

УДК 004.932:523.44

В.Е. Саваневич<sup>1</sup>, А.М. Кожухов<sup>2</sup>, А.Б. Брюховецкий<sup>2</sup>, Е.Н. Диков<sup>3</sup><sup>1</sup> Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков<sup>2</sup> Национальный Центр управления и испытаний космических средств, Евпатория<sup>3</sup> Научно-исследовательский, проектно-конструкторский институт микрографии, Харьков

## МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ, ОСНОВАННЫЙ НА НАКОПЛЕНИИ СИГНАЛОВ ВДОЛЬ ТРАЕКТОРИЙ С НЕИЗВЕСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Разработан метод обнаружения астероида на серии ПЗС-кадров, основанный на послепороговом накоплении статистик сигнала от астероида в пространстве параметров его траектории. Особенностью метода является предварительная отбраковка объектов неподвижных на серии кадров перед проведением обнаружения астероида. В качестве накапливаемой статистики используется оценка видимого блеска в звездных величинах сигналов от астероида. Метод использован авторами в разработанной системе автоматизированного обнаружения новых и известных астероидов. Приведены результаты практического применения данной системы.

**Ключевые слова:** астероиды-методы обнаружения, серия ПЗС-кадров.

### Введение

В настоящее время наблюдается противоречие между новыми средствами наблюдения за астероидами (новые телескопы на «быстрых» монтировках, широкоформатные высокочувствительные ПЗС-камеры) и методами их обнаружения (наблюдение быстро меняющихся (блинкующихся) кадров одного участка небесной сферы оператором). Это противоречие особенно значимо для случая обнаружения астероидов со слабым блеском.

**Анализ литературы.** При обнаружении слабоконтрастного движущегося объекта стробовый метод, основанный на логическом накоплении, не применим [1]. Данный метод создавался как эвристический, предназначенный для обнаружения контрастных объектов. При высоком уровне порога внутрикадровой обработки (ПВО) сигналы от малогабаритных объектов остаются под порогом. Снижение уровня ПВО приводит к лавинообразному возрастанию количества ложных отметок, которое принципиально невозможно обработать при любом уровне развития вычислительной техники.

В общем случае, предельно высокая трудоемкость метода перебора гипотез о сочетании отметок не оставляет надежд и на его реализацию [2]. Были предложены методы обнаружения астероидов [3, 4], где проверка гипотез о наличии объекта проводится путем сложения со смещением вдоль возможных траекторий астероида имеющихся ПЗС-кадров одного и того же участка небесной сферы. В [3] для уменьшения вычислительной трудоемкости проводится проверка гипотетических траекторий астероида сложением со смещением с применением медианной фильтрации только участка кадра вокруг каждой неоднородности изображения, энергетически незначительно превосходящей фон. В методе обна-

ружения астероидов [4] уменьшение вычислительных затрат достигается за счет отказа от полного покрытия пространства параметров траектории, за счет увеличения шага между двумя последовательно проверяемыми гипотезами. Это приводит к увеличению количества пропусков астероидов. В работе [5] была предложена двухэтапная реализация иерархического метода обнаружения малоразмерного движущегося объекта (к таковым можно отнести и астероиды) на основании накопления статистик, пропорциональных энергии сигналов вдоль возможных траекторий движения объекта с организацией полного покрытия пространства параметров траекторий (ППТ). Однако в данной работе не была рассмотрена возможность попадания отметки в несколько пространственных стробов в случае реализации полного покрытия ППТ с учетом ошибок оценки координат. К недостаткам метода, изложенного в [5], следует также отнести невозможность проведения качественного обнаружения в случае наличия в зоне обнаружения (на ПЗС-кадрах) большого количества неподвижных объектов (в случае наблюдения астероидов такими объектами являются звезды), форма сигналов от которых не отличается от формы сигнала от подвижного объекта. Этот недостаток является весьма существенным потому, что одной из главных особенностей условий наблюдения астероидов является формирование кадра не только за счет фонового излучения и излучения от астероида, но и за счет излучения звезд, попавших в поле зрения оптико-электронной системы (ОЭС), на фоне которых движется астероид. При этом на некоторых участках небесной сферы (например, в окрестности Млечного Пути) количество звезд может достигать десятков тысяч на квадратный градус. Данное обстоятельство может привести к серьезному росту значения условной вероятности ложных

обнаружений (УВЛЮ) и появлению большого количества ложных обнаружений астероидов. Поэтому представляется целесообразным провести предварительную отбраковку сигналов, сформированных звездами перед проведением обнаружения траекторий астероидов.

Одним из наиболее широко применяемых методов отбраковки сигналов, принадлежащих неподвижным объектам, является вычитание из кадров медианного кадра, аналогично применяемому в [6] вычитанию медианного фона. Медианный кадр представляет собой совокупность медианных значений яркости пикселей для всех кадров серии. Вычитание такого кадра должно привести к исчезновению сигналов от неподвижных объектов, однако на практике дело обстоит сложнее. Изображения на кадрах представляют из себя размытые точки, а яркость объекта с постоянным видимым блеском может изменяться между кадрами в разы. Поэтому в результате вычитания медианного кадра остаются яркие артефакты в районе нахождения изображений сигналов от звезд с большим видимым блеском. Данные артефакты порождают ложные отметки, что приводит к увеличению времени, затрачиваемого на межкадровую обработку, и может привести к обнаружению ложных траекторий. Кроме того, в случае применения данного метода возможно искажение формы сигналов от медленно движущихся объектов, которое приводит к снижению точности оценки их координат, а то и вовсе к пропуску данных сигналов.

Более корректно можно сделать отбраковку путем сравнения координат сигналов с координатами звезд, имеющихся в звездном каталоге. Однако проведение подобной отбраковки осложняется тем фактом, что большинство звезд с видимым блеском, соответствующим диапазону видимого блеска искомым астероидов, не зарегистрировано ни в одном из доступных наблюдателям звездных каталогов.

**Постановка задачи.** Астероид в поле зрения оптико-электронного средства движется на фоне звезд прямолинейно и равномерно, по каждой координате независимо. Изображение астероида на ПЗС-кадре ничем не отличается от изображения на нем звезд (рис. 1). В качестве модели видимого движения астероидов выбрана модель прямолинейного и равномерного движения со скоростью  $v \in [v_{\min}, v_{\max}]$ . Возможна большая разница уровней (амплитуд) сигнала от одного и того же астероида на разных кадрах одной серии. Оценки координат сигнала от астероида смещены относительно реальных координат вследствие турбулентности атмосферы и искажений, вносимых оптической системой телескопа, а также неточностями механизма суточного ведения телескопа.

Для рассматриваемой серии кадров проведена внутрикадровая обработка. Результатом внутрикадровой обработки являются совокупности отметок

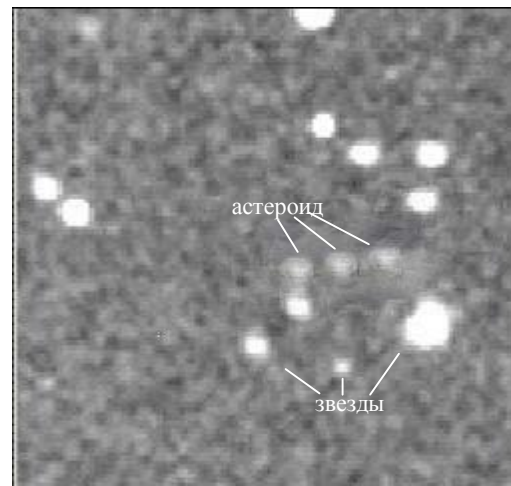


Рис. 1. Движение астероида на фоне звезд

каждого кадра серии. Наличие отметки характеризует решение, принятое на этапе внутрикадровой обработки по данным дискретного кадра, сформированного оптико-электронным средством. Данное решение принято о наличии во входном излучении сигнала с определенными параметрами и энергией, превышающей порог внутрикадровой обработки.

Отметка  $Y_{it}$  ( $i$ -я отметка  $t$ -го кадра) содержит оценки параметров выделенного сигнала. Отметки всегда содержат коды координат  $\chi_{it}$ . Без технических затруднений в состав отметки может быть включен код амплитуды  $A_{it}$ . Тем самым  $Y_{it} = \{A_{it}, \chi_{it}\}$ . Причем, коды координат ( $\chi_{it} = \{x_{it}, y_{it}\}$ ) содержат коды  $x_{it}, y_{it}$  координатной привязки  $i$ -й отметки  $t$ -го кадра. Помехи и внутренний шум оптических приемников на выходе внутрикадровой обработки проявляются в виде ошибок, содержащихся в оценках параметров сигналов, в виде пропусков отметок от астероидов и ложных отметок [7, 8, 9]. С уменьшением порога внутрикадровой обработки количество ложных отметок лавинообразно увеличивается, а вероятность пропуска отметок от астероидов со слабым видимым блеском уменьшается [7, 9].

На одном кадре от одного астероида не может быть более одной отметки [5, 8] либо сведения о том, каким астероидам принадлежат другие отметки, не несут в себе информации о принадлежности данной [5].

**Целью статьи** является разработка метода обнаружения астероида, движущегося на серии ПЗС-кадров. Метод должен учитывать возможность наличия на ПЗС-кадрах большого количества звезд, форма сигналов от которых не отличается от формы сигналов астероида; возможности резких изменений условий наблюдения, приводящих к большим изменениям амплитуд сигналов от одного и того же астероида на разных кадрах серии; наличие неточностей реализации оптической и механической составляющих телескопа, и неточностей реализации про-

граммы наведения и суточного ведения телескопа; влияние турбулентности атмосферы, приводящей к ошибкам в оценках координат объектов.

Предлагаемый метод позволяет накапливать энергию сигналов от объекта вдоль траектории движения, параметры которой неизвестны, за счет использования многозначного преобразования (послепороговое накопление статистик сигналов от астероида вдоль всех возможных траекторий его движения). Причем для стабилизации вычислительных затрат по реализации метода на приемлемом уровне используется иерархическая реализация указанного многозначного преобразования.

### Основной материал исследований

**Многозначное преобразование координат объектов.** Многозначное преобразование позволяет накопить сигналы вдоль всех возможных траекторий движения небесных тел. Физически наблюдаемая область пространства, в соответствии с принятой моделью движения, разбивается на пересекающиеся пространственно-временные области (пространственные области, перемещающиеся от кадра к кадру) так, чтобы из одной из них объект за время обнаружения не вышел. Каждой области отводится накопитель, а сигналы от небесных объектов накапливаются во всех накопителях областей, которым они принадлежат. При реализации метода в качестве модели видимого движения объекта используется модель прямолинейного и равномерного движения объекта на плоскости. На первом этапе отдельные траектории объединяются в классы (в один класс входят все траектории, соответствующие одной прямой). И исследуются соответствующие пространственные области. При принятии решения о возможном наличии небесного тела на одной из исследуемых прямых используется второй этап – исследование пространственно-временных областей, принадлежащих выделенной прямой. В используемой реализации многозначного преобразования, допускающего многоэтапную реализацию, на первом этапе накопление статистик производится в пространстве «траверсный угол – траверсная дальность» траектории, на втором – в пространстве «начальное положение – скорость». Первый этап преобразования представляет собой модификацию преобразования Хока (Хока, Hough) [5, 10], где геометрические места точек, образующих прямую линию (рис. 2), в пространстве «траверсный угол – траверсная дальность» представляют собой синусоидальные кривые (рис. 3), а прямая линия, на которой лежат данные точки (рис. 2), преобразуется в точку пересечения данных кривых (рис. 3).

**Двухэтапный метод обнаружения астероида с отбраковкой сигналов от объектов, неподвижных на Т кадрах.** В связи с отсутствием звездных каталогов, в которых были бы указаны все имеющиеся на кадре звезды, в качестве селективного признака целесообразно и возможно воспользоваться тем, что, из-за

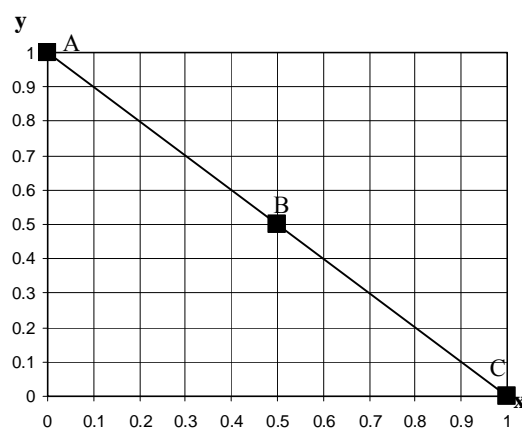


Рис. 2. Изображение траектории в системе координат ПЗС-матрицы

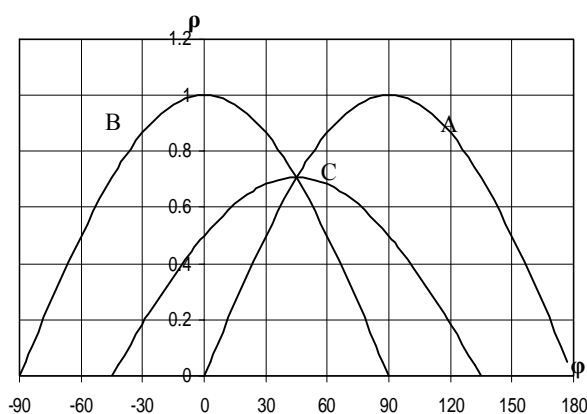


Рис. 3. Отображение точек изображения траектории в плоскость траверсных углов и дальности

особенностей режима наблюдения, сигналы от звезд должны быть неподвижными на всей серии кадров, в то время как сигнал от астероида имеет заметное видимое движение между кадрами. Соответственно отбраковка сигналов от звезд должна проводиться как отбраковка сигналов от объектов, неподвижных на Т кадрах. В действительности сигналы от звезд не являются неподвижными, а несколько «дребезжат» на Т кадрах из-за неточностей часового ведения телескопа и изменений состояния атмосферы между кадрами, соответственно, оценки координат сигналов от одной звезды на разных кадрах серии будут отличаться друг от друга. Учитывая данный фактор, объект предлагается считать неподвижным на Т кадрах (звездой), если координаты соответствующих ему отметок на любом из кадров отличаются не более чем на наперед заданное значение радиуса безразличия. Таким образом, двухэтапный метод обнаружения астероида с отбраковкой сигналов (отметок, соответствующих данным сигналам) от объектов, неподвижных на Т кадрах, сводится к следующему. Предварительно зона обнаружения делится на большое количество неподвижных стробов предполагаемого нахождения объекта, размеры которых определяются погрешностями измерений параметров сигнала. Затем производится сравнение амплитуд отметок, сформированных в одних и тех же стробах предполагаемого нахождения объекта на раз-

ных кадрах. Данные отметки признаются принадлежащими объекту, неподвижному на  $T$  кадрах, если их амплитуды превышают пороговую не менее, чем на  $K$  из  $T$  кадров. Отметки, признанные соответствующими сигналам от объектов, неподвижных на  $T$  кадрах, формируют внутренний каталог неподвижных объектов и в дальнейшей обработке участия не принимают.

Для оставшихся отметок производится формирование в зоне обнаружения объекта пространственно-временных стробов путем деления ее на  $N$  пересекающихся стробов, которые выбраны из условия, что астероид не выйдет из одного из них за  $T$  кадров. Производится накопление амплитуд отметок с максимальным их значением на каждом кадре от каждого из  $N$  ПВС за  $T$  кадров. Накопленная амплитуда каждого ПВС сравнивается с первой пороговой амплитудой  $A_{n1}$ . Стробы, сигналы от которых имеют накопленную амплитуду, превышающую  $A_{n1}$ , делят на  $M$  встроенных стробов, размеры каждого из которых определяются погрешностями оценки параметров оптического сигнала. Производится накопление амплитуды отобранных отметок для каждого из  $M$  встроенных стробов за  $T$  кадров. Выбирают встроенные ПВС, накопленная амплитуда отметок в которых превысила вторую пороговую амплитуду  $A_{n2}$ . Астероид считают обнаруженным, если накопленная амплитуда хотя бы одного встроенного ПВС превысила пороговую, а параметры движения астероида при этом считают соответствующими параметрам ПВС с максимальной накопленной статистикой. В качестве амплитуд отметок предлагается использовать оценки видимого блеска объектов в звездных величинах, которые получаются согласно методу, описанному в [11].

**Определение полного покрытия зоны обнаружения пространственно-временными стробами первого и второго этапов.** Считается, что покрытие зоны обнаружения (ЗО) ПВС первого этапа (ПВСПЭ) полное, если астероид, двигаясь по любой из  $M$  возможных траекторий, на всех  $T$  кадрах постоянно находится хотя бы в одном ПВСПЭ. Авторами рассматривались только ПВСПЭ, которые состоят из пространственных стробов одинакового размера, который не превосходит  $V^*$  пикселей. Рассматривается ЗО с равными размерами по двум координатам. Если размеры ЗО по двум координатам различны, то она представляется в виде ЗО, с равными размерами, соответствующими максимальному размеру по одной координате.

Задача обеспечения оптимального полного покрытия ЗО с учетом ошибок для данных условий была решена в [5]. При этом размер типового пространственного строба оказался равен:

$$S_{\text{пол}}^* = \Delta s_0 \Delta \rho, \quad (1)$$

где  $\Delta s_0$ ,  $\Delta \rho$  – шаг дискретизации по начальному положению  $s_0$  и траверсной дальности  $\rho$  соответственно.

Шаг дискретизации по траверсному углу при этом составляет:

$$\Delta \varphi = 2\pi / (E[\pi/\gamma] + 1), \quad (2)$$

где  $E[x]$  – целая часть числа  $x$ ;

$$\gamma = \frac{0,5\Delta\rho - 5\sigma_x}{0,5R}; \quad (3)$$

$\sigma_x$  – СКО оценки координат отметок;  $R$  – размер зоны обзора по координате  $x$ .

В данной постановке шаг дискретизации по траверсной дальности является постоянным для каждого значения  $\varphi$ . Если шаг дискретизации по  $\rho$  для разных значений  $\varphi$  сделать в общем случае различным, способ расчета  $\varphi$  согласно выражения (2) использовать нельзя. Значение шага по скорости определяется следующим образом:

$$\Delta v = (\Delta s_0 - 10\sigma_x) / [(T-1)\tau], \quad (4)$$

где  $\tau$  – время между двумя последовательными кадрами.

При этом количество стробов первого и второго этапов, необходимых для обеспечения полного покрытия ЗО, составит [5]:

$$N_d = \frac{\pi R^2}{(\Delta\rho - 10\sigma_x)^2} \sum_{k=1}^{N_v} \frac{v_k \tau}{\Delta s_0 - 10\sigma_x}, \quad (5)$$

где  $N_v = \frac{(v_{\max} - v_{\min})(T-1)\tau}{\Delta s_0 - 10\sigma_x}$ .

Минимальное количество стробов будет необходимо для обеспечения полного покрытия ЗО в случае выполнения условия равенства размеров стробов по траверсной дальности начальному положению:

$$\Delta\rho = \Delta s_0. \quad (6)$$

Выражение для минимального точного количества требуемых стробов (5) с учетом (6) имеет вид:

$$N_{d \min} = \frac{2\pi\tau^2 T(T-1)R^2 v_{\max} (v_{\max} - v_{\min})}{(\sqrt{\Delta\rho\Delta s_0} - 10\sigma_x)^4}. \quad (7)$$

**Определение стробов первого и второго этапов, в которые попадает статистика сигнала, с учетом ошибок оценки координат.** В работе [5] показано, что при определении оптимального покрытия зоны обнаружения (ЗО) с учетом ошибок оценки координат количество стробов по траверсной дальности или начальному положению увеличится, так как реальный сдвиг между соседними стробами составит на примере траверсной дальности (рис. 4):

$$\Delta\rho_2 = \Delta\rho - 5\sigma_x, \quad (8)$$

а индекс строба, в который попадает отметка, определяется выражением:

$$j = E((\rho - \rho_{\min}) / \Delta\rho_2), \quad (9)$$

где  $\rho$  – значение траверсной дальности данной отметки для текущего шага по траверсному углу;  $\rho_{\min}$  – минимальное из рассматриваемых значений траверсной дальности в данной серии кадров.

Однако не была оговорена возможность попадания отметки одновременно в несколько таких стробов.

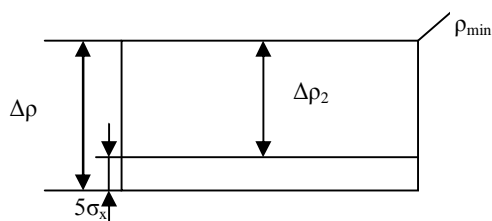


Рис. 4. Определение сдвига начала строба по траверсной дальности

При организации полного покрытия зоны обнаружения с учетом ошибок оценки координат возможна ситуация, когда отметка при одном значении траверсного угла или скорости может попасть не в один, а в два или даже три строба по траверсной дальности или начальному положению из-за имеющегося взаимного перекрытия соседних стробов.

Количество стробов, в которые попадает отметка, зависит от значения параметров самой отметки, размера стробов ( $\Delta\rho, \Delta s_0$ ) и значения СКО оценки координат  $\sigma_x$  (рис. 5 – 6).

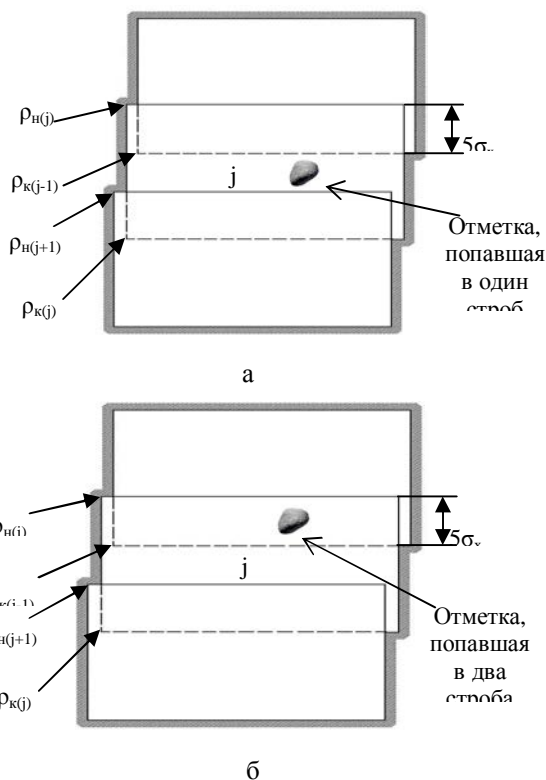


Рис. 5. Попадание значения траверсной дальности в один (а) и два (б) строба по траверсной дальности в случае полного покрытия при  $\Delta\rho \geq 10\sigma_x$

На рис. 5 показана ситуация, когда стробы, соседние с  $j$ -м стробом ( $j-1$ -й и  $j+1$ -й стробы), не перекрываются друг с другом. Это возможно в случае, если размер строба больше, чем удвоенный размер зон взаимного перекрытия соседних стробов с  $j$ -м стробом, то есть когда выполняется условие:

$$\Delta\rho \geq 10\sigma_x. \quad (10)$$

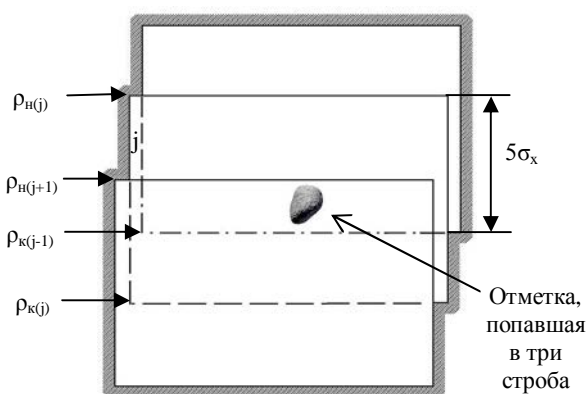


Рис. 6. Попадание значения траверсной дальности в три строба по траверсной дальности в случае полного покрытия при  $5\sigma_x \leq \Delta\rho \leq 10\sigma_x$

Из рис. 5, б видно, что отметка может попасть кроме  $j$ -го еще и в  $j-1$ -й строб в случае выполнения следующего условия:

$$\rho \leq \rho_{кj-1}, \quad (11)$$

где  $\rho_{кj-1} = \rho_{\min} + (j-1) \cdot \Delta\rho_2 + \Delta\rho$  – максимальное значение траверсной дальности, соответствующей  $j-1$ -му стробу по траверсной дальности.

Участок перекрытия  $j$ -го и  $j+1$ -го стробов входит в описанную выше область, но только для  $j+1$ -го строба, поэтому проверка еще одного условия для него не требуется.

В случае, показанном на рис. 6, стробы, соседние с  $j$ -м стробом, взаимно перекрываются. Это возможно в случае, если:

$$5\sigma_x \leq \Delta\rho \leq 10\sigma_x. \quad (12)$$

При этом отметка может попасть в три строба ( $j$ -й,  $j-1$ -й и  $j+1$ -й) только в случае верности неравенства:

$$\rho_{нj+1} \leq \rho \leq \rho_{кj-1}, \quad (13)$$

где  $\rho_{нj+1} = \rho_{\min} + (j+1) \cdot \Delta\rho_2$  – минимальное значение траверсной дальности, соответствующее  $j+1$ -му стробу по траверсной дальности. Учитывая, что участок  $j$ -го строба, расположенный в интервале между  $\rho_{кj-1}$  и  $\rho_{кj}$ , рассматривается при анализе  $j+1$ -го строба, как в предыдущем случае, участок в интервале между  $\rho_{нj+1}$  и  $\rho_{кj}$ , то условие (13) можно привести к упрощенному виду:

$$\rho \geq \rho_{нj+1}. \quad (14)$$

При невыполнении условия (14) отметка записывается только в  $j$ -й и  $j-1$ -й стробы.

Следует заметить, что попадание отметки более чем в три строба невозможно, так как при  $\Delta\rho \leq 5\sigma_x$  стробы начнут накладываться один на другой ( $\Delta\rho_2 \leq 0$ , см. формулу (8)).

Вышеприведенные условия справедливы также и для анализа попадания отметки в несколько стробов по начальному положению, который проводится на втором этапе обнаружения.

При этом номер строба по начальному положению определяется выражением:

$$k = E((s_0 - s_{0\min}) / \Delta s_{02}), \quad (15)$$

где  $s_{0\min}$  – минимальное значение начального положения, из рассматриваемых в данной серии кадров;  $\Delta s_{02} = \Delta s_0 - 5\sigma_x$ ;  $\Delta s_0$  – размер строба по начальному положению.

Условие попадания отметки не более, чем в два строба, примет вид:

$$\Delta s_0 \geq 10\sigma_x. \quad (16)$$

Условие записи отметки в два строба по начальному положению:

$$s_0 \leq s_{0k-1}, \quad (17)$$

где  $s_{0k-1} = s_{0\min} + (k-1) \cdot \Delta s_{02} + \Delta s_0$  – максимальное значение начального положения, соответствующего  $k-1$ -му стробу по начальному положению.

Условие записи отметки в три строба по начальному положению:

$$s_{0nk+1} \leq s_0 \leq s_{0k-1}, \quad (18)$$

где  $s_{0nk+1} = s_{0\min} + (k+1) \cdot \Delta s_{02}$  – минимальное значение начального положения, соответствующее  $k+1$ -му стробу по начальному положению.

**Вычислительный метод реализации двухэтапного обнаружения астероидов с отбраковкой сигналов, принадлежащих неподвижным объектам.** С учетом вышесказанного вычислительная схема метода двухэтапного обнаружения астероида с отбраковкой сигналов, принадлежащих неподвижным объектам, примет следующий вид.

1. Проводится отбраковка отметок, принадлежащих объектам, неподвижным на  $T$  кадрах.

2. Первый этап обнаружения астероида. Для каждой из отметок, не принадлежащих неподвижным объектам, проводится следующая последовательность действий.

2.1. Организовывается перебор по траверсному углу траектории астероида в диапазоне от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  с шагом  $\Delta\varphi$ , определяемым по формуле (2). Для каждого значения траверсного угла производится следующая последовательность действий.

2.1.1. Рассчитывается значение траверсной дальности траектории астероида:

$$\rho_{\ell it} = x_{it} \cos \varphi_\ell + y_{it} \sin \varphi_\ell, \quad (19)$$

где  $x_{it}, y_{it}$  – координаты  $i$ -й отметки  $t$ -го кадра;  $\varphi_\ell$  –  $\ell$ -е значение траверсного угла.

2.1.2. Согласно выражения (9) определяется номер строба  $j$  по траверсной дальности, в который попадает полученное значение  $\rho_{\ell it}$ .

2.1.3. Амплитуда отметки в звездных величинах записывается с накоплением в накопитель, соответствующий  $j$ -му стробу. В дальнейшем под амплитудой отметки понимается амплитуда отметки в звездных величинах.

2.1.4. Проводится проверка условия попадания отметки не более чем в два строба (10). При выполнении условия – на п. 2.1.5, иначе – на п. 2.1.7.

2.1.5. Проверяется условие попадания отметки в два строба по траверсной дальности (11). При его выполнении – на п. 2.1.6, иначе осуществляется переход к следующему значению траверсного угла (п. 2.1).

2.1.6. Амплитуда отметки в звездных величинах записывается с накоплением в накопитель, соответствующий  $j-1$ -му стробу по траверсной дальности. Далее осуществляется переход к следующему значению траверсного угла (п. 2.1).

2.1.7. Проверяется условие попадания отметки в три строба (14). При его выполнении – на п. 2.1.8, иначе – на п. 2.1.9.

2.1.8. Амплитуда отметки записывается с накоплением в накопители, соответствующие  $j-1$ -му и  $j+1$ -му стробам по траверсной дальности. Далее осуществляется переход к следующему значению траверсного угла (п. 2.1).

2.1.9. Амплитуда отметки записывается с накоплением в накопитель, соответствующий  $j-1$ -му стробу. Далее осуществляется переход к следующему значению траверсного угла (п. 2.1).

2.2. Для каждого строба первого этапа производится сравнение накопленной в соответствующем ему накопителе амплитуды с пороговой  $A_{\text{пл}}$ . На второй этап подаются только те стробы первого этапа, накопленная амплитуда в которых превысила пороговую.

3. Второй этап обнаружения астероида. Для каждой отметки, находящейся в стробе первого этапа, подаваемого на второй этап обнаружения астероида, производится следующая последовательность действий.

3.1. Организовывается перебор значений скорости траекторий астероида в диапазоне от  $v_{\min}$  до  $v_{\max}$  с шагом  $\Delta v$ , определяемым по формуле (4). Для каждого значения скорости производится следующая последовательность действий.

3.1.1. Рассчитывается значение начального положения траектории астероида по координатам  $i$ -й отметки  $t$ -го кадра, принадлежащей  $j$ -му стробу первого этапа:

$$s_{0p} = x_{mj(it)} \sin \varphi_j - y_{mj(it)} \cos \varphi_j - v_p \Delta t_t, \quad (20)$$

где  $\varphi_j$  – значение траверсного угла  $j$ -го строба первого этапа;  $v_p$  – значение скорости на данном шаге по скорости;  $x_{jm(it)}, y_{jm(it)}$  – координаты текущей

$i$ -й отметки  $t$ -го кадра, которая является  $m$ -й отметкой, принадлежащей  $j$ -му стробу первого этапа;  $\Delta t_i$  – разница времен формирования базового кадра и кадра, которому принадлежит текущая отметка.

3.1.2. Согласно выражения (15) определяется номер строба  $k$  начального положения, в который попадает данное значение начального положения  $s_{0p}$ .

3.1.3. Амплитуда отметки записывается с накоплением в накопитель, соответствующий  $k$ -му стробу.

3.1.4. Проводится проверка условия попадания отметки не более чем в два строба по начальному положению (16). При выполнении условия – на п. 3.1.5, иначе – 3.1.7.

3.1.5. Проверяется условие попадания отметки в два строба по начальному положению (17). При его выполнении – на п. 3.1.6, иначе осуществляется переход к следующему значению скорости (п. 3.1.).

3.1.6. Амплитуда отметки записывается с накоплением в накопитель, соответствующий  $k-1$ -му стробу по начальному положению. Далее осуществляется переход к следующему значению скорости (п. 3.1.).

3.1.7. Производится проверка условия попадания отметки в три строба (18). При его выполнении – на п. 3.1.8, иначе – на п. 3.1.9.

3.1.8. Амплитуда отметки записывается с накоплением в накопители, соответствующие  $k-1$ -му и  $k+1$ -му стробам по начальному положению. Далее осуществляется переход к следующему значению скорости (п. 3.1.).

3.1.9. Амплитуда отметки записывается с накоплением в накопитель, соответствующий  $k-1$ -му стробу по начальному положению. Далее осуществляется переход к следующему значению скорости (п. 3.1.).

3.2. Для каждой совокупности отметок, предположительно относящихся к одной траектории, производится сравнение накопленной в соответствующем накопителе амплитуды с пороговой  $A_{п2}$ .

Астероид считается обнаруженным, если суммарная амплитуда отметок, накопленная в соответствующем накопителе, превысила пороговое значение.

В результате использования метода формируются совокупность решений об обнаруженных астероидах, параметры траекторий которых соответствуют параметрам соответствующих стробов второго этапа. Так как стробы второго этапа обычно имеют значительно большие размеры, чем ошибка оценки координат отметок, принадлежащих одной траектории, то дальнейшее уточнение параметров траекторий астероидов производится с использованием метода наименьших квадратов.

## Результаты эксперимента

Разработанный метод обнаружения астероидов был положен в основу программной автоматизиро-

ванной системы обнаружения астероидов CoLiTec, основными разработчиками которой являются авторы статьи. Система проходила испытания в Андрушевской астрономической обсерватории (ААО) на телескопе Zeiss-600 с диаметром зеркала 60 см., оснащенном ПЗС-камерой FLI PL09000 (размер кадра при съемке с одинарным бинированием  $1528 \times 1528$  пикселей). С мая по декабрь 2010 года с использованием данной системы наблюдателями ААО (Киев) было открыто 25 астероидов [12]. При этом в мае 2010 года сотрудниками ААО впервые в СНГ астероид был открыт в автоматизированном режиме.

С 27 ноября 2010 года CoLiTec проходит опытную эксплуатацию в российской дистанционно управляемой обсерватории ISON-NM [13], расположенной в штате Нью-Мексико (США), на астрографе Astroworks Centurion-18 с диаметром зеркала 45 см., оснащенном ПЗС-камерой FLI ML09000-65 (размер кадра  $3056 \times 3056$  пикселей). Применение программы значительно увеличило количество наблюдаемых астероидов и наблюдений по ним, позволив обсерватории войти в топ-десять обсерваторий по количеству наблюдений астероидов и стать в декабре самой «наблюдающей» любительской обсерваторией мира [13]. За полтора месяца опытной эксплуатации к 13 января 2011 года с использованием CoLiTec было открыто 133 астероида [12]. В ночь на 3 января 2011 года с помощью CoLiTec было открыто 32 астероида, что является абсолютным рекордом данной обсерватории, в эту ночь с использованием CoLiTec наблюдателем ISON-NM было произведено 3868 наблюдений 967 астероидов, что также является абсолютным рекордом данной обсерватории [14]. 10 декабря 2010 года с использованием программы CoLiTec была открыта комета C/2010 X1 (Elenin) [15, 16], ставшая первой кометой, открытой российским астрономом за последние 20 лет [17].

## Выводы

В статье предложен двухэтапный метод обнаружения астероида, основанный на послепороговом накоплении статистик сигнала от астероида в пространстве параметров его траектории, названный методом собирания света, отличающийся от ранее известных следующим.

1. Перед началом выполнения операций обнаружения производится отбраковка сигналов от объектов, неподвижных на  $T$  кадрах путем создания внутреннего каталога неподвижных объектов, что значительно снижает вычислительные затраты на проведение обнаружения за счет уменьшения количества обрабатываемых отметок и снижает количество ложных обнаружений астероидов.

2. Обеспечивается возможность (целесообразность которой вызвана реализацией полного покрытия ЗО при наличии ошибок в оценках координат



об'єктів) попадання отримані від об'єкта в два і три строки по траверсній дальності і початковому положенню, замість одного в раніше відомому методі.

3. В якості амплітуди сигналу використовується оцінка видимого блиску відповідного об'єкта в звездних величинах, отримувана з допомогою двох-діапазонної кусочно-лінійної моделі коефіцієнтів фотометричного пересчету [10]. Значення даної оцінки для одного і того ж астероїда практично інваріантно змінюється при зміні умов спостереження в одній серії.

Результати використання розробленого методу в програмному комплексі CoLiTec для пошуку рухомих об'єктів на астрокадрах показали його високу ефективність. На рахунок CoLiTec різке підвищення кількості спостережуваних астероїдів і кількості їх спостережень на телескопах ААО і ISON-NM, 135 відкритих з його використанням астероїдів, включаючи перше відкриття астероїда в автоматизованому режимі в СНГ в травні 2010 року, а також його використання при відкритті комети C/2010 X1 (Elenin), ставшої першою кометою, відкритою росіянином в новій історії Росії.

Дальніші дослідження цілеспрямовано зосереджені на удосконаленні методів відбракування ложних траєкторій на останньому етапі використання методу.

### Список літератури

1. Кузьмін С.З. Цифрова радіолокація. Введення в теорію / С.З. Кузьмін. – К.: Вид-во КвіЦ, 2000. – 428 с.
2. Левін Б.Р. Алгоритм розрізнення траєкторій рухомих об'єктів і оцінки їх координат / Б.Р. Левін, Н.В. Тегіна, А.І. Юдицький // Радіотехніка і радіоелектроніка. – 1982. – Т. 27, № 10. – С. 1942-1948.
3. Automatic Detection Algorithm for Small Moving Objects / T. Yanagisawa et al. // Publ. Astron. Soc. Japan, 57. – 2005. – P. 399-408.
4. Gural P.S. Matched Filter Processing for Asteroid Detection / P.S. Gural, J.A. Larsen, A.E. Gleason // The Astronomical Journal, 130:1951-1960, 2005.

5. Деденок В.П. Ієрархічний метод виявлення мало-розмірного рухомого об'єкта / В.П. Деденок, В.Е. Саваневич // Системи озброєння та військова техніка. – 2005. – № 1. – С. 40-45.

6. Kouprianov V. Distinguishing features of CCD astrometry of faint GEO objects / V. Kouprianov // Advances in Space Research. 2008. – Vol. 41, Issue 7. – P. 1029-1038.

7. Кузьмін С.З. Основи проектування систем цифрової обробки радіолокаційної інформації / С.З. Кузьмін. – М.: Радио і зв'язь, 1986. – 352 с.

8. Саваневич В.Е. Оцінка параметрів близьких траєкторій з використанням спільного розподілення відміток на обзорах / В.Е. Саваневич // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ, 2003. – Вип. 3 (46). – С. 70-75.

9. Бакут П.А. Обнаружение движущихся объектов / П.А. Бакут, Ю.В. Жулина, Н.А. Иванчук. – М.: Сов. радио, 1980. – 288 с.

10. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений: пер. с англ. / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

11. Саваневич В.Е. Оцінка параметрів близьких траєкторій з використанням спільного розподілення відміток на обзорах / В.Е. Саваневич, А.М. Кожухов, А.М. Брюховецький, В.П. Власенко // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НІУ, 2010. – № 3 (15). – С. 45-50.

12. MPC 70135 – 70574; MPC 71009 – 71492; MPC 71493–71888; MPC 71889 – 72344; MPC 72345– 72992; MPC 72993– 73612 [Електронний ресурс]. – Режим доступу к ресурсу: [http://www.minorplanetcenter.org/iau/ECS/MPCArchive/MPCArchive\\_TBL.html](http://www.minorplanetcenter.org/iau/ECS/MPCArchive/MPCArchive_TBL.html).

13. [Електронний ресурс]. – Режим доступу к ресурсу: <http://spaceobs.org/ru>.

14. Удаленная обсерватория в Нью-Мексико. Ответ № 336. [Електронний ресурс]. – Режим доступу к ресурсу: <http://fyn.astronomer.ru/forum/index.php?topic=628.msg14976#msg14976>.

15. [Електронний ресурс]. – Режим доступу к ресурсу: <http://spaceobs.org/ru/2010/12/13/c2010-x1-elenin-wj08b04/>.

16. MPC 2010-X101: COMET C/2010 X1 (ELENIN). [Електронний ресурс]. – Режим доступу к ресурсу: <http://www.minorplanetcenter.org/mpc/K10/K10XA1.html>.

17. [Електронний ресурс]. – Режим доступу к ресурсу: [http://www.gazeta.ru/news/science/2010/12/13/n\\_1614225.shtml/](http://www.gazeta.ru/news/science/2010/12/13/n_1614225.shtml/)

Поступила в редакцію 31.01.2011

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

### МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ АСТЕРОЇДА, ЩО БАЗУЄТЬСЯ НА ПІСЛЯПОРОВОГОМУ НАКОПИЧЕННІ СТАТИСТИК СИГНАЛІВ У ПРОСТОРІ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО ТРАЄКТОРІЇ

В.Є. Саваневич, О.М. Кожухов, О.Б. Брюховецький, Є.М. Диков

Розроблений метод виявлення астероїда на серії ПЗЗ-кадрів, що базується на післяпороговому накопиченні статистик сигналів у просторі параметрів його траєкторії. Метод відрізняється попереднім відбракуванням об'єктів, які є нерухомими на серії кадрів, перед проведенням виявлення астероїда. В якості накопичуваної статистики використовується оцінка видимого блиску сигналів від астероїда в зоряних величинах. Метод використаний авторами в розробленій системі виявлення нових і відомих астероїдів. Дані результати практичного використання методу.

**Ключові слова:** астероїди – методи виявлення, серія ПЗЗ-кадрів.

### THE METHOD OF ASTEROID DETECTION, BASED ON AFTER-TRESHOLD ACCUMULATION OF SIGNAL STATISTIC IN SPACE OF ASTEROID TRAJECTORY PARAMETERS

V.E. Savanevich, A.B. Bryukhovetskiy, A.M. Kozhukhov, E.N. Dikov

The method of asteroid detection on the series of CCD-frames, based on after-threshold accumulation of signal statistic in space of asteroid trajectory parameters is developed. The feature of method is preliminary rejection of fixed objects on frame series before asteroid detection. The estimation of visual brightness (in stellar magnitudes) of asteroid signal is used as the accumulated statistic. The method has used by authors in developed system of automatic online new asteroids detection and known asteroids tracking. The results of method application is presented.

**Keywords:** asteroid – methods of detection, CCD-frames series.