

УДК 519.6:004.932

Н.С. СОКОВИКОВА¹, В.Е. САВАНЕВИЧ^{1,2}, М.М. БЕЗКРОВНЫЙ³, С.В. ХЛАМОВ¹¹ Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков² Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев³ Запорожский институт экономики и информационных технологий, Запорожье

ПОДПИКСЕЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ БЛИЗКИХ АСТЕРОИДОВ НА ДИСКРЕТНОМ ИЗОБРАЖЕНИИ

Разрабатывается подпиксельный метод оценки местоположения объектов компактной группы со статистически зависимыми изображениями на дискретном кадре. В качестве модели формы изображения компактной группы объектов используется подпиксельная Гауссова модель. Данная модель основана на использовании распределения координат падения фотонов в области кадра, соответствующей изображению компактной группы объектов. Метод основан на оценке положения объектов компактной группы по критерию минимума квадратов невязок между экспериментальным и модельным изображениями. Минимизация суммы квадратов невязок осуществляется с помощью алгоритма Левенберга-Марквардта.

Ключевые слова: близкие объекты, статистически зависимые изображения, оценка параметров изображений, астероиды, ПЗС-кадр.

Введение

Задача регистрации и наблюдения астероидов существенно усложняется множеством факторов. К ним можно отнести: слабый уровень сигналов от астероидов; наличие на кадрах неравномерно распределенного фона, форма распределения которого может меняться на одной серии кадров; размытие изображения астероида из-за турбулентности атмосферы; искажение изображения астероида вследствие аббераций оптической системы; отсутствие отличий между изображением астероидов и изображением звезд на отдельном кадре. Требования к точности определения координат астероидов достаточно велики – ошибка должна быть менее 1 угловой секунды [1].

Изучение астероидов в основном проводится с использованием оптических телескопов. Проникающая способность таких оптических систем в последнее время существенно возросла, что в свою очередь увеличило плотность наблюдаемых объектов. Учитывая все чаще встречающуюся большую плотность расположения изображений небесных объектов на ПЗС-кадре [2], а также связанное с этим появление компактных групп объектов со статистически зависимыми изображениями, сложность достижения требуемой точности наблюдения близких объектов значительно возрастает.

Все вышеперечисленное указывает на актуальность разработки вычислительных методов высокоточной оценки местоположения близких объектов со статистически зависимыми изображениями. В

таких методах необходимо учитывать основные условия наблюдения исследуемых объектов и особенности формирования их изображений на дискретном изображении.

1. Анализ литературных данных

На данный момент существует достаточно большое количество методов по обнаружению и определению местоположения астероидов на ПЗС-кадре. В одних используется аналитическое оценивание параметров изображений объектов на ПЗС-кадре, например, с использованием экспериментальных оценок полуширины изображения звезды [3]. В других в качестве координат астероида принимается локальный максимум его изображения [4].

Общим для большинства методов оценки параметров местоположения астероида на ПЗС-кадре является использование, в качестве аппроксимации сигналов от небесных объектов, функции рассеяния точки (PSF-fitting) [5-10]. Такие методы используют информацию о закономерностях распределения сигнальных фотонов по изображению объекта. Наиболее часто в качестве модели распределения фотонов по изображению небесного объекта используются различные варианты двумерных гауссоид [10, 11, 7], модели Моффата [12, 13] и Лоренца [10, 13]. Общее количество используемых моделей достаточно велико [10]. Чаще всего указанные модели представляются как непрерывные функции, в то время как реальные ПЗС-изображения являются дискретными.

Такой подход критикуется в [12].

Не стоит забывать о наличии помеховой составляющей изображения, так называемой шумовой подложки [14]. В ряде работ считается, что учет шумовой составляющей и ее компенсация производится на предварительном этапе [5] или, что шумовые фотоны отделяются от изображения объекта в соответствии с принятой моделью сигналов и помех [11]. Методы компенсации шумовой подложки приведены в [13].

Недостатком большинства методов оценки параметров местоположения объекта на ПЗС-кадре является то, что они либо не используют реальный закон распределения фотонов от объекта по поверхности картинной плоскости оптического прибора, либо не рассматривают наличие статистически зависимых изображений от близких объектов, либо не учитывают основные особенности функционирования процесса формирования и съема изображений, либо игнорируют наличие и распределение координат падения шумовых фотонов на изображении статистически зависимых объектов и в его окрестности. Одновременный учет всех перечисленных факторов и условий является необходимым условием создания процедур оценки положения близких объектов, обладающих точностью, близкой к потенциальной.

2. Постановка задачи

Считается, что обнаружено Q небесных объектов, изображения которых находятся в строке внутрикадровой обработки (СВКО). При этом СВКО содержит множество Ω_{SIFP} пикселей, в которых предполагается наличие изображения Q статистически зависимых объектов. Под статистически зависимыми объектами понимается возможное пересечение их изображений на ПЗС-кадре. Количество пикселей, принадлежащих исследуемому СВКО считается равным N_{SIFP} .

Присутствующая в изображении кадра шумовая подложка может считаться как удаленной из изображения объекта, так и подлежащей оценке и удалению.

Наблюдению доступны яркости A_{ikt}^* пикселей из множества Ω_{SIFP} . Изображения объектов на ПЗС-кадре формируются за счет попадания сигнальных фотонов в пиксели ПЗС-матрицы с заданными границами.

Совокупность оцениваемых параметров для каждого из Q гипотетических небесных объектов включает в себя: положение $x_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}), y_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})$, теоретическую амплитуду A_{subGjt} ; параметр формы

σ_{subGjt} изображения объекта. С учетом параметров шумовой подложки, количество оцениваемых параметров, будет равным $4Q + 3$:

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}} &= (A_{\text{noise}}^{\text{sub}}, B_{\text{noise}}^{\text{sub}}, C_{\text{noise}}^{\text{sub}}, x_{1t}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}), y_{1t}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}), \\ &A_{\text{subG1t}}, \sigma_{\text{subG1t}}, \dots, x_{nt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}), y_{nt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}), \\ &A_{\text{Gnt}}^{\text{sub}}, \sigma_{\text{Gnt}}^{\text{sub}}, \dots, x_{Qt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}), y_{Qt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}), \\ &A_{\text{subGQt}}, \sigma_{\text{subGQt}}) = (\theta_1, \dots, \theta_n, \dots, \theta_{4Q+3}), \end{aligned} \quad (1)$$

где θ_n – n -й оцениваемый параметр.

Нужно разработать вычислительный метод, позволяющий на ПЗС-кадре оценивать указанные выше параметры изображения каждого из Q гипотетических объектов. В качестве критерия наилучшей оценки местоположения объектов на ПЗС-кадре выбран минимум суммы квадратов невязок между теоретическими и экспериментальными яркостями пикселей:

$$F_{\Delta\text{AGsub}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}) = \sum_{i,k}^{N_{\text{SIFP}}} \left(A_{ikt}^* - A_{ikt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}) \right)^2 \xrightarrow{\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}} \min. \quad (2)$$

3. Разработка подпиксельной модели формы изображений объектов на цифровом кадре. Оценка параметров изображений объектов на ПЗС-кадре

Считается [15], что координаты падения сигнальных фотонов на ПЗС-матрицу имеют круговое нормальное распределение. Связано это с тем, что изображения небесных объектов на кадре имеют форму точки, а с учетом атмосферной турбулентности и ряда других факторов изображения объектов могут становиться нечеткими (размытыми).

Подынтегральной моделью изображения группы близких объектов, с точностью до констант, считается функция, подобная плотности распределения координат падения фотонов от этих объектов. Иными словами подпиксельная Гауссова модель описывает распределение попадания фотонов в пиксели, принадлежащие исследуемому СВКО. Отличие модели от указанной плотности заключается в отсутствии констант, обеспечивающих нормировку.

Исходя из вышесказанного, выражение для теоретического подынтегрального изображения близких небесных объектов можно представить смесью функций:

$$f_{G2noise}(x_{it}, y_{kt}, \Theta_{sh}^{sub}) = A_{noise}^{sub} x_{it} + B_{noise}^{sub} y_{kt} + C_{noise}^{sub} + \sum_{j=1}^Q \frac{A_{subGjt}}{2\pi\sigma_{subGjt}^2} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{subGjt}^2} [(x_{it} - x_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}))^2 + (y_{kt} - y_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}))^2] \right\}, \quad (3)$$

где A_{noise}^{sub} , B_{noise}^{sub} , C_{noise}^{sub} – параметры подынтегральной шумовой подложки;

A_{subGjt} – подынтегральная амплитуда пика изображения j -го гипотетического объекта на t -ом ПЗС-кадре;

σ_{subGjt} – параметр формы подынтегральной модели изображения j -го гипотетического объекта на t -ом ПЗС-кадре.

В качестве модели подпиксельного помехового изображения в работе используется плоскость с произвольным наклоном:

$$G_{noise}^{sub}(x_{it}, y_{kt}) = A_{noise}^{sub} x_{it} + B_{noise}^{sub} y_{kt} + C_{noise}^{sub}. \quad (4)$$

Параметры данной плоскости можно оценить по пикселям, что не содержат изображения объектов. Считается, что существует возможность разделения пикселей СВКО на пиксели, содержащие и не содержащие изображение сигнала. Количество последних считается равным $N_{SIFP(n)}$.

Чтобы выражение (3) подынтегральной модели изображения близких небесных объектов допускало вероятностную трактовку, необходимо A_{subGjt} заменить p_j (следует учесть, что $\sum_{j=1}^Q p_j = 1 - p_0$, а интеграл от $A_{noise}^{sub} x_{it} + B_{noise}^{sub} y_{kt} + C_{noise}^{sub}$ должен быть равен p_0). При этом σ_{subGjt} – СКО координат падения сигнальных фотонов.

Границы ik -го пикселя ПЗС-матрицы можно выразить через координаты привязки x_{it}, y_{kt} центра ik -го пикселя t -го кадра ПЗС-матрицы:

$$x_{bi} = x_{it} - \frac{\Delta_{CCD}}{2}, \quad x_{ei} = x_{it} + \frac{\Delta_{CCD}}{2}, \quad (5)$$

$$y_{bk} = y_{kt} - \frac{\Delta_{CCD}}{2}, \quad y_{ek} = y_{kt} + \frac{\Delta_{CCD}}{2}, \quad (6)$$

где x_{bi}, x_{ei} – границы (начало и конец соответ-

венно) ik -го пикселя ПЗС-матрицы по координате x ;

y_{bk}, y_{ek} – границы ik -го пикселя ПЗС-матрицы по координате y .

В рамках подпиксельной гауссовской модели теоретическая яркость A_{ikt} пикселей ПЗС-матрицы может быть представлена выражением:

$$A_{ikt}(\Theta_{sh}^{sub}) = \int_{x_{bi}}^{x_{ei}} \int_{y_{bk}}^{y_{ek}} f_{G2n}(x_{it}, y_{kt}, \Theta_{sh}^{sub}) dx_{it} dy_{kt}. \quad (7)$$

Доступные наблюдению напряжения на выходе N_{CCD} пикселей ПЗС-матрицы можно привести к опытному относительным частотам попадания фотонов в ik -й пиксель ПЗС-матрицы в t -м кадре v_{ikt}^* :

$$v_{ikt}^* = \frac{A_{ikt}^*}{\sum_{i,k} A_{ikt}^*}, \quad (8)$$

где A_{ikt}^* – экспериментальная яркость ik -го пикселя ПЗС-матрицы, принадлежащего исследуемому СВКО.

Удобно ввести следующие обозначения:

$$N_z(m_z; \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(z - m_z)^2\right), \quad (9)$$

$$F_{zi}(m_z; \sigma^2) = \int_{z_{ei}}^{z_{bi}} N_z(m_z; \sigma^2) dz. \quad (10)$$

При возможности использование вероятностной трактовки $N_z(m_z; \sigma^2)$ является значением плотности нормального распределения с математическим ожиданием m_z и дисперсией σ^2 в точке z . При этом $F_{zi}(m_z; \sigma^2)$ является значением вероятности попадания нормально распределенной СВ с указанными выше характеристиками в интервал $[z_{bi}, z_{ei}]$.

Согласно принятой модели выражение теоретической яркости пикселя, с учетом выражений (9) и (10), примет вид:

$$A_{ikt}(\Theta_{sh}^{sub}) = \Delta_{CCD}^2 \left(A_{noise}^{sub} y_{kt} + B_{noise}^{sub} x_{it} + C_{noise}^{sub} \right) + \sum_{j=1}^Q A_{subGjt} F_{xi}(x_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGjt}^2) \times F_{yk}(y_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGjt}^2) = I_{ikt_n} + I_{ikt_s}, \quad (11)$$

где I_{ikt_n} , I_{ikt_s} – шумовая и сигнальная составляющие теоретической яркости ik -го пикселя t -го ПЗС-кадра;

$$I_{ikt_n} = \Delta_{CCD}^2 \left(A_{noise}^{int} x_{it} + B_{noise}^{int} y_{kt} + C_{noise}^{int} \right),$$

$$I_{ikt_s} = A_{Gjt}^{int} F_{xi} (x_{jt} (\Theta_{sh}^{int}); \sigma_{Gjt}^2) F_{yk} (y_{jt} (\Theta_{sh}^{int}); \sigma_{Gjt}^2).$$

4. Параметры плоской шумовой подложки

Согласно определению подпиксельной гауссовской модели можно составить выражение для шумовой составляющей теоретической яркости пикселей. Аналогично выражению для теоретической яркости пикселя (7) выражение для шумовой составляющей теоретической яркости пикселей имеет вид:

$$I_{ikt_n} = \int_{x_{hi}}^{x_{ki}} \int_{y_{hk}}^{y_{kk}} G_{noise}^{sub} (x_{it}, y_{kt}) dx_{it} dy_{kt} =$$

$$= (x_{ei} - x_{bi})(y_{ek} - y_{bk}) \times$$

$$\times \left(\frac{A_{noise}^{sub} (x_{ei} + x_{bi}) + B_{noise}^{sub} (y_{ek} + y_{bk})}{2} + C_{noise}^{sub} \right) =$$

$$= \Delta_{CCD}^2 (A_{noise}^{sub} y_{ikt} + B_{noise}^{sub} x_{ikt} + C_{noise}^{sub}). \quad (12)$$

Очевидно, что шумовая составляющая яркости пикселей $I_{ikt_n}^{int}$ представляет собой плоскость с интегральными параметрами A_{noise} , B_{noise} , C_{noise} :

$$I_{ikt_n}^{int} (x_{it}, y_{kt}) = A_{noise} x_{it} + B_{noise} y_{kt} + C_{noise}, \quad (13)$$

где $A_{noise} = \Delta_{CCD}^2 A_{noise}^{sub}$;

$$B_{noise} = \Delta_{CCD}^2 B_{noise}^{sub};$$

$$C_{noise} = \Delta_{CCD}^2 C_{noise}^{sub}.$$

5. Определение производных по параметрам объектов изображений и параметрам шумовой подложки

Для изображения Q небесных объектов на ПЗС-кадре необходимо оценить следующие параметры: положение $x_{jt} (\Theta_{sh}^{sub}), y_{jt} (\Theta_{sh}^{sub})$, теоретическую амплитуду A_{subGjt} ; параметр формы σ_{subGjt} подынтегральной модели изображения объекта.

Для решения оптимизационной задачи по минимизации суммы квадратов невязок между теоретическими и экспериментальными яркостями пикселей используется метод Левенберга – Марквардта [16, 17]. В методе Левенберга-Марквардта используется матрица Якоби, сформированная из частных производных от невязки (2) по параметрам вектора Θ_{sh}^{sub} .

Элементами матрицы Якоби J_{sh}^{sub} являются частные производные невязок

$$\Delta A_{shm(i,k)}^{sub} = A_{ikt}^* - A_{ikt} (\Theta_{sh}^{sub}) \quad (14)$$

между теоретической и экспериментальной яркостью пикселя по оцениваемым параметрам (элементам вектора оцениваемых параметров Θ_{sh}^{sub}) в каждом пикселе множества Ω_{SIFP} . При этом, m -ому элементу матрицы Якоби соответствует значение производной невязки в m -ом пикселе множества Ω_{SIFP} по n -ому оцениваемому параметру из вектора оцениваемых параметров Θ_{sh}^{sub} . Далее считается, что номер пикселя m во множестве Ω_{SIFP} является функцией $m(i, k)$ от номеров пикселя на кадре.

Исходя из вышеизложенного, матрица Якоби имеет вид:

$$J_{sh}^{sub} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta A_{sh}^{sub} 1(1,1)}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{sh}^{sub} 1(1,1)}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{sh}^{sub} 1(1,1)}{\partial \theta_{4Q+3}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Delta A_{sh}^{sub} m(i,k)}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{sh}^{sub} m(i,k)}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{sh}^{sub} m(i,k)}{\partial \theta_{4Q+3}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Delta A_{sh}^{sub} N_{SIFP}(i,k)}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{sh}^{sub} N_{SIFP}(i,k)}{\partial \theta_n} & \dots & \frac{\partial \Delta A_{sh}^{sub} N_{SIFP}(i,k)}{\partial \theta_{4Q+3}} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Производные от невязки (14) между теоретической и экспериментальной яркостями пикселя, по параметрам шумовой подложки имеют вид:

$$\begin{aligned}\frac{d\Delta A_{\text{subm}(i,k)}}{dA_{\text{noise}}^{\text{sub}}} &= -\Delta_{\text{CCD}}^2 Y_{kt}; \\ \frac{d\Delta A_{\text{subm}(i,k)}}{dB_{\text{noise}}^{\text{sub}}} &= -\Delta_{\text{CCD}}^2 X_{it}; \\ \frac{d\Delta A_{\text{subm}(i,k)}}{dC_{\text{noise}}^{\text{sub}}} &= -\Delta_{\text{CCD}}^2.\end{aligned}\quad (16)$$

Производные от невязки (14) между теоретической и экспериментальной яркостью пикселя по теоретическим координатам j -го гипотетического объекта на t -ом ПЗС-кадре имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\frac{d\Delta A_{\text{subm}(i,k)}}{dx_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})} &= -A_{\text{subGjt}} F_{yk}(y_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2) \times \\ &\times (N_{x_{ei}}(x_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2) - N_{x_{bi}}(x_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2)) = \\ &= -\frac{A_{\text{subGjt}} F_{yk}(y_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2) F_{xi}(x_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2)}{\sigma_{\text{subGjt}}} \times \\ &\times (m_{x_{it}}^{\text{loc}} - x_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})),\end{aligned}\quad (17)$$

где $m_{z_i}^{\text{loc}}$ – локальное математическое ожидание случайной величины z [15] на интервале $[z_{bi}, z_{ei}]$ при использовании вероятностной трактовки и просто обозначение в противном случае.

Аналогично (17) производная от невязки (14) по параметру положения $y_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})$ j -го гипотетического объекта:

$$\begin{aligned}\frac{d\Delta A_{\text{subm}(i,k)}}{dy_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})} &= -A_{\text{subGjt}} F_{xi}(x_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2) \times \\ &\times (N_{y_{ei}}(y_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2) - N_{y_{bi}}(y_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2)) = \\ &= -\frac{A_{\text{subGjt}} F_{xi}(x_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2) F_{yk}(y_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2)}{\sigma_{\text{subGjt}}} \times \\ &\times (m_{y_{kt}}^{\text{loc}} - y_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})),\end{aligned}\quad (18)$$

Производная по параметру σ_{subGjt} формы подынтегральной модели изображения j -го гипотетического объекта имеет вид:

$$\frac{d\Delta A_{\text{subm}(i,k)}}{d\sigma_{\text{subGjt}}} = -\frac{A_{\text{subGjt}} F_{yk}(y_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2)}{\sigma_{\text{subGjt}}}$$

$$\begin{aligned}&\times ((x_{ei} - x_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})) N_{x_{ei}}(x_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2) - \\ &- (x_{bi} - x_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})) N_{x_{bi}}(x_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2)) - \\ &- \frac{A_{\text{subGjt}} F_{xi}(x_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2)}{\sigma_{\text{subGjt}}} \times \\ &\times ((y_{ei} - y_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})) N_{y_{ei}}(y_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2) - \\ &- (y_{bi} - y_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})) N_{y_{bi}}(y_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2)).\end{aligned}\quad (19)$$

Пользуясь выражением (12) теоретической яркости пикселя, можно легко вычислить частную производную от невязки (14) между экспериментальной и теоретической яркостями по подынтегральной амплитуде A_{subGjt} пика изображения j -го гипотетического объекта:

$$\begin{aligned}\frac{d\Delta A_{\text{subm}(i,k)}}{dA_{\text{subGjt}}} &= \\ &= -F_{xi}(x_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2) F_{yk}(y_{jt}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2).\end{aligned}\quad (20)$$

6. Оценка параметров подынтегрального изображения близких небесных объектов при предварительно вычитенной шумовой подложке

Так же как и в случае с пиксельной моделью Гаусса [18], можно записать выражение для подынтегрального изображения близких небесных объектов, с учетом предварительно проведенного вычитания шумовой подложки. В таком случае выражение для теоретической яркости пикселя будет выглядеть аналогично выражению (7).

При этом выражение, описывающее подынтегральное изображение близких небесных объектов, примет вид:

$$\begin{aligned}f_{G2\text{residual}}(x_{it}, y_{kt}, \Theta_{\text{sub}}) &= \\ &= C_{\text{residual}}^{\text{sub}} + \sum_{j=1}^Q \frac{A_{\text{subGjt}}}{2\pi\sigma_{\text{subGjt}}^2} \times \\ &\times \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_{\text{subGjt}}^2} [(x_{it} - x_{jt}(\Theta_{\text{sub}}))^2 + \right. \\ &\left. + (y_{kt} - y_{jt}(\Theta_{\text{sub}}))^2]\right\},\end{aligned}\quad (21)$$

где Θ_{sub} – вектор оцениваемых параметров (аналогично (1));

$C_{\text{residual}}^{\text{sub}}$ – остаточная составляющая шумовой подложки.

Оптимизационная задача минимизации суммы квадратов невязок между экспериментальной и теоретической яркостями имеет вид, аналогичный выражению (2). Матрица Якоби формируется по аналогии с матрицей (15).

Выражения для частных производных от невязки $\Delta A_{\text{sub}2\text{m}(i,k)}$ по подынтегральной амплитуде пика изображения j -го гипотетического объекта, параметру формы подынтегральной модели изображения j -го гипотетического, координатам j -го гипотетического объекта на t -ом ПЗС-кадре совпадают с аналогичными выражениями (17), (18), (19) и (20).

Частная производная от невязки $\Delta A_{\text{sub}2\text{m}(i,k)}$ по параметру $C_{\text{residual}}^{\text{sub}}$ остаточной составляющей плоской шумовой подложки имеет вид:

$$\frac{d\Delta A_{\text{sub}2\text{m}(i,k)}}{dC_{\text{residual}}^{\text{sub}}} = -\Delta_{\text{CCD}}^2. \quad (20)$$

Выводы

Разработан вычислительный метод, который позволяет с точностью, близкой к потенциальной, оценивать местоположение нескольких близко расположенных небесных объектов на ПЗС-кадре. В качестве модели формы изображения объектов использована подпиксельная модель Гаусса (3), которая описывает распределение попадания фотонов в пиксели ПЗС-кадра (при наличии в нем изображения близких объектов) с заданными параметрами. В том числе предлагаемая модель учитывает наличие шумовой подложки (4) и позволяет оценивать ее параметры (16), а в случае ее предварительного вычитания – параметры остаточной шумовой составляющей (20). Подпиксельная Гауссова модель также учитывает основные особенности процесса формирования изображения на ПЗС-кадре.

Задача по минимизации суммы квадратов невязок (2) между теоретической и экспериментальной яркостями пикселей решается с помощью стандартного алгоритма Левенберга-Марквардта. Данный алгоритм использует матрицу Якоби (15), согласно которой рассчитываются производные по оцениваемым параметрам (1) объектов. Применение алгоритма Левенберга-Марквардта к поставленной задаче позволяет быстро и с наименьшими затратами реализовать на практике предлагаемый метод.

Метод, прежде всего, планируется к использованию и может быть применен для оценки положения компактной группы близкорасположенных небесных объектов в программах автоматизированного обнаружения астероидов и комет [19]. Также метод может быть использован при разработке систем

автоматического определения положения объектов на кадрах видеоряда.

В дальнейшем, предполагается провести экспериментальные исследования точности предложенного метода на базе реальных кадров звездного неба. Например, в рамках программного комплекса автоматизированного обнаружения астероидов и комет CoLiTec [19, 20].

Литература

1. IAU Minor Planet Center. Guide to Minor Body Astrometry [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.minorplanetcenter.net/iau/info/Astrometry.html#quality>. – 20.08.2013.
2. George, E. Smith The invention and early history of the CCD [Text] / E. Smith George // Rev. Mod. Phys. – 2010. – V. 3, № 82. – P. 2307–2312.
3. Gary, B.L. Image subtraction procedure for observing faint asteroids [Text] / B.L. Gary, D. Healy // Bulletin of the Minor Planets Section of the Association of Lunar and Planetary Observers. – 2006. – Vol. 33, № 1. – P. 16–18.
4. Miura, N. Likelihood-based Method for Detecting Faint Moving Objects [Text] / N. Miura, K. Itagaki, N. Baba // The Astronomical Journal. – 2005. – Vol. 130, № 3. – P. 1278–1285.
5. Automatic Detection Algorithm for Small Moving Objects [Text] / T. Yanagisawa et al. // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 2005. – Vol. 57, № 2. – P. 399–408.
6. Gural, P.S. Matched Filter Processing for Asteroid Detection [Text] / P.S. Gural, J.A. Larsen, A.E. Gleason // The Astronomical Journal. – 2005. – Vol. 30, № 4. – P. 1951–1960.
7. Improved Asteroid Astrometry and Photometry with Trail Fitting [Text] / P. Vereš, R. Jedicke et al // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2012. – Vol. 124, № 921. – P. 1197–1207.
8. Dell'Oro, A. Observations of asteroids on the Gaia astrometric focal plane [Text] / A. Dell'Oro, A. Cellino // Planetary and Space Science. – 2012. – Vol. 73, Is. 1. – P. 10–14.
9. A New Algorithm for Point-Spread Function Subtraction in High-Contrast Imaging: A Demonstration with Angular Differential Imaging [Text] / D. Lafrenière, C. Marois, R. Doyon, R. Nadeau, É. Artigau // The Astrophysical Journal. – 2007. – Vol. 660, № 1. – P. 770–780.
10. Zacharias, N. UCAC3 pixel processing [Text] / N. Zacharias // The Astronomical Journal. – 2010. – Vol. 139, № 6. – P. 2208–2217.
11. Object detection in multi-epoch data [Text] / G. Jogesh Babu, A. Mahabal, S.G. Djorgovski, R. Williams // Statistical Methodology. – 2008. – Vol. 5, № 4. – P. 299–306.
12. Bauer, T. Improving the Accuracy of Position Detection of Point Light Sources on Digital Images [Text] / T. Bauer // Proceedings of the IADIS International Conference, Computer Graphics, Visualization,

Computer Vision and Image Processing 2009. Part of the IADIS Multi Conference on Computer Science and Information Systems 2009. – Algarve, Portugal, June 20-22, 2009. – P. 3-14.

13. *Astrometric CCD observations of visual double stars at the Pulkovo Observatory [Text] / I.S. Izmailov, M.L. Khovrichева, M.Yu. Khovrichев et al // Astronomy Letters. – 2010. – Vol. 36, № 5. – P. 349 – 354.*

14. *Оценка координат астероида на дискретном изображении [Текст] / В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецкий, А.М. Кожухов, Е.Н. Диков // Радиотехника. – 2010. – Вып. 162. – С. 78 – 86.*

15. *Саваневич, В.Е. Определение координат статистически зависимых объектов на дискретном изображении [Текст] / В.Е. Саваневич // Радиотехника и информатика. – 1999. – № 1. – С. 4 – 8.*

16. *Levenberg, K. A method for the solution of certain problems in least squares [Text] / K. Levenberg // Quart. Appl. Math. – 1944. – Vol. 2 – P. 164–168.*

17. *Marquardt, D. An algorithm for least-squares*

estimation of nonlinear parameters [Text] / D. Marquardt // SIAM J. Appl. Math. – 1963. – Vol. 11. – P. 431–441.

18. *Оценка координат близких астероидов на ПЗС изображении [Текст] / Н.С. Соковикова, В.Е. Саваневич, М.М. Безкровный, С.В. Хламов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 4, № 4(64). – С. 41 – 44.*

19. *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.*

20. *Программа CoLiTeс 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.*

Поступила в редакцію 20.08.2013, рассмотрена на редколлегии 11.09.2013

Рецензент: д-р техн. наук, доц., доц. каф. математического и программного обеспечения АСУ К.С. Смеляков, Харьковский университет воздушных сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ПОДПІКСЕЛЬНИЙ МЕТОД ОЦІНКИ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ БЛИЗЬКИХ АСТЕРОЇДІВ НА ДИСКРЕТНОМУ ЗОБРАЖЕННІ

Н.С. Соковікова, В.Е. Саваневич, М.М. Безкровний, С.В. Хламов

Розробляється підпиксельний метод оцінки місцезнаходження об'єктів компактної групи зі статистично залежними зображеннями на дискретному кадрі. В якості моделі форми зображення компактної групи об'єктів використовується підпиксельна гауссова модель. Дана модель заснована на використанні розподілу координат падіння фотонів в області кадру, що відповідає зображенню компактної групи об'єктів. Метод заснований на оцінці місцезнаходження об'єктів компактної групи за критерієм мінімуму квадратів нев'язок між експериментальним і модельним зображеннями. Мінімізація суми квадратів нев'язок здійснюється за допомогою алгоритму Левенберга-Марквардта.

Ключові слова: близькі об'єкти, статистично залежні зображення, оцінка параметрів зображень, астероїди, ПЗС-кадр.

THE METHOD OF SUBPIXEL ASSESSMENT OF CLOSE LOCATION ASTEROIDS ON THE DISCRETE IMAGE

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

Sub-pixel method for estimating the location on the digital frame of a compact group of objects with statistically dependent images is developed. As a model form of the image a compact group of objects the sub-pixel Gaussian model is used. This model describes the distribution of photons falling into pixels of investigated area on digital frame, if it contains objects images. Method is based on the least squares estimation of the parameters of object images. The minimization of sum squares of the residuals is solved by the Levenberg-Markvard method.

Key words: close located objects, statistically dependent images, assessment of image parameters, asteroid, CCD frame.

Соковикова Наталья Сергеевна – аспирант каф. электронных вычислительных машин, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина, e-mail: nataly.sokovikova@gmail.com.

Саваневич Вадим Евгеньевич – д-р техн. наук, проф., проф. каф. электронных вычислительных машин, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков; вед. науч. сотр., Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: vadym@savanevych.com.

Безкровный Михаил Михайлович – ст. преп. каф. компьютерных систем и сетей, Запорожский институт экономики и информационных технологий, Запорожье, Украина, e-mail: bezkrivniy@gmail.com.

Хламов Сергей Васильевич – аспирант каф. электронных вычислительных машин, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина, e-mail: serik2010@yandex.ua.