

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ С ЛОКАЛЬНО НЕИЗМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ВИДИМОГО ДВИЖЕНИЯ

БРЮХОВЕЦКИЙ А. Б.

Описываются вычислительные методы обработки данных, обеспечивающие высокие показатели качества автоматизированного обнаружения объектов с локально неизменными параметрами видимого движения. Данные методы были успешно использованы в разработанной системе автоматизированного обнаружения астероидов. Приводятся результаты применения данной системы для обнаружения малых тел Солнечной системы.

1. Введение

Задача обнаружения объектов в околоземном пространстве и в пределах Солнечной системы требует проведения постоянных наблюдений значительных областей небесной сферы. При этом существует противоречие между современным уровнем развития наблюдательной техники, позволяющей оперативно получить снимки больших областей неба, и устаревшими визуальными методами обнаружения объектов на данных снимках.

Это противоречие можно разрешить путем разработки новых вычислительных методов обработки данных для обнаружения объектов.

2. Анализ литературы

Оценка видимого блеска на ПЗС-кадрах традиционно производится при помощи дифференциальной фоторедукции. В [1] описано проведение дифференциальной фоторедукции с использованием полиномиальной фотометрической модели. Вместе с тем в данной работе не был рассмотрен вопрос оценки точности

полиномиальной модели для разных диапазонов яркостей сигналов объектов.

Теория межкадровой обработки получила свое развитие в [2 – 4]. Однако данные работы в основном посвящены обработке радиолокационных данных, и разработанные в них вычислительные методы требуют дополнительной адаптации для их использования для автоматизированного обнаружения объектов с локально неизменными параметрами движения на серии цифровых изображений (ПЗС-кадров).

3. Постановка задачи

Данные, используемые для обнаружения объектов с локально неизменными параметрами движения, являются результатом проведенной внутрикадровой обработки ПЗС-кадров и представляются в виде совокупностей отметок каждого кадра исследуемой серии. Наличие отметки характеризует решение, принятое на этапе внутрикадровой обработки по данным дискретного кадра, сформированного телескопом с ПЗС-камерой. Данное решение свидетельствует 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. Они всегда содержат оценки координат χ_{it} . Без технических затруднений в состав отметки может быть включена оценка амплитуды A_{it} . Тем самым $Y_{it} = \{A_{it}, \chi_{it}\}$. При этом оценки координат ($\chi_{it} = \{(x_{it}, y_{it}), (\alpha_{it}, \delta_{it})\}$) содержат оценки x_{it} , y_{it} координатной привязки i -й отметки t -го кадра, а также оценки экваториальных координат α_{it} , δ_{it} для данной отметки. Оценки местоположения отметок на ПЗС-кадре определяются с ошибками, величина которых для одной серии кадров может считаться постоянной. Данные ошибки вызваны искажениями формы сигнала из-за неравномерности часового ведения при формировании кадров, а также влиянием атмосферы (размытие изображения объекта) и методическими ошибками используемого метода оценки местоположения сигналов на ПЗС-кадре.

Оценка амплитуды A_{it} может быть определена путем вычисления пространственной свертки принятого излучения с ожидаемой формой сигнала в пределах строба внутрикадровой обработки, в котором предполагается наличие сигнала [5].

4. Цель исследования

Необходимо разработать такую совокупность вычислительных методов обработки данных (отметок) для автоматизированного обнаружения объектов с локально неизменными параметрами движения, которая при приемлемых вычислительных затратах, точностных характеристиках и заданной условной вероятности ложного обнаружения (УВЛО) объекта обеспечивает максимальную условную вероятность его правильного обнаружения (УВПО).

Для решения данной задачи были разработаны следующие вычислительные методы.

5. Метод оценки видимого блеска объекта по амплитуде его сигнала на ПЗС-кадре

Для принятия решения об обнаружении объекта, движущегося по траектории видимого движения с определенными параметрами, обычно используют некую энергетическую характеристику сигналов на разных кадрах серии. Часто в качестве такого параметра выступает амплитуда сигнала серии. В рассматриваемом случае данный подход нецелесообразен, так как, согласно постановке задачи, возможна большая разница амплитуд сигнала от одного и того же объекта на серии кадров. Поэтому было предложено в качестве подобной энергетической статистики использовать оценку видимого блеска сигнала в звездных величинах, которая слабо меняется за время формирования серии кадров.

Так как большинство объектов с локально неизменными параметрами движения имеют малое значение видимого блеска, то разрабатываемый вычислительный метод оценки видимого блеска сигналов от них должен обеспечить наивысшую точность оценки видимого блеска в области малых амплитуд сигнала (малые значения видимого блеска) без потерь в точности оценки видимого блеска в области больших амплитуд сигнала (большие значения видимого блеска).

Традиционно оценку видимого блеска проводят с помощью однодиапазонной модели фотометрического пересчета вида:

$$\hat{m}_{it} = m_{0t} + k_{\text{фот}1t} A_{\ell\text{git}}, \quad (1)$$

где $A_{\ell\text{git}} = -2,5\ell g A_{it}$ – измеренный видимый блеск опорной звезды (звезды из звездного каталога с известной оценкой видимого блеска); A_{it} – амплитуда сигнала на ПЗС-кадре, соответствующего оптическому сигналу от i -й опорной звезды; \hat{m}_{it} – оценка звездной величины сигнала от i -й опорной звезды на t -м кадре; m_{0t} – фотометрический нуль-пункт (видимый блеск звезды, оптический сигнал от которой при данных условиях наблюдения соответствует отметке с

единичной амплитудой); $k_{\text{фот}1t}$ – коэффициент пересчета [1].

Неизвестные величины из выражения (1) (m_{0t} и $k_{\text{фот}1t}$) определяются при помощи МНК.

На качество оценки видимого блеска астероида большее влияние оказывает количество опорных звезд и диапазон значений их звездных величин. Чем больше количество звезд и чем шире указанный диапазон, тем с большей точностью и в большем диапазоне яркостей будет проводиться оценка видимого блеска.

Согласно предварительным экспериментальным исследованиям использование единой оценки для видимого блеска (1) для всего диапазона звездных величин может привести к дополнительным ошибкам оценивания. Поэтому представляется целесообразным проводить оценку видимого блеска отдельно для звезд с большим блеском и отдельно для звезд с малым блеском.

В этом случае можно использовать кусочно-линейную модель фотометрического пересчета с двумя диапазонами:

$$\begin{cases} \hat{m}_{it} = m_{01t} + k_{\text{фот}1t} A_{\ell\text{git}}, & \text{при } A_{it} \geq A_{\text{кпт}}; \\ \hat{m}_{it} = m'_{1t} + k_{\text{фот}2t} (A_{\ell\text{git}} - \bar{A}_{\ell\text{git}}), & \text{при } A_{it} < A_{\text{кпт}}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\bar{A}_{\ell\text{git}} = -2,5\ell g A_{\text{кпт}}$; $A_{\text{кпт}}$ – критическое значение амплитуды сигнала, для амплитуд меньше которого однодиапазонная МНК-оценка отражает соотношение между данными параметрами с ошибками, превышающими предварительно заданное значение; m'_{1t} – оценка видимого блеска, соответствующая критическому значению амплитуды.

Оптимальное критическое значение амплитуды определяется решением оптимизационной задачи методом Фибоначчи по критерию минимума суммы квадратов невязок между каталожным и оценочным значением видимого блеска звезд.

Подробнее вычислительный метод изложен в [6].

6. Двухэтапный иерархический вычислительный метод предварительного обнаружения объекта с локально неизменными параметрами движения на серии ПЗС-кадров

Одной из главных особенностей условий наблюдения объектов с локально неизменными параметрами видимого движения является наличие в обрабатываемых данных значительного количества отметок от звезд, которые на отдельном кадре ничем не отличаются от отметок от объектов с локально неизменными параметрами движения, что серьезно затрудняет или делает невозможными применение известных методов обнаружения движущихся объектов на серии кадров. Поэтому представляется целесообразным провести предварительную отбраковку сигналов, сформированных звездами перед проведением обнаружения объектов с локально неизменными параметрами видимого движения.

Слабый видимый блеск большинства подобных объектов влечет за собой использование низких порогов внутрикадровой обработки и большое количество обрабатываемых отметок даже после отбраковки отметок, сформированных сигналами от звезд. В целях стабилизации вычислительных затрат на приемлемом уровне используется многоэтапная реализация предложенного многозначного преобразования координат объектов с локально неизменными параметрами движения. В этом случае, в отличие от известных методов обнаружения движущихся объектов, на этапе межкадровой обработки имеет место линейная зависимость вычислительной сложности от количества обрабатываемых отметок. При этом вероятность обнаружения подвижных объектов повышается практически до вероятности обнаружения неподвижных.

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). Затем 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 (рис. 1).

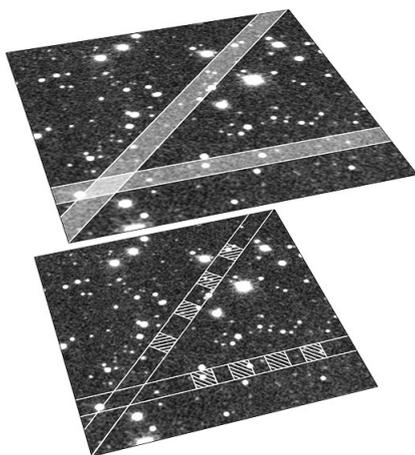


Рис. 1. Двухэтапность метода предварительного обнаружения объекта с локально неизменными параметрами движения

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 Хаффа (Hough) [4], 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 (см. рис. 2), преобразуется в точку пересечения данных кривых (см. рис. 3).

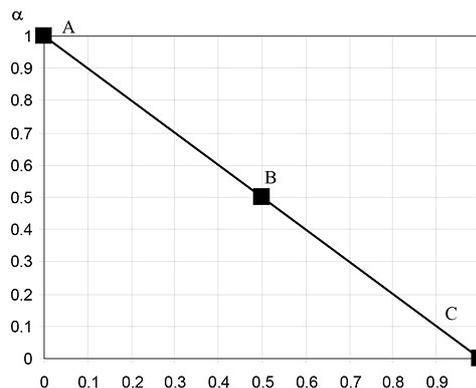


Рис. 2. Изображение отрезка

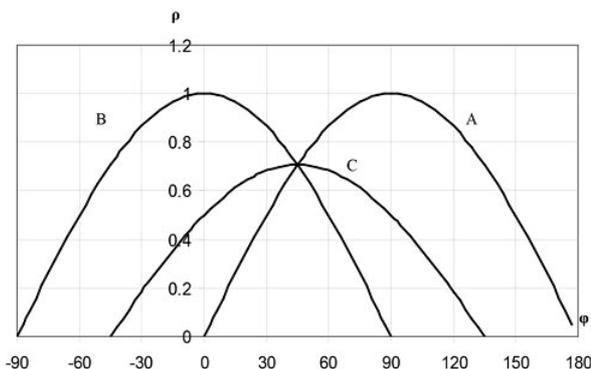


Рис. 3. Отображение точек отрезка в плоскость траверсных углов и дальности

Перед проведением предварительного обнаружения объектов с локально неизменными параметрами движения производится отбраковка объектов, неподвижных на серии кадров. Объект считается неподвижным на серии кадров, если координаты соответствующих ему отметок на любом из кадров отличаются одна от другой не более чем на наперед заданное значение радиуса неподвижности (рис. 4).

Решение о предварительном обнаружении объекта с локально неизменными параметрами движения при наличии его отметки на K из T кадров принимается согласно решающему правилу (РП) (7):

$$\sum_{i=1}^K A_{t(i)} \geq \frac{1}{(A_{\theta_{\text{ср}}} - A_{\text{лоср}})} \times \left(\ln \Pi_{\text{ТР}} + K(A_{\text{лоср}}^2 - A_{\theta_{\text{ср}}}^2) - (T - K) \ln \frac{1 - D}{1 - F} \right), \quad (3)$$

где $A_{t(i)}$ – амплитуда отметки от i -го сигнала на t -м кадре; $A_{\theta_{cp}}$ – среднее значение амплитуды отметки от астероида с параметрами θ_m ; $A_{\text{лоср}}$ – среднее значение амплитуды ложной отметки; $\Pi_{\text{ГР}} = \frac{(A_{\text{лоср}} + A_{\theta_{cp}})}{2}$

– порог обнаружения объекта с локально неизменными детерминированными параметрами движения; D – условная вероятность правильного обнаружения сигнала от объекта на кадре; F – условная вероятность ложного формирования отметки на кадре.

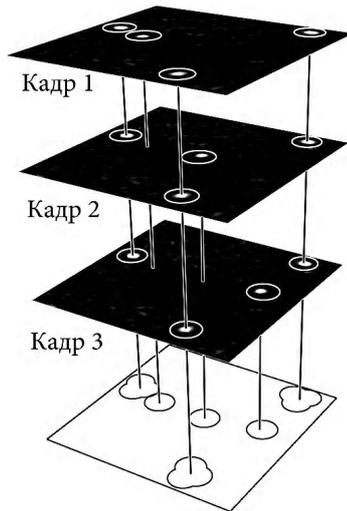


Рис. 4. Формирование внутреннего каталога неподвижных объектов

В качестве амплитуды отметок в РП обнаружения объекта с локально неизменными параметрами движения используется его оценка видимого блеска.

Факт наличия ошибок оценки координат астероидов на этапе накопления данных вдоль возможных траекторий движения учитывается путем организации полного покрытия пространства параметров траектории. Покрытие считается полным, если объект на серии кадров не выйдет за пределы хотя бы одного пространственно-временного строба второго этапа. Оптимальным полным считается полное покрытие, обеспеченное минимальным количеством пространственно-временных стробов (минимальное полное покрытие).

Минимальное полное покрытие можно организовать в случае выполнения условия равенства размеров стробов по траверсной дальности $\Delta\rho$ и начальному положению Δs_0 [4]:

$$\Delta\rho = \Delta s_0. \quad (4)$$

Шаг дискретизации по траверсному углу при этом составляет:

$$\Delta\varphi = 2\pi / (E[\pi/\gamma] + 1), \quad (5)$$

где $E[x]$ – целая часть числа x ; $\gamma = \frac{0,5\Delta\rho - 5\sigma_x}{0,5R}$; σ_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 φ . Если шаг дискретизации по ρ для разных значений φ сделать в общем случае различным, способ расчета j согласно выражению (5) использовать нельзя.

Значение шага по скорости определяется следующим образом:

$$\Delta v = (\Delta s_0 - 10\sigma_x) / [(T-1)\tau], \quad (6)$$

где τ – время между двумя последовательными кадрами.

При организации минимального полного покрытия 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:

$$\Delta\rho_2 = \Delta\rho - 5\sigma_x, \quad (7)$$

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

$$j = E\left(\frac{\rho - \rho_{\min}}{\Delta\rho_2}\right), \quad (8)$$

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

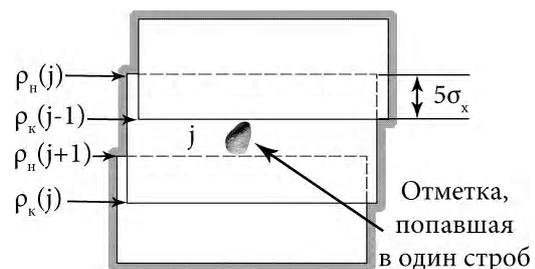


Рис. 5. Попадание статистики в один строб по траверсной дальности в случае полного покрытия

При организации минимального полного покрытия 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 ($\Delta\rho$, Δs_0) и значения СКО оценки координат σ_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, т.е. когда выполняется условие:

$$\Delta\rho \geq 10\sigma_x. \quad (9)$$

Из рис. 6 видно, что отметка может попасть кроме j -го еще и в $j-1$ -й строб в случае выполнения следующего условия:

$$\rho \leq \rho_{kj-1}, \quad (10)$$

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

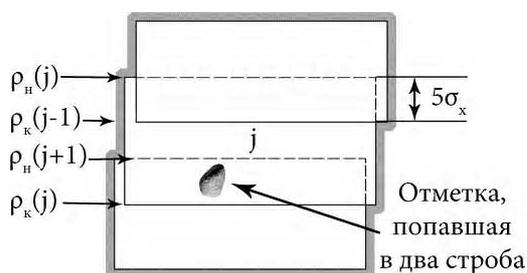


Рис. 6. Попадание статистики в два строба по траверсной дальности в случае полного перекрытия

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. 7, стробы, соседние с j -м стробом, взаимно перекрываются. Это возможно в случае, если:

$$5\sigma_x \leq \Delta\rho \leq 10\sigma_x. \quad (11)$$

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

$$\rho \geq \rho_{nj+1}, \quad (12)$$

где $\rho_{nj+1} = \rho_{\min} + (j+1) \cdot \Delta\rho_2$ – минимальное значение траверсной дальности, соответствующее $j+1$ -му стробу по траверсной дальности.

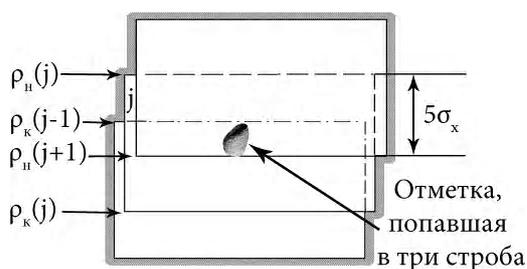


Рис. 7. Попадание статистики в три строба по траверсной дальности в случае полного перекрытия

При невыполнении условия (12) 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 (7)).

Приведенные выше условия справедливы также и для анализа попадания отметки в несколько стробов по начальному положению, который проводится на втором этапе обнаружения. Подробнее метод описан в [7].

7. Амплитудно - координатный вычислительный метод обнаружения объекта с локально неизменными параметрами движения и оценки параметров его траектории

При использовании двухэтапной реализации иерархического вычислительного метода для предварительного обнаружения объектов с локально неизменными параметрами движения для снижения вычислительных затрат обнаружение-измерение параметров их траекторий проводится со сравнительно небольшой точностью. Это приводит к необходимости уточнения параметров траектории предварительно обнаруженного объекта. Также, в целях повышения показателей качества обнаружения, требует уточнения предварительное решение об обнаружении объекта. В связи с этим возникает необходимость разработки вычислительного метода оценки параметров траектории предварительно обнаруженного объекта с локально неизменными параметрами движения с последующей отбраковкой ложных траекторий.

При этом РП обнаружения объекта, используемое в методе, может быть синтезировано по критерию Неймана-Пирсона, а РП оценки локально неизменных параметров движения объекта (координаты начального положения и скорости по каждой координате) – по критерию максимального правдоподобия.

Согласно постановке задачи, объект с локально неизменными параметрами движения движется независимо по каждой координате. Поэтому задачу определения параметров траектории по двум координатам можно свести к раздельному определению параметров движения по каждой координате. При этом задача максимально правдоподобной оценки параметров траектории объекта сводится к их МНК-оценке.

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

$$\sigma_{\hat{\theta}_j}^2 = \sigma_{\hat{\theta}_{jx}}^2 + \sigma_{\hat{\theta}_{jy}}^2, \quad (13)$$

где $\sigma_{\hat{\theta}_{jx}}^2$ и $\sigma_{\hat{\theta}_{jy}}^2$ – дисперсии оценки соответствующих координат.

Дисперсия оценки амплитуды сигнала от объекта для j -й траектории $\sigma_{\hat{\theta}_{ja}}^2$, исходя из постановки задачи, определяется как:

$$\sigma_{\hat{\theta}_{ja}}^2 = \sum_{t=1}^T (A_{kt(j)} - A_{\hat{\theta}_{jcc}})^2 / (T-1), \quad (14)$$

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

В качестве амплитуды сигналов от объектов в данном вычислительном методе также используется оценка видимого блеска астероида в звездных величинах.

С учетом (15) и (16) РП обнаружения астероида на серии кадров при условии наличия отметки от астероида на всех кадрах можно представить в виде:

$$\sum_{t=1}^T \gamma_{tjx} (x_{kt(j)} - \hat{x}_{jt})^2 + \sum_{t=1}^T \gamma_{tjy} (y_{kt(j)} - \hat{y}_{jt})^2 + \sum_{t=1}^T \gamma_{ja} (A_{kt(j)} - A_{\hat{\theta}_{jcc}})^2 \geq \Pi_{tre}, \quad (15)$$

где Π_{tre} – порог обнаружения астероида, определяемый экспериментально; $\gamma_{tjx} = 1/\sigma_{tjx}^2$, $\gamma_{tjy} = 1/\sigma_{tjy}^2$ – весовые коэффициенты, прямо пропорциональные точности оценки координат объекта; $\gamma_{ja} = 1/\sigma_{ja}^2$ – весовой коэффициент, зависящий от точности оценки амплитуды сигналов.

Весовые коэффициенты γ_{tjx} , γ_{tjy} , γ_{ja} зависят от положения объекта на кадре и отношения «сигнал/шум» и в общем случае не известны. 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.

Для случая ненулевой вероятности пропуска отметки от астероида на отдельных кадрах серии РП (15) принимает вид:

$$\sum_{t=1}^K \gamma_{tjx} (x_{kt(j)} - \hat{x}_{jt})^2 + \sum_{t=1}^K \gamma_{tjy} (y_{kt(j)} - \hat{y}_{jt})^2 + \sum_{t=1}^K \gamma_{ja} (A_{kt(j)} - A_{\hat{\theta}_{jcc}})^2 \geq \Pi'_{tre}(K), \quad (16)$$

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

Решающие правила (15), (16) 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 объекта (кинематическая составляющая), а значение амплитуды «лучшей» отметки должно не очень сильно отличаться от амплитуды других отметок, принадлежащих данной траектории (энергетическая составляющая).

Применение в РП подобной энергетической составляющей связано с большим разбросом уровня блеска у большинства объектов с локально неизменными параметрами движения (возможность наличия на серии ПЗС-кадров объектов с большим и малым видимым блеском), что приводит к невозможности использования в качестве статистики непосредственно амплитуд отметок от объекта с локально неизменными параметрами движения.

Для устранения возможности появления большого количества ложных обнаружений траекторий объектов, имеющих околонулевые оценки скорости, принятие решения об обнаружении объекта с локально неизменными параметрами движения производится только для тех траекторий, модуль скорости которых превысил предварительно заданное критическое значение минимальной скорости объекта. В противном случае траектории считаются ложными.

Подробнее метод описан в работе [8].

8. Использование разработанных вычислительных методов в программе автоматизированного обнаружения астероидов CoLiTec

Входными данными программы CoLiTec являются серия ПЗС-кадров с изображением участка небесной сферы, а также звездный каталог. В модуле внутрикадровой обработки производится учет дефектных пикселей ПЗС-матрицы; разбиение кадров на подсерии с определением базового кадра; сложение кадров подсерий с накоплением сигнала от движущегося объекта с получением суперкадров согласно методу описанному в [9]; предварительная селекция сигналов от небесных объектов на суперкадрах.

Затем производится оценка координат и амплитуд сигналов на суперкадрах (формирование отметок) по методу, описанному в [10]; объединение суперкадров одной подсерии согласно [9]; оценка экваториальных координат объектов методом, представленным в [11]. Полученные данные представляются в виде совокупности отметок. В модуле формирования внутреннего каталога неподвижных объектов (внутренний каталог) отбраковываются объекты, неподвижные на серии кадров изложенным методом.

Отметки от неподвижных объектов отождествляются с объектами звездного каталога в модуле решением венгерским методом задачи о назначениях на двудольном графе, одна доля которого представляет отметки кадра, а другая – объекты звездного каталога.

В модуле оценки видимого блеска объектов производится его оценка методом, описанным в [6] и в данной работе; формирование порога отбраковки по видимому блеску. В модуле отбраковки по видимому блеску оставляются только те отметки, оценка видимого блеска которых не превышает значение указанного порога.

В модуле предварительного обнаружения траекторий обнаруживаются траектории на основе накопления

статистик, пропорциональных энергии сигналов, вдоль возможных траекторий движения объекта согласно описаному выше двухэтапному иерархическому методу. В результате работы модуля формируются совокупности отметок, принадлежащие одному объекту с ненулевым видимым движением.

В модуле амплитудно-координатного обнаружения производится МНК-оценка параметров обнаруженных траекторий, а также принятие решения о наличии траекторий, сформированных астероидами на основе РП (16).

В модуле визуального контроля результата наблюдателю предоставляется возможность окончательного принятия решения о принадлежности траектории астероиду.

9. Результаты применения программы CoLiTec

Проверка работоспособности программы проводилась на базе Андрушевской астрономической обсерватории (ААО) и российской дистанционно управляемой обсерватории ISON-NM. В ходе эксперимента с мая 2010 по октябрь 2011 года в ААО было открыто 83 новых астероида [12], в том числе первое открытие астероида в автоматизированном режиме в СНГ. Применение программы в обсерватории ISON-NM значительно увеличило количество обнаруживаемых астероидов, при этом в период с декабря 2010 по октябрь 2011 года было открыто 532 новых астероида [12]. Также за этот период было открыто две кометы. 10 декабря 2010 года с использованием программы была открыта комета C/2010 X1 (Elenin) [13], ставшая первой кометой, открытой российским астрономом с 1990 года. 7 июля 2011 года была открыта комета P/2011 NO1, ставшая второй кометой, открытой данной обсерваторией [14].

10. Выводы

Разработанные вычислительные методы обработки данных для автоматизированного обнаружения объектов с локально неизменными параметрами движения были применены при создании первой на территории СНГ программы автоматизированного обнаружения астероидов CoLiTec. При этом были использованы следующие вычислительные методы, в разработке которых принимал участие автор.

1. Вычислительный метод обработки данных для оценки видимого блеска объекта. Метод основан на МНК-оценке коэффициентов впервые предложенной двухдиапазонной кусочно-линейной модели зависимости значения видимого блеска объекта от логарифма амплитуды отметки от данного объекта на ПЗС-кадре. Координаты точки перегиба двухдиапазонной кусочно-линейной модели (критическое значение амплитуды) определяются решением методом Фибоначчи оптимизационной задачи по критерию минимума суммы квадратов невязок между каталожным и оценочным значением видимого блеска звезд.

2. Двухэтапный иерархический вычислительный метод обработки данных для предварительного обнаружения объекта с локально неизменными параметрами движения. Метод обеспечивает накопление данных

вдоль траекторий объектов с неизвестными параметрами движения путем использования предложенного многозначного преобразования координат объектов. За счет этого значения показателей качества обнаружения объектов с ненулевым видимым движением при использовании метода соответствуют значениям показателей качества обнаружения звезд (объектов с нулевым видимым движением). Перед проведением предварительного обнаружения объекта с локально неизменными параметрами движения производится отбраковка объектов, неподвижных на серии кадров. Объект считается неподвижным на серии кадров, если координаты соответствующих ему отметок на любом из кадров отличаются одна от другой не более чем на наперед заданное значение радиуса неподвижности.

3. Амплитудно-координатный вычислительный метод обработки данных для обнаружения объекта с локально неизменными параметрами движения и оценки параметров его видимого движения. В методе для принятия решения о наличии объекта необходимо, чтобы координаты отметок, предварительно отнесенных к одному объекту, имели в среднем небольшое отклонение от предполагаемой траектории (кинематическая составляющая), а амплитуды данных отметок не должны значительно отличаться друг от друга (энергетическая составляющая).

Обнаружение объекта производится после МНК-оценки параметров его траектории. Вес энергетической составляющей определяется не значением амплитуд отметок, а значением взаимных флуктуаций оценок видимого блеска объекта. Это связано с большим разбросом значений амплитуды отметок от объектов на кадрах одной серии в связи возможными с быстрыми изменениями условий наблюдения.

Успешное применение программы CoLiTec для обнаружения астероидов и комет (первое в СНГ обнаружение нового астероида в автоматизированном режиме, первое открытие новой кометы российским астрономом за 20 лет) подтверждает достоверность данных вычислительных методов. Программа, использующая предложенные вычислительные методы, может быть использована и в других астрономических обсерваториях Украины и мира, занимающихся наблюдениями астероидов.

Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на повышении эффективности разработанных методов (уменьшение вычислительных затрат, снижение уровня ложных обнаружений объектов с локально неизменными параметрами движения).

Литература: 1. Kouprianov V. Distinguishing features of CCD astrometry of faint GEO objects // *Advances in Space Research*. 2008. Vol. 41, Issue 7. P. 1029–1038. 2. *Радиоэлектронные системы*. Основы построения и теория: Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с. 3. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. К.: Издательство КвіЦ, 2000. 428 с. 4. Деденок В.П., Саваневич В.С. Ієрархічний метод виявлення малорозмірного рухомого об'єкта //

Системи озброєння та військова техніка. 2005. № 1. С. 40–45. **5.** Саваневич В. Е., Кожухов А. М., Брюховецький А. Б. Метод предварительного обнаружения сигналов от небесных объектов на цифровом изображении // Системи озброєння та військова техніка. 2011. Вип. 2(26). С. 169–173. **6.** Саваневич В. Е., Кожухов А. М., Брюховецький А. Б., Власенко В. П. Оценка блеска астероида по амплитуде его сигнала на ПЗС-кадре // Системи управління навігації та зв'язку: Зб. наук. пр. 2010. Вип. 3(15). С. 46–50. **7.** Саваневич В. Е., Кожухов А. М., Брюховецький А. Б., Диков Е. Н., Герасименко О. В. Метод обнаружения астероидов, основанный на накоплении сигналов вдоль траекторий с неизвестными параметрами // Системи обробки інформації: Зб. наук. пр. 2011. Вип. 2(92). С. 137–144. **8.** Саваневич В. Е., Кожухов А. М., Брюховецький А. Б., Диков Е. Н. Обнаружение и оценка параметров траектории астероида // Радиоэлектроника и информатика. 2011. Вып. 1(52). С. 15–21. **9.** Саваневич В. Е., Кожухов А. М., Брюховецький А. Б., Власенко В. П. Метод сложения ПЗС-кадров с накоплением сигнала от астероида со слабым блеском и ненулевым видимым движением на серии ПЗС-кадров // Системи озброєння та військова техніка. 2010. Вип. 3(23). С. 154–159. **10.** Саваневич В. Е., Брюховецький А. Б., Кожухов А. М., Диков Е. Н. Оценка координат астероида на дискретном изображении // Радиотехника. 2010. Вып. 162. С. 78–86. **11.** Саваневич В. Е., Брюховецький 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. 2010. Вип. 6(87). С. 172–179. **12.** MPC 70135 – 7667. http://www.minorplanetcenter.net/iau/ECS/MPCArchive/MPCArchive_TBL.html. **13.** MPEC 2010-X101: COMET C/2010 X1 (ELENIN). <http://www.minorplanetcenter.org/mpec/K10/K10XA1.html>. **14.** MPEC 2011-O10. COMET P/2011 NO1. <http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K11/K11O10.html>.

Поступила в редколлегию 12.03.2012

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

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