.$$

Одним из наиболее распространенных дальнейших приближений является приближение Кирхгофа [1] (приближение «тангенциальной плоскости»). Приближение Кирхгофа является линейным, что допускает достаточно простое усреднение полей. На рис. 1 приводятся иллюстрации характера отражений (рассеяния) для различных степеней шероховатости.

2. Модель Бекмана – Торренса

Рассмотрим двунаправленную функция отражений (BRDF — Bidirectional Reflectance Distribution Function) $\rho_{bd}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i)$, которая определяется следующим образом.

$$\rho_{bd}(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i) = \frac{dI_s(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i)}{I_i(\theta_i, \phi_i)\cos\theta_i d\omega_i},$$

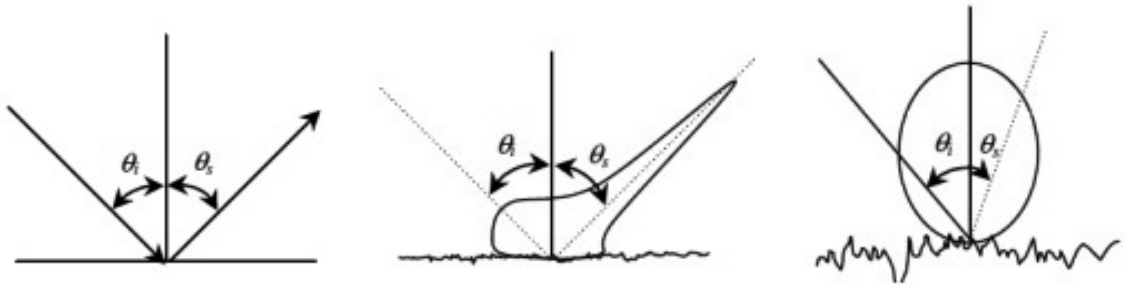
где $dI_s(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i)$ — интенсивность отражения элементарной площадки $d\omega_i$, $I_i(\theta_i, \phi_i)$ — интенсивность падающей волны, θ_s, ϕ_s, θ_i, ϕ_i — углы отражения и падения в сферической системе координат.

Одной из наиболее общих моделей BRDF является модель Бекмана – Торренса – Стогрина [3]

$$\rho_{bd} = \rho_{bd,sp} + \rho_{bd,dd} + \rho_{bd,ud},$$

[1]Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (13-07-00398, 13-07-00367).

[2]Алешин Владимир Петрович, канд. техн. наук, начальник сектора алгоритмов обработки изображений и распознавания ОАО «Научно-производственная корпорация "Системы прецизионного приборостроения"»; e-mail: aleshin_vl@mail.ru.



а) б) в)

Рис. 1. Виды отражений для различных степеней шероховатостей: *а* — когерентное зеркальное отражение, *б* — слабо шероховатая поверхность, *в* — сильно шероховатая поверхность

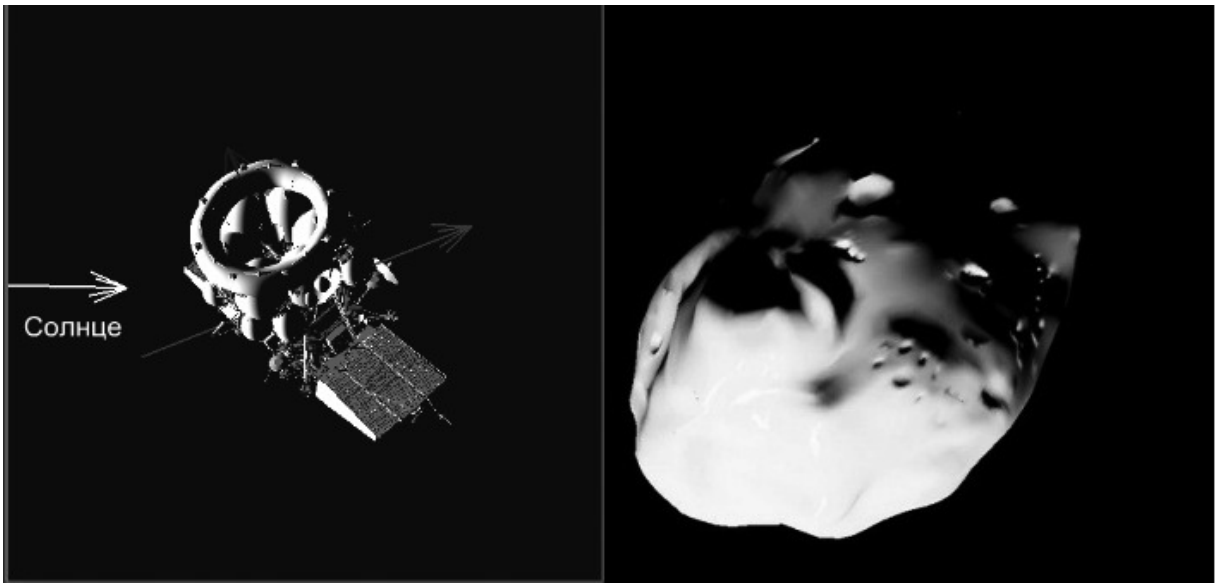


Рис. 2. Примеры моделируемых изображений o_{3d}

где ρ_{bd} — полное двунаправленное отражение, $\rho_{bd,sp}$ — зеркальная компонента, $\rho_{bd,dd}$ — диффузная направленная составляющая, $\rho_{bd,ud}$ — диффузная равномерная составляющая (Ламберто-подобная). Соотношения для функций двунаправленного рассеяния в указанном приближении имеют вид [1, 3]

$$\rho_{bd,sp} = \frac{\rho_s}{\cos\theta_i d\omega_i}\Delta = \frac{|F|^2 e^{-g} S}{\cos\theta_i d\omega_i}\Delta,$$

$$\rho_{bd,dd} = \frac{\mathrm{Im}\left(\hat{n}_b, \hat{n}_b, p\right) S}{\cos\theta_i d\omega_i}\frac{\tau^2}{16\pi}\times \\ \times \sum_{m=1}^{\infty}\frac{g^m e^{-g}}{m!\, m}\exp\left(-\frac{v_{xy}^2\tau^2}{4m}\right),$$

$$\rho_{bd,ud} = a\left(\lambda\right),$$

$$g = \left[\left(2\pi\sigma/\lambda\right)\left(\cos\theta_i + \cos\theta_s\right)\right]^2,$$

где g — функция эффективной шероховатости поверхности (σ — среднеквадратичное отклонение высоты флюктуаций шероховатостей, λ — длина волны излучения), τ — корреляционный коэффициент шероховатостей, $|F|^2$ френелевский коэффициент отражений материала, S — функция затенений, $\mathfrak{I}\left(\hat{n}_b, \hat{n}_b, p\right)$ — коэффициент, учитывающий френелевское отражение и поляризацию p, Δ — функция, задающая угол зеркального отражения.

Ранее доминирующей моделью отражений являлась модель Ламберта-Фонга [4]. С появлением в Open GL 2.0 программируемых аппаратно ускоряемых шейдеров имеется возможность использовать все существующие модели BRDF (в том числе и измеренные). Процесс отрисовки (рендеринга) изображений o_{3d} по трехмерной модели объекта, BRDF и расположению источника освещения и телескопа описан в [5, 6]. На рис. 2 приво-



Рис. 3. Результаты биспектральной обработки (слева один из кадров исходной последовательности, справа — обработанное изображение)

дятся примеры рендеринга изображений o_{3d} (орбитальная станция «Фобос-Грунт» и астероид).

3. Восстановление оптических изображений с помощью классических алгоритмов

Проблеме восстановления изображений посвящено огромное количество публикаций. Здесь продемонстрируем результаты использования классического биспектрального анализа (спекл-интерферометрии) [7–9] и одного из вариантов восстановления при не полностью известной функции рассеяния.

3.1. Восстановление с помощью биспектральной обработки

Любая адаптивная система не позволяет полностью скорректировать искажения, вносимые атмосферой. Поэтому, как правило, во всех телескопах с адаптивной оптикой применяется дополнительная обработка. Одним из общепринятых способов последетекторной обработки адаптивных изображений является использование биспектрального преобразования. Рассматривается следующая общепринятая модель формирования изображений

$$i = o \otimes h + n,$$

где i — получаемые с помощью телескопа изображения, o — изображение объекта, h — функция рассеяния атмосфера-телескоп, n — шумы. Обработка осуществляется на основе анализа усредненного биспектра $B(u, v)$ [7]

$$\tilde{B}(u, v) = \langle B(u, v) \rangle = \langle I(u) I(v) I(-u - v) \rangle ,$$

где $I(\varpi) = \Im\{i\}$ ($\Im$ — Фурье-преобразование) (далее ϖ, u, v — пространственные частоты), $I(u)I(v)I(-u-v)$ — биспектр мгновенного изображения, а угловые скобки $\langle\ \rangle$ обозначают усреднение по ансамблю. В качестве примера на рис. 3 приведено восстановление по последовательности кадров изображений адаптивной оптики орбитальной станции «Фобос-Грунт» (500 кадров).

Как показали проведенные эксперименты, биспектральная обработка достаточно эффективно удаляет шумовой фон вне информативной зоны изображения. Однако, выделение высоких спектральных частот и детализация осуществляется недостаточно эффективно.

3.2. Восстановление с помощью методов максимальной апостериорной вероятности

Следующий класс алгоритмов связан с методом максимальной апостериорной вероятности, который порождает большое число

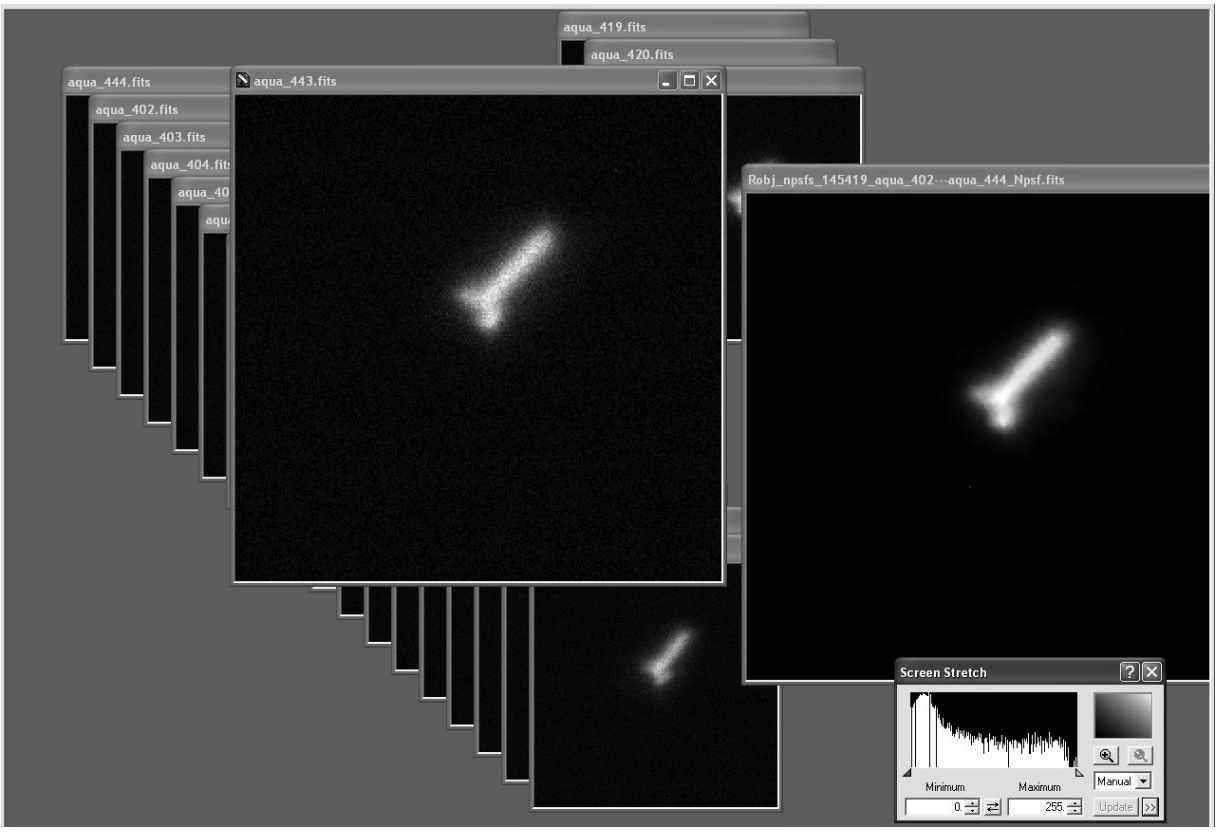


Рис. 4. Обработка изображений АОС ИСЗ «Aqua» (справа обработанное изображениие, слева — один из исходных кадров)

вариантов [9]. Хорошо известно, что в общем случае задача при неизвестных функциях рассеяния является неоднозначной и требует дополнительных априорных ограничений. На данном этапе мы остановились на алгоритме «адаптивного восстановления изображений» AIDA) [11, 12]. Алгоритм основан на поиске максимального значения апостериорной вероятности.

$$f(o,h|\,i,a) = \frac{f(i|\,o,h,a)f(o|\,a)f(h|\,a)}{f(i|\,a)},$$

где $(f(*|\,*)$ — условные плотности вероятности. Максимум ищется по изображению объекта — «o» и последовательности неизвестных функций рассеяния точки «h». Ограничения на класс решений Z задаются с помощью априорных распределений $f(o|\,a)f(h|\,a)$ и дополнительных априорных параметров «a». Эти параметры определяют априорные характеристики объекта и изображения. Обычно рассматривается целевая функция, равная минус логарифму от функции апостериорной вероятности

$$J(*|\,*) = -\ln(f(o,h|\,i,a))$$

$$[\hat{o},\hat{h}]_Z = \arg\min_{[\hat{o},\hat{h}]_Z}\{J(o,\,h|\,i,a)\} =$$

$$= \arg\min_{[\hat{o},\hat{h}]_Z}\{J_n(i|\,o,h,a) + J_o(o|\,a) + J_h(h|\,a)\}.$$

Вычислительный процесс заключается в итерационном вычислении оценок функций рассеяния и затем оценки изображения объекта. Процесс может повторяться и останавливается либо по числу итераций, либо по режиму насыщения (когда целевые функции перестают заметно изменяться). Данный алгоритм не гарантирует достижения глобального экстремума и может расходиться. Очень важно правильное начальное приближение («o» и «h»). Поиск экстремума на каждой итерации обеспечивается с помощью метода сопряженных градиентов (рис. 4). Термин «близорукий» он получил в связи с необходимостью задания приближения для усредненной функции рассеяния.

Алгоритм приводит к сглаживанию углов на объектах. Зафиксированы случаи расхождения вычислительного процесса (при широкой усредненной функции рассеяния)

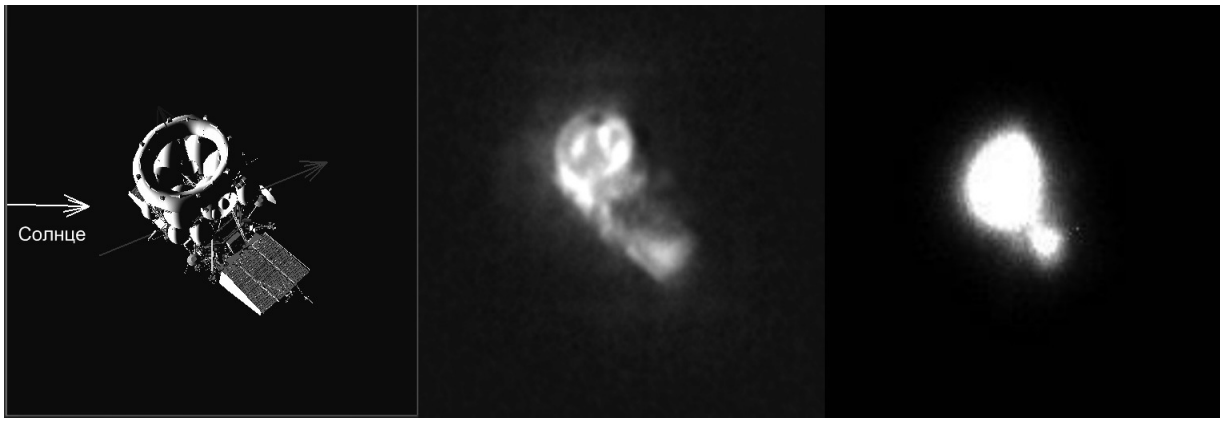


Рис. 5. Пример обработки обобщенным алгоритмом Стейна – Бергера

4. Восстановление изображений с помощью обобщенных тестов Стейна

В современных прикладных задачах доминирующим статистическим методом является метод наименьших квадратов (Лежандр, 1806 г.) соответствующий методу максимального правдоподобия для линейной гауссовой статистической модели. Разновидностью метода максимального правдоподобия является выше упомянутый метод максимальной апостериорной вероятности. Через полтора века после Лежандра в статистике Стейном [13] был получен «шоковый» (термин статистиков) результат, известный также как парадокс Стейна. При размерности пространства оцениваемых параметров больше 2 (двух) метод максимального правдоподобия не является допустимым, то есть существуют равномерно лучшие «сжимающие» оценки [14]. Улучшение оценок проявляется наиболее заметно в случае большой размерности задачи и наличия хорошего приближения, например, o_{3d}. В случае восстановления изображений, обобщенная оценка Джеймса – Стейна [14] $\hat{o}_{JS}$ имеет следующий вид (здесь используется вариант оценки, использующий сжатие к точке o_{3d})

$$\hat{o}_{JS} = o_{3d} + \left(1 - \frac{c\sigma^2}{\|\hat{o}_{ml} - o_{3d}\|^2}\right)_+ (\hat{o}_{ml} - o_{3d}),$$

где $\hat{o}_{ml} = \arg\max\left(\ln\left(f\left(x|\, o\right)\right)\right)$ — оценка максимального правдоподобия, o_{3d} — прогноз, смоделированный на основе метода индуцированной виртуальной среды, $\|\hat{o}_{ml} - o_{3d}\|^2$ — норма в L_2, знак $+$ соответствует замене отрицательных значений на 0.

Если $\hat{o}_{ml} \in N_k\left(o, \sigma^2\mathbf{I}\right)$, где N_k — нормальное распределение размерности k, σ^2 — дисперсия, $\mathbf{I}$ — единичная матрица размерности k, то $c = (k-2)$ для классической оценки Джеймса – Стейна. Доказано в [14], что при $k > 2$ эта оценка имеет лучший для всех o квадратичный риск $R\left(o, \hat{o}_{JS}\right) = \left\langle \|\hat{o}_{JS} - o\|^2 \right\rangle$ по сравнению с оценкой максимального правдоподобия $\hat{o}_{ml}$. Для линейной модели $i = o \otimes h + n$ классическая оценка максимального правдоподобия

$$\widehat{o}_{ml} = \left(N'\left(HH'\right)^{-1}N\right)^{-1} N'\left(HH'\right)^{-1} i,$$

где N — корреляционная матрица шумов n, H — матрица, соответствующая функции рассеяния h в циклическом представлении, $(*')$ знак транспонирования. Обобщенная оценка Джеймса – Стейна в данном случае имеет вид

$$\hat{o}_{JS} = o_{3d} + \left(1 - \frac{c\sigma^2}{\xi}\right)_+ (\hat{o}_{ml} - o_{3d}),$$

$$\xi = \left(\hat{o}_{ml} - o_{3d}\right)' N'\left(HH'\right)^{-1} N\left(\hat{o}_{ml} - o_{3d}\right).$$

Был рассмотрен один из вариантов тестов Стейна — эмпирическая байесова оценка Бергера $\widehat{o}_{bs}$ [15]. Вычисления проводились в спектральном пространстве

$$\widehat{o}_{bsi} = \hat{M}_i \widehat{o}_{mli} + \left(1 - \hat{M}_i\right) o_{3di},$$

где $\widehat{o}_{bsi}$ — i-я спектральная компонента оценки $\widehat{O}_{bsi} = \Im\left\{\widehat{o}_{bs}\right\}_i$ ($\Im$ — Фурье-преобразование). Аналогично O_{3di} — i-я спектральная компонента изображения, сформированного по 3D модели o_{3d}. $\widehat{o}_{mli}$ — измеренная спектральная компонента. Подробности формирования коэффициента сжатия $\hat{M}_i$ приведены в [15]. На рис. 5 иллюстрируются результаты численного эксперимента (справа — один из обрабатываемых кадров)

Из всех проведенных вычислительных экспериментов данные результаты представляются наиболее эффективными.

Автор выражает признательность Новгородцеву Д. Д. за программы 3D графики.

Литература

1. *Beckmann P., Spizzichino A.* The Scattering of Electromagnetic Wave from Rough Surfaces. Norwood, USA: reprinted ARTECH HOUSE, 1987, Originally published Pergamon Press, 1963. 497 p.
2. *Бакут П. А., Мандросов В. И., Матвеев И. Н., Устинов Н. Д.* Теория когерентных изображений. М.: Радио и связь, 1987. 259 с.
3. *He X. D., Torrance K. E, Sillion F. X, Greenberg D. P.* A Comprehensive Physical Model for Light Reflection // Computer Graphics. 1991 Vol. 25. № 4. P. 175–186.
4. *Cook R. L., Torrance K. E.* A Reflectance Model for Computer Graphics // ACM Transaction on Graphics. 1982. Vol. 1. No. 1. P. 7–24.
5. *Алешин В. П., Клименко С. В., Лавров В. В., Новгородцев Д. Д.,* Моделирование оптических изображений и фотометрических сигналов с помощью физически-аккуратного рендеринга и технологии индуцированного виртуального окружения // Вопросы радиоэлектроники. 2007. №4. С. 73–90.
6. *Новгородцев Д. Д., Алешин В. П., Гришин Е. А., Юрасов В. С.* Методы и программы прогноза оптических изображений и фотометрических сигналов космических аппаратов (КА) // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. № 3. Т. 16. С. 18–29.
7. *Lohmann A. W., Weigelt G., Wiritzer B.,* Speckle masking in astronomy – Triple correlation theory and applications // Applied Optics. Vol. 22. 1983, P. 4028–4037.
8. *Алешин В. П., Балега Ю. Ю., Максимов А. Ф., Комаринский С. Л., Новгородцев Д. Д.* Спекл-интерферометрия геостационарных ИСЗ: реальность и перспективы // Международная конференция «Околоземная астрономия 2011». Красноярск. Вестник СИБГАУ. 2011. Вып. 6(39). С. 154–158.
9. Blind image deconvolution. Theory and Applications / Ed. by P. Campisi, K. Egiazarian. Taylor & Francis Group, LLC CRC Press, 2007. 473 p.
10. *Lawrence T. W., Goodman D .M., Fitch J. P.* Speckle imaging of satellites at the U.S. Air Force Maui Optical Station // Appl. Opt. 1992. Vol. 31. P. 6307–6321.
11. *Hom E. F. Y., Marchis F., Lee T. K., Haase S., Agards D. A., Sedat J. W.* AIDA: an adaptive image deconvolution algorithm with application to multi-frame and three-dimensional data // J. Opt. Soc. Am. A. 2007. Vol. 24. No. 6. P. 1580–1599.
12. *Mugnier L. M., Fusco T., Conan J.-M.* MISTRAL: a myopic edge-preserving image restoration method, with application to astronomical adaptive-optics-corrected long-exposure images // J. Opt. Soc. Am. A. Vol. 21. P. 1841–1854.
13. *Stein C.* Inadmissibility of the usual estimator for the mean of a multivariate normal distribution // In Proc. 3th Berkeley Sympos. Math. Statist. and Prob., Vol. I. Univ. California Press, Berkeley, Calif. 1956. P. 197–206.
14. *James W., Stein C.* Estimation with quadratic loss // In Proc. 4th Berkeley Sympos. Math. Statist. and Prob., Vol. I. Univ. California Press, Berkeley, Calif. 1961. P. 361–379.
15. *Zhigen Z.* Double shrinkage empirical Bayesian estimation for unknown and unequal variances // Statistics and Its Interface. Vol. 3. 2010. P. 533–541.

Ключевые слова: рассеяние излучения, шероховатая поверхность, биспектральная обработка, «близорукая» деконволюция, оценка Стейна.

Статья поступила 12 ноября 2013 г.

ОАО «Научно-производственная корпорация “Системы прецизионного приборостроения”», г. Москва

© Алешин В. П., 2013