

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ СО СЛАБЫМ БЛЕСКОМ

КОЖУХОВ А.М.

Описывается совокупность вычислительных методов обработки изображений, полученных оптическими телескопами с ПЗС-камерами, позволяющих провести высокоточную оценку местоположения объектов со слабым блеском. Методы используются в разработанной системе автоматизированного обнаружения новых и известных астероидов. Приводятся результаты работы данной системы.

1. Введение

К категории объектов со слабым блеском относится большинство искусственных спутников Земли и их обломки, а также большая часть малых тел Солнечной системы (астероидов и комет). Изучение объектов со слабым блеском является важной научной задачей с точки зрения решения проблем безопасности новых космических запусков и астероидно-кометной опасности.

На сегодняшний день большинство наблюдений объектов со слабым блеском осуществляется телескопами, оснащенными специальными астрономическими ПЗС-камерами, формирующими при наблюдении серии ПЗС-кадров с изображением одного участка небесной сферы.

Одним из этапов изучения объектов со слабым блеском является оценка их местоположения. При этом существует противоречие между слабым видимым блеском таких объектов и малой апертурой телескопов большинства обсерваторий, как средств их наблюдения. Из-за наличия ненулевого движения данное противоречие не может быть разрешено за счет увеличения экспозиции кадров. Длительное наблюдение отдельных участков неба с последующим сложением полученных кадров приводит к резкому снижению наблюдательного потенциала обсерваторий, что нецелесообразно. Указанное противоречие может быть разрешено путем разработки вычислительных методов обработки изображений, максимально свободных от потерь информации.

2. Анализ литературы

Автору не удалось найти специальных научных работ, описывающих методы обработки изображений, применяемых при обнаружении объектов со слабым блеском. Судя по отдельным упоминаниям (например, в [1]), традиционно применяются методы обработки ПЗС-изображений, принятые в астрономии. Это подтверждается списком программ, рекомендованных для работы Центром малых планет [2]. В него входят

такие известные астрономические программы, как *Astrometrica*, *PinPoint* и *Prizm*.

Анализ возможностей упомянутых выше программ показывает, что к наиболее используемым операциям обработки изображений в рассматриваемых целях следует отнести: накопление сигнала от движущегося объекта; предварительная селекция сигналов от небесных объектов; оценка координат объектов на цифровом изображении; оценка экваториальных координат объектов.

Большинство известных методов накопления сигнала от движущихся объектов невозможно использовать при отсутствии априорных данных о параметрах движения объекта. Это не позволяет применять их при обнаружении новых объектов со слабым блеском. Исключением является метод, описанный в [1]. Однако для обеспечения высокого качества детектирования объектов со слабым блеском он требует получения большого количества (20-30) последовательных кадров для одного участка небесной сферы, что значительно снижает поисковый потенциал телескопа.

Предварительная селекция сигналов на ПЗС-кадре в основном производится путем установления глобального порогового значения, превышающего средний уровень шума на величину, пропорциональную СКО шума [1, 3, 4].

После предварительной селекции в обработку поступают только те пиксели ПЗС-кадра, амплитуда (яркость) которых превышает данное пороговое значение. При этом возникает необходимость проведения дополнительной обработки изображения для выявления групп пикселей, амплитуда которых превысила порог [1, 3].

Существенным недостатком данного подхода, отмеченным в [4], является то, что он больше подходит для телескопов с большими апертурами, где даже сигналы от объектов со слабым блеском имеют сравнительно большое (более 10) отношение «сигнал/шум». Для телескопов с малыми апертурами сигналы от объектов могут иметь малое отношение «сигнал/шум» еще и из-за большего «размытия» сигнала. Поэтому для таких телескопов данный метод не позволяет выделять сигналы от астероидов со слабым блеском с высокой вероятностью.

Другой метод предварительной селекции основан на предположении, что потенциально устойчиво обнаруживаемые сигналы практически всегда находятся в окрестностях локальных максимумов (пиков) изображения на ПЗС-кадре [5]. Однако из-за значительного количества пиков на ПЗС-изображении необходимо провести предварительную отбраковку пиков, в окрестностях которых заведомо нет сигнала от небесных объектов.

Методам оценки координат объекта на цифровом изображении посвящена обширная литература. Сейчас наиболее распространены методы оценки положения небесного объекта, которые в том или ином виде

используют в качестве априорных данных различные модели распределения фотонов, принадлежащих сигналу от небесного объекта.

В астрономии все эти методы получили название «аппроксимация функцией рассеяния точки» (англ. PSF-fitting) [3, 5]. В качестве моделей плотности распределения фотонов (функций рассеяния точки) чаще всего используют модель нормального (гауссового) распределения [3, 5, 6], а также модели Лоренца и Моффата [3]. Однако ни один из приведенных методов не рассматривает учет остаточных помеховых фотонов, оставшихся после компенсации помеховой подложки, на которой обычно находится сигнал на ПЗС-кадре.

Высокоточная оценка экваториальных координат объекта обычно проводится дифференциальным методом [3] относительно известных экваториальных координат опорных звезд, положение которых на изображении известно с высокой точностью.

3. Постановка задачи

Наблюдение объектов со слабым блеском осуществляется с помощью оптического средства (телескопа), оснащенного ПЗС-матрицей. Видимое движение объектов на фоне звезд в картинной плоскости телескопа прямолинейно и равномерно, по каждой координате независимо. Изображение объекта со слабым блеском на отдельном кадре ничем не отличается от изображения звезд, находящихся на данном участке неба. На кадрах имеется неравномерно распределенная низкочастотная помеха, форма распределения которой может меняться от кадра к кадру серии. «Размытие» и смещение изображения сигнала от объекта со слабым блеском вследствие турбулентности атмосферы и искажений (аббераций), вносимых оптической системой телескопа.

По результатам наблюдений объектов со слабым блеском на одном участке небесной сферы формируется серия ПЗС-кадров. Серия, в общем случае, может быть разбита на подсерии, время между проведением подсерий значительно больше длительности самих подсерий. Экваториальные координаты участков небесной сферы, соответствующих центрам кадров серии, взаимно смещены из-за ошибок системы наведения и управления телескопом.

4. Цель исследования

Необходимо разработать такую совокупность вычислительных методов обработки изображений для оценки местоположения объектов со слабым видимым блеском телескопами с малой апертурой при приемлемых вычислительных затратах, при которых оценка условной вероятности правильного обнаружения объекта (УВПО) на серии суперкадров будет наибольшей.

5. Метод накопления сигнала от движущегося объекта с неизвестными параметрами движения (метод СКДО)

Энергия сигналов на единичном кадре не всегда позволяет достичь желаемого значения УВПО объектов при заданном значении условной вероятности ложного обнаружения.

Поэтому существует необходимость усовершенствования программного метода сложения кадров с накоплением сигнала от объекта со слабым видимым блеском и неизвестными ненулевыми параметрами видимого движения на серии ПЗС-кадров, реализуемого при приемлемых вычислительных затратах. Метод должен учитывать как наличие у объекта ненулевого видимого движения, так и возможные взаимные смещения ПЗС-кадров в серии, вызванные ошибками наведения и суточного ведения телескопа. Для получения наибольшего энергетического выигрыша сложение кадров должно осуществляться с оптимальными параметрами.

Накопление сигнала предлагается осуществлять в отдельном итоговом суперкадре. В данный суперкадр будет производиться накопление всех соответствующих кадров. Разработанный метод СКДО позволяет учитывать возможный дробный сдвиг между складываемыми кадрами за счет подхода, который можно назвать «площадным». Суть «площадного» подхода заключается в сложении в суммарный суперпиксель долей яркости исходных пикселей, пропорциональных долям площадей исходных пикселей, попадающих в площадь текущего суперпикселя (рис. 1).

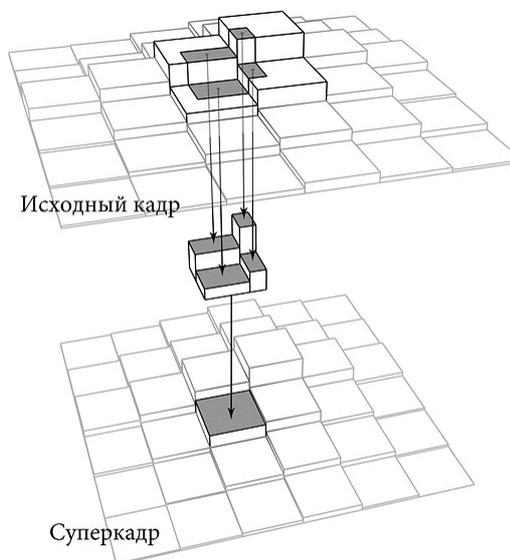


Рис. 1. «Площадной» подход в СКДО

Значения весов соответствующих пикселей исходного кадра образуют матрицу весов вида:

$$\gamma_t = \begin{pmatrix} \gamma_{00t} & \gamma_{01t} \\ \gamma_{10t} & \gamma_{11t} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} \gamma_{00t} &= (1 - |\Delta x_t|)(1 - |\Delta y_t|); \gamma_{10t} = |\Delta x_t|(1 - |\Delta y_t|); \\ \gamma_{01t} &= (1 - |\Delta x_t|)|\Delta y_t|; \gamma_{11t} = |\Delta x_t| \cdot |\Delta y_t|; \\ \Delta x_t &= x_t - E(x_t); \Delta y_t = y_t - E(y_t); \end{aligned}$$

$$\Delta x_t = \hat{V}_x(\tau_t - \tau_0) + \hat{d}x_t; \Delta y_t = \hat{V}_y(\tau_t - \tau_0) + \hat{d}y_t$$

– значения сдвигов текущего кадра относительно базового по соответствующим координатам;

$$\begin{aligned} \hat{d}x_t &= \frac{1}{N'_{\text{первотм}}} \sum_{i=1}^{i=N'_{\text{первотм}}} \sum_{j=1}^{j=N'_{\text{первотм}}} (x_{jt} - x_{i0}); \\ \hat{d}y_t &= \frac{1}{N'_{\text{первотм}}} \sum_{i=1}^{i=N'_{\text{первотм}}} \sum_{j=1}^{j=N'_{\text{первотм}}} (y_{jt} - y_{i0}), \end{aligned}$$

– используемые оценки смещения координат центра текущего кадра относительно координат центра базового кадра; x_{i0} , y_{i0} – координаты i -й отметки базового кадра; x_{jt} , y_{jt} – координаты j -й отметки текущего кадра, отождествленной с i -й отметкой базового кадра; $N'_{\text{первотм}}$ – количество взаимосоответствующих пар отметок на текущем и базовом кадре; \hat{V}_x , \hat{V}_y – используемые оценки скоростей видимого движения объекта в картинной плоскости телескопа по соответствующим координатам; τ_0 – временная привязка кадра, принятого за базовый; τ_t – временная привязка текущего складываемого кадра; $E()$ – операция выделения целой части.

Выбор пикселей, из которых записывается амплитуда, зависит от направления сдвига, т.е. от знаков сдвигов Δx_t , Δy_t .

Для повышения эффективности накопления амплитуды сигнала от объекта в условиях наличия остаточных ошибок оценок взаимного сдвига складываемых кадров используется матрица размытия, представляющая собой цифровой сглаживающий фильтр низких частот [7].

Матрица размытия M_p представляет собой квадратную матрицу размера $(2n + 1) \times (2n + 1)$, где n – размер области пикселей, соседних с конкретным (основным) пикселем текущего кадра, амплитуда которых будет принимать участие в процессе размытия. В элементы M_p записываются выбранные веса

таким образом, что вес центрального элемента, соответствующего размываемому пикселю, всегда равен 1, а веса остальных меньше единицы (рис. 2).

Например, для матрицы размытия размера 3×3 ($n = 1$):

$$M_p = \begin{pmatrix} M_{p00} & M_{p01} & M_{p02} \\ M_{p10} & M_{p11} & M_{p12} \\ M_{p20} & M_{p21} & M_{p22} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

С учетом (1), (2) выражение для расчета суммарной амплитуды пикселя суперкадра $A_{\Sigma ik}$ будет иметь вид:

$$\begin{aligned} A_{\Sigma ik} &= \sum_{t=t_1}^{t_1+N_{\text{СКДО}}-1} \sum_{e=0}^1 \sum_{g=0}^1 \sum_{j_p=0}^{2n} \sum_{i_p=-n}^n (\gamma_{egt} \cdot M_{pj_p(i_p+n)} \times \\ &\times A_{(i+i_p+\Delta N_{xt}+e \cdot j_{xt}), (k-j_p+1+\Delta N_{yt}+g \cdot j_{yt})t}), \quad (3) \end{aligned}$$

где $A_{(i+\Delta N_{xt}), (k+\Delta N_{yt})t}$ – амплитуда смещаемого пикселя ПЗС-матрицы с координатами $(i + \Delta N_{xt}), (k + \Delta N_{yt})$ на t -м (текущем) кадре; $\Delta N_{xt} = E(\Delta x_t)$, $\Delta N_{yt} = E(\Delta y_t)$ – приращения номеров пикселей итогового кадра относительно текущего кадра по соответствующим координатам; t_1 – первый кадр подсерии, для которой проводится СКДО; $N_{\text{СКДО}}$ – количество кадров подсерии, участвующих в СКДО;

$$j_{xt} = \begin{cases} -1, & \Delta x_t < 0 \\ 1, & \Delta x_t \geq 0 \end{cases}; j_{yt} = \begin{cases} -1, & \Delta y_t < 0 \\ 1, & \Delta y_t \geq 0 \end{cases}$$

– коэффициенты, определяющие выбор смещаемых пикселей, амплитуда которых записывается в очередной пиксель суперкадра, в зависимости от направления (знака) сдвига складываемого кадра относительно базового по каждой координате.

Согласно формуле (3) в ik -й пиксель суперкадра записываются амплитуды всех пикселей текущего кадра, расположенные в пределах размера матрицы размытия от основного пикселя текущего кадра. При этом вес записываемой амплитуды от каждого пикселя определяется весом соответствующего элемента

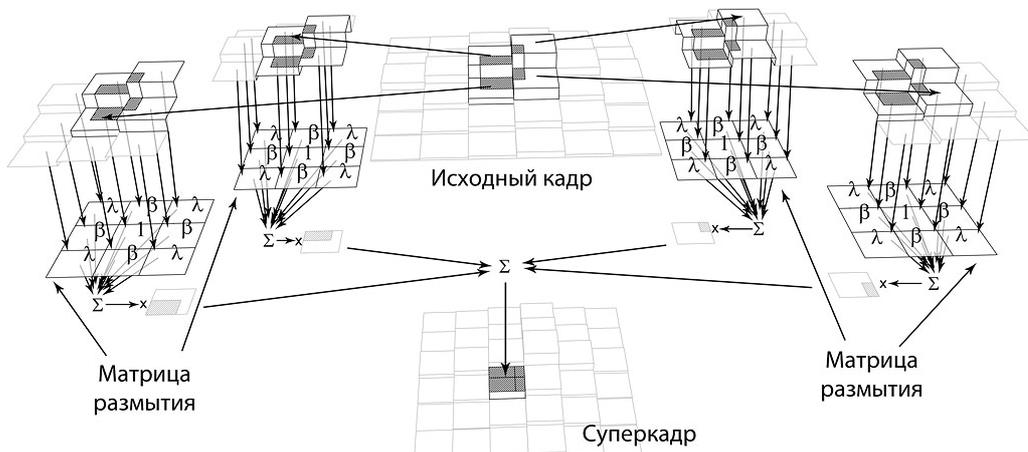


Рис. 2. Применение матрицы размытия при проведении СКДО

матрицы размытия, а также весом основного пикселя, определяемым по формуле (1).

С использованием формулы (3) формирование суперкадра можно организовать при помощи цикла по пикселям суперкадра. Суперкадр может быть сформирован также циклом по пикселям текущего кадра. При этом амплитуда пикселя текущего кадра записывается с различным весом в соответствующие пиксели суперкадра с накоплением. Подробнее метод СКДО описан в работе [8].

Для получения наилучших результатов применения СКДО необходимо использовать матрицу размытия с оптимальными значениями ее элементов. Определение данных значений производится для каждого телескопа отдельно. Метод определения оптимальных значений элементов матрицы размытия изложен в [9].

6. Метод оценки координат объекта на цифровом изображении

В специализированных базах данных оценка координат объектов на небесной сфере представляется в системе экваториальных координат (прямое восхождение – склонение) [10]. При этом результатами наблюдений являются ПЗС-кадры, на которых непосредственно может быть получена только оценка координат объекта в системе координат (СК) ПЗС-кадра.

Исходя из отмеченных особенностей условий наблюдения объектов и формирования ПЗС-кадров следует, что точность оценки экваториальных координат объекта прямо зависит от оценки координат сигнала от него в СК ПЗС-кадра. Поэтому возникает необходимость обеспечить наилучшую точность оценки местоположения сигнала от объекта в СК ПЗС-кадра. Эта оценка должна учитывать как дискретный характер ПЗС-изображения (отдельные пиксели), так и наличие на данном изображении низкочастотной помехи. При использовании метода максимального правдоподобия данную задачу можно представить в виде:

$$L(\Theta) \xrightarrow{x, y} \max, \quad (4)$$

где $L(\Theta)$ – функция правдоподобия; Θ – совокупность параметров объекта (координаты объекта в СК ПЗС-кадра на момент временной привязки ПЗС-кадра, СКО распределения координат падения фотонов на ПЗС-матрицу); x, y – координаты объекта в СК ПЗС-кадра.

При разработке метода считалось, что изображение одиночного объекта (его изображение не пересекается с изображением какого-либо другого объекта) находится в стробе внутрикадровой обработки (СВКО), размер $N_{\text{СВКО}}$ в пикселях которого существенно превышает размер изображения объекта (десятки пикселей). Координаты падения сигнальных фотонов от объекта на ПЗС-матрицу имеют круговое нормальное распределение с математическими ожиданиями x_t, y_t и СКО σ_Φ , а помеховые фотоны формируют наклонную плоскую подложку (рис. 3):

$$f(x, y) = A_{\text{ш}}x + B_{\text{ш}}y + C_{\text{ш}} + \frac{p_1}{2\pi\sigma_\Phi^2} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_\Phi^2}[(x-x_t)^2 + (y-y_t)^2]\right\}, \quad (5)$$

где $p_1 = 1 - p_0$ – относительный вес сигнальных фотонов; $A_{\text{ш}}, B_{\text{ш}}, C_{\text{ш}}$ – параметры наклонной плоской помеховой подложки;

$$p_0 = \int_{x_{\text{ни}}}^{x_{\text{ки}}} \int_{y_{\text{нк}}}^{y_{\text{кк}}} (A_{\text{ш}}x + B_{\text{ш}}y + C_{\text{ш}}) dx dy$$

– относительный вес шумовых фотонов ПЗС-матрицы.

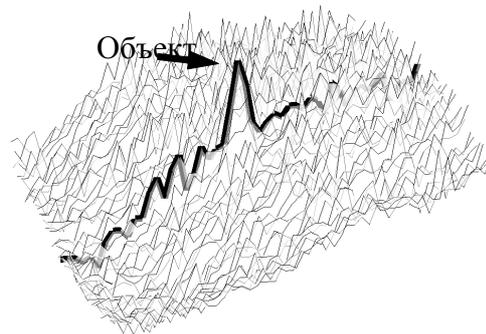


Рис. 3. Изображение объекта (астероида) на плоской наклонной помеховой подложке

С учетом сказанного вероятность $v_{\text{икт}}(\Theta)$ попадания фотонов в пиксели ПЗС-матрицы может быть представлена в виде:

$$v_{\text{икт}}(\Theta) = \int_{x_{\text{ни}}}^{x_{\text{ки}}} \int_{y_{\text{нк}}}^{y_{\text{кк}}} f(x, y) dx dy = I_{\text{иктш}} + I_{\text{иктс}}, \quad (6)$$

где $I_{\text{иктш}} = \Delta_{\text{ПЗС}}^2 (A_{\text{ш}}x_{\text{икт}} + B_{\text{ш}}y_{\text{икт}} + C_{\text{ш}})$,

$I_{\text{иктс}} = p_1 F_{x_i}(x_t; \sigma_\Phi^2) F_{y_k}(y_t; \sigma_\Phi^2)$ – вероятности падения в ik -й пиксель ПЗС-матрицы помеховых и сигналь-

ных фотонов; $F_{z_i}(m_z; \sigma^2) = \int_{z_{\text{ки}}}^{z_{\text{ки}}} N_z(m_z; \sigma^2) dx$;

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

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

соответственно; $x_{\text{икт}} = \frac{x_{\text{ки}} + x_{\text{ни}}}{2}$, $y_{\text{икт}} = \frac{y_{\text{кк}} + y_{\text{нк}}}{2}$ – средние значения координат ik -го пикселя ПЗС-матрицы.

При решении задачи (4) методом максимального правдоподобия с учетом (6), а также с использованием методов теории группированных выборок система уравнений максимального правдоподобия для пикселей исследуемого СВКО, в которых предполагается наличие сигнала, примет вид:

$$\begin{cases} \hat{x}_t = \sum_{i,k}^{N_{\text{СВКОс}}} v_{ikt}^* \lambda_{ikt} m_{x_i}^{\text{лок}} / \sum_{i,k}^{N_{\text{СВКОс}}} v_{ikt}^* \lambda_{ikt}; \\ \hat{y}_t = \sum_{i,k}^{N_{\text{СВКОс}}} v_{ikt}^* \lambda_{ikt} m_{y_k}^{\text{лок}} / \sum_{i,k}^{N_{\text{СВКОс}}} v_{ikt}^* \lambda_{ikt}, \end{cases} \quad (7)$$

где $N_{\text{СВКОс}}$ – количество пикселей в исследуемом СВКО, в которых предполагается наличие сигнала;

$v_{ikt}^* = A_{ikt} / \sum_{i,k}^{N_{\text{СВКОс}}} A_{ikt}$ – опытная относительная частота

попадания фотонов в ik -й пиксель ПЗС-матрицы в t -м кадре; A_{ikt} – амплитуда ik -го пикселя t -го ПЗС-кадра; \hat{x}_t – оценка координаты x объекта на t -м ПЗС-

кадре; $\lambda_{ikt} = \frac{p_1 F_{yk}(y_t; \sigma_\phi^2) F_{xi}(x_t; \sigma_\phi^2)}{v_{ikt}(\Theta)}$;

$m_{x_i}^{\text{лок}} = m_x + \frac{\sigma^2}{F_{xi}(m_x; \sigma^2)} (N_{x_{ki}}(m_x; \sigma^2) - N_{x_{ni}}(m_x; \sigma^2))$

– локальное математическое ожидание случайной величины на интервале $[x_{ni}, x_{ki}]$ [6].

Возможность разделения СВКО на область помех (пиксели, на которые попали только помеховые фотоны 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 помеховой подложки – независимой МНК - оценки, которая будет рассмотрена ниже.

Учет плоской помеховой подложки не может полностью исключить помеховую составляющую. Для оценки относительного веса сигнальных фотонов используется стандартная оценка весов дискретной смеси вероятностных распределений [11]:

$$\hat{p}_1 = \frac{1}{N_{\text{СВКОс}}} \sum_{i,k}^{N_{\text{СВКОс}}} \lambda_{ikt}; \quad \hat{p}_0 = 1 - \hat{p}_1, \quad (8)$$

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

Так как локальное математическое ожидание – это функция от соответствующей искомой координаты, то (7) является системой трансцендентных уравнений, которые могут быть решены методом последовательных приближений [12].

Из выражения (6) следует возможность разделения пикселей СВКО на пиксели, содержащие и не содержащие изображение сигнала. Количество последних равно $N_{\text{СВКОш}}$. Так как плоскостному характеру распределения координат падения помеховых фотонов соответствует плоскостной характер распределения напряжений на выходе ПЗС-матрицы, то опытные частоты плоской помеховой подложки представляются выражением:

РИ, 2012, № 2

$$v_{ikt\text{ш}}^*(\theta_{\text{ш}}) = A_{\text{ш}}^{\text{int}} x_{ikt} + B_{\text{ш}}^{\text{int}} y_{ikt} + C_{\text{ш}}^{\text{int}}, \quad (9)$$

где $v_{ikt\text{ш}}^*$ – опытная частота попадания помеховых фотонов в ik -й пиксель ПЗС - матрицы; $A_{\text{ш}}^{\text{int}} = \Delta_{\text{ПЗС}}^2 A_{\text{ш}}$, $B_{\text{ш}}^{\text{int}} = \Delta_{\text{ПЗС}}^2 B_{\text{ш}}$, $C_{\text{ш}}^{\text{int}} = \Delta_{\text{ПЗС}}^2 C_{\text{ш}}$, $\theta_{\text{ш}}^T = (A_{\text{ш}}^{\text{int}}, B_{\text{ш}}^{\text{int}}, C_{\text{ш}}^{\text{int}})$ – интегральные параметры плоской помеховой подложки и их вектор; x_{ikt}, y_{ikt} – средние значения координат ik -го пикселя ПЗС-матрицы в пределах СВКО.

Интегральные параметры плоской помеховой подложки $A_{\text{ш}}^{\text{int}}, B_{\text{ш}}^{\text{int}}, C_{\text{ш}}^{\text{int}}$ можно определить с использованием процедуры МНК - оценки.

Полученные значения коэффициентов $\hat{A}_{\text{ш}}^{\text{int}}, \hat{B}_{\text{ш}}^{\text{int}}, \hat{C}_{\text{ш}}^{\text{int}}$ используются для вычитания подложки из сигнала от астероида в данном СВКО перед проведением оценки его местоположения по формулам (7), (8):

$$v_{ikt\text{с}}^* = v_{ikt\text{с}}^* - (\hat{A}_{\text{ш}}^{\text{int}} x_{it\text{с}} + \hat{B}_{\text{ш}}^{\text{int}} y_{kt\text{с}} + \hat{C}_{\text{ш}}^{\text{int}}), \quad (10)$$

где $v_{ikt\text{с}}^*$ – опытная частота попадания фотонов в ik -й пиксель ПЗС-матрицы, принадлежащий области предполагаемого наличия сигнала от небесного объекта; $x_{it\text{с}}, y_{kt\text{с}}$ – прямоугольные координаты привязки ik -го пикселя ПЗС-матрицы, принадлежащего области предполагаемого наличия сигнала от небесного объекта.

Подробное описание метода оценки координат астероида на цифровом изображении представлено в работе [13].

По полученным оценкам координат астероида в СК ПЗС-кадра оцениваются его экваториальные координаты методом, описанным в статье [14].

7. Метод предварительной селекции сигналов от небесных объектов

Уменьшению вычислительных затрат на оценку местоположения объектов со слабым блеском может способствовать разработка метода предварительной селекции, отбраковывающего заведомо ложные сигналы, т.е. сигналы, не принадлежащие небесным объектам. При этом предварительная селекция не должна приводить к значительному количеству пропусков сигналов от небесных объектов, которые могут быть устойчиво обнаружены без ее применения.

При разработке метода принято, что группы сигнальных пикселей расположены вблизи одного из пиков изображения. При этом на этапе предварительной селекции считается, что пространственная форма сигнала не зависит от его положения в пикселе. Также считается, что координаты падения фотонов от небесных объектов имеют круговое нормальное распределение (5) с математическими ожиданиями, соответствующими координатам пика изображения, в окрест-

ности которого сформировано изображение сигнала от небесного объекта.

Разработанный метод предварительной селекции сигналов от небесных объектов основан на сравнении с порогом значений пространственной свертки между принятым излучением, в окрестности пика изображения, и маской, соответствующей форме ожидаемого сигнала. Решающее правило предварительной селекции сигналов от небесных объектов в этом случае принимает вид:

$$A_{it} = \sum_{i,k}^{N_{CBKOC}} v_{ikt} A_{ikt} > \Pi_1,$$

где A_{it} – амплитуда сигнала, подлежащего обнаружению, которая соответствует пространственной свертке между принятым излучением, в окрестности пика изображения, и маской, соответствующей форме ожидаемого сигнала.

При этом пороговое значение Π_1 определяется для каждого кадра как:

$$\Pi_1 = \bar{A}_t + k_{отбр} \hat{\sigma}_{At},$$

где \bar{A}_t – среднее значение пространственной свертки, соответствующее шуму; $\hat{\sigma}_{At}$ – СКО шумовых значений свертки; $k_{отбр}$ – коэффициент пропорциональности, определяемый для каждого телескопа с ПЗС-камерой экспериментально и находящийся обычно в пределах между 2 и 3.

Для оценки \bar{A}_t и $\hat{\sigma}_{At}$ предложена новая модель распределения значений пространственной свертки для текущего кадра. Она представляет собой смесь нормального закона распределения значений пространственной свертки, соответствующих шуму, и «хвоста» из значений пространственной свертки, соответствующих сигналам от небесных объектов, в области больших значений пространственной свертки (рис. 4).

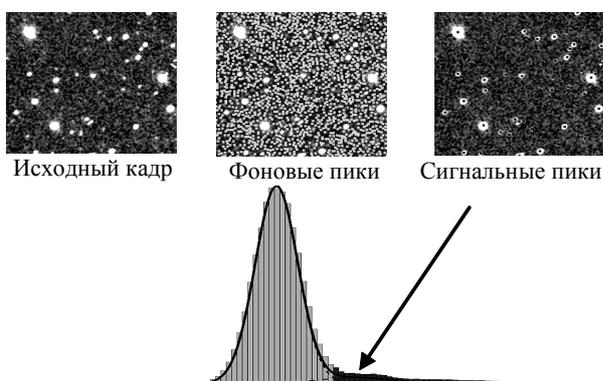


Рис. 4. Решающее правило обнаружения сигналов от небесных объектов

Для определения порога отбраковки пиков изображения, в окрестностях которых отсутствуют сигналы от небесных объектов, производится приближенное вы-

деление нормальной («фоновой») составляющей смеси распределений значений пространственной свертки.

Данное выделение проводится разработанным итерационным вычислительным методом, основанным на свойстве равенства значений медианы и среднего нормально распределенных случайных величин.

Метод описан в работе [15].

8. Вычислительный метод обработки изображений для оценки местоположения объектов со слабым блеском

Исходными данными обработки является набор кадров, сформированных при наблюдении одной области небесной сферы, и звездный каталог, звезды которого будут использоваться в качестве опорных. Исходя из сказанного выше, вычислительный метод обработки изображений для оценки местоположения объектов со слабым блеском соответствует следующей последовательности операций.

1. Разбиение серии кадров на подсерии и определение базовых кадров в них (в качестве таковых используются средние кадры).
2. Если количество кадров в подсериях больше одного, то переход на пункт 3. Иначе – на пункт 4.
3. Сложение кадров с накоплением сигнала от движущихся объектов (формирование суперкадров) для каждой подсерии согласно подразделу 5.
4. Формирование отметок. Для каждого кадра (суперкадра) проводится следующая последовательность действий.
 - 4.1. Предварительная селекция сигналов от небесных объектов согласно разделу 7 данной статьи.
 - 4.2. Оценка координат и амплитуды отметок для локальных максимумов (пиков) изображения, оставшихся после проведения пункта 4.1, согласно разделу 6 данной статьи. На выходе формируется совокупность отметок для каждого кадра (суперкадра).
5. Если количество кадров в подсериях больше одного, то переход на пункт 6. Иначе – на пункт 7.
6. Формирование совокупности отметок, соответствующих каждой подсерии.
7. Отождествление всех совокупностей отметок с звездным каталогом и проведение астрометрической редукции [3] для каждой совокупности отметок в целях получения экваториальных координат отметок и уточненных экваториальных координат центров кадров (суперкадров) для каждой совокупности отметок.
8. Пересчет координат совокупностей отметок, принадлежащих одному кадру (подсерии), в координаты базового кадра.

В результате проведения обработки изображений формируется совокупность отметок, принадлежащих разным кадрам (подсериям). Отметки содержат оценки

амплитуды экваториальные координаты предполагаемых небесных объектов, а также оценки координат данных объектов в системе координат ПЗС-матрицы базового кадра.

9. Результаты применения метода

Разработанные вычислительные методы изображений были применены в автоматизированной системе обнаружения астероидов CoLiTeс, в разработке которой принимал участие автор. Система используется в Андрушевской астрономической обсерватории (ААО). С мая 2010 года с применением данной программы наблюдателями ААО было открыто 83 астероида, отослано в Центр Малых планет 42 877 наблюдений малых тел Солнечной системы [16].

С конца ноября 2010 года программа испытывается также в российской дистанционно управляемой обсерватории ISON-NM, расположенной в штате Нью-Мексико (США). Применение программы значительно увеличило количество наблюдаемых астероидов и наблюдений по ним, позволив обсерватории войти в топ-десятку обсерваторий по количеству наблюдений астероидов в 2010 году [17]. По состоянию на 12 октября 2011 года ISON-NM является восьмой обсерваторией мира по количеству наблюдений астероидов в 2011 году [17]. За время эксплуатации к 12 октября 2011 года с использованием CoLiTeс было открыто 532 астероида, отослано в Центр Малых планет 129 121 наблюдение малых тел Солнечной системы [16].

10 декабря 2010 года с использованием программы CoLiTeс была открыта комета C/2010 X1 (Elenin) [18], ставшая первой кометой, открытой российским астрономом за последние 20 лет. 7 июля 2011 года с использованием CoLiTeс была открыта комета P/2011 NO1, ставшая второй кометой, открытой ISON-NM [19].

10. Выводы

Предложен комплексный вычислительный метод обработки изображений, полученных телескопами оптического диапазона, основанный на использовании разработанных отдельных вычислительных методов:

а) метода предварительной селекции сигналов от небесных объектов, основанного на сравнении с порогом значений пространственной свертки между принятым излучением, в окрестности пика изображения, и маской, соответствующей форме ожидаемого сигнала;

б) метода сложения кадров с накоплением сигнала от небесного объекта с ненулевым видимым движением, отличающегося от известных сложением кадров по всему возможному диапазону скоростей движения объектов с применением «площадного» подхода и использованием матрицы размытия для повышения эффективности накопления амплитуды сигнала от объекта со слабым блеском в условиях наличия остаточных ошибок оценок взаимного смещения складываемых кадров;

в) итерационного метода оценки местоположения объекта на цифровом изображении на фоне помехи с неизвестными параметрами, в котором впервые, в рамках технологии группированных выборок, использована модель координат падения помеховых фотонов в виде наклонной плоской помеховой подложки, высота и наклон которой являются дополнительными параметрами, подлежащими оценке в пределах исследуемого строка.

Разработанные вычислительные методы успешно применены при разработке программы автоматизированного обнаружения астероидов CoLiTeс, используемой в двух обсерваториях, наблюдающих астероиды (ААО и обсерватория ISON-NM).

В результате работы программы CoLiTeс впервые был открыт астероид обсерваторией на территории СНГ (ААО) в автоматизированном режиме и впервые за 20 лет открыта комета наблюдателем с территории СНГ (обсерватория ISON-NM). Всего по состоянию на 12 октября 2011 года, при помощи программы CoLiTeс, было послано в Центр Малых планет 171 998 измерений координат астероидов, при этом открыто 615 астероидов и две кометы.

Программный комплекс, использующий разработанные вычислительные методы, может быть полезен в других астрономических обсерваториях Украины и мира, занимающихся наблюдениями астероидов.

Литература: 1. *Yanagisawa T.* Automatic Detection Algorithm for Small Moving Objects// Publications of Astronomical Society of Japan. 2005. 57. P. 399–408. 2. *IAU Minor Planet Center. Guide to Minor Body Astrometry.* <http://www.minorplanetcenter.net/iau/info/Astrometry.html>. 3. *Kouprianov V.* Distinguishing features of CCD astrometry of faint GEO objects// Advances in Space Research. 2008. Vol. 41, Issue 7. P. 1029–1038. 4. *Starck J.-L., Murtagh F.* Astronomical Image and Data Analysis. Second Edition. Berlin: Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 335 p. 5. *Mighell K.J.* Stellar photometry and astrometry with discrete point spread functions// Monthly Notices of Royal Astronomical Society. 2005. 361. P. 861–878. 6. *Саваневич В.Е.* Определение координат статистически зависимых объектов на дискретном изображении // Радиоэлектроника и информатика. 1999. № 1. С. 4–8. 7. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. М: Техносфера, 2005. 1072 с. 8. *Саваневич В. Е., Кожухов А. М., Брюховецкий А. Б., Власенко В. П.* Метод сложения ПЗС-кадров с накоплением сигнала от астероида со слабым блеском и ненулевым видимым движением на серии ПЗС-кадров // Системи озброєння та військова техніка. Харків: ХУПС. 2010. Вип. 3(23). С. 154–159. 9. *Саваневич В. Е., Кожухов А. М., Брюховецкий А. Б., Власенко В. П., Ткачев В. Н.* Определение оптимальных значений элементов матрицы размытия для метода сложения ПЗС-кадров с накоплением сигнала от движущегося объекта // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ», 2011. №34. С. 107–115. 10. *IAU Minor Planet Center. Format For Optical Astrometric Observations Of Comets, asteroids and Natural Satellites.* <http://www.minorplanetcenter.net/iau/info/OpticalObs.html>. 11. *Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.* Прикладная статистика: Клас-

сификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с. **12.** Зализняк В.Е. Основы научных вычислений. Введение в численные методы для физиков. Учебное пособие для вузов. М.: Едиториал УРСС, 2002. 296 с. **13.** Саваневич В. Е., Брюховецкий А. Б., Кожухов А. М., Диков Е. Н. Оценка координат астероида на дискретном изображении // Радиотехника. 2010. Вып. 162. С. 78–86. **14.** Саваневич В. Е., Брюховецкий А. Б., Кожухов А. М., Диков Е. Н. Оценка экваториальных координат астероида по оценкам его координат на ПЗС-кадре // Системи обробки інформації: Харків: ХУПС. 2010. Вип. 6(87). С. 172–179. **15.** Саваневич В. Е., Кожухов А. М., Брюховецкий А. Б. Метод предварительного обнаружения сигналов от небесных объектов на цифровом изображении // Системи озброєння та військова техніка. Харків: ХУПС, 2011. Вип. 2(26). С. 169–173. **16.** MPC 70135–76678. http://www.minorplanetcenter.net/iau/ECS/MPCArchive/MPCArchive_TBL.html. **17.** *Yearly break down of the*

observations. <http://www.minorplanetcenter.net/iau/special/CountObsByYear.txt>. **18.** MPEC 2010-X101: COMET C/2010 X1 (ELENIN). <http://www.minorplanetcenter.org/mpec/K10/K10XA1.html>. **19.** MPEC 2011-O10. COMET P/2011 NO1. <http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K11/K11O10.html>.

Поступила в редколлегию 12.03.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Гребенник И.В.

Кожухов Александр Михайлович, инженер станции Национального Центра управления и испытания космических средств, Евпатория. Научные интересы: астрометрические наблюдения малых тел Солнечной системы и околоземных космических объектов. Адрес: Украина, 97419, АР Крым, Евпатория-19, в/г 189, общ. 5, к. 12, e-mail: skinny2@rambler.ru.