

ОЦЕНКА КООРДИНАТ БЛИЗКИХ АСТЕРОИДОВ НА ПЗС ИЗОБРАЖЕНИИ

Н. С. Сокови́кова
Аспирант*

E-mail: nataly.sokovikova@gmail.com

В. Е. Саваневич

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: vadyam@savanevych.com

М. М. Безкровный

Старший преподаватель

Кафедра компьютерных систем и сетей

Запорожский институт экономики и

информационных технологий

ул. Кияшка, 16-Б, г. Запорожье, Украина

E-mail: bezkrovonii@gmail.com

С. В. Хламов*

E-mail: serik2010@yandex.ua

*Кафедра электронно-вычислительных машин

Харьковский национальный университет

радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

У статті розроблено метод оцінки місцезнаходження декількох близько розташованих об'єктів на ПЗС-кадрі. У якості моделі форми зображення об'єктів використовується піксельна модель Гаусса, що описує розподіл яскравості пікселів ПЗС-кадра при наявності у ньому зображення об'єктів. Метод базується на МНК-оцінці параметрів зображень об'єктів. Мінімізація суми квадратів нев'язок здійснюється за допомогою методу Левенберга-Марквардта

Ключові слова: близькі об'єкти, статистично залежні зображення, оцінка параметрів зображень, астероїди

В статье разработан метод оценки местоположения нескольких близко расположенных объектов на ПЗС-кадре. В качестве модели формы изображения объектов используется пиксельная модель Гаусса, описывающая распределение яркости пикселей ПЗС-кадра при наличии в нем изображения объектов. Метод основан на МНК-оценке параметров изображений объектов. Минимизация суммы квадратов невязок осуществляется с помощью метода Левенберга-Марквардта

Ключевые слова: близкие объекты, объекты, статистически зависимые изображения, оценка параметров изображений, астероиды

1. Введение

Рост интереса к изучению астероидов связан с проблемами астероидно-кометной опасности [1]. Наблюдение и изучение астероидов, в том числе сближающихся с Землей, в основном проводится с помощью оптических телескопов, оснащенных ПЗС-матрицами. При этом к точности измерений координат астероидов выдвигаются высокие требования – ошибка должна быть менее 1 угловой секунды [2].

Условия наблюдения астероидов можно считать сложными. Это обусловлено, например: слабым уровнем сигналов от астероидов; наличием на кадрах неравномерно распределенного фона, форма распределения которого может меняться на одной серии кадров; размытием изображения астероида из-за турбулентности атмосферы; искажением изображения астероида вследствие аберраций оптической системы. Одной из особенностей наблюдения объектов является отсутствие отличий между изображением астероидов и изображением звезд на отдельном кадре.

В настоящее время существенно возросла проникающая способность оптических систем, что увеличило плотность наблюдаемых объектов. Ряд задач приводит к необходимости наблюдения в регионах небесной сферы, густонаселенных небесными объектами. Учитывая факт все чаще встречающийся большой плотности расположения небесных объектов на ПЗС-кадре, а также связанное с ним появление компактных групп

объектов со статистически зависимыми изображениями, сложность достижения требуемой точности наблюдения близких объектов значительно возрастает.

Все это делает актуальной задачу разработки вычислительных методов высокоточной оценки местоположения близких объектов со статистически зависимыми изображениями на дискретном изображении, учитывающих основные условия наблюдения исследуемых объектов и особенности формирования их изображений.

2. Анализ литературных данных

Существует две основные группы методов оценки параметров местоположения астероида на ПЗС-кадре. К первой группе относятся метод принятия в качестве координат астероида координат локального максимума его изображения [3] и метод определения координат центра объекта, как координат середины пятна, засвеченного объектом на ПЗС-матрице [4].

Вторая группа методов использует информацию о закономерностях распределения сигнальных фотонов по изображению объекта и основана на «аппроксимации сигналов от небесных объектов функцией рассеяния точки» (PSF-fitting) [3, 5 – 8]. Наиболее часто в качестве модели распределения фотонов по изображению небесного объекта используются различные варианты двумерных гауссоид [5 – 9], модели

Моффата [6, 8, 10] и Лоренца [8, 10]. Общее количество используемых моделей достаточно велико [8].

При оценке параметров объектов не стоит забывать о наличии помеховой составляющей сигнала, так называемой шумовой подложки. В методах второй группы считается, что учет шумовой составляющей и ее компенсация производится на предварительном этапе [3] или, что шумовые фотоны отделяются от изображения объекта в соответствии с принятой моделью сигналов и помех [9]. Методы компенсации шумовой подложки приведены в [11].

Значительная часть методов оценки параметров местоположения объекта на ПЗС-кадре не учитывает возможного пересечения изображений нескольких близкорасположенных объектов, иными словами статистической зависимости изображений близких объектов, либо не учитывает основные особенности формирования ПЗС-изображений небесных объектов, либо не учитывает закономерности распределения шумовых фотонов на изображении объекта и в его окрестности.

3. Постановка задачи

Предполагается, что объекты обнаружены, а их количество Q известно. Изображения объектов находятся в строке внутрикадровой обработки (СВКО) – множестве Ω_{SIFP} пикселей, в которых предполагается наличие изображения Q статистически зависимых объектов. Под статистически зависимыми объектами понимают возможное пересечение их изображений на ПЗС-кадре. Количество пикселей, принадлежащих исследуемому СВКО считается равным N_{SIFP} . Альтернативно СВКО может быть задан координатами и размерами соответствующего строка.

Шумовая подложка может считаться как удаленной из изображения объекта, так и подлежащей оценке и удалению.

Наблюдению, регистрации доступны яркости A_{ikt}^* пикселей СВКО (пикселей множества Ω_{SIFP}). Начальные приближения координат объектов на t -м кадре x_{jt}, y_{jt} (где $j=1, Q$) соответствуют координатам привязки центра пикселя, в котором находится пик изображения исследуемых объектов.

Совокупность оцениваемых параметров для каждого из Q гипотетических небесных объектов включает в себя: A_{Gjt} – теоретическую амплитуду изображения j -го гипотетического объекта, $x_{jt}(\Theta), y_{jt}(\Theta)$ – координаты j -го гипотетического объекта, σ_{Gjt} – параметр формы модели изображения j -го гипотетического объекта. С учетом параметров шумовой подложки, количество оцениваемых параметров, будет равным $4Q + 3$:

$$\begin{aligned} \Theta_{SH} = & (A_{noise}, B_{noise}, C_{noise}, x_{It}(\Theta_{SH}), y_{It}(\Theta_{SH}), \\ & A_{G1t}, \sigma_{G1t}, \dots, x_{nt}(\Theta_{SH}), y_{nt}(\Theta_{SH}), \\ & A_{Gnt}, \sigma_{Gnt}, \dots, x_{Qt}(\Theta_{SH}), y_{Qt}(\Theta_{SH}), \\ & A_{GQt}, \sigma_{GQt}) = (\theta_1, \dots, \theta_n, \dots, \theta_{4Q+3}) \end{aligned} \quad (1)$$

где θ_n – n -й оцениваемый параметр.

Необходимо разработать вычислительный метод, позволяющий на ПЗС-кадре оценивать указанные

выше параметры изображения каждого из Q гипотетических объектов. Критерием точности оценки выбран минимум суммы квадратов невязок между яркостями пикселей и их модельными (теоретическими) значениями в СВКО:

$$F_{\Delta AG1}(\Theta) = \sum_{i,k}^{N_{SIFP}} (A_{ikt}^* - A_{ikt})^2 \xrightarrow{\Theta} \min. \quad (2)$$

4. Гауссова модель изображения объектов на ПЗС-кадре

В качестве модели формы изображения близких объектов используется пиксельная модель Гаусса [3, 5, 7]:

$$\begin{aligned} A_{ikt} = & A_{noise} x_{it} + B_{noise} y_{kt} + C_{noise} + \sum_{j=1}^Q \frac{A_{Gjt}}{2\pi\sigma_{Gjt}^2} \times \\ & \times \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{Gjt}^2} [(x_{it} - x_{jt}(\Theta_{SH}))^2 + (y_{kt} - y_{jt}(\Theta_{SH}))^2] \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где A_{ikt} – теоретическая яркость ik -го пикселя ПЗС-матрицы, на t -ом ПЗС-кадре;

$A_{noise}, B_{noise}, C_{noise}$ – модельные интегральные параметры шумовой подложки;

A_{Gjt} – теоретическая амплитуда изображения j -го гипотетического объекта на t -ом ПЗС-кадре;

$x_{jt}(\Theta_{SH}), y_{jt}(\Theta_{SH})$ – координаты j -го гипотетического объекта на t -ом ПЗС-кадре;

σ_{Gjt} – параметр формы модели изображения j -го гипотетического объекта на t -ом ПЗС-кадре;

Q – количество гипотетических объектов в исследуемом СВКО;

x_{it}, y_{kt} – координаты привязки центра ik -го пикселя t -го кадра ПЗС-матрицы;

Θ_{SH} – вектор оцениваемых параметров изображений объектов.

В модели форма изображения и соответствующие яркости пикселей каждого объекта в СВКО распределены по нормальному закону, а также учитывается наличие шумовой подложки.

При условии предварительного вычитания шумовой подложки из изображения объекта, модель Гаусса (2) может быть использована в виде:

$$\begin{aligned} A_{ikt} = & C_{noise}^{residual} + \sum_{j=1}^Q \frac{A_{Gjt}}{2\pi\sigma_{Gjt}^2} \times \\ & \times \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{Gjt}^2} [(x_{it} - x_{jt}(\Theta))^2 + (y_{kt} - y_{jt}(\Theta))^2] \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $C_{noise}^{residual}$ – остаточные значения шумовой подложки.

5. Вычислительный метод оценки положения объекта на дискретном изображении

В случае предварительного вычитания шумовой подложки, сумма квадратов невязок выглядит следующим образом:

$$F_{\Delta AG1}(\Theta) = \sum_{i,k}^{N_{SIFP}} \Delta A_{m(i,k)}^2, \quad (6)$$

где

$$\Delta A_{m(i,k)} = A_{ikt}^* - C_{noise}^{residual} - \sum_{j=1}^Q \frac{A_{Gjt}}{2\pi\sigma_{Gjt}^2} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_{Gjt}^2} [(x_{it} - x_{jt}(\Theta))^2 + (y_{kt} - y_{jt}(\Theta))^2]\right\}, \quad (7)$$

Θ – вектор оцениваемых параметров.

Минимизация квадратичной формы $F_{\Delta AG1}(\Theta)$ осуществляется при помощи метода Левенберга-Марквардта [12], предназначенного для оптимизации параметров нелинейных регрессионных моделей. Данный метод является наиболее распространенным методом минимизации квадратичных форм.

Для реализации метода Левенберга-Марквардта используется матрица Якоби (8). Элементами матрицы $J_{\Delta AG1}$ являются частные производные невязок $\Delta A_{m(i,k)}$ между теоретической и экспериментальной яркостью пикселя по оцениваемым параметрам (элементам вектора оцениваемых параметров Θ) в каждом пикселе множества Ω_{SIFP} .

Невязка $\Delta A_{m(i,k)}$ рассчитывается для множества пикселей Ω_{SIFP} , принадлежащих исследуемому СВКО.

При этом, m -ой строке матрицы Якоби $J_{\Delta AG1}$ соответствует значение производных по всем оцениваемым параметрам от невязки в m -ом пикселе множества Ω_{SIFP} , а n -ый столбец матрицы содержит производные по n -ому параметру вектора оцениваемых параметров Θ по невязкам во всех пикселях множества Ω_{SIFP} .

Далее считается, что номер пикселя m в множестве Ω_{SIFP} является функцией $m(i,k)$ от номеров пикселя на кадре.

Исходя из вышеизложенного, матрица Якоби имеет вид:

$$J_{\Delta AG1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta A_{1(1,1)}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{1(1,1)}}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{1(1,1)}}{\partial \theta_{4Q+1}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Delta A_{m(i,k)}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{m(i,k)}}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{m(i,k)}}{\partial \theta_{4Q+1}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Delta A_{N_{SIFP}(i,k)}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{N_{SIFP}(i,k)}}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{N_{SIFP}(i,k)}}{\partial \theta_{4Q+1}} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Выражения для частных производных невязки $\Delta A_{m(i,k)}$ между теоретической и экспериментальной яркостью пикселя по: теоретической амплитуде A_{Gjt} изображения объекта, параметру σ_{Gjt} формы модели изображения объекта, параметрам $x_{jt}(\Theta), y_{jt}(\Theta)$ (координаты j -го гипотетического объекта на t -ом ПЗС-кадре) имеют следующий вид:

$$\frac{\partial \Delta A_{m(i,k)}}{\partial A_{Gjt}} = -\sum_{j=1}^Q \frac{1}{2\pi\sigma_{Gjt}^2} \exp\left\{-\frac{(x_{it} - x_{jt}(\Theta))^2 + (y_{kt} - y_{jt}(\Theta))^2}{2\sigma_{Gjt}^2}\right\}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \Delta A_{m(i,k)}}{\partial \sigma_{Gjt}} = -\frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^Q \frac{A_{Gjt}}{\sigma_{Gjt}^5} \times \exp\left\{-\frac{(x_{it} - x_{jt}(\Theta))^2 + (y_{kt} - y_{jt}(\Theta))^2}{2\sigma_{Gjt}^2}\right\} \times \quad (10)$$

$$\times \left((x_{it} - x_{jt}(\Theta))^2 + (y_{kt} - y_{jt}(\Theta))^2 \right) + \frac{A_{Gjt}}{\pi\sigma_{Gjt}^3} \exp\left\{-\frac{(x_{it} - x_{jt}(\Theta))^2 + (y_{kt} - y_{jt}(\Theta))^2}{2\sigma_{Gjt}^2}\right\},$$

$$\frac{\partial \Delta A_{m(i,k)}}{\partial x_{jt}(\Theta)} = -\frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^Q \frac{A_{Gjt} (2x_{it} - 2x_{jt})}{\sigma_{Gjt}^4} \times \exp\left\{-\frac{(x_{it} - x_{jt}(\Theta))^2 + (y_{kt} - y_{jt}(\Theta))^2}{2\sigma_{Gjt}^2}\right\}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \Delta A_{m(i,k)}}{\partial y_{jt}(\Theta)} = -\frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^Q \frac{A_{Gjt} (2y_{kt} - 2y_{jt})}{\sigma_{Gjt}^4} \times \exp\left\{-\frac{(x_{it} - x_{jt}(\Theta))^2 + (y_{kt} - y_{jt}(\Theta))^2}{2\sigma_{Gjt}^2}\right\}. \quad (12)$$

Частная производная невязки $\Delta A_{m(i,k)}$ между теоретической и экспериментальной яркостью пикселя по параметру $C_{noise}^{residual}$ (остаточные значения шумовой подложки) выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial \Delta A_{m(i,k)}}{\partial C_{noise}^{residual}} = -1. \quad (13)$$

Аналогично матрице Якоби (8) формируется матрица Якоби для суммы квадратов невязок при наличии шумовой подложки. При этом сумма квадратов невязок, подлежащая минимизации, будет выглядеть так:

$$F_{\Delta AG2}(\Theta_{SH}) = \sum_{i,k}^{N_{SIFP}} \Delta A_{SHm(i,k)}^2, \quad (14)$$

где

$$\Delta A_{SHm(i,k)} = \left\{ A_{ikt}^* - A_{noise} x_{it} - B_{noise} y_{kt} - C_{noise} - \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^Q \frac{A_{Gjt}}{\sigma_{Gjt}^2} \times \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_{Gjt}^2} ((x_{it} - x_{jt}(\Theta_{SH}))^2 + (y_{kt} - y_{jt}(\Theta_{SH}))^2)\right\} \right\}, \quad (15)$$

Θ_{SH} – вектор оцениваемых параметров изображений объектов:

$$\Theta_{SH} = (A_{noise}, B_{noise}, C_{noise}, x_{1t}, y_{1t}, A_{G1t}, \sigma_{G1t}, \dots, x_{nt}, y_{nt}, A_{Gnt}, \sigma_{Gnt}, \dots, x_{Qt}, y_{Qt}, A_{GQt}, \sigma_{GQt}) = (\theta_1, \dots, \theta_j, \dots, \theta_{4Q+3}). \quad (16)$$

Матрица Якоби с учетом шумовой подложки имеет аналогичный вид.

Как с учетом шумовой подложки (14), так и без нее (6) частные производные от суммы квадратов невязок по оцениваемым параметрам выглядят идентично и соответствуют выражениям (9), (10), (11) и (12).

В данном случае, выражения для частных производных по параметрам шумовой подложки для невязки (15) между теоретической и экспериментальной яркостью пикселя можно представить таким образом:

$$\frac{\partial \Delta_{SH} A_{m(i,k)}}{\partial A_{noise}} = -x_{it} ; \quad (17)$$

$$\frac{\partial \Delta_{SH} A_{m(i,k)}}{\partial B_{noise}} = -y_{kt} ; \quad (18)$$

$$\frac{\partial \Delta_{SH} A_{m(i,k)}}{\partial C_{noise}} = -1 . \quad (19)$$

6. Выводы

Разработан вычислительный метод оценки параметров местоположения Q близких объектов по статистически зависимым пересекающимся ПЗС-изображениям. В качестве модели формы изображения объектов используется пиксельная модель Гаусса, которая описывает распределение яркости пикселей

ПЗС-кадра при наличии в нем изображения статистически зависимых объектов с заданными параметрами.

В созданном методе, предлагаемая к использованию пиксельная модель Гаусса (на изображении ПЗС-кадра) учитывает наличие шумовой подложки и позволяет оценивать ее параметры, а в случае ее предварительного вычитания – параметры остаточной шумовой составляющей.

Использование в предлагаемом методе стандартного АЛМ позволяет быстро и с наименьшими затратами реализовать на практике предлагаемый метод при необходимости при разработке систем автоматического определения положения объектов на кадрах видеоряда.

Метод, прежде всего, планируется к использованию и может быть использован для оценки положения близких статистически зависимых объектов в программах автоматизированного обнаружения астероидов [13].

В дальнейшем, целесообразно провести экспериментальные исследования разработанного метода, например, в рамках мероприятий по его возможному использованию в программном комплексе автоматизированного обнаружения астероидов и комет CoLiTec [13, 14].

Литература

1. Ericson, J. Asteroids, comets, and meteorites. Cosmic Invaders of the Earth [Текст]/ J. Ericson // New York: Fact on File. – 2003.
2. IAU Minor Planet Center. Guide to Minor Body Astrometry [Электронный ресурс] – Режим доступа: \www/ URL <http://www.minorplanetcenter.net/iau/info/Astrometry.html#quality> – Загл. с экрана.
3. Harris, W. E. A comment on image detection and the definition of limiting magnitude [Текст]/ W. E., Harris // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 1990. – №102. – pp. 949-953.
4. Gubanov, V. S. Precision estimate of CCD positional observations [Текст]/ V. S., Gubanov, I. I., Kumkova, E. I., Malakhov // Cinematics and Physics of Celestial Bodies. – 1990. – №6/2. – pp. 83-90.
5. Kouprianov, V. V. Distinguishing features of CCD astrometry of faint GEO objects [Текст]/ V. V. Kouprianov // Advances in Space Research. – 2008. – Vol. 41, Issue 7. – pp. 1029 – 1038.
6. Bauer, T. Improving the Accuracy of Position Detection of Point Light Sources on Digital Images [Текст]/ T. Bauer // Proceedings of the IADIS Multiconference, Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing, Algarve, Portugal. – June 20-22 2009. – pp. 3-15.
7. Mighell, K. J. Stellar photometry and astrometry with discrete point spread functions [Текст]/ K. J. Mighell // Monthly Notices of Royal Astronomical Society. – 2005. – Vol. 361. – pp. 861 – 878.
8. Zacharias, N. UCAC3 pixel processing [Текст]/ N. Zacharias // The Astronomical Journal. – 2010. – №139. – pp. 2208–2217.
9. Veiga, C. H. Astrometric position determination of digitized images of natural satellites [Текст]/ C. H. Veiga, R. Vieira Martins // Astronomy and Astrophysics Supplement Series. – 1995. – v.111. – pp. 387-392.
10. Izmailov, I. S. Astrometric CCD observations of visual double stars at the Pulkovo Observatory [Текст]/ I. S. Izmailov, M. L. Khovricheva, M. Yu. Khovrichev et al. // Astronomy Letters. – 2010. – Vol. 36, Issue 5 – pp. 349 – 354.
11. Саваневич, В. Е. Оценка координат астероида на дискретном изображении [Текст]/ В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, А. М. Кожухов, Е. Н. Диков // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 162. – С. 78 – 86.
12. Алгоритм Левенберга-Марквардта [Электронный ресурс] – Режим доступа: \www/ URL: <http://www.katy.ru/science/LMA.pdf> – 8.06.2004г. – Загл. с экрана.
13. Вавилова, И. Б. Астроинформационный ресурс Украинской виртуальной обсерватории (УкрВО): объединенный архив данных наблюдений, научные задачи и программное обеспечение [Текст]/ И. Б. Вавилова, Л. К. Пакуляк, В. Е. Саваневич и др. // Кинематика и физика небесных тел. – 2012. – т.28. – №2. – С. 59–80.
14. Саваневич, В.Е. Программа CoLiTec автоматизированного обнаружения небесных тел со слабым блеском [Текст] / В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, А. М. Кожухов, Е. Н. Диков, В. П. Власенко // Космічна наука і технологія. – 2012. – т.18. – №1. – С. 39 – 46.