

ОЦЕНКА КООРДИНАТ АСТЕРОИДА НА ДИСКРЕТНОМ ИЗОБРАЖЕНИИ**Введение**

В связи с проблемами астероидной опасности интерес к астероидам в настоящее время достаточно велик [1]. Изучение астероидов, в том числе сближающихся с Землей в основном проводится с помощью оптических средств наблюдения, оснащенных ПЗС-матрицами. В настоящее время выдвигаются высокие требования к точности измерений положения астероидов – ошибка экваториальных координат не должна превышать угловой секунды [2]. Это связано с малостью длин мерных дуг, на которых можно наблюдать астероид на протяжении одной ночи, и с требуемой точностью прогнозирования положения объектов на достаточно большие временные интервалы.

При этом условия наблюдения астероидов можно считать сложными, характеризующимися, например, слабым уровнем сигналов от астероидов; возможной большой разницей яркостей изображения одного и того же астероида даже на одной серии кадров; отсутствием отличий между изображением астероида и изображением звезд, находящихся на данном участке неба, на отдельном кадре; наличием на кадрах неравномерно распределенного фона, форма распределения которого может меняться на одной серии кадров; «размытием» сигнала от астероида из-за турбулентности атмосферы; искажением сигнала от астероида вследствие аббераций оптической системы.

Используемые методы оценки координат астероида на дискретном изображении, наряду с качеством исходного изображения, являются определяющими для точности определения его координат, что делает задачу разработки данных методов актуальной.

Анализ литературы

Можно выделить две основные группы методов оценки параметров местоположения астероида на ПЗС-кадре. К первой группе относятся метод принятия в качестве координат астероида координат локального максимума изображения в области ПЗС-кадра, где предполагается наличие сигнала от астероида [3] и метод определения координат центра звезды как координат середины пятна, засвеченного объектом на ПЗС-матрице [4]. Неиспользование информации о закономерностях распределения сигнальных фотонов по изображению небесного объекта не позволяет добиться предельно допустимой точности оценки его положения на небесной сфере при использовании методов первой группы.

Вторая группа методов использует указанную информацию и основана на «аппроксимации сигналов от небесных объектов функцией рассеяния точки» (PSF-fitting) [3, 5]. Методы данной группы оценки положения небесного объекта используют различные модели распределения фотонов от небесного объекта на изображении объекта, что позволяет добиться большей точности оценки. К сожалению, в методах второй группы в большинстве случаев учет шумовых фотонов не уделяется особого внимания. Связано это с предположением о том, что учет шумовой составляющей и ее компенсация производится на этапе, предшествующем оценке положения небесного объекта [3]. В других методах [6] учет шумовой составляющей производится отделением шумовых фотонов в соответствии с принятой моделью сигналов и помех. Например, это может быть сумма функции рассеяния точки и постоянной или наклонной плоской шумовой подложки, высота и наклон которой являются дополнительными параметрами, подлежащими оценке [5]. Так как оценка шумовой составляющей сигнала по любой модели имеет какую-то ошибку, то некоторое количество шумовых фотонов остаются в составе сигнала даже после отделения. Однако данный факт не учитывается в большинстве описанных методов. В работе [6] учет шумовых и сигнальных фотонов ведется на основе группированных выборок, аппарат которых позволяет учесть факт

дискретизации сигналов от небесных объектов и невозможность определить внутрипиксельные координаты падения сигнальных фотонов [7]. Однако при этом в работе предполагается, что шумовые фотоны распределены равномерно по изображению небесного объекта, что не всегда верно

Таким образом, существующие методы либо не учитывают некоторых особенностей формирования дискретных изображений небесных объектов, связанных с использованием для этого ПЗС-матриц, либо не учитывают закономерностей, присущих распределению фоновых фотонов на изображении объекта и в его окрестности.

Цель статьи – разработка метода оценки положения астероида на дискретном изображении, учитывающего факт оценки непрерывных параметров (координат астероидов) на дискретном изображении (совокупность потенциалов пикселей ПЗС-матрицы) и то, что остаточные шумовые фотоны могут быть распределены по изображению объекта неравномерно.

Постановка задачи

Одиночный астероид (его изображение не пересекается с изображением какого-либо другого объекта) наблюдается в режиме часового ведения. Его изображение находится в строке внутрикадровой обработки (СВКО), размер $N_{СВКО}$ в пикселях которого существенно превышает размер изображения астероида (десятки пикселей). Малое время экспозиции позволяет пренебречь перемещением астероида за ее время. Координаты падения сигнальных фотонов астероида на ПЗС-матрицу имеют круговое нормальное распределение с математическими ожиданиями x_t, y_t и СКО σ_ϕ (1). Шумовые фотоны вызваны шумами считывания

изображения с ПЗС-матрицы, «темновыми токами», неравномерностью чувствительности пикселей ПЗС-матрицы, а также фоновым излучением неба [3]. Шумовые фотоны в СВКО образуют плоскую шумовую «подложку» (рис. 1). Местоположение изображения астероида на кадре точно неизвестно. При оценке параметров плоской шумовой подложки (параметров шума) известна предварительная оценка местоположения астероида на кадре с точностью, достаточной для выделения группы пикселей, соответствующих сигналу, внутри СВКО. Данная предварительная оценка основана на том, что группы сигнальных пикселей находятся в окрестности одного из локальных максимумов изображения по яркости. Каждый локальный максимум становится также и центром соответствующего СВКО.



Рис. 1

Наблюдению, регистрации доступны напряжения на выходе $N_{ПЗС}$ пикселей ПЗС-матрицы, которые легко можно привести к опытным относительным частотам попадания фотонов в ik -й пиксель ПЗС-матрицы в t -м кадре v_{ikt}^* :

$$v_{ikt}^* = A_{ikt} / \sum_{i,k}^{N_{СВКО}} A_{ikt}, \quad (1)$$

где A_{ikt} – амплитуда ik -го пикселя ПЗС-матрицы, принадлежащего исследуемому СВКО.

Результатом наблюдений является совокупность относительных частот $\vec{U} = (v_{11t}^*, \dots, v_{ikt}^*, \dots, v_{N_{СВКО}t}^*)$. Напряжения на выходе пикселей ПЗС-матрицы независимы.

Теоретическим аналогом опытных относительных частот являются вероятности $v_{ik}(\Theta)$ попадания фотонов в ik -й пиксель ПЗС-матрицы с границами x_m, x_{ki} по координате x и y_{ik}, y_{kk} – по координате y на t -м кадре за время t -й экспозиции. Размеры области Δ_x и

Δ_y ответственности пикселей ПЗС-матрицы по координатам x и y одинаковы.

Необходимо на основе совокупности значений v_{ik}^* и информации об изображении астероида на ПЗС-матрице синтезировать процедуру максимально правдоподобной оценки местоположения астероида на t -м кадре. Считается, что используемая при решении поставленной задачи функция правдоподобия дифференцируема в окрестности своего глобального максимума, начальное приближение находится в этой окрестности. Совокупность оцениваемых параметров Θ включает в себя параметры местоположения астероида x_t, y_t на момент привязки кадра τ_t , СКО координат падения фотонов σ_ϕ , а также параметры плоской шумовой подложки.

Функция правдоподобия кадра ОЭС с ПЗС-матрицей

Для максимизации точности оценки местоположения астероида необходимо учесть факт дискретизации пространства наблюдения (оцениваются непрерывные величины – координаты астероидов, по дискретным – амплитудам напряжений на выходах элементов ПЗС-матрицы), при этом выборка координат падения фотонов является группированной [6]. Общий вид уравнений, входящих в систему уравнений максимального правдоподобия оценки местоположения астероида на дискретном изображении можно представить выражением

$$\sum_{i,k}^{N_{CBKO}} \frac{v_{ikt}^*}{v_{ikt}(\Theta)} \frac{\partial v_{ikt}(\Theta)}{\partial \theta_m} = 0, \quad (2)$$

где Θ – совокупность параметров астероида.

Выражение для вероятности $v_{ikt}(\Theta)$ попадания фотонов в ik -й пиксель ПЗС-матрицы имеет вид

$$v_{ikt}(\Theta) = \int_{x_{ik}}^{x_{ki}} \int_{y_{ik}}^{y_{kk}} f(x, y) dx dy. \quad (3)$$

При этом, в соответствии с постановкой задачи, закон распределения координат падения фотонов на ПЗС-матрицу за время экспозиции t -го кадра можно представить смесью вероятностных распределений:

$$f(x, y) = A_u x + B_u y + C_u + \frac{p_1}{2\pi\sigma_\phi^2} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_\phi^2}[(x-x_t)^2 + (y-y_t)^2]\right\}, \quad (4)$$

где $p_1 = 1 - p_0$ – относительный вес сигнальных фотонов; A_u, B_u, C_u – параметры плоской

шумовой подложки; $p_0 = \int_{x_{ik}}^{x_{ki}} \int_{y_{ik}}^{y_{kk}} (A_u x + B_u y + C_u) dx dy$ – относительный вес шумовых фотонов

ПЗС-матрицы; σ_ϕ – СКО координат падения сигнальных фотонов; x_t, y_t – координаты небесного объекта на t -м кадре.

С учетом сказанного вероятность (3) попадания фотонов в пиксели ПЗС-матрицы может быть представлена в виде

$$v_{ikt}(\Theta) = I_{iknu} + I_{iktc}, \quad (5)$$

где

$$I_{iknu} = \Delta_{ПЗС}^2 (A_u x_{ikt} + B_u y_{ikt} + C_u), I_{iktc} = p_1 F_{xi}(x_t; \sigma_\phi^2) F_{yk}(y_t; \sigma_\phi^2) \quad (6)$$

– вероятности падения в ik -й пиксель ПЗС-матрицы шумовых и сигнальных фотонов;

$\Delta_{ПЗС} = \Delta_x = \Delta_y$ – размеры области ответственности ik -го пикселя ПЗС-матрицы по координатам x и y соответственно;

$$x_{ikt} = \frac{x_{ki} + x_{it}}{2}, \quad y_{ikt} = \frac{y_{kk} + y_{kk}}{2} \quad (7)$$

– средние значения координат ik -го пикселя ПЗС-матрицы;

$$F_{zi}(m_z; \sigma^2) = \int_{z_{ki}}^{z_{ii}} N_z(m_z; \sigma^2) dx; \quad (8)$$

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

Система уравнений максимального правдоподобия

Производные от вероятности (6) попадания фотонов в пиксели ПЗС-матрицы по параметрам сигнала не зависят от вероятности I_{ikna} . Поэтому при определении выражений для указанных производных используется только последнее слагаемое выражения (5):

$$\frac{d\nu_{ikt}(\Theta)}{dx_i} = \frac{P_1 F_{yk}(y_i; \sigma_\phi^2) F_{xi}(x_i; \sigma_\phi^2)}{\sigma_\phi} (m_{x_i}^{лок} - x_i), \quad (10)$$

где $m_{x_i}^{лок} = m_x + \frac{\sigma^2}{F_{xi}(m_x; \sigma^2)} (N_{x_{ki}}(m_x; \sigma^2) - N_{x_{it}}(m_x; \sigma^2))$ – локальное математическое ожидание случайной величины на интервале $[x_{ii}, x_{ki}]$ [6].

Аналогичное выражение имеет производная по положению объекта по координате y .

Если оценивается только положение астероида, то система уравнений максимального правдоподобия для пикселей исследуемого СВКО, в которых предполагается наличие сигнала, примет вид

$$\begin{cases} \hat{x}_t = \frac{\sum_{i,k}^{N_{СВКО}} \nu_{ikt}^* \lambda_{ikt} m_{x_i}^{лок}}{\sum_{i,k}^{N_{СВКО}} \nu_{ikt}^* \lambda_{ikt}}; \\ \hat{y}_t = \frac{\sum_{i,k}^{N_{СВКО}} \nu_{ikt}^* \lambda_{ikt} m_{y_k}^{лок}}{\sum_{i,k}^{N_{СВКО}} \nu_{ikt}^* \lambda_{ikt}}; \end{cases} \quad (11)$$

где $N_{СВКО}$ – количество пикселей в исследуемом СВКО, в которых предполагается наличие сигнала; \hat{x}_t – оценка координаты x астероида,

$$\lambda_{ikt} = \frac{P_1 F_{yk}(y_i; \sigma_\phi^2) F_{xi}(x_i; \sigma_\phi^2)}{\nu_{ikt}(\Theta)}. \quad (12)$$

При необходимости, для оценки СКО координат падения фотонов от астероида может быть использовано следующее приближенное уравнение максимального правдоподобия, основанное на формуле прямоугольников численного интегрирования:

$$\hat{\sigma}_\phi^2 \approx \frac{\sum_{i,k}^{N_{СВКО}} \nu_{ikt}^* \lambda_{ikt} \left((m_{x_i}^{лок} - \hat{x}_t)^2 + (m_{y_k}^{лок} - \hat{y}_t)^2 \right)}{2 \sum_{i,k}^{N_{СВКО}} \nu_{ikt}^* \lambda_{ikt}}. \quad (13)$$

Возможность разделения СВКО на область шума (пиксели, на которые попали только фотоны плоской шумовой подложки) и область сигнала (пиксели, на которые попали, в том числе, и сигнальные фотоны) приводит к возможности более простой (по отношению к оценке в общей системе уравнений максимального правдоподобия) оценки параметров плоской шумовой подложки – независимой МНК-оценки, которая будет рассмотрена ниже.

Учет плоской шумовой подложки не может полностью исключить шумовую составляющую. Для оценки относительного веса сигнальных фотонов используется стандартная оценка весов дискретной смеси вероятностных распределений [8]:

$$\hat{p}_1 = \frac{1}{N_{СВКОс}} \sum_{i,k}^{N_{СВКОс}} \lambda_{ikt};$$

$$\hat{p}_0 = 1 - \hat{p}_1,$$
(14)

где $N_{СВКОс}$ – количество пикселей с предполагаемым наличием сигнала в СВКО.

Так как локальное математическое ожидание является функцией от соответствующей искомой координаты, то система уравнений (11) является системой трансцендентных уравнений, которые могут быть решены методом последовательных приближений [9].

Сущностное описание процедуры оценки координат астероида на дискретном изображении

Для оценки координат астероида поочередно производятся две операции. Первая – расщепление статистик пикселей ПЗС-матрицы, входящих в исследуемый СВКО на статистики сигнала и статистики остаточного шума. Данная операция производится не для всех пикселей, входящих в исследуемый СВКО, а только для тех, которые входят в область предполагаемого наличия сигнала. В ходе данной операции, в соответствии со значением параметров Θ , полученным на предыдущей итерации (на первой итерации – начальные приближения) фотоны, попавшие в пиксель ПЗС-матрицы, распределяются на принадлежащие сигналу от астероида, которые посылаются на процедуру оценки координат астероида, и принадлежащие остаточному шуму. В качестве начального приближения, исходя из постановки задачи, используются координаты локального максимума изображения, вокруг которого сформирован исследуемый СВКО. Результатом первой операции является совокупность коэффициентов расщепления λ_{ikt} .

Операция, следующая за расщеплением, – оценка координат астероида проводится со статистиками, полученными в операции расщепления. При этом используется процедура оценки, на которую поступает результат расщепления статистик пикселей ПЗС-матрицы, входящих в исследуемую область, полученный на данной итерации. Процедура оценки по детерминированному правилу (11) – (14) формирует оценку координат местоположения астероида t -м кадре.

Сформированная таким образом оценка положения астероида $\hat{\Theta}_n$ поступает в качестве начального приближения на операцию расщепления следующей итерации и т.д. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока либо все коэффициенты расщепления λ_{ikt} на n -м и $(n - 1)$ -м шаге не станут практически попарно равны, либо оценки $\hat{\Theta}_{n-1}$ и $\hat{\Theta}_n$ практически не совпадут.

Определение параметров плоской шумовой подложки

Из поставленной задачи следует возможность разделения пикселей СВКО на пиксели, содержащие и не содержащие изображение сигнала. Количество последних равно $N_{СВКОш}$. Интегральные параметры плоской шумовой подложки $A_{ш}^{int}$, $B_{ш}^{int}$, $C_{ш}^{int}$ можно определить с использованием процедуры МНК-оценки. Так как плоскостному характеру распределения координат падения шумовых фотонов соответствует плоскостной характер распределения напряжения на выходе ПЗС-матрицы, то опытные частоты плоской шумовой подложки представляются выражением

$$v_{икш}^*(\theta_{ш}) = A_{ш}^{int} x_{ик} + B_{ш}^{int} y_{ик} + C_{ш}^{int},$$
(15)

где $v_{икш}^*$ – опытная частота попадания шумовых фотонов в ik -й пиксель ПЗС-матрицы;

$A_{uu}^{int} = \Delta_{ПЗС}^2 A_u$, $B_{uu}^{int} = \Delta_{ПЗС}^2 B_u$, $C_{uu}^{int} = \Delta_{ПЗС}^2 C_u$, $\theta_u^T = (A_{uu}^{int}, B_{uu}^{int}, C_{uu}^{int})$ – интегральные параметры плоской шумовой подложки и их вектор; x_{ikt} , y_{ikt} – средние значения координат ik -го пикселя ПЗС-матрицы в пределах СВКО.

Для оценки параметров шума из совокупности пикселей СВКО можно предварительно исключить пиксели, в которых предполагается наличие сигнала от астероида. При этом

В рамках поставленной задачи МНК-оценкой параметров плоской шумовой подложки является вектор [10]:

$$\hat{\theta}_u = (F^T F)^{-1} F^T \tilde{U}_u. \quad (16)$$

где

$$F^T = \begin{pmatrix} x_1 & \dots & x_i & \dots & x_{N_{СВКОu}} \\ y_1 & \dots & y_i & \dots & y_{N_{СВКОu}} \\ 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

Для исключения влияния мешающих выбросов, имеющих отдельную физическую природу, на данную оценку параметров шумовой подложки используется процедура двухпроходового МНК. При этом используются только пиксели СВКО, не принадлежащие областям предполагаемого наличия сигналов от небесных объектов ($N_{СВКОu} \leq (N_{СВКО} - N_{СВКО})$). На следующий проход МНК оценки (16), (17) отправляются только пиксели, для которых значение опытной частоты ν_{ikt}^* удовлетворяет условию

$$|\nu_{ikt}^* - \hat{\nu}_{ikt}^*| \leq k_\sigma \sqrt{\left(\sum_{i,k} (\nu_{ikt}^* - \hat{\nu}_{ikt}^*)^2 / N_{СВКОu} \right)}, \quad (18)$$

где k_σ – пороговый коэффициент отбрасывания; $\sqrt{\left(\sum_{i,k} (\nu_{ikt}^* - \hat{\nu}_{ikt}^*)^2 / N_{СВКОu} \right)}$ – СКО оценки плоской шумовой подложки; $\hat{\nu}_{ikt}^* = \hat{A}_u^{int} x_{it} + \hat{B}_u^{int} y_{kt} + \hat{C}_u^{int}$ – сглаженная оценка опытной частоты ik -го пикселя, входящего в $N_{СВКОu}$ используемых пикселей СВКО.

При этом количество пикселей $N_{СВКОu}$, формирующих совокупность \tilde{U}_u , уменьшается на число пикселей, для которых условие (18) не выполняется. Процесс повторяется до тех пор, пока модуль разности двух последовательно полученных значений СКО не станет меньше наперед заданной величины.

Полученные значения коэффициентов используются для вычитания шумовой подложки из сигнала от астероида в данном СВКО:

$$\nu_{ikt}^* = \nu_{ikt}^* - (\hat{A}_\sigma^{int} x_{itc} + \hat{B}_\sigma^{int} y_{ktc} + \hat{C}_\sigma^{int}), \quad (19)$$

где ν_{ikt}^* – опытная частота попадания фотонов в ik -й пиксель ПЗС-матрицы, принадлежащий области предполагаемого наличия сигнала от небесного объекта; x_{itc} , y_{ktc} – прямоугольные координаты привязки ik -го пикселя ПЗС-матрицы, принадлежащего области предполагаемого наличия сигнала от небесного объекта.

Алгоритм оценки положения астероида на дискретном изображении

1. С центром в локальном максимуме изображения формируется исследуемый квадратный строб внутрикадровой обработки (СВКО) со стороной ℓ пикселей ($N_{СВКО} = \ell^2$). С центрами в каждом локальных максимуме СВКО формируются квадратные области предполагаемого наличия сигналов от небесных объектов со стороной s ($s \ll \ell$) пикселей ($N_{СВКОс} = s^2$).

2. Согласно (16), (17) производится двухпроходовая МНК-оценка параметров плоской шумовой подложки. При этом на следующий проход МНК оценки отправляются только пиксели, для которых значение опытной частоты $\nu_{икт}^*$ удовлетворяет условию (18). Процесс повторяется до тех пор, пока модуль разности двух последовательно полученных значений СКО не станет меньше наперед заданной величины.

3. По формуле (19), согласно значениям МНК-оценок параметров плоской шумовой подложки, производится исключение шумовых фотонов из потенциалов пикселей области предполагаемого наличия сигнала.

4. Оцениваются координаты положения астероида на дискретном изображении, очищенном, в соответствии с (19), от шумовых фотонов. Начальное приближение оценки координат положения считается равным координатам центрального локального максимума изображения СВКО (центра СВКО).

4.1. По формуле (12) вычисляются коэффициенты расщепления $\lambda_{икт}$.

4.2. Согласно (11) рассчитываются оценки координат положения астероида на ПЗС-изображении. По формуле (13) получается оценка СКО попадания фотонов от астероида. По формуле (14) определяются оценки весов дискретной смеси вероятностных распределений координат падения сигнальных и остаточных шумовых фотонов.

4.3. Полученное значение оценки координат положения сравнивают с предыдущим. Если разница между ними больше заданного значения, то полученные оценки поступают как оценки предыдущего шага в п. 4.1. В противном случае полученная оценка поступает на выход алгоритма в качестве результата его работы.

Результаты проведения эксперимента

Эксперимент проводился на телескопе Андрушевской астрономической обсерватории с диаметром зеркала 600 мм, оснащенный ПЗС-камерой FLI PL09000 (размер ПЗС-матрицы – 3056x3056 пикселей, размер пикселя – 12 мкм). Наблюдения велись с экспозицией 30 с и биуровнением. Для обработки полученных кадров использовалась программа CLT, созданная авторами для обнаружения астероидов и других небесных объектов с ненулевым видимым движением и слабым блеском и использующая данную процедуру на этапе первичной (внутрикадровой) обработки.

На достаточно больших объемах наблюдений были получены следующие результаты относительно точности (СКО и средний модуль невязки между значениями координаты звезды в каталоге и ее оценки) оценок экваториальных координат звезд в зависимости от их блеска (рис. 2). Для разработанного в статье метода (кривая 3) оценки координат астероидов среднее значение СКО невязок определения координат опорных звезд по сравнению с их каталожными координатами (в качестве опорного звездного каталога использовался каталог USNO B1.0. [11]) составило 0,41 угловой секунды. Для метода (кривая 1) оценки координат астероидов как аргументов локальных максимумов их изображения данное СКО составило 0,77 угловой секунды. А для метода (кривая 2) оценки координат астероидов, аналогичного разработанному, но без учета плоской шумовой подложки, СКО составило 0,63 угловой секунды. При этом соответствующие средние значения невязок составили 0,003, -0,013, и -0,012 угловых секунд соответственно.

Кроме проверки на непротиворечивость оценок внешним данным была проведена проверка на внутреннюю сходимость оценок путем оценки остаточного СКО прямоугольных координат сигналов, находящихся на разных кадрах, но принадлежащих одному и тому же отождествленному небесному объекту. Для перечисленных методов оценки координат астероидов (по локальным максимумам изображения разработан метод с учетом плоской шумовой подложки и без данного учета) среднее суммарное остаточное СКО по обеим координатам составило 0,53; 0,41 и 0,47 пикселя соответственно.

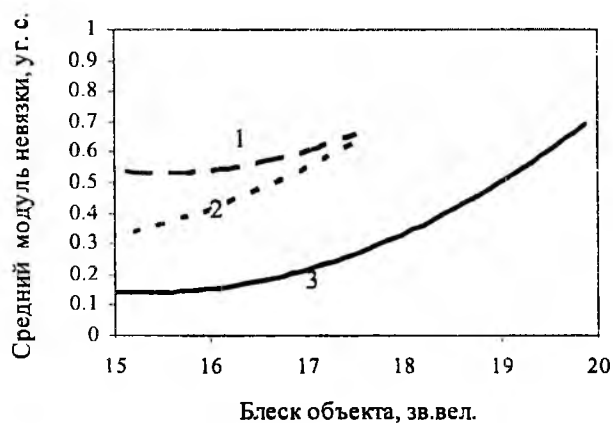


Рис. 2

Расширение диапазона оцениваемых координат звезд при использовании разработанного метода (кривая 3) объясняется тем, что согласно натурным экспериментам, при превышении величиной среднего модуля невязки значения 0,6 угловых секунд надежное отождествление объектов, выделенных на кадре и содержащихся в каталоге, становится невозможным. В случае применения разработанного метода данное пороговое значение средней невязки достигается при более слабых значениях блеска небесных объектов, энергия сигнала от которых близка к энергии шума, что еще раз показывает важность качественного учета шумовой составляющей изображения астероида.

Выводы

В статье разработан итерационный метод оценки координат астероида на дискретном изображении. Метод основан на учете факта оценки непрерывных параметров по дискретному пространству наблюдений (оценивается континуальное положение объекта по значениям совокупности потенциалов пикселей ПЗС-матрицы). Данный учет стал возможен благодаря использованию математического аппарата группированных выборок для описания потенциалов пикселей, соответствующих координатам падения сигнальных и шумовых фотонов. Метод впервые, в рамках технологии группированных выборок, расширяет модель координат падения шумовых фотонов до плоской шумовой подложки с параметрами, постоянными в пределах исследуемого строка. Путем экспериментальных исследований на натуральных данных подтверждена работоспособность метода, определены его предварительные точностные характеристики. Показана важность повышения точности оценки координат положения объекта для отождествления звезд с блеском, соответствующим энергии сигналов, близкой к энергии шума. Практическая значимость метода заключается в возможности его использования в системах оперативного автоматического обнаружения новых и сопровождения известных астероидов, а также возможность, с его использованием, более глубокого отождествления небесных объектов в автоматическом режиме. Дальнейшие исследования целесообразно сконцентрировать на разработке вычислительных методов обнаружения оптических сигналов от астероидов и оценки положения нескольких близко расположенных объектов.

Список литературы: 1. *Ericson J. Asteroids, comets, and meteorites. Cosmic Invaders of the Earth.* New York: Fact on File. 2003. 2. *IAU Minor Planet Center. Guide to Minor Body Astrometry.* <http://www.cfa.harvard.edu/iau/info/Astrometry.html>. 3. *Harris W.E. A comment on image detection and the definition of limiting magnitude.* Publications of the Astronomical Society of the Pacific 102, 949-953, August 1990. 4. *Губанов В.С., Куликова И.И., Малахов Е.И. Оценка точности позиционных наблюдений с использованием ПЗС-матриц // Кинематика и физика небесных тел.* 1990. Т. 6. № 2. С. 83 – 90. 5. *Koupryanov V. "Distinguishing features of CCD astrometry of faint GEO objects" // Advances in Space Research.* Vol. 41, Issue 7, 2008, pp. 1029-1038, <http://lfvn.astronomer.ru/report/0000021/p000021.htm>.

6. *Саваневич В.Е.* Определение координат статистически зависимых объектов на дискретном изображении // Радиозлектроника и информатика. 1999. № 1. С. 4 – 8. 7. *Бодин Н.А.* Оценка параметров распределения по группированным выборкам // Тр. Ин-та им. Стеклова. Теоретические задачи математической статистики. 1970. № 3. С. 110 – 150. 8. *Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.* Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с. 9. *Зализняк В.Е.* Основы научных вычислений. Введение в численные методы для физиков. М. Едиториал УРСС, 2002. 296 с. 10. *Ермаков С.М., Жиглявский А.А.* Математическая теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 1987. 320 с. 11. *Zacharias, N.; Gaume, R.; Dorland, B.; and Urban, S.E.* "Catalog Information and Recommendations," U.S. Naval Observatory, http://web.archive.org/web/20080202144018/http://ad.usno.navy.mil/star/star_cats_rec.shtml .

*Харьковский национальный
университет радиозлектроники*

Поступила в редколлегию 20.05.2010