

УДК 629.1:543.42

В.Е. Саваневич¹, А.М. Кожухов², А.Б. Брюховецкий², В.П. Власенко²¹Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков²Национальный Центр управления и испытаний космических средств, Евпатория

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 пронающей 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 :

$$q = A / \sqrt{D_m}, \quad (1)$$

где A – превышение амплитуды сигнала над средним уровнем фона; D_m – дисперсия фона.

Теоретически при сложении N кадров ОСШ сигнала q увеличится в \sqrt{N} раз. На практике, уве-

личение 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 осуществления 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 реализации 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 од-

ной 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.

Основной раздел

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 значенные смещения координат оптических центров кадров друг относительно друга, вызванные неточностью суточного ведения или ошибками повторно-

го наведення 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:

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

где $\Delta x_t, \Delta y_t$ – значения сдвигов текущего кадра относительно базового по соответствующим координатам; $\hat{d}x_t, \hat{d}y_t$ – 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, имеющих 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:

$$\left\{ \begin{aligned} \hat{d}x_t &= \frac{1}{N'_{\text{первотм}}} \sum_{i=1}^{i=N'_{\text{первотм}}} \sum_{j=1}^{j=N'_{\text{первотм}}} (x_{jt} - x_i); \\ \hat{d}y_t &= \frac{1}{N'_{\text{первотм}}} \sum_{i=1}^{i=N'_{\text{первотм}}} \sum_{j=1}^{j=N'_{\text{первотм}}} (y_{jt} - y_i); \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где 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.

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:

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

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; $N_{\text{ППЗ}}$ – 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 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 каждого пикселя складываемого кадра, записываемая в пиксель суперкадра, пропорциональна указанной выше мере.

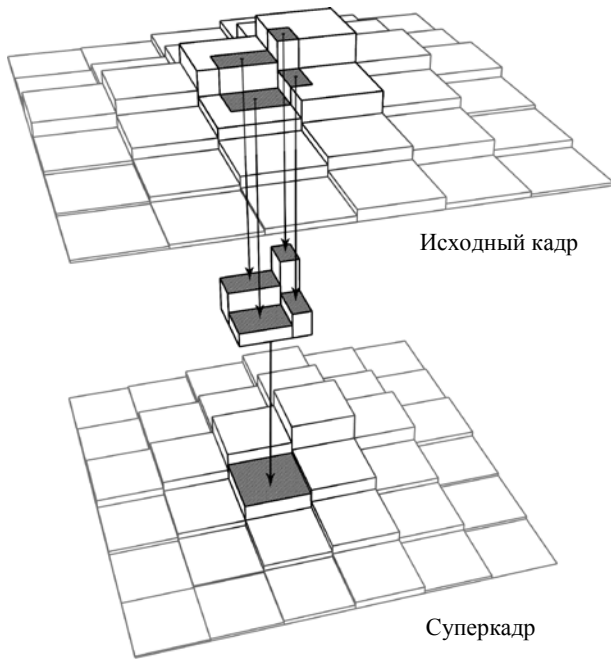


Рис. 1. Сложение кадров с взаимным сдвигом на дробное число пикселей на основе «площадного» подхода

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 Δx_t , Δy_t . При этом формула (4) преобразуется к виду:

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

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 коор-

динаты 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 3×3 ($n = 1$):

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

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

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

При матрице размытия размером 1×1 ($n = 0$), 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 асте-

роидам. 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 суперкадров. 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 видимого движения астероида неизвестны, то метод СКДО производится во всем диапазоне скоростей (измеряются пикселях за единицу времени) от минимальной $V_{\text{ППЗmin}}$ до максимальной $V_{\text{ППЗmax}}$, в котором предполагается наличие астероида. Скорость изменяется с шагом $\Delta V_{\text{ППЗ}}$, 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 ℓ -м шаге определяется как:

$$\begin{aligned} V_{\ell x \text{ ППЗ}} &= V_{\text{min}} + (\ell - 1) \Delta V_{\text{ППЗ}} ; \\ V_{\ell y \text{ ППЗ}} &= V_{\text{min}} + (\ell - 1) \Delta V_{\text{ППЗ}} . \end{aligned} \quad (9)$$

При этом общее количество используемых значений скорости видимого движения по одной координате N_{ℓ} составляет:

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

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 их качестве 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 $N_{\text{перв}}$ пикселей с наибольшей яркостью на кадре.

2.2. Отбор $N_{\text{первотм}}$ локальных максимумов из $N_{\text{перв}}$ пикселей с наибольшей яркостью.

2.3. Оценка координат объектов, находящихся в окрестности 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 $V_{\ell x}$, $V_{\ell y}$ определяются согласно выражения (9), количество используемых значений скорости видимого движения по каждой координате – согласно выражения (10). Для всех сочетаний значений $V_{\ell x}$, $V_{\ell y}$ 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 $V_{\ell x}$, $V_{\ell y}$.

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) $V_{\ell x} \in [-0,5 ; 0,5]$, $V_{\ell y} \in [-0,5 ; 0,5]$.

Экспериментальные исследования, проведенные в Андрушевской астрономической обсерватории на телескопе Zeiss-600 с диаметром зеркала 60 см., оснащенный ПЗС-камерой FLI PL09000 (размер кадра при съемке с одинарным бинированием 1528x1528 пикселей), дополнительно показали, что при съемке с указанной экспозицией достаточно

змінювати в методі СКДО очікувану швидкість $\Delta V_{\text{ПЗЗ}}$ об'єкта з кроком по кожній координаті 0,5. При цьому $N_{\text{перв}} = 0,02N_{\text{ПЗС}}$; $N_{\text{первотм}} = 650$, а значення радіуса безразличчя при об'єднанні суперкадрів однієї підсерії склало 2 пікселі.

Всього, таким чином, при методі СКДО формується 9 суперкадрів для кожної підсерії, що не представляє значущої складності.

Висновки

В статті удосконалено метод складання кадрів з накопиченням сигналу від астероїдів з слабким блиском і ненульовим видимим рухом. Він відрізняється від відомих тим, що складання кадрів проводиться для декількох підсерій в межах однієї серії спостережень; оцінка взаємного зміщення кадрів всередині підсерії проводиться шляхом взаємного отождествлення відміток, отождествлених з зірковим каталогом на базовому і складуваних кадрах; урахування дробності взаємного зсуву складуваних кадрів і напрямку руху астероїда проводиться за допомогою «площадного» підходу (матриці ваг), використанням матриці розмиття для підвищення ефективності накопичення амплітуди сигналу від астероїда в умовах наявності залишкових помилок оцінок взаємного зсуву складуваних кадрів.

Представлено метод об'єднання суперкадрів, належачих одній підсерії, що дозволяє підвищити показники якості виявлення астероїда і значно скоротити обчислювальні витрати на виявлення астероїдів, заснований на припущенні, що в одну і ту ж область кадру невеликого об'єму може потрапити сигнал тільки від одного астероїда.

Метод використано в розробленій авторами системі оперативного автоматизованого виявлення астероїдів з слабким блиском. Метод може бути застосований також в інших системах обробки ПЗС-кадрів, де існує необхідність в

складанні кадрів для об'єктів з невідомими параметрами ненульового видимого руху.

Дальніші дослідження цілорозумно присвятити визначенню оптимальних значень елементів матриці розмиття, що дозволить підвищити ефективність запропонованого методу.

Список літератури

1. Миронов А.В. *Основи астрофотометрії. Практичні основи високоточної фотометрії та астрофотометрії зірок*. 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 астрономія: навч. посіб.* / Д.П. Дума. – К.: Наукова думка, 2007. – 600 с.
5. Ковальчук А.Н. *Швидкісний автоматичний комплекс для реєстрації небесних об'єктів природного і штучного походження в околотериторіальному космічному просторі* / А.Н. Ковальчук, Г.І. Пинигін, А.В. Шульга // *Околотериторіальна астрономія та проблеми вивчення малих тіл Сонячної системи*. – М.: ИНАСАН, 2000. – С. 361-371.
6. Yanagisawa, T. *Automatic Detection Algorithm for Small Moving Objects*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 57, p. 399-408, 2005.
7. Михельсон Н.Н. *Оптичні телескопи. Теорія та конструкція* / Н.Н. Михельсон. – М.: Наука, 1976. – 512 с.
8. Саваневич В.Е., Брюховецький А.Б., Кожухов А.М., Диков Е.Н. *Оцінка координат астероїда на дискретному зображенні* / В.Е. Саваневич, А.Б. Брюховецький, А.М. Кожухов, Е.Н. Диков // *Радиотехніка: Всеукр. міжвед. науч.-техн. сб.* 2010. Вип. 162. – С. 134 – 141.
9. Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифрова обробка зображень* / Пер. з 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.*

Поступила в редколлегию 2.09.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.П. Деденок, ГП НИПИ "Союз", НКА України, Харків.

МЕТОД НАКОПИЧЕННЯ СИГНАЛУ ВІД АСТЕРОЇДА ЗІ СЛАБКИМ БЛИСКОМ ТА НЕНУЛЬОВИМ ВИДИМИМ РУХОМ НА СЕРІЇ ПЗС-КАДРІВ

В.Є. Саваневич, О.М. Кожухов, О.Б. Брюховецький, В.П. Власенко

Розроблений метод додавання ПЗЗ-кадрів з накопиченням сигналу від астероїда зі слабким блиском і ненульовим видимим рухом, в основі якого лежить додавання ПЗЗ-кадрів зі зсувом уздовж можливих траєкторій руху астероїда. Особливістю методу є можливість зсуву між кадрами, що додаються, на дробове число пікселів. Коректне додавання кадрів із дробовим взаємним зсувом забезпечується використанням запропонованого авторами площинного підходу. Метод використаний авторами в розробленій системі виявлення нових і відомих астероїдів.

Ключові слова: астероїд, накопичення сигналу від астероїда, додавання ПЗЗ-кадрів.

THE METHOD OF SIGNAL ACCUMULATION FROM A FAINT ASTEROID WITH NONZERO VISUAL MOTION ON SERIES OF CCD-FRAMES

V.E. Savanevich, A.B. Bryukhovetskiy, A.M. Kozhukhov, V.P. Vlasenko

The method of CCD frames stacking with signal accumulation from a faint asteroid with nonzero visual motion is worked out. The method is based on the CCD frames stacking with shift along the possible trajectories of asteroid's motion. The feature of method is option of fractional shift (in pixels) between stacking frames. Correct frames stacking with a fractional shift is provided by using the areal approach offered by authors. The method has used by authors in developed system of automatic online new asteroids detection and known asteroids tracking.

Keywords: asteroid, signal accumulation from an asteroid, CCD-frames stacking.