

## МЕТОД СЛОЖЕНИЯ ПЗС-КАДРОВ С НАКОПЛЕНИЕМ СИГНАЛА ОТ АСТЕРОИДА СО СЛАБЫМ БЛЕСКОМ И НЕНУЛЕВЫМ ВИДИМЫМ ДВИЖЕНИЕМ НА СЕРИИ ПЗС-КАДРОВ

*Разработан метод сложения ПЗС-кадров с накоплением сигнала от астероида со слабым блеском и ненулевым видимым движением, в основе которого лежит сложение ПЗС-кадров со смещением вдоль возможных траекторий движения астероида. Особенностью метода является возможность сдвига между складываемыми кадрами на дробное число пикселей. Корректное сложение кадров с дробным взаимным сдвигом обеспечивается использованием предлагаемого авторами площадного подхода. Метод использован авторами в разработанной системе автоматизированного обнаружения новых и известных астероидов.*

**Ключевые слова:** астероид, накопление сигнала от астероида, сложение ПЗС-кадров.

**Введение.** Накопление сигнала от объекта позволяет повысить показатели качества его обнаружения и точность оценки его параметров. Особенно это актуально для оптико-электронных средств (ОЭС), использующих телескопы с малыми апертурами и, следовательно, невысокими характеристиками проникающей способности. Однако, из-за значительных видимых собственных движений астероидов для них невозможно применить такие классические астрономические методы накопления сигналов, как увеличение времени экспозиции или простое сложение кадров ПЗС-наблюдений одной области небесной сферы. Поэтому целесообразна разработка метода накопления сигнала от астероидов со слабым видимым блеском, в котором учитываются их видимое собственное движение по небесной сфере и ошибки механической части телескопа при проведении наблюдений.

**Анализ литературы.** Сложение кадров возникло как средство борьбы с переполнением пикселей ПЗС-матрицы, принадлежащих ярким объектам, при длительных экспозициях, что приводило к искажениям сигнала от слабых объектов, находящихся рядом с яркими. Поэтому, было предложено заменять одну длительную экспозицию несколькими короткими и потом складывать их программно [1]. Сложение проводилось для неподвижных объектов, т.е. складывались друг с другом пиксели с одинаковыми номерами на разных кадрах.

ОСШ сигнала от объекта  $q$  в случае оптических ПЗС-наблюдений определяется [2] как :

$$q = \frac{A}{\sqrt{D_{ш}}} , \quad (1)$$

где  $A$  – превышение амплитуды сигнала над средним уровнем фона;

$D_{ш}$  – дисперсия фона.

Теоретически при сложении  $N$  кадров ОСШ сигнала  $q$  увеличится в  $\sqrt{N}$  раз. На практике, увеличение значения ОСШ несколько меньше за счет влияния шумов считывания, которое тем больше, чем больше кадров складывается. Это особенно существенно для звезд со слабым видимым блеском [1].

Еще одним способом повышения ОСШ сигналов от небесных объектов, имеющих значительное видимое движение, является метод накопления с задержкой по времени (time delay integration, TDI). Его еще называют методом дрейф - скана (drift scan mode) или аппаратным переносом заряда (АПЗ). Первая практическая реализация данного метода произошла не позднее 1989 года [3].

Суть АПЗ сводится к настройке системы передачи потенциалов пикселей ПЗС-матрицы так, чтобы потенциалы перемещались точно в том же направлении и с той же скоростью, с которой происходит смещение изображения объекта в кадре.

Основным недостатком метода АПЗ считается необходимость наличия априорной информации о направлении движения объекта и о его скорости, что не позволяет использовать данный режим для поиска объектов с неизвестными параметрами движения. К тому же, для использования данного режима при наблюдении объектов, движущихся в поле зрения под разными углами необходимо дооснащение наблюдательного инструмента поворотной платформой для поворота ПЗС-камеры с целью осуществле-

ния АПЗ. Однако, одновременное накопление сигнала от нескольких объектов, движущихся по разным траекториям, при помощи АПЗ в общем случае невозможно.

Еще одной разновидностью АПЗ можно считать накопление сигнала от объекта при его сопровождении. В этом случае изображение объекта на ПЗС-матрице становится неподвижным, что способствует накоплению сигнала от него. Основой для данного метода является предложенный в 1906 году метод Меткафа [4], использовавшийся в период применения для наблюдения астероидов фотопластинок. Недостатки данного варианта аналогичны недостаткам АПЗ.

Попыткой объединения достоинств двух данных методов (программного сложения кадров для замены длительной экспозиции и АПЗ) и является метод сложения кадров с накоплением сигнала от движущегося объекта (СКДО).

Суть данного метода заключается в программном сложении полученных кадров с их сдвигом пропорционально скорости движения объекта и сдвигу между кадрами из-за эффектов их взаимного смещения.

При этом формируется итоговый кадр – результат сложения всех кадров с соответствующими смещениями с базовым. Базовым кадром называется кадр, координаты отметок которого не изменяют при проведении сложения. В качестве базового кадра обычно выбирают какой-то один (обычно первый, последний или средний) кадр серии.

Преимуществом метода СКДО перед АПЗ является возможность поиска объектов с ненулевым видимым движением, в частности, астероидов. Это осуществляется за счет того, что при методе СКДО обработка не обязательно должна осуществляться в реальном масштабе времени, поэтому появляется возможность произвести сложение кадров (или части кадров) в различных направлениях и с различными скоростями за счет увеличения времени обработки. На данный момент известно несколько реализаций метода СКДО. В работе [5] описано проведение сложения кадров с накоплением сигнала от объектов с ненулевым видимым движением в реальном масштабе времени при наблюдении низкоорбитальных искусственных спутников Земли. Существенным недостатком данной реализации, как и в случае с АПЗ, является необходимость априорных данных о траектории движения объекта и невозможность наблюдать более одного объекта одновременно. В [6] изложен метод обнаружения астероидов со слабым видимым блеском, основанный на методе СКДО на участке кадра с последующей медианной фильтрацией для отбраковки изображений звезд. В данной реализа-

ции рассматриваемого метода для каждой неоднородности изображения, энергетически незначительно превосходящей фон, отдельно проводится сложение кадров. Это является недостатком данной реализации метода, так как влечет за собой необходимость оценки параметров сложения кадров в большом количестве мелких стробов кадра и большую вычислительную сложность. Также недостатком данной реализации метода СКДО является использование значительного количества последовательно снятых кадров, что существенно снижает поисковый потенциал телескопов. С другой стороны достоинством данной реализации метода СКДО является высокое качество детектирования объектов со слабым блеском.

**Постановка задачи.** Астероиды в картинной плоскости ОЭС движутся на фоне звезд равномерно по каждой координате со скоростями  $V_x, V_y$ . В одной области пространства одновременно может находиться несколько астероидов с различными параметрами движения. Точные параметры движения астероидов заранее неизвестны – имеются только общие сведения о возможных максимальной и минимальной скоростях их движения.

Астероиды наблюдаются в режиме часового ведения (такого движения опорно-поворотного устройства ОЭС, которое компенсирует суточное вращение Земли). По результатам наблюдений формируются кадры. Совокупность кадров, на которых изображается одна и та же область пространства в течение одной наблюдательной ночи, называется серией. Экваториальные координаты оптических центров кадров серии смещены относительно друг друга. Это объясняется ошибками наведения при повторных наблюдениях одной и той же области пространства, а также ошибками суточного ведения [7].

Для исключения дополнительных погрешностей, связанных с увеличением влияния шумов считывания при большом количестве складываемых кадров [1] целесообразно производить не сложение всех кадров серии, а сложение по подсериям. Каждая серия делится на нескольких подсерий, состоящих из двух и более кадров. Считается, что кадры в одной подсерии получены во времени один за другим и, поэтому смещены друг относительно друга незначительно и отличаются только сдвигом, а не сдвигом и поворотом. В этом случае для каждого направления и скорости формируется не один итоговый кадр, состоящий из всех кадров серии, а несколько, каждый из которых является итоговым кадром для соответствующей подсерии.

**Цель статьи.** Необходимо разработать метод сложения кадров с накоплением сигнала от астероидов со слабым видимым блеском и неизвестными

ненулевыми параметрами видимого движения на серии ПЗС-кадров реализуемый при приемлемых вычислительных затратах. Метод должен учитывать как наличие у астероида ненулевого собственного видимого движения, так и возможные взаимные смещения ПЗС-кадров в серии, вызванные ошибками наведения и суточного ведения телескопа.

**Определение сдвига кадров, необходимого для проведения сложения кадров с накоплением сигнала от движущегося объекта.** Метод СКДО представляет собой программное сложение кадров между собой с неким сдвигом. Для реализации данного метода необходимо первоначально провести оценку такого сдвига для каждого складываемого кадра. При этом необходимо учитывать не только скорости движения небесного объекта, но и значение смещения координат оптических центров кадров друг относительно друга, вызванные неточностью суточного ведения или ошибками повторного наведения на одну и ту же область неба. Поэтому сдвиг текущего кадра относительно базового перед сложением представляет собой сумму используемых в методе СКДО оценок скорости и соответствующего смещения центров складываемых кадров:

$$\begin{aligned} \Delta x_t &= \hat{V}_x(\tau_t - \tau_0) + \hat{\Delta}x_t \\ \Delta y_t &= \hat{V}_y(\tau_t - \tau_0) + \hat{\Delta}y_t \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\Delta x_t, \Delta y_t$  – значения сдвигов текущего кадра относительно базового по соответствующим координатам;

$\hat{\Delta}x_t, \hat{\Delta}y_t$  – используемые оценки смещения координат центра текущего кадра относительно координат центра базового кадра;

$\hat{V}_x, \hat{V}_y$  – используемые оценки скоростей видимого движения астероида в картинной плоскости ОЭС по соответствующим координатам.

Для оценки смещения координат центра текущего кадра относительно координат центра базового кадра использован следующий алгоритм. На кадрах каждой подсерии выделяется некоторое количество пикселей с максимальной яркостью. Из этих пикселей выделяются локальные максимумы изображения также с наибольшей яркостью. Затем, в окрестности данных локальных максимумов изображения проводится формирование отметок с оценкой их координат согласно [8]. Астероиды имеют достаточно слабый блеск, поэтому имеются основания считать, что отметки, сформированные вышеописанным способом, соответствуют оптическим сигналам от наиболее ярких звезд, имеющихся на данном участке небесной сферы.

Так как кадры внутри подсерий смещены друг относительно друга незначительно, то определение параметров смещения проводится через

отождествление отметок на базовом кадре с отметками на остальных кадрах подсерии.

На кадрах одной подсерии изображение практически любого объекта представляется неподвижным, из-за чего в число отождествляемых отметок могут попасть отметки, сформированные сигналами от ярких астероидов или каких либо артефактов изображения (например, от пикселей, засвеченных космическими частицами высоких энергий). Поэтому проводится взаимное отождествление только тех отметок на кадрах, которые были предварительно отождествлены со звездным каталогом.

Полученный набор взаимосоответствующих пар отметок используется для определения оценок смещения координат центра текущего кадра относительно координат центра базового кадра подсерии:

$$\begin{cases} \hat{\Delta}x_t = \frac{1}{N'_{первом}} \sum_{i=1}^{i=N'_{первом}} \sum_{j=1}^{j=N'_{первом}} (x_{jt} - x_{i\bar{0}}); \\ \hat{\Delta}y_t = \frac{1}{N'_{первом}} \sum_{i=1}^{i=N'_{первом}} \sum_{j=1}^{j=N'_{первом}} (y_{jt} - y_{i\bar{0}}), \end{cases} \quad (3)$$

где  $x_{i\bar{0}}, y_{i\bar{0}}$  – координаты  $i$ -й отметки базового кадра;

$x_{jt}, y_{jt}$  – координаты  $j$ -й отметки текущего кадра, отождествленной с  $i$ -й отметкой базового кадра;

$N'_{первом}$  – количество взаимосоответствующих пар отметок на текущем и базовом кадре.

**Метод сложения кадров с накоплением сигнала от движущегося объекта при сдвиге между кадрами на целое количество пикселей.** Для упрощения процедуры сложения создается отдельный итоговый кадр (в работе он называется суперкадром), на который и будут складываться все соответствующие кадры. Если для данного значения скорости подвижного объекта сдвиг между текущим и базовым кадром подсерии производится на целое количество пикселей, то суммарная амплитуда пикселя суперкадра  $A_{\Sigma ik}$  будет иметь вид:

$$A_{\Sigma ik} = \sum_{t=t_1}^{t_1 + N_{ПЗ} - 1} A_{(i + \Delta N_{xt}), (k + \Delta N_{yt})t}, \quad (4)$$

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 ППЗ;

$N_{ППЗ}$  – количество кадров подсерии, участвующих в ППЗ;

$E(\cdot)$  – операция выделения целой части.

**Метод сложения кадров с накоплением сигнала от движущегося объекта с учетом дробности сдвига между кадрами.** В общем случае величина сдвига между текущим кадром и базовым в пикселях будет иметь не только целую, но и дробную часть. При этом отсутствует возможность использовать для сложения кадров формулу (4). Для корректного учета дробности значения сдвига использован подход, который можно назвать «площадным». Суть его заключается в следующем (Рис.1). В случае дробного сдвига между кадрами область ответственности каждого пикселя суперкадра соответствует частям областей ответственности определенных четырех соседних пикселей складываемого кадра. Понятно, что при этом часть области ответственности пикселя суперкадра одновременно принадлежит области ответственности определенного складываемого кадра. В работе мерой включения потенциала каждого пикселя складываемого

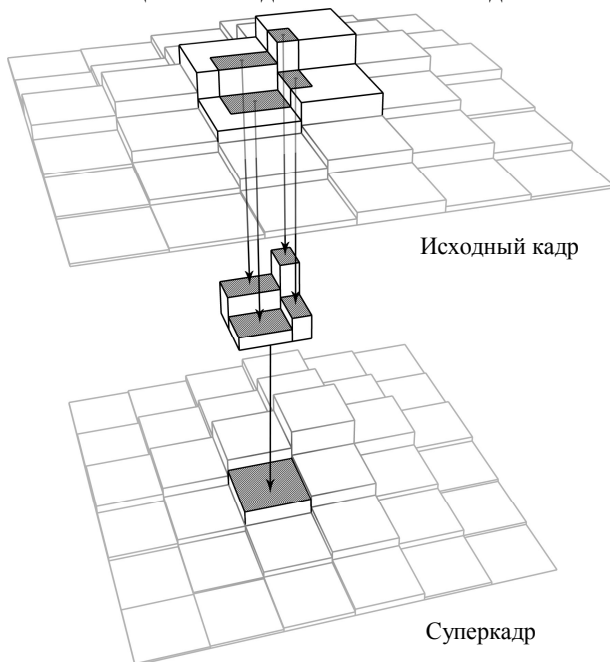


Рис. 1 Сложение кадров с взаимным сдвигом на дробное число пикселей на основе «площадного» подхода

в потенциал пикселя суперкадра является отношение площади указанной выше части области ответственности пикселя суперкадра к общей площади данной области. При площадном подходе в пиксель суперкадра записываются с накоплением доли амплитуд определенных четырех соседних пикселей складываемого кадра. Доля амплитуды пикселя складываемого кадра, записываемая в пиксель су-

перкадра, пропорциональна указанной выше мере, весу.

Значения весов соответствующих пикселей исходного кадра образуют матрицу весов вида:

$$\gamma_t = \begin{pmatrix} \gamma_{00t} & \gamma_{01t} \\ \gamma_{10t} & \gamma_{11t} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где  $\gamma_{00t} = (1 - |d\Delta x_t|)(1 - |d\Delta y_t|)$ ;

$\gamma_{10t} = |d\Delta x_t|(1 - |d\Delta y_t|)$ ;

$\gamma_{01t} = (1 - |d\Delta x_t|)|d\Delta y_t|$ ;

$\gamma_{11t} = |d\Delta x_t| \cdot |d\Delta y_t|$ ;

$d\Delta x_t = \Delta x_t - E(\Delta x_t)$ ;  $d\Delta y_t = \Delta y_t - E(\Delta y_t)$ .

Выбор пикселей, из которых записывается амплитуда, зависит от направления сдвига, т.е. от знаков сдвигов  $\Delta x_t, \Delta y_t$ . При этом формула (4) преобразуется к виду:

$$A_{\Sigma ik} = \sum_{t=t_1}^{t_1+N_{ППЗ}-1} \sum_{e=0}^1 \sum_{g=0}^1 \gamma_{egt} \cdot A_{(i+\Delta N_{xt}+e \cdot j_{xt}), (k+\Delta N_{yt}+g \cdot j_{yt})t}, \quad (6)$$

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

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.

При нулевом дробном переносе формула (6) сводится к формуле (4).

**Матрица размытия.** Из-за невозможности учета всех влияющих факторов (например, влияния турбулентности атмосферы на распределение амплитуд пикселей ПЗС-матрицы) при определении значений используемых сдвигов, их значение будет определено с ошибкой. Кроме того, так как координаты падения фотонов являются случайной величиной, то и координаты центра сигнала являются случайными. Из-за данных особенностей при выполнении СКДО, согласно формул (4) или (6), координаты пикселей с максимальными амплитудами, соответствующие конкретному объекту, на разных кадрах могут не совпасть друг с другом и эффективность накопления сигналов будет низкой. Для повышения эффективности накопления сигналов от небесных объектов, а также уменьшения количества ложных накоплений, проводится некоторое дополнительное размытие амплитуды с помощью сглаживающего цифрового фильтра низких частот [9, 10]. Характеристики данного фильтра определяются матрицей (маской) размытия. 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. Например, для матрицы размытия размера  $3 \times 3$  ( $n = 1$ ):

$$M_p = \begin{pmatrix} M_{p00} & M_{p01} & M_{p02} \\ M_{p10} & M_{p11} & M_{p12} \\ M_{p20} & M_{p21} & M_{p22} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

При этом формула для амплитуды пикселя суперкадра (6) примет вид:

$$A_{\Sigma ik} = \sum_{t=t_1}^{t_1+N_{ППЗ}-1} \sum_{e=0}^1 \sum_{g=0}^1 \sum_{j_p=0}^{2n} \sum_{i_p=-n}^n (\gamma_{egt} \cdot M_{pj_p(i_p+n)} \cdot A_{(i+i_p+\Delta N_{xt}+e \cdot j_{xt}), (k-j_p+1+\Delta N_{yt}+g \cdot j_{yt})t}). \quad (8)$$

При матрице размытия размером  $1 \times 1$  ( $n = 0$ ), формула (8) сводится к формуле (6).

Согласно формуле (8) 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 матрицы размытия, а также весом основного пикселя, определяемым по формуле (5).

С использованием формул (4), (6), (8) 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.

**Объединение суперкадров, принадлежащих одной подсерии.** После проведения СКДО для каждой подсерии будет получено некоторое количество суперкадров, сформированных для каждого шага по скорости, на которых в свою очередь получено некоторое количество отметок, возможно принадлежащих астероидам. Проведение поиска подвижных объектов на каждом таком суперкадре отдельно, во-первых, значительно увеличивает его трудоемкость, а, во-вторых, может снизить показатели качества обнаружения астероидов. Это связано с тем, что, из-за дискретности скоростей предполагаемого движения астероидов по каждой координате, максимумы накопленной энергии для одного астероида в разных подсериях одной серии могут получиться на разных суперкадрах, что может привести к пропуску траектории астероида при раздельной обработке супер-

кадров. Для снижения трудоемкости обнаружения астероидов, а также повышения вероятности правильного обнаружения траектории астероида, перед обнаружением объектов с ненулевым видимым движением проводится объединение суперкадров, принадлежащих одной подсерии. В основе операции объединения лежит предположение, что в одну и ту же область кадра малого объема может попасть сигнал только от одного астероида. Для объединения суперкадров проводится анализ отметок, принадлежащих различным суперкадрам одной подсерии и имеющим координаты, отличающихся между собой менее чем на радиус безразличия – экспериментально определяемую константу. В таких совокупностях отметок оставляется по одной с максимальной амплитудой – остальные отбрасываются.

**Определение значений скорости при проведении метода СКДО.** Так как параметры собственного видимого движения астероида неизвестны, то метод СКДО производится во всем диапазоне скоростей (измеряются пикселях за единицу времени) от минимальной  $V_{ППЗ \min}$  до максимальной  $V_{ППЗ \max}$ , в котором предполагается наличие астероида. Скорость изменяется с шагом  $\Delta V_{ППЗ}$ , который выбирается таким, чтобы траекториям с соседними сочетаниями значений скоростей по координатам хотя бы на одном кадре серии соответствовали пиксели с разными номерами.

Значение скоростей по каждой координате на  $\ell$ -м шаге определяется как:

$$\begin{aligned} V_{\ell x} &= V_{ППЗ \min} + (\ell_x - 1) \Delta V_{ППЗ} \\ V_{\ell y} &= V_{ППЗ \min} + (\ell_y - 1) \Delta V_{ППЗ}, \end{aligned} \quad (9)$$

При этом общее количество используемых значений скорости видимого движения по одной координате  $N_\ell$  составляет:

$$N_\ell = E((V_{ППЗ \max} - V_{ППЗ \min}) / \Delta V_{ППЗ}) + 1. \quad (10)$$

**Описание вычислительного метода сложения кадров с накоплением сигнала от объекта с ненулевым видимым движением.** Для каждой подсерии вычислительный метод сложения кадров с накоплением сигнала объекта с ненулевым видимым движением заключается в следующем.

1. Определение номеров базовых кадров подсерий (в качестве таковых используются средние кадры)

2. Внутрикадровая обработка исходных кадров для определения оценок параметров их взаимного смещения. Для каждого кадра проводится следующая последовательность действий.

2.1. Отбор  $N_{перв}$  пикселей с наибольшей яркостью на кадре.

2.2. Отбор  $N_{первом}$  локальных максимумов из  $N_{перв}$  пикселей изображения с наибольшей яркостью.

2.3. Проведение оценки координат объектов, находящихся в окрестности около отобранных локальных максимумов изображения согласно процедуры, описанной в [8].

2.4. Отождествление полученных отметок со звездным каталогом.

2.5. Отождествление полученных отметок с отметками на базовом кадре (производится только для отметок, отождествленных со звездным каталогом).

2.6. Определение значения смещения центра текущего кадра относительно центра базового при помощи выражения (3).

3. Проведение сложения кадров для каждого значения скоростей. Значения скоростей  $V_{lx}$ ,  $V_{ly}$  определяются согласно выражения (9), количество используемых значений скорости видимого движения по каждой координате – согласно выражения (10). Для всех сочетаний значений  $V_{lx}$ ,  $V_{ly}$  в каждой подсерии проводится следующая последовательность действий.

3.1. Определение значения сдвигов кадров в подсерии по каждой координате по формуле (2). Базовому кадру, который также участвует в операциях сложения и размытия, назначается нулевой сдвиг по обеим координатам.

3.2. Определение значений матрицы весов по дробным значениям сдвигов согласно формулы (5).

3.3. Определение для каждого пикселя суперкадра его суммарной амплитуды из амплитуд соответствующих пикселей кадров подсерии, взятых с учетом матрицы весов (5) и матрицы размытия (7), по формуле (8).

В результате СКДО формируются совокупности суперкадров в подсериях. Количество суперкадров соответствует количеству возможных сочетаний табулируемых скоростей  $V_{lx}$ ,  $V_{ly}$ .

**Результаты эксперимента.** Несмотря на широкий диапазон расстояний астероидов от орбиты Земли, большая их часть находится в пределах главного пояса, и движется с видимыми скоростями порядка 0,5 угловых секунд в минуту. Следовательно, при проведении съемки с типичным временем экспозиции 30 с. достаточно проведения программного переноса заряда в диапазоне скоростей (в пикселях за время между формированием соседних кадров)  $V_{lx} \in [-0,5 ; 0,5]$ ,  $V_{ly} \in [-0,5 ; 0,5]$ .

Экспериментальные исследования, проведенные в Андрушевской астрономической обсерватории

на телескопе Zeiss-600 с диаметром зеркала 60 см., оснащенном ПЗС-камерой FLI PL09000 (размер кадра при съемке с одинарным бинированием 1528x1528 пикселей), дополнительно показали, что при съемке с указанной экспозицией достаточно изменять в методе СКДО ожидаемую скорость  $\Delta V_{\text{ИС}}$  объекта с шагом по каждой координате 0,5. При этом  $N_{\text{идаа}} = 0,02 N_{\text{ИС}} \tilde{N}$ ;  $N_{\text{идаио}} = 650$ , а значение радиуса безразличия при объединении суперкадров одной подсерии составило 2 пикселя.

Всего, таким образом, при методе СКДО формируется 9 суперкадров для каждой подсерии, что не представляет значительной трудности.

**Выводы.** В статье усовершенствован метод сложения кадров с накоплением сигнала от астероидов со слабым блеском и ненулевым видимым движением. Он отличается от известных тем, что сложение кадров проводится для нескольких подсерий в пределах одной серии наблюдений; оценка взаимного смещения кадров внутри подсерии проводится путем взаимного отождествления отметок, отождествленных со звездным каталогом на базовом и складываемом кадрах; учет дробности взаимного сдвига складываемых кадров и направления движения астероида проводится с применением «площадного» подхода (матрицы весов), использованием матрицы размытия для повышения эффективности накопления амплитуды сигнала от астероида в условиях наличия остаточных ошибок оценок взаимного сдвига складываемых кадров.

Предложен метод объединения суперкадров, принадлежащих одной подсерии, позволяющий повысить показатели качества обнаружения астероида и значительно сократить вычислительные затраты на обнаружение астероидов, основанный на предположении что в одну и ту же область кадра малого объема может попасть сигнал только от одного астероида.

Метод использован в разработанной авторами системе оперативного автоматизированного обнаружения астероидов со слабым блеском. Метод может быть применен также в других системах обработки ПЗС-кадров, где имеется необходимость в сложении кадров для объектов с неизвестными параметрами ненулевого видимого движения.

Дальнейшие исследования целесообразно посвятить определению оптимальных значений элементов матрицы размытия, что позволит повысить эффективность предложенного метода.

**Список литературы.** 1. Миронов А. В. Основы астрофотометрии. Практические основы высокоточной фотометрии и астрофотометрии звезд. М.: Физматлит, 2008. – 260 с. 2. 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. 3. Rabinowitz D, Drift Scanning (Time-Delay Integration). Michelson Summer Workshop, Caltech, 2005. 4. Дума Д. П. Загальна астрометрія. Навчальний посібник. –

Київ: «Наукова думка», 2007. – 600 с. 5 Ковальчук А.Н., Пинигин Г.И., Шульга А.В. Скоростной автоматический комплекс для регистрации небесных объектов естественного и искусственного происхождения в околоземном космическом пространстве // *Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы.* – М.: ИНАСАН, 2000. – С. 361 – 371. 6. Yanagisawa, T., et al., *Automatic Detection Algorithm for Small Moving Objects*, Publ. Astron. Soc. Japan, 57, p. 399-408, 2005. 7. Михельсон Н.Н. *Оптические телескопы. Теория и конструкция.*, М.: «Наука», Гл. ред. физ. – мат. лит., 1976. – 512 с. 8. Саваневич В. Е., Брюховецкий А. Б., Кожухов А. М., Диков Е. Н. Оценка координат астероида на дискретном изображении // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* 2010. Вып. 162. – С. 134 – 141. 9. Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений/ Пер. с англ.* - М: Техносфера, 2005.-1072с. 10. Mighell K.J. *Algorithms for CCD Stellar Photometry. Astronomical Data Analysis Software and Systems VIII ASP Conference Series*, ed. D. V. Mehringer, R. L. Plante. and D. A. Roberts, Vol 172, p 317 – 328, 1999.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки и техники Украины В.П. Деденок, НИПИ «СОЮЗ», Харьков.