

ОБНАРУЖЕНИЕ И ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ АСТЕРОИДА

*САВАНЕВИЧ В. Е., КОЖУХОВ А. М.,
БРЮХОВЕЦКИЙ А. Б., ДИКОВ Е. Н.,
ГЕРАСИМЕНКО О.В.*

Описывается синтезированное решающее правило амплитудно-координатного обнаружения траектории астероида по совокупности отметок, предположительно принадлежащих одному объекту с ненулевым видимым движением на серии кадров, обобщенное для случая ненулевой вероятности пропуска отметки от астероида на серии кадров. Предлагаются результаты практического использования метода в системе автоматизированного обнаружения астероидов CoLiTec.

1. Введение

Обнаружение траектории астероида со слабым блеском является сложной и трудоемкой задачей. Это связано с необходимостью понижения значения порога внутрикадровой обработки для формирования отметок, соответствующих сигналу от такого астероида. Понижение порога внутрикадровой обработки приводит к появлению значительного количества ложных траекторий. Поэтому актуальной представляется задача разработки метода, позволяющего провести отбраковку ложных траекторий, полученных при обнаружении астероида.

2. Анализ литературы

В работе [1] был предложен двухэтапный метод обнаружения астероида, основанный на послепороговом накоплении статистик сигнала от астероида в пространстве параметров его траектории, названный методом собирания света. С точки зрения технологии РИ, 2011, № 1

вычислений в накоплении принимает участие не сигнал от астероида, а отметки, соответствующие данному сигналу на каждом кадре. Отметка содержит оценки параметров сигнала, которыми обычно являются местоположение на кадре и амплитуда сигнала.

В методе собирания света астероид считается обнаруженным, если накопленный потенциал вдоль одной из возможных траекторий движения объекта (внутри одного из взаимно-однозначно соответствующего возможной траектории пространственно-временного строба) превысил пороговое значение. В данном методе параметры траектории астероида определяются с точностью до размеров указанных выше пространственно-временных стробов (ПВС), размеры которых значительно превосходят значения ошибок координат отметок. Это обстоятельство приводит к необходимости уточнения параметров предварительно обнаруженного движущегося объекта. Также, в целях повышения показателей качества обнаружения астероидов, требует уточнения предварительное решение о наличии в соответствующем стробе второго этапа объекта с ненулевым видимым движением (астероида).

3. Постановка задачи

Астероид движется (рассматривается видимое движение) на серии кадров прямолинейно и равномерно, по каждой координате независимо:

$$\begin{aligned}x_t(\theta_x) &= x_0 + V_x(\tau_t - \tau_0), \\y_t(\theta_y) &= y_0 + V_y(\tau_t - \tau_0),\end{aligned}\quad (1)$$

где $x_0, y_0, x_t(\theta_x), y_t(\theta_y)$ – координаты астероида на базовом и t -м кадрах; V_x, V_y – скорости движения астероида по соответствующим координатам; $\theta_x = (x_0, V_x)^T, \theta_y = (y_0, V_y)^T$ – параметры движения

астероида по каждой координате; τ_t, τ_0 – время привязки t -го и базового кадров.

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

Отметка Y_{it} (i -я отметка t -го кадра) содержит оценки параметров выделенного сигнала, которые включают коды координат ($\chi_{it} = \{x_{it}, y_{it}\}$) и амплитуды A_{it} данного сигнала. В качестве амплитуды в статье, как и в работе [1], используется оценка видимого блеска объекта, так как данная энергетическая характеристика, в отличие от амплитуды (яркости) сигнала от объекта, практически инвариантна изменениям условий наблюдения, имеющим место при длительных сериях наблюдений [2].

На одном кадре от одного астероида не может быть более одной отметки [3] либо сведения о том, каким астероидам принадлежат другие отметки, не несут в себе информации о принадлежности данной.

На серии из T кадров сформирована совокупность отметок Y , отнесенных методом собирания света [1] к астероиду с неизвестными параметрами движения:

$$Y = (Y_{k1(j)}, \dots, Y_{kt(j)}, \dots, Y_{kT(j)}),$$

где $Y_{kt(j)} = \{x_{kt(j)}, y_{kt(j)}, A_{kt(j)}\}$ – k -я отметка t -го кадра серии, отнесенная к j -му предполагаемому астероиду, с координатами $x_{kt(j)}, y_{kt(j)}$ и амплитудой $A_{kt(j)}$.

Ошибки оценок координат и амплитуд астероида, содержащиеся в отметках, независимы между собой как внутри одной отметки, так и между отметками, сформированными на разных кадрах, распределены по нормальному закону и имеют нулевые средние и дисперсии σ_x^2, σ_y^2 . Считается, что оценки координат небесного объекта на исследуемых кадрах равноточны. Ошибки оценок видимого блеска объекта распределены по нормальному закону с экспериментально определенной дисперсией σ_a^2 , не зависящей от источника ее формирования (астероид, шум, фон).

Координаты ложных отметок считаются распределенными равномерно в пределах областей кадра, соответствующих введенным в методе собирания света пространственно-временным стробам.

Закон распределения амплитуд ложных отметок является равномерным в интервале с экспериментально определяемыми параметрами.

Оценка параметров предварительно обнаруженных траекторий при использовании метода собирания света [1] делает обоснованным использование следующих дополнительных предпосылок. Каждый возможный астероид может рассматриваться независимо от других. Известно начальное приближение параметров траекторий с точностью до размера соответствующе-

го пространственно-временного строба. Кроме того, считается: функция правдоподобия параметров траектории дифференцируема в окрестности своего глобального максимума, начальное приближение находится в этой окрестности; амплитудная компонента отметок не вносит вклада в оценку параметров траектории $\theta(\partial P(A_{it} / \theta) / \partial \theta \equiv 0)$.

Цель исследования – синтезировать решающее правило (РП) обнаружения астероида и оценки параметров траектории. При этом РП обнаружения должно быть синтезировано по критерию Неймана-Пирсона, а РП оценки параметров траектории астероида (координаты начального положения x_0, y_0 и скорости V_x, V_y по каждой координате) – по критерию максимального правдоподобия.

4. Обнаружение и оценка параметров траектории астероида

4.1. МНК-оценка параметров траектории

Движение астероида по каждой координате считается независимым. Поэтому задачу определения параметров траектории по двум координатам можно свести к раздельному определению параметров движения по каждой координате. В этом случае МНК-оценкой параметров j -й траектории для координаты x $\hat{\theta}_{jx}$ служит вектор [4]:

$$\hat{\theta}_{jx} = (F_x^T F_x)^{-1} F_x^T \tilde{Y}_{jx}, \quad (2)$$

где $\tilde{Y}_{jx} = (x_{k1(j)}, \dots, x_{kt(j)}, \dots, x_{kT(j)})$ – совокупность соответствующих координат отметок;

$$F_x^T = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ \Delta_{\tau 1} & \dots & \Delta_{\tau t} & \dots & \Delta_{\tau T} \end{pmatrix} - \text{матрица плана [4],}$$

также называемая матрицей частных производных [5]; $\Delta_{\tau t} = (\tau_t - \tau_0)$.

МНК-оценки координаты астероида на базовом кадре \hat{x}_{j0} и его скорости \hat{V}_{jx} можно представить в скалярном виде [4]:

$$\hat{x}_{j0} = \frac{D \cdot A_{jx} - C \cdot B_{jx}}{T \cdot D - C^2}; \quad (3)$$

$$\hat{V}_{jx} = \frac{T \cdot B_{jx} - C \cdot A_{jx}}{T \cdot D - C^2}, \quad (4)$$

где $A_{jx} = \sum_{t=1}^T x_{kt(j)}$; $B_{jx} = \sum_{t=1}^T \Delta_{\tau t} x_{kt(j)}$; $C = \sum_{t=1}^T \Delta_{\tau t}$;
 $D = \sum_{t=1}^T \Delta_{\tau t}^2$.

Выражения для оценок параметров траектории по второй координате имеют аналогичный вид.

4.2. Оценка остаточной дисперсии траектории

Оценкой дисперсии (остаточной дисперсией) показателя координаты x (для координаты y аналогично)

для j -й траектории $\sigma_{\hat{\theta}_{jx}}^2$ в исследуемом случае считается оценка дисперсии для невырожденной линейной регрессионной модели с двумя оцениваемыми параметрами [4]:

$$\sigma_{\hat{\theta}_{jx}}^2 = \sum_{t=1}^T (x_{kt(j)} - \hat{x}_{jt})^2 / (T - 2), \quad (5)$$

где

$$\hat{x}_{jt} = \hat{x}_{j0} + \hat{V}_{jx}(\tau_t - \tau_0) \quad (6)$$

– сглаженная оценка координаты x в СК базового ПЗС-кадра j -й траектории на t -м кадре.

Суммарная остаточная дисперсия $\sigma_{\hat{\theta}_j}^2$ оценки координат сигнала от астероида, движущегося по j -й траектории, имеет вид:

$$\sigma_{\hat{\theta}_j}^2 = \sigma_{\hat{\theta}_{jx}}^2 + \sigma_{\hat{\theta}_{jy}}^2. \quad (7)$$

4.3. Дисперсия оценки амплитуды сигнала

Оценка дисперсии показателя амплитуды сигнала от астероида для j -й траектории $\sigma_{\hat{\theta}_{ja}}^2$, исходя из постановки задачи, определяется как:

$$\sigma_{\hat{\theta}_{ja}}^2 = \sum_{t=1}^T (A_{kt(j)} - A_{\hat{\theta}_{jcc}})^2 / (T - 1), \quad (8)$$

где $A_{\hat{\theta}_{jcc}} = \sum_{t=1}^T A_{kt(j)} / T$ – среднее значение амплитуды сигналов от астероида, соответствующих j -й траектории.

4.4. Решающее правило обнаружения астероида на серии кадров при наличии отметок от астероида на всех кадрах

Исходя из постановки задачи для принятия решения о наличии сигналов от астероида на серии кадров, можно использовать амплитуды сигналов от астероида и координаты отметок, отнесенные к предварительно обнаруженному объекту с ненулевым видимым движением. Так как имеет место оценка составного параметра (как факт наличия астероида, так и параметры его траектории), то можно использовать подстановочное РП. Общий вид подстановочного [6] амплитудно-координатного РП для обнаружения следующий:

$$\max_{\hat{\theta}} \frac{P_{Y/\theta}(\bar{Y}/\hat{\theta})}{P_{Y/0}(\bar{Y}/0)} = \max_{\hat{\theta}} \prod_{t=1}^T \frac{P_{Y/\theta}(\bar{Y}_t/\hat{\theta})}{P_{Y/0}(\bar{Y}_t/0)} \geq \Pi_{tr}, \quad (9)$$

где $P_{Y/\theta}(\bar{Y}_t/\hat{\theta})$ – вероятность формирования отметки на t -м кадре сигналом от астероида с параметрами траектории θ ; $P_{Y/0}(\bar{Y}_t/0)$ – вероятность формирования ложной отметки на t -м кадре; Π_{tr} – порог обнаружения астероида, определяемый в соответствии с

критерием Неймана-Пирсона; $\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} \prod_{t=1}^T P_{Y/\theta}(\bar{Y}_t/\theta)$

– оценка параметров траектории астероида.

Обилие доступных экспериментальных данных, цифровая форма их представления приводят к выводу о целесообразности определения значения порога Π_{tr} экспериментальным методом.

Выражение (9) является оценкой отношения правдоподобия (ОП) для точки пространства параметров траектории астероида, которая является аргументом максимума МНК-оценки (4). Данный результат может быть получен с учетом оценок дисперсий показателей координат (5) и амплитуд (8) отметок, предположительно принадлежащих траектории астероида, и постановки задачи:

$$L_{\theta_j} = \frac{\prod_{t=1}^T f_{jx1}(\theta_{jx}, \sigma_{tjx}), f_{jy1}(\theta_{jy}, \sigma_{tjy}), f_{ja1}(A_{\hat{\theta}_{jcc}}, \sigma_{tja})}{f_{jx0}, f_{jy0}, f_{ja0}}, \quad (10)$$

где

$$f_{jx1}(\theta_j, \sigma_{tjx}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{tjx}} \times \exp\left[-\frac{(\chi_{kt(j)} - (\hat{x}_{j0} + \hat{V}_{jx}(\tau_t - \tau_0)))^2}{2\sigma_{tjx}^2}\right], \quad (11)$$

$$f_{ja1}(A_{\hat{\theta}_{jcc}}, \sigma_{tja}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{tja}} \exp\left[-\frac{(A_{kt(j)} - A_{\hat{\theta}_{jcc}})^2}{2\sigma_{tja}^2}\right] \quad (12)$$

– плотности распределения значений координат ($\chi_{kt(j)} = \{x_{kt(j)}, y_{kt(j)}\}$) и амплитуд отметок, в предположении, что данные отметки сформированы сигналом от астероида с параметрами движения $\hat{\theta}_j$;

$$f_{jx0} = 1/\Delta_{jx}, \quad f_{jy0} = 1/\Delta_{jy}, \quad f_{ja0} = 1/\Delta_{ja} \quad (13)$$

– плотности распределения значений координат и амплитуд отметок, в предположении, что j -я траектория является ложной; $\Delta_{jx} = x_k - x_n$, $\Delta_{jy} = y_k - y_n$ – пространственные размеры строка послепорогового накопления сигналов вдоль возможных траекторий движения астероида, в котором сформирована j -я траектория; Δ_{ja} – диапазон возможных амплитуд ложной отметки.

После логарифмирования (10) РП (9) можно представить в виде:

$$\sum_{t=1}^T \gamma_{tjx} (x_{kt(j)} - \hat{x}_{jt})^2 + \sum_{t=1}^T \gamma_{tjy} (y_{kt(j)} - \hat{y}_{jt})^2 + \sum_{t=1}^T \gamma_{tja} (A_{kt(j)} - A_{\hat{\theta}_{jcc}})^2 \geq \Pi_{tre}, \quad (14)$$

где $\Pi_{\text{тре}}$ – порог обнаружения астероида, определяемый экспериментально;

$$\gamma_{\text{tjx}} = 1/\sigma_{\text{tjx}}^2; \gamma_{\text{tjy}} = 1/\sigma_{\text{tjy}}^2; \quad (15)$$

– весовые коэффициенты, прямо пропорциональные точности оценки координат объекта;

$$\gamma_{\text{tja}} = 1/\sigma_{\text{tja}}^2 \quad (16)$$

– весовой коэффициент, зависящий от точности оценки амплитуды сигналов.

Весовые коэффициенты γ_{tjx} , γ_{tjy} , γ_{tja} зависят от положения объекта на кадре и ОСШ и в общем случае неизвестны. В их качестве предлагается использовать соответствующие оценки. Данные оценки для каждого кадра представляются как полиномиальные зависимости от координат в СК ПЗС-матрицы и амплитуды сигналов. В большинстве случаев все сигналы, относящиеся к одной траектории находятся в одной локальной области ПЗС-кадра. Кроме того, изменения условий наблюдения за время обследования одного участка неба таковы, что не приводят к значительным изменениям видимого блеска сигналов от объектов. Поэтому в частном случае рассматриваемые коэффициенты можно считать одинаковыми для всех кадров и в формуле (14) вынести их за знаки сумм.

Выражение (14) является РП принятия решения о наличии астероида в ПВС, соответствующем предварительно выбранной совокупности отметок.

4.5. Решающее правило обнаружения астероида на серии кадров при ненулевой вероятности пропуска отметки от астероида на отдельных кадрах

Решающее правило (14) справедливо только для частного случая нулевого порога формирования отметок от астероида при внутрикадровой обработке. Более общим является случай, когда за T кадров серии из-за наличия порогов внутрикадровой обработки только K раз будет сформирована отметка ($K \leq T$). Если перенумеровать кадры так, что порог формирования отметок будет превышен на K первых из них, то выражения для вероятности формирования K отметок на определенных кадрах при условии наличия ($P_{Y/\theta}^{(BO)}(K)$) и отсутствия ($P_{Y/\theta}^{(BO)}(K)$) астероида примут вид:

$$P_{Y/\theta}^{(BO)}(K) = \prod_{t=1}^K D_{\theta t} \prod_{t=K+1}^T (1 - D_{\theta t}),$$

$$P_{Y/\theta}^{(BO)}(K) = \prod_{t=1}^K F_t \prod_{t=K+1}^T (1 - F_t), \quad (17)$$

где $D_{\theta t}$, F_t – условные вероятности правильного и ложного обнаружения сигнала от астероида с параметрами θ в t -м кадре.

Закон распределения координат и амплитуды отметки при наличии и отсутствии астероида согласно (11) – (13) определяется выражениями:

$$P_{Y/\theta}(A_{\text{kt}(j)} / 0) = \frac{1}{F_t} l(A_{\text{kt}(j)} - \Pi_{\text{МОФ}}) \frac{1}{\Delta_{\text{jx}} \Delta_{\text{jy}} \Delta_{\text{ja}}}; \quad (18)$$

$$P_{Y/\theta}(A_{\text{kt}(j)} / \theta_j) = \frac{1}{D_{\theta t}} l(A_{\text{kt}(j)} - \Pi_{\text{МОФ}}) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{tjx}}}} \times$$

$$\times \exp\left[-\frac{(x_{\text{kt}(j)} - (\hat{x}_{\text{j0}} + \hat{V}_{\text{jx}}(\tau_t - \tau_0)))^2}{2\sigma_{\text{tjx}}^2}\right] \times$$

$$\times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{tjy}}}} \exp\left[-\frac{(y_{\text{kt}(j)} - (\hat{y}_{\text{j0}} + \hat{V}_{\text{jy}}(\tau_t - \tau_0)))^2}{2\sigma_{\text{tjy}}^2}\right] \times$$

$$\times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{tja}}}} \exp\left[-\frac{(A_{\text{kt}(j)} - A_{\theta\text{jcc}})^2}{2\sigma_{\text{tja}}^2}\right], \quad (19)$$

где $l(x - y) = \begin{cases} 1, & \text{при } x \geq y; \\ 0, & \text{при } x < y; \end{cases}$ $\Pi_{\text{МОФ}}$ – входное граничное значение кода амплитуды отметок, поступающих на межкадровую обработку для t -го кадра.

Условие $A_{\text{kt}(j)} \geq \Pi_{\text{МОФ}}$ для амплитуды отметки выполняется всегда, поэтому единичную функцию $l(A_{\text{kt}(j)} - \Pi_{\text{МОФ}})$ в дальнейшем можно опустить.

Согласно (18), (19) выражение для совместного закона распределения формирования K отметок на T кадрах с соответствующими амплитудами имеет вид:

$$P_{Y/\theta}(K, A_1, \dots, A_K) =$$

$$= \prod_{t=1}^K \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{tjx}}}} \exp\left[-\frac{(x_{\text{kt}(j)} - (\hat{x}_{\text{j0}} + \hat{V}_{\text{jx}}(\tau_t - \tau_0)))^2}{2\sigma_{\text{tjx}}^2}\right] \times$$

$$\times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{tjy}}}} \exp\left[-\frac{(y_{\text{kt}(j)} - (\hat{y}_{\text{j0}} + \hat{V}_{\text{jy}}(\tau_t - \tau_0)))^2}{2\sigma_{\text{tjy}}^2}\right] \times$$

$$\times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{tja}}}} \exp\left[-\frac{(A_{\text{kt}(j)} - A_{\theta\text{jcc}})^2}{2\sigma_{\text{tja}}^2}\right] \times \prod_{t=K+1}^T (1 - D_{\theta t(j)}); \quad (20)$$

$$P_{Y/\theta}(K, A_1, \dots, A_K) = \prod_{t=1}^K \frac{1}{\Delta_{\text{jx}} \Delta_{\text{jy}} \Delta_{\text{ja}}} \prod_{t=K+1}^T (1 - F_t). \quad (21)$$

Соответственно, для выражений (20), (21) РП обнаружения астероида (14) преобразуется к виду:

$$\sum_{t=1}^K \gamma_{\text{tjx}} (x_{\text{kt}(j)} - \hat{x}_{\text{jt}})^2 + \sum_{t=1}^K \gamma_{\text{tjy}} (y_{\text{kt}(j)} - \hat{y}_{\text{jt}})^2 +$$

$$+ \sum_{t=1}^K \gamma_{\text{tja}} (A_{\text{kt}(j)} - A_{\theta\text{jcc}})^2 \geq \Pi'_{\text{тре}}(K), \quad (22)$$

где $\Pi'_{tre}(K) = \Pi_{tre} - \sum_{t=K+1}^T \ell_n \frac{1 - D_{0t(j)}}{1 - F_t}$ – порог обнаружения астероида при условии формирования отметок от астероида на K из T кадров.

Решающие правила (14), (22) для обнаружения траектории астероида предписывают на каждом кадре выбирать "лучшую" отметку для продолжения траектории. "Лучшая" отметка должна иметь не очень большие отклонения своего положения от траектории астероида (кинематическая составляющая), а значение амплитуды «лучшей» отметки должно не очень сильно отличаться от амплитуды других отметок, принадлежащих данной траектории (амплитудная – составляющая). Применение в РП подобной амплитудной составляющей связано с большим разбросом уровня блеска у астероидов (возможность наличия на серии ПЗС-кадров астероидов с большим и малым видимым блеском), что приводит к невозможности использования в качестве статистики непосредственно амплитуд отметок от астероида.

Известен недостаток подстановочных правил оценки составного параметра (9), заключающийся в том, что чаще всего выбирается гипотеза, которая имеет большее количество оцениваемых параметров. В данном случае это может привести к большому количеству ложных обнаружений траекторий астероидов, имеющих околонулевые оценки скорости. Для устранения данного недостатка принятие решения об обнаружении астероида производится только для тех траекторий, модуль скорости которых превысил предварительно заданное критическое значение минимальной скорости астероида. В противном случае траектории считаются ложными.

4.6. Критическое значение минимальной скорости астероида

Данное понятие тесно связано с понятием неподвижного объекта на серии кадров и связанным с этим стробом предполагаемого нахождения неподвижного объекта [1]. Размер данного строба равен радиусу неподвижности R_{fix} . R_{fix} вводится как максимальное расстояние между координатами отметок неподвижного объекта, сформированных на разных кадрах серии.

Критическое значение минимальной скорости астероида также связано с порогом бинарного обнаружения астероида K_{min} – минимальным количеством отметок (не более, чем по одной на кадр), достаточным для принятия решения о наличии объекта с ненулевым видимым движением.

За время формирования K_{min} отметок объект пройдет некоторое расстояние. Если это расстояние будет меньше радиуса неподвижности, то все отметки объекта попадут в один строб предполагаемого нахождения неподвижного объекта. Иными словами, отметки будут признаны отметками неподвижного объекта.

Таким образом, критическое значение минимальной скорости астероида $|V_{lim}|$ соответствует минимальной скорости видимого движения объекта, достаточной для прохождения им радиуса неподвижности за время формирования минимально требуемого для обнаружения объекта количества отметок (не более, чем по одной на кадр):

$$|V_{lim}| = R_{неп} / ((K_{min} - 1) \cdot \bar{\Delta}_\tau), \quad (23)$$

где

$$\bar{\Delta}_\tau = (\tau_T - \tau_1) / T \quad (24)$$

– среднее время между двумя последовательными кадрами серии.

С критическим значением минимальной скорости сравнивается оценка модуля скорости исследуемой траектории $|\hat{V}_j|$, определяемая выражением:

$$|\hat{V}_j| = \sqrt{\hat{V}_{jx}^2 + \hat{V}_{jy}^2}, \quad (25)$$

где оценки скоростей j -го объекта по каждой координате \hat{V}_{jx} , \hat{V}_{jy} получаются в соответствии с выражением (4).

Траектория считается сформированной объектом с ненулевым видимым движением на исследуемой серии кадров, если значение оценки модуля скорости данной траектории $|\hat{V}_j|$ оказалось не меньше, чем критическое значение минимальной скорости $|V_{lim}|$.

Количество отметок K_{fix} , достаточное для обнаружения неподвижного объекта, часто меньше минимального количества отметок K_{min} (не более, чем по одной на кадр). В связи с этим астероид может быть не обнаружен из-за того, что часть отметок астероида, имеющего скорость, близкую к значению $|V_{lim}|$, попадет в один строб предполагаемого нахождения неподвижного объекта и они будут причислены к неподвижному объекту. Такая возможность особенно вероятна для серий с малым (три-четыре) количеством кадров.

Для того чтобы избежать пропуска подобного астероида, учитывается тот факт, что объект с ненулевым видимым движением замечен, в первую очередь, благодаря эффекту перемещения. Перемещение объекта особенно заметно между кадрами с наибольшим интервалом времени между ними.

Поэтому даже K_{fix} отметок, сформированных на соседних кадрах, могут не позволить выявить перемещение реального астероида с небольшим видимым движением. При этом увеличение K_{fix} приведет к попаданию большого количества отметок от слабых звезд на межкадровую обработку. Это приведет к увеличению времени счета процедур межкадровой обработки и ухудшению показателей качества обнаружения астероидов. Чтобы разрешить указанное противоречие, можно использовать следующий двухкритериальный обнаружитель неподвижных объек-

тов. Во-первых, в стробе предполагаемого нахождения неподвижного объекта должно находиться не менее, чем K_{fix} отметок (не более, чем по одной на кадр). Во-вторых, интервал времени, на котором сформированы кадры, соответствующие указанным отметкам, должен превышать наперед заданную величину $\Delta\tau_{\text{min}}$:

$$(\tau'_{\text{end}} - \tau'_{\text{beg}}) > \Delta\tau_{\text{min}}, \quad (26)$$

где τ'_{beg} , τ'_{end} – времена формирования кадров, на которых сформированы первая и последняя (по времени) отметки, соответствующие объекту внутреннего каталога неподвижных объектов.

При этом при $K_{\text{fix}} < T$ значение $\Delta\tau_{\text{min}}$ должно превышать время, минимально необходимое для формирования минимального количества отметок (не более, чем по одной на кадр) K_{fix} , достаточного для обнаружения неподвижного объекта.

Например, при $T = 3$, а $K_{\text{fix}} = 2$ значение $\Delta\tau_{\text{min}}$ должно быть таким, чтобы решение о формировании объекта внутреннего каталога неподвижных объектов, состоящего из 2 отметок, принималось только в том случае, если данные отметки были сформированы на первом и третьем кадрах.

4.7. Вычислительный метод проведения обнаружения и оценки параметров траектории

Для каждой совокупности отметок, отнесенных методом собирания света [1] к одному астероиду, производится следующая последовательность действий.

1. МНК-оценка начального положения и скорости движения сигнала от астероида по каждой координате независимо согласно выражениям (3), (4).
2. Оценка остаточных дисперсий показателей параметров траектории астероида по каждой координате по выражению (5).
3. Оценка дисперсии амплитуды сигналов, отметки от которых сформировали данную траекторию согласно выражению (8).
4. Расчет критического значения минимальной скорости согласно выражению (25).
5. Получение модуля оценки скорости траектории согласно выражению (26).
6. Проверка превышения модулем оценки скорости траектории критического значения минимальной скорости астероида. Если модуль оценки скорости траектории меньше, чем критическое значение минимальной скорости, то траектория признается ложной и отбрасывается. Иначе – переход на п. 7.
7. Применение решающего правила обнаружения астероида (14) или (22). Если условие выполняется, то астероид считается обнаруженным. Иначе – траектория считается ложной.

Согласно правилам, действующим на сегодняшний день, данные об обнаруженных астероидах отправля-

ются в Центр Малых планет не в виде параметров траекторий, а в виде отдельных измерений, принадлежащих траекториям. В качестве таких измерений выступают оценки положения астероидов на каждом кадре серии в экваториальных координатах $\alpha_{\text{kt}(j)}$, $\delta_{\text{kt}(j)}$, сформировавших соответствующие траектории. Оценки экваториальных координат астероида получаются по координатам $x_{\text{kt}(j)}$, $y_{\text{kt}(j)}$ (в СК базового ПЗС-кадра) отметок, соответствующих астероиду [7].

5. Результаты эксперимента

Разработанное амплитудно-координатное решающее правило было использовано для обнаружения и оценки параметров астероидов в программной автоматизированной системе 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, оснащенный ПЗС-камерой FLI PL09000 (размер кадра при съемке с одинарным бинированием 1528x1528 пикселей). При этом ложные обнаружения составили 70-90% (в зависимости от количества кадров в серии) от общего количества обнаруженных траекторий без применения РП, и 12-25% при применении РП для отбраковки ложных траекторий. С мая 2010 по июнь 2011 года с использованием данной системы наблюдателями ААО (Киев) было открыто 53 астероида, отослано в Центр Малых планет 32 956 наблюдений малых тел Солнечной системы [8]. 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, расположенной в штате Нью-Мексико (США), на астрографе Astroworks Centurion-18 с диаметром зеркала 45 см, оснащенный ПЗС-камерой FLI ML09000-65 (размер кадра 3056x3056 пикселей). Применение программы значительно увеличило количество наблюдаемых астероидов и наблюдений за ними, позволив обсерватории войти в топ-десятку обсерваторий по количеству наблюдений астероидов в 2010 году [9]. По состоянию на 15 июня 2011 года ISON-NM является седьмой обсерваторией мира по количеству наблюдений астероидов в 2011 году [9]. За время эксплуатации к 15 июня 2011 года с использованием CoLiTec было открыто 419 астероидов, отослано в Центр Малых планет 96 022 наблюдения малых тел Солнечной системы [8].

10 декабря 2010 года с использованием программы CoLiTec была открыта комета C/2010 X1 (Elenin) [10], ставшая первой кометой, открытой российским астрономом за последние 20 лет.

6. Выводы

Научной новизной полученных результатов является впервые синтезированное решающее правило ампли-

трудно-координатного обнаружения и оценки параметров траектории астероида по совокупности отметок, предположительно принадлежащих одному объекту, обобщенное для случая ненулевой вероятности пропуска отметки от астероида на кадрах серии.

РП инвариантно возможному значительному разбросу амплитуд сигналов от астероидов на разных кадрах из-за резких изменений условий наблюдения. Это достигается благодаря использованию в качестве амплитуд сигналов оценок видимого блеска соответствующих объектов. Для принятия решения о наличии астероида, движущегося по исследуемой траектории, необходимо, чтобы координаты отметок имели небольшое отклонение от траектории (кинематическая составляющая), а амплитуды данных отметок не должны значительно отличаться друг от друга (амплитудная составляющая). Оценка параметров траектории, для учета кинематической составляющей, осуществляется методом наименьших квадратов независимо по каждой координате.

Чтобы избежать появления большого количества ложных траекторий с околонулевыми скоростями, принятие решения об обнаружении астероида производится только для тех траекторий, оценка модуля скорости которых превысила предварительно заданное критическое значение минимальной скорости астероида.

Для разрешения противоречия между условиями, обеспечивающими бланкирование максимального количества звезд со слабым блеском, и выявления объектов с незначительным видимым движением используется двухкритериальный обнаружитель неподвижных объектов. Для принятия решения о наличии объекта, неподвижного на исследуемой серии кадров, в рассматриваемом строке предполагаемого нахождения неподвижного объекта должно не только находиться не менее чем K_{fix} отметок (не более, чем по одной на кадр), но и интервал времени, на котором сформированы кадры, соответствующие этим отметкам, должен превышать наперед заданную величину $\Delta_{\tau min}$. При этом значение $\Delta_{\tau min}$ должно превышать время, минимально необходимое для формирования K_{min} отметок (не более, чем по одной на кадр), достаточных для принятия решения о наличии неподвижного объекта.

Практическая значимость заключается в открытии около 500 небесных объектов с использованием программы CoLiTec, а также в том, что применение разработанного правила в программной автоматизированной системе обнаружения астероидов CoLiTec позволило значительно сократить количество ложных обнаружений.

Дальнейшие исследования целесообразно сконцентрировать на вопросах отождествления плотных потоков протяженных небесных объектов.

Литература: 1. *Саваневич В.Е., Кожухов А.М., Брюховецкий А.Б., Диков Е.Н.* Метод обнаружения астероидов, основанный на накоплении сигналов вдоль траекторий с неизвестными параметрами // Системы обработки информации: Зб. наук. пр. Харків: ХУПС, 2011. №2(92). С. 137–144. 2. *Саваневич В.Е., Кожухов А.М., Брюховецкий А.Б., Власенко В.П.* Оценка блеска астероида по амплитуде его сигнала на ПЗС-кадре // Системы управління навігації та зв'язку: Зб. наук. пр. К.: ЦНДІ НіУ, 2010. №3(15). С. 46–50. 3. *Деденок В.П., Саваневич В.С.* Ієрархічний метод виявлення малорозмірного рухомого об'єкта // Системи озброєння та військова техніка. 2005. № 1. С. 40–45. 4. *Ермаков С.М., Жигляевский А.А.* Математическая теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 1987. 320 с. 5. *Кузьмин С.З.* Цифровая радиолокация. Введение в теорию. К.: Издательство КвіЦ, 2000. 428 с. 6. *Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.* Пикладная статистика: Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с. 7. *Саваневич В.Е., Брюховецкий А.Б., Кожухов А.М., Диков Е.Н.* Оценка экваториальных координат астероида по оценкам его координат на ПЗС-кадре // Системи обробки інформації: Зб. наук. пр. Харків: ХУПС, 2010. №6(87). С. 172–179. 8. *MPC 70135–75354.* http://www.minorplanetcenter.net/iau/ECS/MPCArchive/MPCArchive_TBL.html. 9. <http://www.minorplanetcenter.net/iau/special/CountObsByYear.txt>. 10. *MPEC 2010-X101: COMET C/2010 X1 (ELENIN).* <http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K10/K10XA1.html>.

Поступила в редколлегию 23.02.2011

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

Саваневич Вадим Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор кафедры телекоммуникационных систем ХНУРЭ. Научные интересы: астрометрические наблюдения малых тел Солнечной системы и околоземных космических объектов. Адрес: Украина, 310086, Харьков, ул. Тобольская, 38-а, кв.33, тел. (057)-702-55-92, e-mail: domsv1@rambler.ru.

Кожухов Александр Михайлович, инженер станции Национального Центра управления и испытания космических средств, Евпатория. Научные интересы: астрометрические наблюдения малых тел Солнечной системы и околоземных космических объектов. Адрес: Украина, 97419, АР Крым, Евпатория, 19, в/г. 189, общ. 5, к. 12, тел. (067)-235-11-78, e-mail: skinny2@rambler.ru.

Брюховецкий Александр Борисович, инженер станции Национального Центра управления и испытания космических средств, Евпатория. Научные интересы: астрометрические наблюдения малых тел Солнечной системы и околоземных космических объектов. Адрес: Украина, 97419, АР Крым, Евпатория, 19, в/г. 189, общ. 5, к. 9, тел. (099)-232-72-71, e-mail: izumsasha@rambler.ru.

Диков Евгений Николаевич, ведущий инженер-программист Научно-исследовательского, проектно-конструкторского института микрографии, Харьков. Научные интересы: астрометрические наблюдения малых тел Солнечной системы и околоземных космических объектов. Адрес: Украина, 61099, Харьков, ул. Фабрициуса, д. 9, кв.2, тел. (066)-320-78-31, e-mail: FellerScS@yandex.ru.

Герасименко Олег Викторович, бакалавр кафедры телекоммуникационных систем ХНУРЭ. Научные интересы: php-программирование, телекоммуникации. Адрес: Украина, 61000, Харьков, просп. Л.Свободы, 51-а, кв. 727, тел. (099)-117-19-24, e-mail: olegzxc@i.ua.