

Оценка эффективности обнаружения объектов комплексами наблюдательных средств с большим базовым расстоянием

Ю. Г. Даник

Харьковский военный университет
61043, г. Харьков, пл. Свободы, 6

Статья поступила в редакцию 27 июля 1999 г., после переработки 25 октября 1999 г.

В работе рассмотрен обобщенный метод бинокулярного обнаружения малоподвижных космических объектов комплексами узкопольных оптико-электронных средств с большим базовым расстоянием. Предложена методика оценки эффективности метода и произведена ее оценка. Полученные в работе результаты могут быть использованы при обработке и анализе результатов радиоастрономических наблюдений.

В роботі розглянуто узагальнений метод бінокулярного виявлення малорухомих космічних об'єктів комплексами вузькопольних оптико-електронних засобів з великою базовою відстанню. Запропоновано методику оцінки ефективності метода і проведено її оцінку. Отримані в роботі результати можуть бути використані при обробці та аналізі результатів радіоастрономічних спостережень.

Введение

Обеспечение контроля за космическими объектами (КО) на стационарных орбитах, а также за дальними космическими объектами является актуальным ввиду того, что в данной области пространства находятся и продолжают размещаться космические элементы наиболее важных информационных систем. Однако существующие и используемые в настоящее время методы обнаружения КО не позволяют решать задачу обнаружения малоподвижных объектов с требуемой оперативностью.

В традиционных методах обнаружения КО оптико-электронными средствами (ОЭС) на фоне звезд [1,2,3,4,5] в качестве исходной используется информация о неравенстве векторов скоростей КО и звезд. При учете скорости вращения Земли звезды в поле зрения станции остаются неподвижными, а спутники образуют в фокальной плоскости объектива "след". Если длина "следа" превышает некоторое пороговое значение, принимается решение об обнаружении КО. Время, необходимое для формирования "следа", выбирается исходя из требования обнаружения самого медленного объекта.

Решение задачи обнаружения малоподвижных относительно наблюдателя КО с использованием указанного признака приводит к значительному снижению скорости обзора пространства [2,5]. Расчеты показывают, что при применении метода оптимальной фильтрации обнаружение КО на фоне звезд обеспечивается с вероятностью правильного обнаружения $D = 0.97$ при интенсивности ложных

тревог $N_{лт.} = 10^{-6}$ обнаружений в секунду, за 50 телевизионных кадров при угловой скорости смещения КО относительно звезд $\omega = 0.004$ °/с и периоде следования кадров $T_k = 0.04$ с. В качестве базового средства при расчетах рассматривалось оптико-электронное средство с техническими характеристиками аналогичными системе ААТС-2 [3]. При этом время, необходимое для формирования следа, длина которого достаточна для решения задачи обнаружения с заданными вероятностными характеристиками, будет составлять $t_{сл} = 2$ с, а оптимальная фильтрация измерений должна вестись независимо для каждого объекта в телевизионном кадре. Общее число объектов, регистрируемых в кадре, после линейного и логического накопления составит $N_{об} \approx N_{зв}$. Число звезд в поле зрения ОЭС с приемником с высокой пороговой чувствительностью может составлять несколько тысяч. Следовательно, столько же должно быть оптимальных фильтров.

Оценим поисковые возможности ОЭС при реализации традиционного метода обнаружения. Они главным образом зависят от технических характеристик используемых наблюдательных средств и необходимости обеспечения заданных показателей эффективности обнаружения, а также размеров контролируемой области пространства. То есть поисковые возможности определяются временем, необходимым для обнаружения (формирования "следа" требуемой длины) всех имеющих место КО при каждом заданном положении визирной оси, в

каждом конкретном мгновенном поле зрения (МПЗ), количеством таких МПЗ, и временем переходов от одного МПЗ к другому при проведении обзора пространства.

В рассматриваемых средствах поиск, как правило, осуществляется с применением компенсаторов сдвига изображений оптико-телевизионного канала (КСИО) [3]. Время, необходимое для переброса поля зрения в них, может быть определено по формуле:

$$t_{\text{пер}} = 0.2t_{\text{сл}} = 0.4 \text{ с.}$$

Поисковые возможности ОЭС при этом оцениваются по формуле:

$$\theta = \frac{(2\beta)^2}{t_{\text{сл}} + t_{\text{пер}}} = \frac{0.5^2}{2.4} \approx 0.1 \text{ квадратных градусов в секунду,}$$

где θ – скорость обзора пространства; 2β – угловой размер поля зрения средства.

В этом случае время, необходимое для просмотра области стационарных орбит в пределах зоны обзора ОЭС $S = 120 \times 20^\circ$ (120° по широте и 20° по долготе), будет равно:

$$t_{\text{просм}} = \frac{S}{\theta} = 6 \text{ ч } 40 \text{ мин.}$$

Таким образом, при обнаружении стационарных КО традиционным методом, контролируемая область орбит может быть осмотрена за ночь не более чем один раз, причем каждый обнаруженный геостационарный спутник (ГСС) наблюдается на дуге орбиты, не превышающей $0.5'$.

В связи с этим в работе [6] было предложено повысить поисковые возможности ОЭС за счет уменьшения времени, необходимого на обнаружение КО, путем перехода от традиционного метода обнаружения к принципу бинокулярного дальномера [2,8]. Данный метод основан на селекции КО на фоне звезд по дальности, поэтому при наличии условий наблюдения, обеспечивающих требуемую величину вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения отдельного сигнала, показатели качества обнаружения КО на фоне звезд не зависят от времени просмотра поля зрения.

Суть метода заключается в следующем. Имеются два оптических инструмента, разнесенных на расстояние B . Оптические оси инструментов направлены в одну и ту же точку звездного неба. При этом параллакс изображений звезд в областях телевизионных кадров, соответствующих зоне стереоскопического наблюдения левого и правого инструментов, будет равен нулю, а параллакс наблюдаемых космических объектов (например, ГСС) будет

ненулевым, так как удаление ГСС от базы наблюдения конечное, а удаление звезд практически бесконечное. Параллактическое расстояние между изображениями КО зависит от их высот, и вся контролируемая область пространства разбивается на диапазоны в зависимости от классов наблюдаемых объектов (их высот) [4]. Использование принципа бинокулярного дальномера, как показано в [2], позволяет проводить обзор контролируемой области стационарных орбит не более чем за 30 минут (в 13 раз быстрее, чем с помощью традиционных методов). Однако существенным недостатком рассмотренного метода при применении ОЭС с узкими полями зрения (угловые размеры которых менее 0.5 квадратных градусов) является невозможность его реализации при превышении базовым расстоянием некоторого предела ($B > B_{\text{пред}}$). Это обусловлено тем, что необходимым условием реализации принципа бинокулярного дальномера является наличие у средств комплекса зоны стереоскопического наблюдения. Увеличение базового расстояния приводит к существенному подъему нижней границы зоны стереоскопического наблюдения и, следовательно, к невозможности наблюдения КО в заданной зоне на фоне одного и того же звездного узора двумя ОЭС одновременно.

Обобщенный метод обнаружения малоподвижных космических объектов комплексами оптико-электронных средств с большим базовым расстоянием

Для разрешения указанного противоречия предлагается метод, в основу которого положена идея искусственного расширения полей зрения средств до требуемых размеров на основе обеспечения сканирования зоны обзора эквивалентным виртуальным полем зрения. Такое поле зрения формируется путем интеграции нескольких мгновенных, смежных по пространству, полей зрения в одно, на основе представления их в единой системе координат, сохранения результатов регистрации в памяти ЭВМ и создания электронного образа поля зрения требуемых размеров [9].

Для этого осуществляют синхронный (по пространственно-временным характеристикам) обзор пространства обоими средствами комплекса. После сравнения последовательных кадров, получаемых одновременно при каждом из согласованных положений визирных осей каждым средством комплекса, и идентификации изображений, сформированных каждым из приемников, координаты отсементированных изображений (при формировании разностных кадров) на фоне общего звездного узора перечис-

тывают в единую систему координат. Далее, каждому из отселектированных изображений ищут соответствующее ему (сформированное при наблюдении того же объекта другим наблюдательным средством комплекса) изображение в серии последующих разностных кадров. Поиск осуществляется до тех пор, пока для каждого изображения, зарегистрированного в одном приемнике, не будет найдено соответствующее изображение в другом. Таким образом, достигается возможность реализации принципа бинокулярного обнаружения независимо от увеличения базового и фокусного расстояний. Процедура идентификации заключается в поэлементном сравнении сюжетов, зарегистрированных в каждом из средств комплекса, и выделении областей, соответствующих источникам излучения, совпадающим по своим геометрическим и энергетическим характеристикам. При этом изображения звезд в телевизионных кадрах, полученных первым и вторым ОЭС при наблюдении одного и того же участка небесной сферы, будут идентичны, и в идеальном случае полностью исключаются из рассмотрения базового сюжета. Процесс обнаружения объектов состоит в выделении всех отметок неидентифицированных в результате сравнения двух сюжетов, синхронно зарегистрированных средствами оптико-электронного комплекса, и в поиске соответствующих изображений в n последующих синхронно получаемых кадрах. Добавление каждого нового кадра в интегрированный кадр обеспечивает расширение диапазона контролируемых высот на некоторую величину (поддиапазон).

В реальных условиях после проведения селекции останутся также помеховые изображения, сформированные внутренними шумами приемника, и изображения неидентифицированных звезд. Решение об обнаружении КО принимается при выполнении для неидентифицированных изображений следующих условий:

а) условная линия, соединяющая изображения между собой, совпадает по ориентации φ^n (φ^n – угол ориентации условной линии между изображениями в заданной системе координат; n – номер кадра) с условной линией, соединяющей точки нахождения наблюдательных средств;

б) относительное расстояние между изображениями ρ^n соответствует контролируемому интервалу высот;

в) изображения совпадают по звездной величине m .

Условия обнаружения объекта при реализации предлагаемого метода можно записать в следующем виде:

$$\rho_{\min}^n \leq \rho^n \leq \rho_{\max}^n, \quad \varphi_{\min}^n \leq \varphi^n \leq \varphi_{\max}^n, \quad (1)$$

$$|m_i - m_j| \leq r_m^n / 2,$$

$$\text{где} \quad \rho_{\min}^n = \rho^n - \frac{\Delta\rho}{2}; \quad \rho_{\max}^n = \rho^n + \frac{\Delta\rho}{2};$$

$$\varphi_{\min}^n = \varphi^n - \frac{\Delta\varphi}{2}; \quad \varphi_{\max}^n = \varphi^n + \frac{\Delta\varphi}{2}; \quad \Delta\rho, \Delta\varphi, r_m^n -$$

размеры стробов [10] ($\Delta\rho$, $\Delta\varphi$ зависят от величин дисперсий ошибок измерения координат объектов, а r_m^n – от ошибок измерения их блеска; n – номер кадра (поддиапазона обнаружения) в интегрированном (виртуальном) поле зрения; m_i , m_j – зарегистрированные звездные величины изображений; $i=1\dots q$; $j=1\dots q$; $i \neq j$; q – количество отселектированных изображений для которых выполнены условия а) и б).

Методика оценки эффективности метода

Предлагаемый метод может быть реализован на любых известных ОЭС. Но эффективность решения задачи обнаружения при этом (как собственно и при реализации любых других известных методов и алгоритмов обнаружения), как в оптике, так и в радиолокации [2,8], будет определяться их техническими характеристиками (уровнем внутренних шумов, порогом чувствительности и т. д.).

Для оценки эффективности предложенного метода необходимо получить выражения для определения вероятностей ложного обнаружения, правильного обнаружения и необнаружения объекта.

Оценим вероятность ложного обнаружения ИСЗ при реализации предложенного метода. Для этого проанализируем те ситуации, в которых принимается ошибочное решение об обнаружении. Это возможно, когда пары отождествляемых отметок, у которых звездные величины и взаимное расположение удовлетворяют условиям обнаружения (1), представляют собой следующие комбинации: звезда-звезда, помеха-помеха, звезда-помеха, помеха-звезда.

Рассмотрим случай, когда неидентифицированные звезды формируют группы, для которых выполняются условия (1). Определим условную вероятность ложного обнаружения для данного случая. Она равна произведению следующих вероятностей: вероятности наличия изображений двух звезд, расположенных друг относительно друга так, что в n -м поддиапазоне обнаружения возможно принятие ошибочного решения об обнаружении объекта; вероятности того, что некоторые из изображений звезд на этапе формирования разностных кадров не будут идентифицированы (например,

если одним приемником звезда зарегистрирована, а другим нет, или если координаты изображений одной и той же звезды или ее блеск определены с такими ошибками, что эти изображения не будут идентифицированы); вероятности того, что звездные величины изображений будут отличаться друг от друга не больше, чем на некоторую величину r_m^n .

Статистические характеристики процесса изменения интенсивности изображения A наблюдаемых источников излучения (с амплитудой светового сигнала u ($A = u^2$) и средним значением амплитуды u_0 : $u = u_0 \exp(\chi)$, где χ – логарифм амплитуды, гауссова случайная переменная со средним значением $\bar{\chi}$ и стандартным отклонением σ_χ [11]) главным образом определяются влиянием неоднородностей атмосферы, которые значительно меньше диаметра объектива телескопа. Преобладающее большинство экспериментальных данных говорит в пользу логарифмически-нормального распределения случайной амплитуды светового сигнала, прошедшего турбулентный атмосферный слой [11]. Принято считать, что при малых флуктуациях амплитуды такая статистическая модель достаточно точна и ею можно пользоваться в теоретических расчетах [11,12].

Предположим, что свет распространяется в атмосфере без заметного затухания [12]. Это значит, что плоская волна интенсивности A_0 , входящая в турбулентный слой атмосферы, в силу закона сохранения энергии на выходе из турбулентного слоя должна иметь среднюю интенсивность A_0 . Известно [13], что интенсивность света A связана с освещенностью E объектива ОЭС формулой: $E = A \cos \vartheta$, где ϑ – угол между направлением падения световых лучей и нормалью к освещаемой поверхности. Так как в рассматриваемом случае ϑ не может принимать значения больше 0.5° , положим, что $E \approx A$ ($E_0 \approx A_0$). Тогда в соответствии с методикой, описанной в [11], плотность вероятности $\omega(E)$ случайной величины E ($E \geq 0$) может быть определена следующим образом:

$$\omega(E) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_\chi E} \exp\left(-(\ln(E/E_0) - 2\sigma_\chi^2)^2 / 8\sigma_\chi^2\right). \quad (2)$$

Звездная величина m точечного источника излучения в свою очередь связана с освещенностью E следующим образом [2,5,14]:

$$m = -14.18 - 2.5 \lg E.$$

Плотность вероятности случайной величины m равна:

$$\omega(m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{m_i}} \exp\left(-\frac{(m - \bar{m}_0)^2}{2\sigma_{m_i}^2}\right), \quad (3)$$

где $\bar{m}_0 = m_0 + \sigma_{m_i}^2 \ln 10 / 5 = m_0 + 0.46\sigma_{m_i}^2$; $m_0 = -14.18 - 2.5 \lg E_0$; $\sigma_{m_i}^2 = 5\sigma_\chi^2 / \ln 10$; $\sigma_{m_i}^2$ – дисперсия оценки видимого блеска изображений точечных объектов.

Правильность закона (3) подтверждается результатами исследований, приведенными в [15,16].

Таким образом, после прохождения атмосферного турбулентного слоя изображение звезды начинает мерцать, причем амплитуда мерцаний по звездной величине случайна. Это является одной из причин, приводящих к ошибкам идентификации и к ложным обнаружениям.

Предположим, что отождествляемая отметка на самом деле является изображением неидентифицированной звезды. Кроме того, в области обнаружения какого-либо из поддиапазонов также имеет место изображение неидентифицированной звезды (событие s) такое, что выполняются условия (1). Определим вероятность P_s^n возникновения такого события в n -м поддиапазоне обнаружения.

При наблюдении произвольного участка звездного неба закон распределения количества источников излучения доступных для наблюдения с большой долей достоверности может быть принят пуассоновским [2]. Средняя плотность звезд с блеском $m \leq m_z$ (m_z – пороговая чувствительность приемника оптического излучения ОЭС) в квадратном градусе при оптических наблюдениях [5,17] описывается выражением:

$$C_m = 0.2 \cdot 2.8^{(m_z - 6.5)}. \quad (4)$$

Вероятность того, что в виртуальном кадре окажутся два изображения звезд на расстоянии, удовлетворяющем условиям (1), будет равна:

$$P_s^n = \frac{C_m \Theta_{pz}^2}{XY} (1 - \exp(-C_m \Delta\rho^n \Delta\varphi^n)), \quad (5)$$

где XY – количество элементарных приемников (чувствительных элементов) в многоэлементном приемнике оптического излучения (X – количество чувствительных элементов в строке, Y – количество строк в фотоприемнике); $|\Theta_{pz}|$ – угловые размеры мгновенного поля зрения ОЭС; $\Delta\rho^n$, $\Delta\varphi^n$ – размеры строки в n -ом поддиапазоне обнаружения.

Вероятность $P_{zv}(m_{io})$ того, что сигнал от звезды с блеском m_{io} (m_{io} – истинная звездная величина наблюдаемой звезды) превысит порог регистрации $m_{пор}$, при условии, что регистрируемый блеск звезды m_i описывается нормальным законом (3), равна:

$$P_{zv}(m_{io}) = \frac{1}{2} \left(1 - \Phi \left(\frac{m_{пор} - m_{io} - 0.46\sigma_{ml}^2}{\sigma_{ml}} \right) \right), \quad (6)$$

где Φ – интеграл Лапласа. При этом плотность вероятности $\omega_{zv}(m_i)$ звездной величины m_i ($m_i \in]-\infty; m_{пор}]$) обнаруженного объекта, полученная из выражений (3), (6) с использованием методик, описанных в [12,18,19] имеет следующий вид:

$$\omega_{zv}(m_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ml}P_{zv}(m_{io})} \exp \left(-\frac{(m_i - m_{io} - 0.46\sigma_{ml}^2)^2}{2\sigma_{ml}^2} \right). \quad (7)$$

Для другой звезды с блеском m_{jo} выражения для $P_{zv}(m_{jo})$ и $\omega_{zv}(m_j)$ имеют вид аналогичный (6) и (7).

Отметки от неидентифицированных звезд в разностном кадре будут иметь место в следующих случаях: звезды зарегистрированы только одним из ОЭС; звезды зарегистрированы обоими ОЭС, однако из-за ошибок определения координат изображений и (или) их яркостей они не будут идентифицированы. Исходя из этого, вероятность $P_n(m_{io})$ неправильной идентификации изображений звезды с блеском m_{io} :

$$P_n(m_{io}) = P_{zv}(m_{io})(1 - P_{zv}(m_{jo})) + P_{zv}^2(m_{io})(1 - P_{pi}(m_{io})), \quad (8)$$

где $P_p = \Phi^2(r_l / \sqrt{2}\sigma_n)$ – вероятность того, что случайный параллакс двух изображений одной и той же звезды не превысит допустимую величину r_l ; σ_n – среднеквадратичное отклонение (СКО) ошибок определения координат отметок в n -ом поддиапазоне обнаружения с учетом ошибок определения параметров привязки кадров; $P_{pi}(m_{io})$ – вероятность того, что звездные величины рассматриваемых отметок не будут отличаться друг от друга больше, чем на величину r_m .

Определим теперь плотность вероятности разности y наблюдаемых звездных величин

двух изображений звезд $y = m_i - m_j$. Если плотность вероятности наблюдаемого блеска обнаруженной отметки описывается выражением (7), то плотность вероятности случайной величины y равна:

$$\begin{aligned} \omega_{ij}(y / m_{io}, m_{jo}) &= \int_{-\infty}^{m_{пор}} \omega_{zvi}(m_i) \omega_{zvj}(m_i - y) dm_i; \\ \omega_{ij}(y / m_{io}, m_{jo}) &= \int_{-\infty}^{m_{пор}} \omega_{zvi}(m_j + y) \omega_{zvj}(m_i - y) dm_i; \\ y &\in [0; +\infty[. \end{aligned}$$

После интегрирования получаем:

$$\begin{aligned} \omega_{ij}(y / m_{io}, m_{jo}) &= \\ &= \frac{\left[1 + \Phi \left(\frac{2m_{пор} - m_{io} - m_{jo} - 0.92\sigma_{ml}^2 - |y|}{\sqrt{2}\sigma_{ml}} \right) \right]}{4\sqrt{\pi}\sigma_{ml}P_{zv}(m_{io})P_{zv}(m_{jo})} \times \\ &\times \exp \left(-\frac{(y - (m_{io} - m_{jo}))^2}{4\sigma_{ml}^2} \right). \quad (9) \end{aligned}$$

Вероятность того, что звездные величины неидентифицированных на этапе формирования разностных кадров звезд, изображения которых расположены так, что в n -ом поддиапазоне обнаружения выполняются условия (1), будут отличаться друг от друга не более чем на величину r_m^n , равна:

$$P_{ij}^n(m_{io}, m_{jo}) = \int_{-r_m^n}^{r_m^n} \omega_{ij}(y / m_{io}, m_{jo}) dy. \quad (10)$$

Воспользовавшись выражением (4), описывающим эмпирическую плотность звезд C_m с блеском $m \leq m_z$ в квадратном градусе в предположении, что m_{io}, m_{jo} – случайные величины, определим плотность вероятности значений блеска случайно выбранной звезды $\omega_{io}(m_{io})$ [17]. С этой целью вычислим вероятность того, что истинный блеск M случайно взятого изображения звезды меньше некоторой величины m_{io} :

$$\begin{aligned} P(M < m_{io}) &= (0.2 \cdot 2.8^{m_{io} - 6.5} \Theta_{pz}^2) \times \\ &\times (0.2 \cdot 2.8^{m_z - 6.5} \Theta_{pz}^2)^{-1} = 2.8^{-(m_z - m_{io})}. \end{aligned}$$

Тогда плотность вероятности $\omega_{io}(m_{io})$ равна:

$$\omega_{i_0}(m_{i_0}) = \frac{dP(M < m_{i_0})}{dm_{i_0}} = 2.8^{-(m_z - m_{i_0})}. \quad (11)$$

Используя выражения (5), (8), (10), (11), определим вероятность ложного обнаружения, обусловленного наличием неидентифицированных изображений звезд:

$$P_1^n = P_s^n \int_{-\infty}^{m_z} \int_{-\infty}^{m_z} P_n(m_{i_0}) P_n(m_{j_0}) P_{ij}^n(m_{i_0}, m_{j_0}) \times \omega_{i_0}(m_{i_0}) \omega_{j_0}(m_{j_0}) dm_{i_0} dm_{j_0}. \quad (12)$$

Предположим, что анализируемые изображения сформированы внутренними или внешними аддитивными шумами и для них выполняются условия (1). Это также является причиной ложных обнаружений. Оценим вероятность этого события.

Учитывая то, что случайные амплитуды ложных точечных изображений так же как и случайные амплитуды световых сигналов от наблюдаемых объектов распределены по логарифмически-нормальному закону [11], а их количество – по закону Пуассона [2], определим вероятность появления ложной отметки в чувствительном элементе многоэлементного фотоприемника:

$$F = 0.5(1 + \Phi(m_{\text{пор}} - \bar{m}_\phi) / \sigma_\phi), \quad (13)$$

где σ_ϕ – стандартное отклонение флуктуаций звездной величины шумового выброса; $\bar{m}_\phi = m_\phi + 0.46\sigma_\phi$, (\bar{m}_ϕ получают аналогично \bar{m}_0 , (3)), m_ϕ – звездная величина, характеризующая яркость фона.

Плотность вероятности яркости обнаруженных шумовых выбросов в этом случае описывается выражением:

$$\omega_{sh}(m_{sh}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\phi F} \exp\left(-\frac{(m_{sh} - \bar{m}_\phi)^2}{2\sigma_\phi^2}\right), \quad (14)$$

где m_{sh} – звездная величина шумового изображения.

Тогда среднее количество шумовых выбросов в области обнаружения n -го поддиапазона, ограниченной по ρ^n и φ^n , будет равно:

$$\mu_\phi^n = \frac{FX Y \Delta \rho^n \Delta \varphi^n}{\Theta_\phi^2}. \quad (15)$$

Определим P_{sh} – вероятность того, что разность $z = m_{sh1} - m_{sh2}$ звездных величин двух случайно взятых шумовых изображений не будет превышать размеров строка по интенсивности r_m^n :

$$P_{sh} = \int_{-r_m^n}^{r_m^n} \omega_{sh}(z) dz = \int_{-r_m^n}^{r_m^n} \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma_\phi F^2} \exp\left(-\frac{z^2}{4\sigma_\phi^2}\right) \times \left[1 + \Phi\left(\frac{(2m_{\text{пор}} - 2m_\phi - |z|)}{\sqrt{2}\sigma_\phi}\right)\right] dz. \quad (16)$$

Вероятность ложного обнаружения, обусловленного шумовыми изображениями для n -го поддиапазона можно определить по формуле:

$$P_2^n = F \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\mu_\phi^k}{k!} \exp(-\mu_\phi) (1 - (1 - P_{sh})^k). \quad (17)$$

Еще одна возможность принятия ложного решения об обнаружении объекта появляется в том случае, когда одно из анализируемых изображений является изображением звезды, неидентифицированной на этапе формирования разностного кадра, а другое – шумовое изображение, и при этом также выполняются условия (1). Если при этом значения звездных величин шумового изображения и изображения звезды отличаются не более чем на величину $v = |m_{sh} - m_{i_0}| \leq r_m^n$ – произойдет ложное обнаружение. Вероятность такого события, принимая во внимание (8), (11), (15), (17), равна:

$$P_3^n = \frac{C_m \Theta_{pz}^2}{XY} \int_{-\infty}^{m_z} \omega_{i_0}(m_{i_0}) P_n(m_{i_0}) \times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\mu_\phi^k}{k!} \exp(-\mu_\phi) (1 - (1 - P_{shi}^n(m_{i_0}))^k) dm_{i_0}, \quad (18)$$

где

$$P_{shi}^n(m_{i_0}) = \int_{-r_m^n}^{r_m^n} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(v - (m_{i_0} + 0.46\sigma_{m_i} - \bar{m}_\phi)\right)^2 (\sigma_\phi^2 + \sigma_{m_i}^2)^{-1}\right] \times \frac{1}{2\sqrt{\pi}(\sigma_\phi^2 + \sigma_{m_i}^2) F P_{zv}(m_{i_0})} \times [1 + \Phi[H]] dv -$$

вероятность того, что звездные величины изображения звезды и шумового изображения бу-

дуг отличаться друг от друга на величину, меньшую r_m^n ;

$$H = \left\{ n_{\text{пор}} (\sigma_\phi^2 + \sigma_{m_i}^2) - (m_{i_0} + 0.46\sigma_{m_i}^2) \sigma_\phi^2 - \bar{m}_\phi \sigma_{m_i}^2 - 0.5 |v| [\sigma_\phi^2 + \sigma_{m_i}^2 + \text{sign}(v)(\sigma_\phi^2 - \sigma_{m_i}^2)] \right\} \times \left(\sqrt{(\sigma_\phi^2 + \sigma_{m_i}^2) \sigma_\phi \sigma_{m_i}} \right)^{-1}.$$

Ложное обнаружение произойдет также в том случае, если анализируемое изображение в действительности является шумовым, а в области обнаружения какого-либо из поддиапазонов имеет место изображение звезды, не идентифицированной на этапе формирования разностных кадров. При этом звездные величины данных отметок должны различаться между собой не более, чем на величину r_m^n . Вероятность этого события можно определить из выражения:

$$P_4^n = FC_m \Delta\rho^n \Delta\varphi^n \exp(-C_m \Delta\rho^n \Delta\varphi^n) \times \int_{-\infty}^{m_i} \omega_{i_0}(m_{i_0}) P_n(m_{i_0}) P_{shi}^n(m_{i_0}) dm_{i_0}. \quad (19)$$

Таким образом, для n -го поддиапазона обнаружения, полная вероятность ложного обнаружения в элементе разложения кадров при наличии флуктуационных аддитивных и мультипликативных помех будет равна сумме:

$$P_{LO}^n = P_1^n + P_2^n + P_3^n + P_4^n. \quad (20)$$

Необходимо отметить, что приведенные формулы учитывают далеко не все возможные события, которые будут влиять на частоту ложных тревог. Однако основные ситуации, дающие наибольший вклад в вероятность ложных тревог, выражениями (5)-(20) учитываются.

Среднее количество N_{LO} ложных обнаружений за кадр можно оценить выражением:

$$N_{LO} = P_{LO} XY. \quad (21)$$

Оценим вероятность пропуска объекта при обнаружении предложенным методом. Для этого проанализируем те ситуации, в которых является об отсутствии объекта, хотя в действительности он содержится в зарегистрированном сюжете. Ввиду того, что реализация предлагаемого метода предполагает идентификацию изображений звезд на этапе формирования разностных кадров, возможно отождествление изображения ИСЗ либо с каким-либо изображени-

ем, сформированным под влиянием внутренних шумов приемника, либо с изображением звезды.

Определим вероятность ложного отождествления изображения ИСЗ с шумовым изображением. Среднее количество μ_{sh} шумовых изображений в стробе радиусом r_t можно рассчитать по формуле:

$$\mu_{sh} = FX Y \pi r_t^2 / \Theta_{pz}^2. \quad (22)$$

Вероятность попадания в строб интенсивности отметки, обусловленной ИСЗ, с блеском m_{co} и интенсивности ложного (шумового) изображения рассчитаем, используя (14), (16):

$$P_{csh}(m_{co}) = P_{shi}(m_{co}).$$

Тогда вероятность ложного отождествления целевой и шумовой отметок на этапе формирования разностных кадров равна:

$$P_5 = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\mu_{sh}^k}{k!} \exp(-\mu_{sh}) (1 - (1 - P_{csh}(m_{co}))^k). \quad (23)$$

Определим вероятность отождествления изображений объекта и звезды. Среднее количество изображений звезд, случайно попадающих в строб идентификации отметок радиусом r_t , равно:

$$\mu_{zsh} = C_m \pi r_t^2 / \Theta_{pz}^2.$$

Вероятность того, что изображения звезды с блеском m_{i_0} и объекта с блеском m_{co} попадут в строб интенсивностей можно определить, воспользовавшись формулами (9), (10):

$$P_{ic}(m_{i_0}) = P_{ij}(m_{co}; m_{i_0}). \quad (24)$$

Тогда вероятность ложного отождествления изображений объекта и звезды на этапе совмещения кадров будет определяться следующим образом:

$$P_6 = \mu_{zsh} \exp(-\mu_{zsh}) \int_{-\infty}^{m_{\text{пор}}} \omega_{i_0}(m_{i_0}) P_n(m_{i_0}) P_{ic}(m_{i_0}) dm_{i_0}. \quad (25)$$

Оценим вероятность правильного обнаружения объекта предлагаемым методом. Отметим, что обнаружение объекта произойдет

только в том случае, если в кадрах обоих средств наблюдения сигнал от объекта превысит порог регистрации $m_{пор}$, расположение отметок удовлетворяет условиям обнаружения (1), интенсивности отметок примерно одинаковы, а при идентификации кадров, одновременно получаемых обоими ОЭС, не произойдет ложного отождествления изображения, сформированного ИСЗ, с каким-либо шумовым изображением или с изображением звезды.

Вероятность правильного обнаружения объекта с ожидаемой звездной величиной m_{co} будет определяться прежде всего вероятностью P_{pp} превышения сигналом от цели заданного порога $m_{пор}$ при наличии флуктуаций интенсивности:

$$P_{pp} = 0.5 \left(1 + \Phi \left(\frac{m_{пор} - m_{co} - 0.46\sigma_{mi}^2}{\sigma_{mi}} \right) \right). \quad (26)$$

Вероятность того, что два изображения ИСЗ попадут в строб по интенсивности, может быть вычислена с помощью выражений (9) и (10): $P_{in} = P_{ii}(m_{co}; m_{co})$.

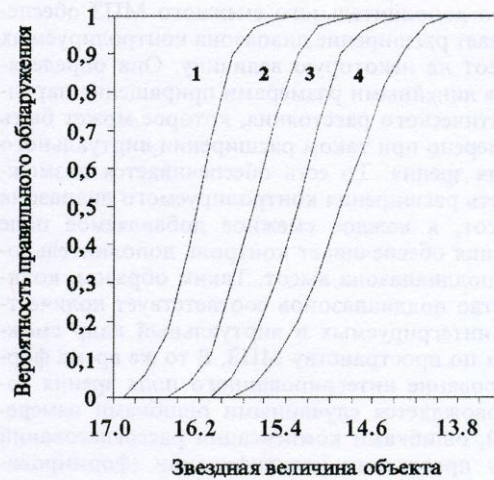
В итоге оценка вероятности правильного обнаружения объектов предложенным методом может быть произведена с помощью выражения:

$$P_{pn}^n = P_p^n P_{pp}^n P_{in}^n (1 - 2P_5(1 - P_6)^2(1 - P_5) - 2P_6(1 - P_5)^2(1 - P_6) - P_5^2(1 - P_6)^2 - P_6^2(1 - P_5)^2 - 2P_5P_6(1 - P_5)(1 - P_6)),$$

где

$$P_p^n = \frac{1}{4\pi\sigma_{op}\sigma_n} \int_{\rho_o - 0.5\Delta\rho^n}^{\rho_o + 0.5\Delta\rho^n} \int_{\varphi_o - 0.5\Delta\varphi^n}^{\varphi_o + 0.5\Delta\varphi^n} \rho^n \times \exp\left(-\frac{\rho^{n^2} + \rho_o^2 - 2\rho^n\rho_o \cos(\varphi^n - \varphi_o)}{4\pi\sigma_{op}\sigma_n}\right) d\rho^n d\varphi^n.$$

Рисунок и таблица иллюстрируют результаты расчетов, выполненных на основе разработанной методики. При расчетах использовались следующие исходные данные: СКО ошибки оценки видимого блеска объектов $\sigma_{mi} \sim 0.3^m$; СКО ошибок определения координат отметок, вызванных помехами и неточностью совмещения кадров, $\sigma \sim 2''$; яркость фона равна $m_\phi \sim 20^m$. При проведении расчетов каждому отдельному МПЗ был поставлен в соответствие поддиапазон обнаружения. Этим поддиапазонам соответствуют определенные интервалы высот, в которых производится поиск КО. В зависимости от высот наблюдаемых КО, расстояния между используемыми наблюда-



Вероятность правильного обнаружения КО

Таблица

Поддиапазон обнаружения	Номер кривой	Количество ложных отметок в ТВ кадре	Вероятность ложного обнаружения $P_{лo}$	Количество ложных обнаружений $N_{лo}$
1	1	50	$1.54 \cdot 10^{-4}$	7.7
	2	5	$6.05 \cdot 10^{-5}$	0.3025
	3	0.5	$3.87 \cdot 10^{-6}$	0.1935
	4	0.05	$7.70 \cdot 10^{-7}$	0.0385
2	1	50	$1.85 \cdot 10^{-4}$	9.25
	2	5	$6.51 \cdot 10^{-5}$	0.3255
	3	0.5	$4.03 \cdot 10^{-6}$	0.2015
	4	0.05	$7.97 \cdot 10^{-7}$	0.03985
3	1	50	$2.27 \cdot 10^{-4}$	11.35
	2	5	$6.93 \cdot 10^{-5}$	0.3465
	3	0.5	$4.52 \cdot 10^{-6}$	0.226
	4	0.05	$8.48 \cdot 10^{-7}$	0.0424
4	1	50	$3.19 \cdot 10^{-4}$	15.95
	2	5	$7.78 \cdot 10^{-5}$	0.389
	3	0.5	$5.43 \cdot 10^{-6}$	0.271
	4	0.05	$9.52 \cdot 10^{-7}$	0.0476
5	1	50	$5.02 \cdot 10^{-4}$	25.1
	2	5	$9.83 \cdot 10^{-5}$	0.491
	3	0.5	$8.34 \cdot 10^{-6}$	0.417
	4	0.05	$3.03 \cdot 10^{-6}$	0.15

тельными средствами, а также от их фокусных расстояний, параллактическое расстояние между изображениями одного и того же объекта, зарегистрированного каждым из средств, может значительно превышать линейные размеры светочувствительных элементов приемников оптического излучения. В этом случае размер виртуального поля зрения должен быть выбран в соответствии с величиной параллактического расстояния, то есть с высотой космического

объекта. Интеграция в виртуальный кадр каждого дополнительного смежного МПЗ обеспечивает расширение диапазона контролируемых высот на некоторую величину. Она определяется линейными размерами приращения параллактического расстояния, которое может быть измерено при таком расширении виртуального поля зрения. То есть обеспечивается возможность расширения контролируемого диапазона высот, а каждое смежное добавляемое поле зрения обеспечивает контроль дополнительного поддиапазона высот. Таким образом, количество поддиапазонов соответствует количеству интегрируемых в виртуальный кадр смежных по пространству МПЗ. В то же время формирование интегрированного поля зрения сопровождается случайными ошибками измерений, ошибками компенсации рассогласований при проведении идентификации (формировании разностных кадров) и совмещении (приведении систем координат в единую) смежных по пространству кадров. Эти ошибки обусловлены плоскопараллельными сдвигами и поворотами кадров, возникающими за счет изгибания и скручивания осей, механической вибрации антенной системы и других случайных факторов [20,21]. Это, в свою очередь, приводит к увеличению размеров стробов, в которых осуществляется поиск изображений, соответствующих ранее отобраным по условиям (1), в каждом последующем добавляемом поле зрения (поддиапазоне обнаружения). Увеличение размеров стробов сопровождается возрастанием количества шумовых и неидентифицированных изображений при их постоянном среднем количестве в каждом кадре.

На рисунке представлены кривые обнаружения, демонстрирующие зависимость условной вероятности правильного обнаружения от блеска наблюдаемых объектов при разных значениях пороговой чувствительности фотоприемника ОЭС. В таблице приведены данные, демонстрирующие зависимость условных вероятностей ложного обнаружения и динамики возрастания их количества от количества ложных изображений в телевизионном кадре и количества телевизионных кадров, интегрируемых в виртуальный кадр. Из полученных результатов видно, что предложенный метод позволяет достаточно уверенно обнаруживать ГСС с блеском $\sim 15^m$ при пороговой чувствительности фотоприемника ОЭС $m_{\text{пор}} \approx 17^m$, при среднем количестве ложных изображений в телевизионных кадрах порядка 5 (кривая 2). В этих условиях количество ложных обнаружений ГСС в среднем составит $0.30 \div 0.39$ в поддиапазонах обнаружения с первого по четвертый (то есть примерно одна-два за 3 кадра). В пятом поддиапазоне количество ложных обнаружений резко возрастает до

0.49. Это накладывает ограничение на дальнейшее расширение поддиапазонов высот, в которых производится обнаружение объектов предложенным методом, так как увеличение размеров интегрированного кадра приводит к возрастанию количества шумовых и неидентифицированных изображений при решении задачи обнаружения и, следовательно, к снижению эффективности обнаружения при реализации данного метода по сравнению с методом, основанным на селекции КО на фоне звезд по скорости [2,3,4,5,6]. Так, при вероятности правильного обнаружения 0.98 и среднем количестве шумовых изображений в телевизионном кадре равном 50 количество ложных обнаружений в интегрированном из 5 телевизионных кадров виртуальном кадре возрастает более чем в три раза. В то же время, как видно из таблицы, снижение количества шумовых изображений на порядок приводит к уменьшению на порядок вероятности ложных обнаружений. Следует также отметить, что снижение вероятности ложной тревоги в элементе разложения путем повышения порога обнаружения сигнала ($m_{\text{пор}} \approx 16^m.5$) приводит к снижению вероятности правильного обнаружения P_{po} (кривая 3). Это можно объяснить тем, что при повышении порога обнаружения будет снижаться вероятность правильного обнаружения сигналов от объектов, блеск которых регистрируется на пределе чувствительности фотоприемника (при неизменности прочих условий). Увеличение же вероятности ложной тревоги в элементе разложения путем понижения порога обнаружения сигнала ($m_{\text{пор}} \approx 17^m.5$) наряду с ростом P_{po} (кривая 1) приводит к значительному росту частоты ложных обнаружений (до пятнадцати за кадр (см. таблицу)). Снижение качества обнаружения при реализации предложенного в работе метода по сравнению с методом, основанным на селекции КО на фоне звезд по скорости (вероятность ложного обнаружения возрастает до двух порядков в зависимости от количества шумовых изображений), объясняется прежде всего тем, что не была использована априорная информация о движении обнаруживаемых объектов. Но, с другой стороны, достигнутое благодаря использованию этого метода увеличение скорости обзора позволяет получить более десятка обнаружений и измерений параметров каждого ГСС на временном интервале в 6 часов, если традиционным методом за это же время каждый ГСС удастся пронаблюдать не более одного раза. Расчеты, проведенные с использованием методик, предложенных в работах [22,23], показали, что информативность выборки измерений при реализации предложенного в работе метода возрастает настолько, что позволяет примерно на 2-4 порядка точнее оп-

ределять параметры движения ГСС и благодаря этому с высоким качеством идентифицировать полученные измерения с известными траекториями. Таким образом, на эффективность решения задачи обнаружения малоподвижных КО предложенным методом главным образом влияют уровень внутренних шумов используемого приемника оптического излучения и качество идентификации зарегистрированных изображений, а также количество объединяемых в интегрированный кадр смежных МПЗ.

Выводы

В работе предложены обобщенный метод бинокулярного обнаружения малоподвижных космических объектов комплексами длиннофокусных (с узкими полями зрения) оптико-электронных средств с большим базовым расстоянием, а также изложены методика и результаты оценки его эффективности. Обобщенный метод бинокулярного обнаружения позволяет реализовать принцип бинокулярного обнаружения в тех (наиболее часто встречающихся в практике наблюдений) случаях, когда высоты наблюдаемых КО, расстояния между используемыми наблюдательными средствами, а также их фокусные расстояния находятся в таких соотношениях, что объекты не обнаруживаются в зоне стереоскопического наблюдения обоих средств одновременно.

Литература

1. А. Н. Абраменко, Е. С. Агапов, В. Ф. Анисимов, Н. Д. Галинский, В. В. Прокофьева. Телевизионная астрономия. Под ред. В. Б. Никонова. Москва, Наука, 1983, 272 с.
2. С. В. Москвитин, А. И. Стрелков. Теоретические основы оптической локации. МО Украины, 1992, 369 с.
3. Б. И. Демченко, А. В. Диденко, С. В. Матягин. Автоматизация наблюдений подвижных космических объектов. Алма-Ата, Наука Каз. ССР, 1990, 160 с.
4. С. Е. Здор, В. Б. Широков. Оптический поиск и распознавание. Москва, Наука, 1973, 240 с.
5. В. И. Курышев. Оптические наблюдения космических объектов. Москва, МО СССР, 1973, 494 с.
6. Ю. Г. Даник. В зб. наукових праць ХВУ. Випуск 17. Харків, ХВУ, 1998, с. 123-128.
7. Ю. Г. Даник, О. И. Рыбачук, В. В. Кондрат, Д. В. Дяченко. Радиоэлектроника и информатика. 1999, вып. 2, с. 11-14.
8. Я. Д. Ширман, В. Н. Голиков, И. Н. Бусыгин и др. Теоретические основы радиолокации. Под ред. Я. Д. Ширмана. Москва, Сов. Радио, 1970, 590 с.
9. Ю. Г. Даник. Спосіб виявлення об'єктів. Матеріали заявки на Патент України на винахід № 98084304 від 06.08.1998 р. Ужгород, Патент, 1999 р.
10. С. З. Кузьмин. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. Москва, Радио и связь, 1986, 352 с.
11. Дж. Гудмен. Статистическая оптика. Москва, Мир, 1988, 527 с.
12. Ж. Воукулер. Астрономическая фотография. Москва, Наука, 1975, 489 с.
13. Т. С. Ромашин, Л. Д. Бешенова. Фазовая зависимость блеска ГСС. Астрономо-геодезические исследования, статистические методы. Свердловск, 1987, с. 161.
14. Г. Уокер. Астрономические наблюдения. Москва, Мир, 1990, 352 с.
15. А. В. Диденко, Ф. К. Раснаев. Многоцветные электрофотометрические наблюдения геостационарных спутников. Астрономический циркуляр. №1333, 1984, с.25.
16. В. И. Иванов, П. Г. Ковадло, Ш. П. Дарчия. Исследования по геомагнетизму, аэрологии и физике Солнца. 1977, вып. 42, с. 111-115.
17. Y. G. Danik, V. I. Karpenko, G. G. Pisaryonok. SPIE, 1995, 2647, p. 508-512.
18. Б. Р. Левин. Теоретические основы статистической радиотехники. В 3-х книгах. Кн. 1. Москва, Сов. радио, 1966, 728 с.
19. Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. Прикладные задачи теории вероятностей. Москва, Радио и связь, 1983, 416 с.
20. Ю. Г. Даник. В сб. научных трудов ХВУ, НАНУ, ПАНИ. Харьков, ХВУ, 1996, с. 27-33.
21. Ю. Г. Даник, А. А. Антонович. Спосіб локації космічних об'єктів, Патент України на винахід №21544 А кл. G 01S 3/78. Ужгород, Патент, 1997 р.
22. З. Н. Хуторовский, В. Ф. Бойков. Наблюдения искусственных небесных тел. 1990, №85, с. 123-131.
23. А. С. Сочилина. Наблюдения искусственных небесных тел. 1990, №85, с. 104-110.

Detection Efficiency with Observation Aids Having Large Base Distance

Yu. G. Danik

The generalized method of binocular detection of the low-mobility space objects by complexes with narrow observation fields of optical-electronic aids with a large base distance is considered. The technique of the efficiency evaluation of the method is offered and the estimation is carried out. The results can be used in processing and analysis of radio astronomical observations.