

УДК 519.6:004.932

М.М. Безкровный¹, С.В. Хламов², В.Е. Саваневич^{2,3}, Н.С. Соковикова²¹Запорожский институт экономики и информационных технологий, Запорожье²Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков³Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев

ПИКСЕЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ С ИЗОБРАЖЕНИЕМ, СМАЗАННЫМ СОБСТВЕННЫМ ДВИЖЕНИЕМ

Разработан вычислительный метод оценки местоположения объекта на серии ПЗС-изображений, смазанных его собственным движением. Метод основан на нелинейной МНК-оценке параметров изображений объектов. Оптимизационная задача минимизации суммы квадратов невязок решается методом Левенберга-Марквардта. При этом считается, что яркости пикселей изображения каждого гипотетического объекта в СВКО распределены в соответствии со смесью нормальных законов. Аппроксимация изображения объекта, смазанного собственным движением, смесью гауссоид обеспечивает достаточную точность оценки местоположения протяжённого объекта при использовании данного метода. Метод может быть использован в программах автоматизированного обнаружения малых тел солнечной системы при оценке местоположения объектов, имеющих большие скорости видимого движения, например, астероидов, сближающихся с Землей.

Ключевые слова: обработка ПЗС-изображений, протяжённый объект, оценка местоположения, CoLiTec.

Введение

Рост интереса к изучению астероидов связан с проблемами астероидно-кометной опасности [1]. Данная проблема [2, 3] в XXI веке стала актуальной темой научных конференций, регулярно рассматривается ООН, правительствами и парламентами ведущих стран мира, влиятельными неправительственными организациями.

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 [4]. Количество известных потенциально опасных объектов, сближающихся с Землей, быстро растёт. Однако информации по-прежнему не достаточно, а методы ее получения далеки от совершенства.

В настоящее время существенно увеличилась плотность наблюдаемых объектов, возросла проникающая способность оптических систем, стало более вероятным появление на изображении компактных групп объектов, смазанных собственным движением. Учитывая данный факт, сложность достижения требуемой точности наблюдения протяжённых объектов значительно возрастает. Все это делает актуальной задачу разработки вычислительных методов высокоточной оценки местоположения объектов с протяжённым изображением, учитывающих основные условия наблюдения исследуемых объектов и особенности формирования их изображений.

Анализ литературных данных. Среди методов оценки параметров местоположения астероида

на ПЗС-кадре можно выделить две основные группы. К первой относятся метод принятия координат локального максимума изображения астероида в качестве его координат и метод определения координат центра объекта, как координат середины пятна, засвеченного объектом на ПЗС-матрице [5].

Вторая группа методов основана на «аппроксимации сигналов от небесных объектов функцией рассеяния точки» (PSF-fitting) [6 – 8] и использует информацию о закономерностях распределения сигнальных фотонов по изображению объекта.

Суть метода аппроксимации функцией рассеяния точки (PSF, point spread function) в случае объектов с протяжённым изображением состоит в использовании модели изображения объекта, вытянутого вдоль направления своего движения. Количество используемых моделей распределения фотонов по изображению небесного объекта достаточно велико [8]. Однако модель изображения объекта конструируется на основе одной из стандартных симметричных PSF для точечных источников. Например, PSF Гаусса (различные варианты двумерных гауссоид) [6 – 8], модели Моффата [6, 8, 9] или Лоренца [8, 9]. Методы компенсации помеховой составляющей сигнала приведены в [10].

Известен метод оценки местоположения нескольких объектов, изображения которых пересекаются и находятся в статистической зависимости друг от друга [11]. Однако этот метод не учитывает того, что данные изображения объектов во время экспозиции могут быть смазаны собственным движением объектов, т. е. не учитывает закономерности распределения шумовых фотонов на изображении объекта и в его окрестности.

Постановка задачі

Изображения объектов при времени экспозиции Δ_τ могут быть смазаны собственным движением. В связи с этим изображения объектов имеют форму холма, вытянутого вдоль направления их видимого движения. Изображения таких объектов можно назвать протяженными, иногда и сами объекты называют протяженными в этом контексте.

Считается, что количество объектов известно и равно Q . Изображения протяженных объектов находятся в стробе внутрикадровой обработки (СВКО). Причем, СВКО – это множество N_{SIFP} из Ω_{SIFP} пикселей, в которых предполагается наличие изображения Q протяженных объектов. СВКО может быть задан координатами и размерами соответствующего строба.

Помеховая подложка изображения может считаться как удаленной из изображения объекта, так и подлежащей оценке и удалению. Наблюдению доступны яркости $A_{ikt\tau}^*(x_{it}, y_{kt}, \Theta_\tau)$ пикселей СВКО (пикселей множества Ω_{SIFP}).

Для оценки местоположение объекта выполняется аппроксимация изображения объекта, смазанного собственным движением, упорядоченной смесью двумерных гауссоид [12, 13]. В рамках используемой пиксельной модели изображения гауссоиды данной смеси расположены вдоль направления движения объекта на равных расстояниях между центрами соседних гауссоид. Чем больший путь проходят объекты за время экспозиции, тем большее количество гауссоид необходимо для адекватного представления их изображения. Необходимо разработать вычислительный метод, позволяющий на ПЗС-кадре оценивать параметры изображения каждого из Q гипотетических объектов. Критерием точности оценки $F_{\Delta\text{AG}}(\Theta_\tau)$ выбран минимум суммы квадратов невязок $\Delta A_{m(i,k)}$ между яркостями пикселей и их модельными (теоретическими) значениями в СВКО:

$$F_{\Delta\text{AG}}(\Theta_\tau) = \sum_{i,k}^{N_{\text{SIFP}}} \Delta A_{m(i,k)}^2 \xrightarrow{\Theta_\tau} \min, \quad (1)$$

где $\Delta A_{m(i,k)} = A_{ikt\tau}^*(x_{it}, y_{kt}, \Theta_\tau) - A_{ikt\tau}(x_{it}, y_{kt}, \Theta_\tau)$.

В рамках пиксельной модели гауссовой смеси теоретическую яркость пикселей изображения можно представить выражением:

$$A_{ikt\tau}(x_{it}, y_{kt}, \Theta_\tau) = \Delta_\tau C_{\text{noise}}^{\text{residual}} + \sum_{j=1}^Q A_{Gjt} \times \sum_{n=0}^N \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{Gjt}^2} \times \left[(x_{it} - x_{j\tau_t}(\Theta_\tau) - \ell_n \cos \omega_j)^2 + (y_{kt} - y_{j\tau_t}(\Theta_\tau) - \ell_n \sin \omega_j)^2 \right] \right\}, \quad (2)$$

где $C_{\text{noise}}^{\text{residual}}$ – модельная остаточная составляющая помеховой подложки; Θ_τ – вектор оцениваемых параметров изображений объектов; $x_{j\tau_t}(\Theta_\tau)$, $y_{j\tau_t}(\Theta_\tau)$ – координаты j -го объекта на момент привязки кадра

τ_t (как правило, половина времени экспозиции); A_{Gjt} – теоретическая средняя амплитуда пиков изображения j -го гипотетического объекта на t -ом ПЗС-кадре; σ_{Gjt} – параметр формы модели изображения j -го гипотетического объекта на t -м ПЗС-кадре; x_{it}, y_{kt} – координаты привязки центра ik -го пикселя ПЗС-матрицы на t -ом ПЗС-кадре; ω_j – угол между направлением движения j -го объекта и осью абсцисс в системе координат ПЗС-кадра; $\ell_n = -d/2 + n \cdot d/N$ – положение объекта на n -й момент времени (учитывая, что вся экспозиция представлена разделенной на N моментов времени) или положение n -ой гауссоиды из N , используемых для аппроксимации изображения объекта, смазанного собственным движением; d – длина пути (в пикселях), пройденного j -м объектом за время экспозиции, которая также является длиной изображения j -го объекта; N – количество гауссоид, используемых для аппроксимации изображения объекта, смазанного собственным движением или количество интервалов численного интегрирования по времени.

Вектор оцениваемых параметров Θ_τ включает в себя совокупность координат объекта $x_{j\tau_t}(\Theta_\tau)$, $y_{j\tau_t}(\Theta_\tau)$, среднюю амплитуду пиков A_{Gjt} , параметр σ_{Gjt} формы модели изображения гипотетического объекта и угол ω_j между его направлением движения и осью абсцисс.

Вычислительный метод оценки местоположения объектов с изображением, смазанным собственным движением

После предварительного вычитания помеховой подложки, невязка $\Delta A_{m(i,k)}$ между яркостями пикселей и их модельными (теоретическими) значениями в СВКО, учитывая выражение (2), будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta A_{m(i,k)} = A_{ikt\tau}^*(x_{it}, y_{kt}, \Theta_\tau) - \Delta_\tau C_{\text{noise}}^{\text{residual}} - \sum_{j=1}^Q A_{Gjt} \times \sum_{n=0}^N \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{Gjt}^2} \left[(x_{it} - x_{j\tau_t}(\Theta_\tau) - \ell_n \cos \omega_j)^2 + (y_{kt} - y_{j\tau_t}(\Theta_\tau) - \ell_n \sin \omega_j)^2 \right] \right\} \quad (3)$$

Тогда сумма квадратов невязок примет вид:

$$F_{\Delta\text{AG}}(\Theta_\tau) = \sum_{i,k}^{N_{\text{SIFP}}} \Delta A_{m(i,k)}^2, \quad (4)$$

Минимизация квадратичной формы (4) осуществляется при помощи алгоритма Левенберга-Марквардта (Levenberg-Marquardt Algorithm, LMA) [14], предназначенного для оптимизации параметров нелинейных регрессионных моделей. Данный алгоритм является наиболее распространенным ал-

горитмом оптимизации, потому что он превосходит по производительности метод наискорейшего спуска и другие методы сопряженных градиентов.

Для реализации алгоритма Левенберга-Марквардта используется матрица Якоби $J_{\Delta AG}$ (5), элементами которой являются частные производные невязок $\Delta A_{m(i,k)}$ между теоретической и экспериментальной яркостью пикселя по оцениваемым параметрам (элементам вектора оцениваемых параметров Θ_τ) в каждом пикселе множества Ω_{SIFP} , т.е. матрица Якоби будет иметь следующий вид:

$$J_{\Delta AG} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta A_{1(1,1)}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{1(1,1)}}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{1(1,1)}}{\partial \theta_{5Q+1}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Delta A_{m(i,k)}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{m(i,k)}}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{m(i,k)}}{\partial \theta_{5Q+1}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Delta A_{N_{SIFP}(i,k)}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{N_{SIFP}(i,k)}}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{N_{SIFP}(i,k)}}{\partial \theta_{5Q+1}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

где θ_n – n-й оцениваемый параметр из вектора оцениваемых параметров Θ_τ .

Частная производная невязки $\Delta A_{m(i,k)}$ между теоретической и экспериментальной яркостью пикселя по параметру σ_{Gjt} формы модели изображения объекта на t-м ПЗС-кадре в общем случае имеет вид:

$$\frac{\partial \Delta A_{m(i,k)}}{\partial y_{Gjt}} = \sum_{j=1}^Q A_{Gjt} \times \sum_{n=0}^N \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{Gjt}^2} \left[(x_{it} - x_{j\tau_t}(\Theta_\tau) + \ell_n \cos \omega_j)^2 + (y_{kt} - y_{j\tau_t}(\Theta_\tau) + \ell_n \sin \omega_j)^2 \right] \right\} \cdot \left(\sigma_{Gjt}^3 \right)^{-1} \times \left[(x_{it} - x_{j\tau_t}(\Theta_\tau) + \ell_n \cos \omega_j)^2 + (y_{kt} - y_{j\tau_t}(\Theta_\tau) + \ell_n \sin \omega_j)^2 \right] \quad (6)$$

Общий вид частных производных невязки $\Delta A_{m(i,k)}$ между теоретической и экспериментальной яркостью пикселя по параметрам $x_{jt}(\Theta_\tau)$, $y_{jt}(\Theta_\tau)$ (координаты j-го гипотетического объекта на t-ом ПЗС-кадре) представлен выражениями (7) и (8) соответственно:

$$\frac{\partial \Delta A_{m(i,k)}}{\partial x_{j\tau_t}(\Theta_\tau)} = \sum_{j=1}^Q A_{Gjt} \times \sum_{n=0}^N \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{Gjt}^2} \left[(x_{it} - x_{j\tau_t}(\Theta_\tau) + \ell_n \cos \omega_j)^2 + (y_{kt} - y_{j\tau_t}(\Theta_\tau) + \ell_n \sin \omega_j)^2 \right] \right\} \times \left[(x_{it} - x_{j\tau_t}(\Theta_\tau) + \ell_n \cos \omega_j) \right]; \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Delta A_{m(i,k)}}{\partial y_{j\tau_t}(\Theta_\tau)} = \sum_{j=1}^Q A_{Gjt} \times \sum_{n=0}^N \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{Gjt}^2} \left[(x_{it} - x_{j\tau_t}(\Theta_\tau) + \ell_n \cos \omega_j)^2 + (y_{kt} - y_{j\tau_t}(\Theta_\tau) + \ell_n \sin \omega_j)^2 \right] \right\} \times \left[(y_{kt} - y_{j\tau_t}(\Theta_\tau) + \ell_n \sin \omega_j) \right]. \quad (8)$$

Выражение для частной производной невязки $\Delta A_{m(i,k)}$ между теоретической и экспериментальной яркостью пикселя по параметру $C_{noise}^{residual}$ (остаточная составляющая помеховой подложки) имеют вид:

$$\frac{\partial \Delta A_{m(i,k)}}{\partial C_{noise}^{residual}} = \Delta_\tau \quad (9)$$

Частные производные невязки $\Delta A_{m(i,k)}$ между теоретической и экспериментальной яркостью пикселя по параметрам A_{Gjt} (средняя амплитуда пиков изображения j-го гипотетического объекта на t-м ПЗС-кадре) и ω_j (угол между направлением движения j-го объекта и осью абсцисс в системе координат ПЗС-кадра) в общем случае представлены выражениями (10) и (11) соответственно:

$$\frac{\partial \Delta A_{m(i,k)}}{\partial A_{Gjt}} = \sum_{n=0}^N \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{Gjt}^2} \left[(x_{it} - x_{j\tau_t}(\Theta_\tau) + \ell_n \cos \omega_j)^2 + (y_{kt} - y_{j\tau_t}(\Theta_\tau) + \ell_n \sin \omega_j)^2 \right] \right\}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \Delta A_{m(i,k)}}{\partial \omega_j} = \sum_{j=1}^Q A_{Gjt} \times \sum_{n=0}^N \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{Gjt}^2} \left[(x_{it} - x_{j\tau_t}(\Theta_\tau) + \ell_n \cos \omega_j)^2 + (y_{kt} - y_{j\tau_t}(\Theta_\tau) + \ell_n \sin \omega_j)^2 \right] \right\} \cdot \frac{1}{2\sigma_{Gjt}^2} \left[2\ell_n (\sin \omega_j \times (x_{j\tau_t}(\Theta_\tau) - x_{it}) - \cos \omega_j (y_{j\tau_t}(\Theta_\tau) - y_{kt})) \right]. \quad (11)$$

Таким образом, минимизация квадратичной формы (4) с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта может быть осуществлена при наличии матрицы Якоби $J_{\Delta AG}$ (5), элементами которой будут полученные в выражениях (6) ÷ (11) значения частных производных невязок $\Delta A_{m(i,k)}$ между теоретической и экспериментальной яркостью пикселя по параметрам вектора оцениваемых параметров Θ_τ .

Выводы

Разработан вычислительный метод оценки местоположения Q объектов на серии ПЗС-изображений, смазанных собственным движением. В качестве модели изображения объекта используется пиксельная модель гауссовой смеси. Она описывает распределение степени яркости пикселей, принадлежащих исследуемому СВКО. При этом считается, что яркости пикселей изображения каждого гипотетического объекта в СВКО распределены в соответствии со смесью нормальных законов.

Метод основан на нелинейной МНК-оценке параметров изображений объектов. Оптимизационная задача минимизации суммы квадратов невязок осуществляется с помощью метода Левенберга-Марквардта. Разработанный метод целесообразно

использовать [8] для оценки параметров видимого движения протяжённых объектов в программах оперативного автоматизированного обнаружения новых и сопровождения известных астероидов, комет и небесных тел со слабым блеском, например, в программе CoLiTec [16, 17].

В рамках дальнейшего развития проекта CoLiTec внедрение вычислительного метода оценки местоположения объекта на серии ПЗС-изображений, смазанных собственным движением объекта, позволит провести экспериментальные исследования статистических характеристик объектов с протяжённым изображением на базе реальных снимков звёздного неба.

Список литературы

1. Ericson J. *Asteroids, comets, and meteorites. Cosmic Invaders of the Earth* [Текст] / J. Ericson // New York: Fact on File.— 2003.
2. Rivkin, A. S. *Asteroids, Comets And Dwarf Planets* [Текст] / A. S. Rivkin // Greenwood Press. — 2009.
3. Kortencamp Steve. *Asteroids, Comets, and Meteoroids. Mankato, MN: Capstone Press, 2012*
4. 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.
5. Kouprianov V.V. *Distinguishing features of CCD astrometry of faint GEO objects* [Текст] / V. Kouprianov // *Advances in Space Research.* — 2008. — Vol. 41, Issue 7. — P. 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 Multicoference, Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing, Algarve, Portugal.* — June 20-22 2009. — P. 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. — P. 861–878.
8. Zacharias N. *UCAC3 pixel processing* [Текст] / N. Zacharias // *The Astronomical Journal.* — 2010. — 139. — P. 2208–2217.
9. Izmailov I. S. *Astrometric CCD observations of visual double stars at the Pulkovo Observatory* [Текст] / I. S. Izmailov, M. L. Khovricheva, M. Yu. Khorichev et al. // *Astronomy Letters.* — 2010. — Vol. 36, Issue 5 — P. 349–354.
10. Саваневич В.Е. *Оценка координат астероида на дискретном изображении* / В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецкий, А.М. Кожухов, Е.Н. Диков // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* 2010. — Вып. 162. — С. 78–86.
11. Соковикова Н.С. *Оценка координат близких астероидов на ПЗС-изображении* [Текст] / Н.С. Соковикова, В.Е. Саваневич, М.М. Безкровный, С.В. Хламов // *Восточно-Европейского журнала передовых технологий.* — 2013. — Т. 4/4(64). — С. 41–45.
12. Безкровный, М.М. *Оценка местоположения объекта на ПЗС-кадре при среднем времени экспозиции* [Текст] / М.М. Безкровный, А.М. Кожухов, В.Е. Саваневич, А.Б. Анненков, Н.С. Соковикова // *Системы обработки информации: 36. науч. пр. — Харків: ХУПС, 2012.* — Т. 7(105). — С. 44–50.
13. Zoran Zivkovic *Improved Adaptive Gaussian Mixture Model for Background Subtraction.* — *Intelligent and Autonomous Systems Group.* — University of Amsterdam. — The Netherlands. — In Proc. ICPR. — 2004
14. Nocedal, Jorge; Wright, Stephen J. *Numerical Optimization.* — Springer: ISBN 0-387-30303-0. — 2nd Edition. — 2006.
15. Chris Stauffer, W.E.L. Grimson *Adaptive background mixture models for real-time tracking, The Artificial Intelligence Laboratory.* — Massachusetts Institute of Technology. — Cambridge, MA 02139
16. 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.
17. Сайт программы CoLiTec. [Электронный ресурс] — Режим доступа : \WWW/ URL <http://neoaastrosoft.com/home/> — Загл. с экрана.

Поступила в редколлегию 6.08.2013

Рецензент: д-р техн. наук проф. В.П. Деденок, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ПІКСЕЛЬНИЙ МЕТОД ОЦІНКИ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ІЗ ЗОБРАЖЕННЯМ, ЩО ЗМАЗУЄТЬСЯ ВЛАСНИМ РУХОМ

М.М. Безкровний, С.В. Хламов, В.Є. Саваневич, Н.С. Соковикова

Розроблено обчислювальний метод оцінки місцезнаходження об'єкта на серії ПЗС-зображень, змазаних його власним рухом. Метод заснований на нелінійній МНК-оцінці параметрів зображень об'єктів. Оптимізаційна задача мінімізації суми квадратів нев'язок вирішується методом Левенберга-Марквардта. При цьому вважається, що яскравості пікселів зображення кожного гіпотетичного об'єкта в СВКО розподілені відповідно із сумішшю нормальних законів. Апроксимація зображення об'єкта, змазаного власним рухом, сумішшю гауссоїд забезпечує достатню точність оцінки місцезнаходження протяжного об'єкта при використанні даного методу. Метод може бути використаний в програмах автоматизованого виявлення малих тіл Сонячної системи при оцінці місцезнаходження об'єктів, що мають великі швидкості видимого руху, наприклад, астероїдів, що зближуються із Землею.

Ключові слова: обробка ПЗС-зображень, протяжний об'єкт, оцінка місця розташування, CoLiTec.

PIXEL-BASED ASSESSMENT OF THE OBJECTS LOCATION WITH IMAGES, BLURRY OWN MOVEMENT

M.M. Bezkrvniy, S.V. Khlamov, V.Ye. Savanevych, N.S. Sokovikova

The computing method of estimating the location of the fast moving object on a series of CCD images is developed. The method is based on a non-linear least-squares assessment of objects image parameters. The minimization of sum squares of the residuals is solved by the Levenberg-Markvard method. The brightness of pixels of the each hypothetical object image in SIFP is distributed according to a mix of normal laws. Using this method the approximation of extended objects image by the Gaussian mixture models provides sufficient accuracy of the location of extended objects. The method can be used in programs of the automated detection of small solar system bodies when assessing the fast moving objects location, such as asteroids approaching the Earth.

Keywords: processing of CCD images, stretched object, assessment of location, CoLiTec.