

**Розроблено обчислювальний метод оцінки місця положення астероїдів компактної групи на серії ПЗС-кадрів. В якості моделі зображення об'єктів використовується субпиксельна модель Гаусса. Для оцінки точності вибрано критерій максимальної правдоподібності.**

**Метод може бути використаний при оцінці місця розташування тіл у програмах автоматизованого виявлення рухомих об'єктів, наприклад, у програмі CoLiTec**

**Ключові слова: ПЗС-кадр, метод максимальної правдоподібності, компактна група астероїдів, оцінка місця розташування, CoLiTec**

**Разработан вычислительный метод оценки местоположения астероидов компактной группы на серии ПЗС-кадров. В качестве модели изображения объектов используется субпиксельная гауссова модель. Для оценки точности выбран критерий максимального правдоподобия.**

**Метод может быть использован при оценке местоположения тел в программах автоматизированного обнаружения движущихся объектов, например, в программе CoLiTec**

**Ключевые слова: ПЗС-кадр, метод максимального правдоподобия, компактная группа астероидов, оценка местоположения, CoLiTec**

УДК 004.89  
DOI: 10.15587/1729-4061.2014.28028

# МЕТОД МАКСИМАЛЬНО ПРАВДОПОДОБНОЙ ОЦЕНКИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ КОМПАКТНОЙ ГРУППЫ НА ПЗС-КАДРЕ

**Л. О. Михайлова\***

E-mail: ne-luboff@yandex.ua

**В. Е. Саваневич**

Доктор технических наук, профессор\*

E-mail: vadym@savanevych.com

**Н. С. Соковикова**

Аспирант\*

E-mail: nataly.sokovikova@gmail.com

**М. М. Безкровный**

Старший преподаватель

Кафедра компьютерных систем и сетей

Запорожский институт экономики и информационных технологий  
ул. Кияшка, 16-Б, г. Запорожье, Украина, 69041

E-mail: bezkrovonii@gmail.com

**С. В. Хламов**

Аспирант\*

E-mail: serik2010@yandex.ua

**А. В. Погорелов\***

E-mail: pogartem@rambler.ru

\*Кафедра электронно-вычислительных машин

Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

## 1. Введение

Падение на Землю комет и астероидов представляет угрозу планетарного масштаба. В последние годы активно обсуждаются различные аспекты астероидно-кометной опасности. В настоящее время известно около четырех сотен астероидов [1], орбиты которых опасно сближаются с орбитой Земли с диаметрами от 40 километров до нескольких метров. Общее же число неоткрытых астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ) может достигнуть, по некоторым оценкам, ста тысяч и более. Отслеживание и исследование астероидов осуществляется с использованием телескопов, использующих матричные приборы с зарядовой связью (ПЗС) [2–4].

Наблюдение АСЗ производится в сложных условиях, обусловленных рядом причин, таких как:

- 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 аберраций оптической системы;

– отсутствие отличий между изображением астероида и изображением звезд на отдельном кадре [5].

Актуальной остаётся задача расчёта локализации астероидов. Стоит заметить, что в результате пересечения орбит возможны варианты передвижения нескольких астероидов компактными группами вблизи друг от друга. В этом случае необходимо определять параметры каждого астероида в группе.

## 2. Анализ литературных данных

Методы вычисления параметров местоположения объекта на ПЗС-кадре могут быть разделены на две крупные группы:

- методы, которые принимают в качестве координат объекта координаты локального максимума его изображения на кадре [6];
- методы, основанные на аппроксимации сигналов от объектов функцией рассеяния точки [5].

Наиболее часто в качестве модели распределения фотонов применяются различные варианты двумерной гауссианы [5, 8, 9]: модели Моффата [10, 11] или Лоренца [7, 11]. Обычно такие модели описываются непрерывными функциями, в то время как реальные ПЗС-изображения являются дискретными. Такой подход аргументировано критикуется в [10]. Основной его недостаток в том, что модели хорошо работают только с изображениями объектов больших размеров. Это приводит к тому, что: во-первых, существенно усложняет процесс вычислений; во-вторых, не в полной мере решается вопрос об адекватности используемых оценок параметров PSF. Как результат – возрастает ошибка определения координат наблюдаемых объектов.

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 [12] или, что шумовые фотоны отделяются от изображения объекта в соответствии с принятой моделью сигналов и помех [13]. Методы компенсации шумовой подложки приведены в [14].

Основным недостатком большинства методов оценки параметров местоположения объекта на ПЗС-кадре является то, что они не учитывают возможность пересечения изображений нескольких близкорасположенных объектов (статистическую зависимость изображений близких объектов). Также они упускают основные особенности формирования ПЗС-изображений объектов и закономерности распределения шумовых фотонов на изображении объекта и в его окрестности.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью данной работы является разработка нового метода определения местоположения объектов компактной группы на ПЗС-кадре. Данный метод учитывает основные особенности формирования изображений и наличие шумовой составляющей в изображении объекта и в его окрестности. Некоторые общие положения данного метода и результаты его применения можно найти в наших работах [14–16].

Предполагается, что в результате телескопических наблюдений обнаружено  $Q$  объектов, изображение которых взаимно пересекаются и являются, в этом смысле, статистически зависимыми. Такое множество объектов в работе называется компактной группой объектов. Считается, что при оценке положения элементов объектов компактной группы по их ПЗС-изображению исследуется только область изображения гипотетических объектов  $\Omega_{IPSS}$  (ОИГО). ОИГО является частью области внутрикадровой обработки  $\Omega_{IPS}$ , в которую входит  $N_{IPSS}$  пикселей, содержащих изображение объектов. При наблюдении и регистрации объектов доступны экспериментальные яркости  $A_{ikt}^*$  пикселей ПЗС-матрицы. Данные яркости  $A_{ikt}^*$  формируются независимо друг от друга (напряжения на выходах пикселей ПЗС-матрицы независимы) и являются величиной, пропорциональной количеству фотонов, попавших в данный пиксель. Экспериментальные яркости  $A_{ikt}^*$  приводятся к относительным яркостям  $v_{ikt}^*$ :

$$v_{ikt} = \frac{A_{ikt}}{\sum_{i,k} A_{ikt}}. \quad (1)$$

При этом результатом наблюдений является совокупность относительных яркостей  $\tilde{U} = (v_{11t}^*, \dots, v_{ikt}^*, \dots, v_{N_{IPSt}}^*)$ .

Во время предварительной оценки положения объектов на кадре, предполагается, что истинные положения объектов локализируются в окрестностях пикселей-пиков (локальных максимумов изображения по яркости). Под пиком изображения понимается пиксель ПЗС-матрицы, яркость которого больше яркости любого из прилегающих к нему. Начальные приближения координат объектов на  $t$ -м кадре  $x_{jt}, y_{jt}$  (где  $j = \overline{1, Q}$ ) соответствуют координатам привязки пикселей-пиков изображения, гипотетически соответствующих положению объектов.

Учитывая описанные выше условия, необходимо разработать вычислительный метод оценки местоположения каждого из  $Q$  объектов компактной группы.

Вектор оцениваемых параметров  $\Theta_{sh}^{sub}$  включает в себя параметры местоположения объектов компактной группы  $x_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}), y_{jt}(\Theta_{sh}^{sub})$  (где  $j = \overline{1, Q}$ ), среднее квадратическое отклонение (СКО) координат падения сигнальных фотонов  $\sigma_{subGjt}$ . В том числе оценке подлежат весовые характеристики изображений отдельных фотонов  $p_j$  и фона  $p_0$ . При этом количество объектов в компактной группе считается известным и равным  $Q$ . Для оценки вектора параметров объектов компактной группы, в данной работе, используется критерий максимального правдоподобия.

### 4. Субпиксельная гауссова модель цифрового изображения объектов компактной группы

Считается, что координаты падения сигнальных фотонов на ПЗС-матрицу имеют круговое нормальное распределение [17].

Субпиксельную модель изображения объектов компактной группы, с точностью до констант, считается функция, подобная плотности распределения координат падения фотонов от этих объектов. Иными словами субпиксельная гауссова модель описывает распределение координат падения фотонов в области кадра, соответствующей изображению компактной группы. Отличие модели от указанной плотности заключается в отсутствии нормирующей константы.

Плотность распределения координат падения фотонов компактной группы объектов можно представить смесью вероятностных распределений:

$$f_{G2noise}(x_{it}, y_{kt}, \Theta_{sh}^{sub}) = p_0 + \sum_{j=1}^Q \frac{p_j}{2\pi\sigma_{subGjt}^2} \times \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_{subGjt}^2} \left[ (x_{it} - x_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}))^2 + (y_{kt} - y_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}))^2 \right]\right\}, \quad (2)$$

где  $p_0$  – вероятность того, что очередной фотон является шумовым;  $p_j$  – вероятность того, что очередной фотон принадлежит  $j$ -му объекту из компактной

группы ( $\sum_{j=1}^Q p_j = 1 - p_0$ );  $X_{\text{subGjt}}$  – СКО координат падения сигнальных фотонов.

Пиксели ПЗС-матрицы являются интеграторами, объединяющими в один потенциал энергию всех попавших в них фотонов. Поэтому в рамках субпиксельной гауссовой модели относительная яркость  $A_{\text{ikt}}$  пикселей ПЗС-матрицы может быть представлена выражением:

$$A_{\text{ikt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}) = \int_{x_{\text{bi}}}^{x_{\text{ei}}} \int_{y_{\text{bi}}}^{y_{\text{ei}}} f_{\text{G2n}}(x_{\text{it}}, y_{\text{kt}}, \Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}) dx_{\text{it}} dy_{\text{kt}}. \quad (3)$$

Выражение (3) теоретической яркости пикселя при субпиксельной гауссовой модели можно получить, подставив в (3) в качестве подынтегрального выражения плотность распределения координат падения фотонов компактной группы объектов (2):

$$A_{\text{ikt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}) = \Delta_{\text{CCD}}^2 (p_0) + \sum_{j=1}^Q p_j F_{x_i}(x_{\text{jt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2) F_{y_k}(y_{\text{jt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2) = I_{\text{ikt n}} + I_{\text{ikt s}}, \quad (4)$$

$$I_{\text{ikt n}} = \Delta_{\text{CCD}}^2 (p_0), \quad (5)$$

$$I_{\text{ikt s}} = p_j F_{x_i}(x_{\text{jt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{int}}); \sigma_{\text{Gjt}}^2) F_{y_k}(y_{\text{jt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{int}}); \sigma_{\text{Gjt}}^2). \quad (6)$$

где  $N_z(m_z; \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp(-\frac{1}{2\sigma^2}(z - m_z)^2)$  – значение плотности нормального распределения с математическим ожиданием  $m_z$  и дисперсией  $\sigma^2$  в точке  $z$ ;

$F_{z_i}(m_z; \sigma^2) = \int_{z_{\text{ei}}}^{z_{\text{bi}}} N_z(m_z; \sigma^2) dz$  – значение вероятности попадания нормально распределенной СВ с указанными выше характеристиками в интервал  $[z_{\text{bi}}, z_{\text{ei}}]$ ;  $\Delta_{\text{CCD}}$  – размер пикселя ПЗС-матрицы;  $I_{\text{ikt n}}, I_{\text{ikt s}}$  – шумовая и сигнальная составляющие теоретической яркости  $\text{ikt}$ -го пикселя  $t$ -го ПЗС-кадра.

### 5. Функция правдоподобия и общий вид системы уравнений максимального правдоподобия

Теоретическим аналогом относительных яркостей являются вероятности попадания сигнальных фотонов в  $\text{ik}$ -ый пиксель ПЗС-матрицы с заданными границами. Плотность распределения координат падения сигнальных фотонов от объектов компактной группы на ПЗС-матрицу (с параметрами  $x_{\text{it}}, y_{\text{kt}}, \Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}$ ) можно представить смесью распределений, аналогичной выражению. Учитывая вероятностный характер распределения координат сигнальных фотонов в пикселях ПЗС-матрицы, выражение для вероятности попадания сигнальных фотонов в  $\text{ik}$ -ый пиксель ПЗС-матрицы имеет вид, аналогичный выражению:

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

В рамках поставленной задачи функция правдоподобия  $L(\Theta_{\text{mlm}}^{\text{sub}})$  является произведением вероятностей  $v_{\text{ikt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})$  попадания сигнальных фотонов в пиксели ПЗС-матрицы, возведенных в степень, пропорциональную количеству фотонов, попавших в данные пиксели [18]:

$$L(\Theta_{\text{mlm}}^{\text{sub}}) = \prod_{\text{ik}}^{N_{\text{IPS}}} v_{\text{ikt}}^{A_{\text{ikt}}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}). \quad (8)$$

Уравнения максимального правдоподобия находятся путем дифференцирования соответствующей функции правдоподобия (8) по искомым параметрам и приравниванию ее к нулю [19]. При этом следует учитывать, что вероятности  $v_{\text{ikt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})$  попадания сигнальных фотонов в пиксели ПЗС-матрицы не равны нулю. С учетом этого, выражение (8) примет вид:

$$\sum_{\text{ik}}^{N_{\text{IPS}}} \frac{A_{\text{ikt}}}{v_{\text{ikt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})} \frac{\partial v_{\text{ikt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})}{\partial \theta_n} = 0. \quad (9)$$

Выражение (9) не изменится, если обе его части поделить на количество фотонов  $\sum_{\text{ik}}^{N_{\text{IPS}}} A_{\text{ikt}}$  попавших в пиксели ОИГО. Учитывая выражение (1) уравнения максимального правдоподобия будут выглядеть следующим образом:

$$\sum_{\text{ik}}^{N_{\text{IPS}}} \frac{v_{\text{ikt}}^*}{v_{\text{ikt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})} \frac{\partial v_{\text{ikt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})}{\partial \theta_n} = 0. \quad (10)$$

Уравнение данного вида является уравнением системы уравнений максимально правдоподобной оценки местоположения объектов компактной группы на ПЗС-кадре.

### 6. Определение элементов уравнений из системы уравнений максимального правдоподобия

Согласно [14], производные от вероятности  $v_{\text{ikt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})$  по теоретическим координатам  $j$ -го гипотетического объекта на  $t$ -ом ПЗС-кадре имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dv_{\text{ikt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})}{dx_{\text{jt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})} &= p_j F_{y_k}(y_{\text{jt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2) \times \\ &\times (N_{x_{\text{ei}}}(x_{\text{jt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2) - N_{x_{\text{bi}}}(x_{\text{jt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2)) = \\ &= \frac{p_j F_{y_k}(y_{\text{jt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2) F_{x_i}(x_{\text{jt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}}); \sigma_{\text{subGjt}}^2)}{\sigma_{\text{subGjt}}} \times \\ &\times (m_{x_{\text{it}}}^{\text{loc}} - x_{\text{jt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $m_{z_i}^{\text{loc}}$  – локальное математическое ожидание случайной величины  $z$  [15] на интервале  $[z_{\text{bi}}, z_{\text{ei}}]$ .

Аналогично (11) производная от относительной яркости  $v_{\text{ikt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})$  по параметру положения  $y_{\text{jt}}(\Theta_{\text{sh}}^{\text{sub}})$   $j$ -го гипотетического объекта определяется выражением:

$$\begin{aligned} \frac{dv_{ikt}(\Theta_{sh}^{sub})}{dy_{jt}(\Theta_{sh}^{sub})} &= p_j F_{xi}(x_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGjt}^2) \times \\ &\times (N_{y_{ei}}(y_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGjt}^2) - N_{y_{bi}}(y_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGjt}^2)) = \\ &= \frac{p_j F_{xi}(x_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGjt}^2) F_{yk}(y_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGjt}^2)}{\sigma_{subGjt}} \times \\ &\times (m_{y_{kt}}^{loc} - y_{jt}(\Theta_{sh}^{sub})). \end{aligned} \quad (12)$$

Производная от относительной яркости  $v_{ikt}(\Theta_{sh}^{sub})$  по параметру  $\sigma_{subGjt}$  формы подынтегральной модели изображения  $j$ -го гипотетического объекта, согласно [14], может быть представлена в виде (13).

$$\begin{aligned} \frac{dv_{ikt}(\Theta_{sh}^{sub})}{d\sigma_{subGjt}} &= \\ &= \frac{p_j F_{yk}(y_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGjt}^2)}{\sigma_{subGjt}} \times \\ &\times ((x_{ei} - x_{jt}(\Theta_{sh}^{sub})) N_{x_{ei}}(x_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGjt}^2) - \\ &- (x_{bi} - x_{jt}(\Theta_{sh}^{sub})) N_{x_{bi}}(x_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGjt}^2)) + \\ &+ \frac{p_j F_{xi}(x_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGjt}^2)}{\sigma_{subGjt}} \times \\ &\times ((y_{ei} - y_{jt}(\Theta_{sh}^{sub})) N_{y_{ei}}(y_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGjt}^2) - \\ &- (y_{bi} - y_{jt}(\Theta_{sh}^{sub})) N_{y_{bi}}(y_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGjt}^2)). \end{aligned} \quad (13)$$

### 7. Система уравнений максимального правдоподобия для субпиксельной модели

При максимально правдоподобной оценке координат местоположения объекта на ПЗС-кадре используются только пиксели исследуемого СВКО. Уравнения (10) максимального правдоподобия, с учетом выражений (11), (12) для оценок координат  $x_{jt}(\Theta_{sh}^{sub})$  и  $y_{jt}(\Theta_{sh}^{sub})$   $j$ -го гипотетического объекта на  $t$ -ом ПЗС-кадре, может быть представлена в виде [14]:

$$\begin{cases} \sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \sum_{j=1}^Q v_{ikt}^* p_j F_{yk}(y_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGjt}^2) F_{xi}(x_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGjt}^2) \times \\ \times (m_{x_{it}}^{loc} - x_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}))/v_{ikt}(\Theta_{sh}^{sub}) = 0; \\ \sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \sum_{j=1}^Q v_{ikt}^* p_j F_{xi}(x_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGjt}^2) F_{yk}(y_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma_{subGjt}^2) \times \\ \times (m_{y_{kt}}^{loc} - y_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}))/v_{ikt}(\Theta_{sh}^{sub}) = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Проведя некоторые преобразования [14], уравнение максимального правдоподобия по координате  $x_{jt}(\Theta_{sh}^{sub})$  можно представить в виде:

$$\hat{x}_j = \frac{\sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \sum_{j=1}^Q v_{ikt}^* \lambda_{jikt} m_{x_{it}}^{loc}}{\sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \sum_{j=1}^Q v_{ikt}^* \lambda_{jikt}}, \quad (15)$$

$$\lambda_{jikt} = \frac{p_j F_{jik}}{v_{ikt}(\Theta_{sh}^{sub})} = \frac{p_j F_{jik}}{p_0/N_{IPSS} + \sum_{j=1}^Q p_j F_{jik}}, \quad (16)$$

где  $\lambda_{jikt}$  – апостериорные вероятности принадлежности фотонов  $ik$ -го пикселя  $t$ -го кадра  $j$ -му объекту;

$$v_{ikt}(\Theta_{sh}^{sub}) = p_0/N_{IPSS} + \sum_{j=1}^Q p_j F_{jik}, \quad (17)$$

где  $v_{ikt}(\Theta_{sh}^{sub})$  – вероятность попадания сигнальных фотонов в  $ik$ -й пиксель ПЗС-матрицы на  $t$ -ом кадре;

$$F_{jik} = F_{x_{jt}} F_{y_{kt}}, \quad (18)$$

$$F_{x_{jt}} = \int_{x_{bi}}^{x_{ei}} N_x(x_{jt}(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma^2), \quad F_{y_{kt}} = \int_{y_{bk}}^{y_{ek}} N_y(y_{kt}(\Theta_{sh}^{sub}); \sigma^2), \quad (19)$$

где  $F_{zi}(m_z; \sigma^2)$  – значение вероятности попадания нормально распределенной СВ в интервал  $[z_{bi}, z_{ei}]$ ;  $N_z(m_z; \sigma^2)$  – значение плотности нормального распределения с математическим ожиданием  $m_z$  и дисперсией  $\sigma^2$  в точке  $z$ ;  $N_{IPSS}$  – количество пикселей в исследуемой ОБКО, в которых предполагается наличие изображения объектов;

$$\hat{p}_j = \frac{\sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \lambda_{jikt} v_{ikt}(\Theta_{sh}^{sub})}{\lambda_0 + \sum_{j=1}^Q \sum_{i,k} \lambda_{jikt} v_{ikt}(\Theta_{sh}^{sub})}, \quad (20)$$

где – оценка относительного веса фотонов от  $j$ -го объекта;

$$\hat{p}_0 = \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \sum_{j=1}^Q \sum_{i,k} \lambda_{jikt} v_{ikt}(\Theta_{sh}^{sub})}, \quad (21)$$

где  $\hat{p}_0$  – выражение для оценки относительного веса шумовых фотонов в исследуемой области  $\Omega_{IPSS}$ ;

$$\lambda_0 = \frac{1}{N_{IPSS}} \sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \frac{p_0 v_{ik}(\Theta_{sh}^{sub})}{\frac{p_0}{N_{IPSS}} + \sum_{j=1}^Q p_j F_{jik}}, \quad (22)$$

где  $\lambda_0$  – апостериорные вероятности принадлежности фотонов исследуемой области  $\Omega_{IPSS}$  шумовой подложке;  $\hat{x}_j$  – оценка координаты  $j$ -го объекта.

После проведения аналогичных преобразований с уравнением максимального правдоподобия по координате  $y_{jt}(\Theta_{sh}^{sub})$  система (10) примет вид:

$$\begin{cases} \hat{x}_j = \frac{\sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \sum_{j=1}^Q v_{ikt}^* \lambda_{jikt} m_{x_{it}}^{loc}}{\sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \sum_{j=1}^Q v_{ikt}^* \lambda_{jikt}}; \\ \hat{y}_j = \frac{\sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \sum_{j=1}^Q v_{ikt}^* \lambda_{jikt} m_{y_{kt}}^{loc}}{\sum_{i,k}^{N_{IPSS}} \sum_{j=1}^Q v_{ikt}^* \lambda_{jikt}}. \end{cases} \quad (23)$$

Если необходимо оценить и СКО координат падения фотонов объекта, то уравнение максимального правдоподобия для оценки СКО может быть представлено выражением [14]:

$$\hat{\sigma}_{subGjt}^2 = \frac{\sum_{i,k}^{N_{ips}} v_{ikt}^* \lambda_{jikt} \left( (m_{xi}^{loc} - \hat{x}_j)^2 + (m_{yk}^{loc} - \hat{y}_j)^2 \right)}{\sum_{i,k}^{N_{ips}} L_{ik}} \approx \frac{\sum_{i,k}^{N_{ips}} v_{ikt}^* \lambda_{jikt} \left( (m_{xi}^{loc} - \hat{x}_j)^2 + (m_{yk}^{loc} - \hat{y}_j)^2 \right)}{2 \sum_{i,k}^{N_{ips}} v_{ikt}^* \lambda_{jikt}}, \quad (24)$$

$$L_{ik} = \frac{v_{ikt}^*}{v_{ikt}(\Theta_{sh}^{sub})} p_j(F_{yjk}(\Delta x_{bi} N_{x_{bi}}(\hat{x}_j; \sigma_j^2) + \Delta x_{ei} N_{x_{ei}}(\hat{x}_j; \sigma_j^2)) + F_{xji}(\Delta y_{bk} N_{y_{bk}}(\hat{y}_j; \sigma_j^2) + \Delta y_{ek} N_{y_{ek}}(\hat{y}_j; \sigma_j^2))). \quad (25)$$

Приближенное равенство [14] в уравнении для оценки  $\hat{\sigma}_{subGjt}^2$  (13) вводится путем использования приближенной замены:

$$\Delta x_{bi} N_{x_{bi}}(\hat{x}_j; \sigma_{subGjt}^2) + \Delta x_{ei} N_{x_{ei}}(\hat{x}_j; \sigma_{subGjt}^2) \approx F_{xji},$$

$$\Delta y_{bk} N_{y_{bk}}(\hat{y}_j; \sigma_{subGjt}^2) + \Delta y_{ek} N_{y_{ek}}(\hat{y}_j; \sigma_{subGjt}^2) \approx F_{yjk}, \quad (26)$$

основанной на формуле прямоугольников численного интегрирования [20].

Решение уравнения (26) может быть получено путем использования итерационной процедуры метода последовательных приближений [21].

### 8. Обсуждение показателей точности предложенного метода максимально правдоподобной оценки местоположения объектов компактной группы

Был проведен сравнительный анализ статистических свойств оценок разработанного метода и методов, используемых в современных обсерваториях. Для сравнения взяты результаты тридцати самых продуктивных обсерваторий по количеству наблюдений астероидов за 2012 год. Суммарное количество измерений, объектов и открытий астероидов приведено согласно циркулярам [22] Центра малых планет (MPC), статистические свойства измерений приведены из сайта MPC [23]. Практическое внедрение разработанного метода было осуществлено в программу оперативного автоматизированного обнаружения астероидов CoLiTec [16]. В исследуемом временном интервале пользователями ПО CoLiTec были обсерватории: ISON-NM Observatory (H15), Andrushivka Astronomical Observatory (A50), ISON-Kislovodsk Observatory (D00). В рейтинге самых продуктивных обсерваторий мира по количеству измерений малых тел Солнечной Системы (СС) пользователи ПО CoLiTec в 2012 году заняли 9, 13, 22 места. В 2010 г. обсерватории H15 и A50 занимали 11 и 17 места по данному показателю. По суммарным итогам 2011–2012 гг. обсерватория ISON-NM (H15) заняла 7 место, как по числу измерений, так и по числу предварительных открытий.

По среднему модулю невязок обсерватории-партнеры CoLiTec занимают лидирующие позиции в своем классе телескопов (рис. 1, а). Так в 2012 г. модуль средних невязок на обсерваториях H15 и A50 был равен

0,061" и 0,06", Таким образом, по среднему модулю невязок обсерватории H15 и A50 заняли 3 и 2 места среди телескопов с малой апертурой.

СКО, в пикселях, оценок положения объектов (рис. 1, б) используется для характеристики потенциальных возможностей вычислительного метода при абстрагировании от параметров используемых ПЗС-матрицы и другого используемого оборудования. По этому показателю обсерватории-партнеры CoLiTec имеют одни из лучших результатов среди телескопов с малой апертурой. Обсерватории-партнеры CoLiTec за 2012 год имеют практически одинаковые показатели СКО (в пикселях): H15 – 0,25 пикселя (5 место), A50 – 0,23 пикселя (3 место), D00 – 0,23 пикселя (3 место).

Внедрение в ПО CoLiTec разработанного метода значительно повысило точность измерений объектов. Благодаря этому, в 2012 году была открыта всемирно известная комета C/2012 S1 (ISON), а в 2013 году – комета P/2013 V3 (Nevski). Всего, на текущий момент, при использовании программы CoLiTec сделано более полумиллиона измерений малых тел Солнечной Системы, открыто 1523 астероидов, 4 из них околоземные (из 16 открытых в СССР, СНГ и Балтии), четыре кометы (из 7 открытых в СНГ и Балтии), 21 троянский астероид Юпитера и один кентавр (из 2 открытых в СНГ и Балтии). Еще трем открытым ПО CoLiTec необычным объектам посвящены отдельные циркуляры MPC.

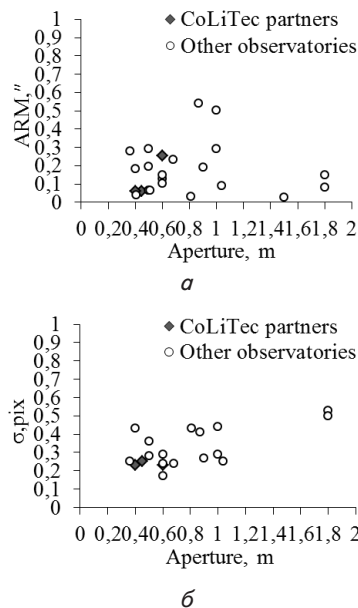


Рис. 1. Ведущие астероидные обзоры мира по данным 2012 года: а – модуль средних невязок измерений объектов, угловые секунды; б – СКО оценок положения объектов, пиксели

### 9. Выводы

Разработан новый вычислительный метод оценки параметров местоположения близких объектов с использованием критерия максимального правдоподобия. В качестве модели формы изображения объектов используется субпиксельная модель Гаусса. При этом

субпиксельной моделью изображения объектов компактной группы, с точностью до констант, считается функция, подобная плотности распределения координат падения фотонов от этих объектов. Отличие модели от указанной плотности заключается в отсутствии нормирующей константы.

За счёт использования субпиксельной гауссовой модели изображения объектов достигнута высокая точность измерений. Внедрение уравнений максимального правдоподобия обеспечило низкую вычислительную сложность метода.

Разработанный метод может быть использован для оценки положения близких статистически зависимых объектов в программах автоматизированного обнаружения любых объектов, включая астероиды, на ПЗС-кадрах [24]. Данный метод уже используется в системе оперативного автоматизированного обнару-

жения астероидов CoLiTec. Метод показал высокую точность при оценке положения нескольких близких статистически зависимых объектов [16].

Внедрение разработанного метода в ПО CoLiTec повысило точность измерений объектов. За счет этого, пользователи программы повысили свой рейтинг по количеству измерений малых тел СС. По суммарным итогам 2011–2012 года обсерватория ISON-NM заняла 7 место как по числу измерений, так и по числу предварительных открытий. По параметру СКО, в пикселях, оценок положения объектов, партнеры CoLiTec за 2012 год имеют: H15 – 0,25 пикселя (5 место), A50 – 0,23 пикселя (3 место), D00 – 0,23 пикселя (3 место). В 2012 году среднему модулю невязок оценок положения астероидов был равен 0,061" (H15) и 0,06" (A50), обеспечив данным обсерваториям 3 и 2 места среди телескопов с малой апертурой.

### Литература

1. Шустов, Б. М. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра [Текст] / Б. М. Шустов, Л. В. Рыхлова. – М.: Физматлит, 2010. – 384 с.
2. Вениаминов, С. С. Концепция системы противодействия космическим угрозам: астрономические аспекты [Текст] / С. С. Вениаминов, Г. К. Боровин, И. Е. Молотов, С. А. Нароенков и др. // Астрономический вестник. – 2013 – Т. 47, № 4 – С. 327–340.
3. Рыхлова, Л. В. Получение физических характеристик избранных астероидов, сближающихся с землей [Текст] / Л. В. Рыхлова, Е. С. Баканас, С. И. Барабанов, В. В. Бусарев. – РФФИ, 2013. – 43 с.
4. Козырев, Е. С. Исследование точности астрометрической редукции при использовании комбинированного метода наблюдений небесных объектов [Текст] / Е. С. Козырев, Е. С. Сибирякова, А. В. Шульга // Космічна наука і технологія. – 2010. – Т. 16, № 5. – С. 71–76.
5. Соковикова, Н. С. Оценка координат близких астероидов на ПЗС-изображении [Текст] / Н. С. Соковикова, В. Е. Саваневич, М. М. Бескровный, С. В. Хламов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 4, № 4 (64). – С. 41–44.
6. Miura, N. Likelihood-based Method for Detecting Faint Moving Objects [Text] / N. Miura, K. Itagaki, N. Baba // The Astronomical Journal. – 2005. – Vol. 130, Issue 3. – P. 1278–1285. doi:10.1086/431955
7. Zacharias, N. UCAC3 pixel processing [Text] / N. Zacharias // The Astronomical Journal. – 2010. – Vol. 139, Issue 6. – P. 2208–2217. doi:10.1088/0004-6256/139/6/2208
8. Jogesh Babu, G. Object detection in multi-epoch data [Text] / G. Jogesh Babu, A. Mahabal, S. G. Djorgovski, R. Williams // Statistical Methodology. – 2008. – Vol. 5, Issue 4. – P. 299–306. doi:10.1016/j.stamet.2008.02.003
9. Vereš, P. Improved Asteroid Astrometry and Photometry with Trail Fitting [Text] / P. Vereš, R. Jedicke, L. Denneau, R. Wainscoat, M. J. Holman, H.-W. Lin // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2012. – Vol. 124, Issue 921. – P. 1197–1207. doi:10.1086/668616
10. Bauer, T. Improving the Accuracy of Position Detection of Point Light Sources on Digital Images [Text] / T. Bauer // Proceedings of the IADIS Multiconference, Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing, Algarve, Portugal, 2009. – P. 3–15.
11. Izmailov, I. S. Astrometric CCD observations of visual double stars at the Pulkovo Observatory [Text] / I. S. Izmailov, M. L. Khovrichева, M. Y. Khovrichев, O. V. Kiyeva, E. V. Khrutskaya, L. G. Romanenko et al. // Astronomy Letters. – 2010. – Vol. 36, Issue 5. – P. 349–354. doi:10.1134/s1063773710050051
12. Harris, W. E. A comment on image detection and the definition of limiting magnitude [Text] / W. E. Harris // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 1990. – Vol. 102. – P. 949–953. doi: 10.1086/132720
13. Veiga, C. H. Astrometric position determination of digitized images of natural satellites [Text] / C. H. Veiga, R. Vieira Martins // Astronomy and Astrophysics Supplement Series. – 1995. – Vol. 111. – P. 387–392.
14. 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. – № 162. – С. 78–86.
15. Саваневич, В. Е. Определение координат статистически зависимых объектов на дискретном изображении [Текст] / В. Е. Саваневич // Радиоэлектроника и информатика. – 1999. – № 3. – С. 4–8.
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. Lafrenière, D. A New Algorithm for Point-Spread Function Subtraction in High-Contrast Imaging: A Demonstration with Angular Differential Imaging [Text] / D. Lafrenière, C. Marois // The Astrophysical Journal. – 2007. – Vol. 660, Issue 1. – P. 770–780. doi:10.1086/513180

18. Кожухов, А. М. Оценка координат астероида на дискретном изображении [Текст] / А. М. Кожухов // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 15-й Юбилей. Междунар. молодеж. форум, 18–20 апреля 2011 г. : сб. матер. форума. Т. 3. – Харьков, 2011. – С. 213–214.
19. Закс, Ш. Теория статистических выводов [Текст]: пер. с англ. / Ш. Закс. – М.: Мир, 1975. – 776 с.
20. Бахвалов, Н. С. Численные методы [Текст] / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2003. – 632 с.
21. Демидович, Б. П. Основы вычислительной математики. [Текст] / Б. П. Демидович, И. А. Марон. – М.: Наука, 1970. – 664 с.
22. Minor Planet Center. MPC/MPO/MPS Archive [Electronic resource] / Available at : [http://www.minorplanetcenter.org/iau/ECS/MPCArchive/MPCArchive\\_TBL.html](http://www.minorplanetcenter.org/iau/ECS/MPCArchive/MPCArchive_TBL.html)
23. Minor Planet Center. Numbered-Residuals Statistics For Observatory Codes [Electronic resource] / Available at: <http://www.minorplanetcenter.net/iau/special/residuals2.txt>
24. 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.

*Запропоновано метод формування навчальних вибірок, який дозволяє охарактеризувати індивідуальну інформативність зразків відносно центрів і меж інтервалів ознак. Це дозволяє автоматизувати аналіз вибірки і її поділ на підвибірки, і, як наслідок, скоротити розмірність навчальних даних. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує запропоновані показники та проведені експерименти з дослідження їхніх властивостей*

*Ключові слова: вибірка, відбір екземплярів, редуція даних, нейронна мережа, скорочення розмірності*

*Предложен метод формирования обучающих выборок, позволяющий охарактеризовать индивидуальную информативность экземпляров относительно центров и границ интервалов признаков. Это позволяет автоматизировать анализ выборки и её разделение на подвыборки, и, как следствие, сократить размерность обучающих данных. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенные показатели, и проведены эксперименты по исследованию их свойств*

*Ключевые слова: выборка, отбор экземпляров, редуция данных, нейронная сеть, сокращение размерности*

УДК 004.93

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.28027

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЦЕНЗУРИРОВАНИЯ ВЫБОРОК ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ НЕЙРОМОДЕЛЕЙ

С. А. Субботин

Доктор технических наук, профессор  
Кафедра программных средств  
Запорожский национальный  
технический университет  
ул. Жуковского, 64,  
г. Запорожье, Украина, 69063  
E-mail: subbotin@zntu.edu.ua

### 1. Введение

Нейросетевые методы [1], являясь одним из наиболее мощных инструментальных средств вычислительного интеллекта, получили широкое распространение в задачах автоматизации принятия решений, где необходимо синтезировать модели принятия решений на основе набора прецедентов (экземпляров) – наблюдений за состоянием объекта или процесса в некоторый момент времени.

Как правило, процесс построения нейромодели является длительным по времени и высоко итеративным вследствие того, что время обучения и точность получаемой нейромодели существенно зависят от размерности и качества используемой обучающей выборки. Поэтому для повышения скорости построения и качества нейромодели по прецедентам необходимо сократить размерность

выборки, обеспечив при этом сохранение основных её свойств.

Сокращение размерности выборки возможно обеспечить путем выделения подмножества наиболее информативных признаков из исходного набора признаков, характеризующих экземпляры выборки, а также путем выделения подмножества наиболее ценных (информативных) экземпляров, позволяющих аппроксимировать межклассовые границы. Раздельная реализация данных процедур на основе различных методов приводит к существенным затратам времени, поскольку при таком подходе информация о выборке, получаемая в результате промежуточных вычислений в одной процедуре, как правило, не используется в другой. Поэтому целесообразно разработать метод сокращения размерности выборки за счет объединения процедур отбора признаков и экземпляров и использующий один набор промежуточных расчетов для обеих