

АЛГОРИТМ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ

А. В. ДЕМИН

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: dav_60@mail.ru

Предложены алгоритм коррекции коэффициентов риска при наличии аддитивного гауссового шума и схема имитационного моделирования процесса обнаружения высокоскоростного летательного аппарата оптико-электронным детектором с целью выбора значений коэффициентов риска, обеспечивающих минимизацию ожидаемой величины потерь при использовании критерия Байеса.

Ключевые слова: оптико-электронный детектор, обнаружение, эффективность, алгоритм.

Принцип действия оптико-электронного детектора обнаружения летательных аппаратов (ОЭД_{ЛА}), входящего в состав оптико-электронного комплекса поиска и обнаружения, основан на регистрации изменения структуры облученности в зоне чувствительности детектора. В зависимости от структуры зоны чувствительности, одноэлементной или многоэлементной, алгоритмы регистрации изменения структуры облученности (ИСО) различны, но сам факт обнаружения летательного аппарата, особенно высокоскоростного, носит вероятностный характер. Под высокоскоростным объектом (ВСО) понимается любой объект, время пребывания которого в зоне чувствительности ОЭД_{ЛА} соизмеримо с временем регистрации ИСО, определяемым алгоритмом работы детектора и числом шагов накопления одной и той же структуры облученности [1—8]. Наиболее распространенным алгоритмом обнаружения ВСО является параллельно-последовательный, а в качестве решающего правила используется один из возможных критериев: Байеса, Неймана — Пирсона и др. [2, 3, 8]. Эффективность ОЭД_{ЛА} определяется не только его оптико-физическими параметрами, но и эффективностью алгоритма принятия решения.

В данном исследовании в основу алгоритма повышения эффективности обнаружения высокоскоростных объектов положен критерий Байеса. В соответствии с этим критерием алгоритм принятия решения о наличии ВСО (H_0) в зоне чувствительности ОЭД или его отсутствии (H_1) строится на основе априорного распределения вероятностей относительно сравниваемых результатов наблюдений исходя из возможных четырех гипотез [2, 8]:

$H_0|H_0$ — правильное решение „да“;

$H_1|H_1$ — правильное решение „нет“;

$H_1|H_0, H_0|H_1$ — определенный „ответ“ относительно истинности наличия цели в зоне чувствительности ОЭД дать нельзя, при этом

$H_1|H_0$ — ложная тревога;

$H_0|H_1$ — пропуск цели.

С учетом значений априорных переходных вероятностей (P_0/P_1) и подпространств решений „да“/„нет“ соответствующее соотношение имеет следующий вид [2, 8, 9]:

$$\left. \begin{aligned} & \left\{ \begin{aligned} \mathfrak{R} &= C_{00}P_0 \int_{Z_0} B_0 dR + C_{10}P_0 \int_{Z_1} B_0 dR + C_{11}P_1 \int_{Z_1} B_1 dR + C_{01}P_1 \int_{Z_1} B_1 dR; \\ B_0 &= p_{r|H_0}(R|H_0); B_1 = p_{r|H_1}(R|H_1); \\ \frac{B_1}{B_0} \frac{P_0(C_{10} - C_{00})}{P_1(C_{01} - C_{11})} &\Leftrightarrow \Lambda(R) \frac{H_1}{H_0} \geq \eta \Rightarrow \ln\{\Lambda(R)\} \frac{H_1}{H_0} \geq \ln(\eta), \end{aligned} \right. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где \mathfrak{R} — ожидаемая величина потерь; $\Lambda(R)$ — отношение правдоподобия; η — порог обнаружения; $p_{r|H_0}, p_{r|H_1}$ — значение априорной плотности вероятности решений „да“/„нет“; R — множество точек в пространстве наблюдений (регистрация каждого решения „да“/„нет“); $C_{00}, C_{10}, C_{11}, C_{01}$ — коэффициенты риска („цена“) принимаемого решения, при этом „цена“ ошибочного решения (например, в случае $H_0|H_1$) может быть выше правильного [2].

На вероятность правильного обнаружения $H_0|H_0$ или $H_1|H_1$ влияет и назначение коэффициентов риска „ответа“, правильность выбора которых повышает эффективность ОЭДЛА ($\Psi_{\text{ОЭД}}$), определяемую соотношением

$$\Psi_{\text{ОЭД}} = \frac{\mathfrak{R}_0 - \mathfrak{R}_V}{\mathfrak{R}_0 + \mathfrak{R}_V}, \quad (2)$$

где \mathfrak{R}_0 — ожидаемая начальная величина потерь; \mathfrak{R}_V — ожидаемая величина потерь после коррекции коэффициентов риска.

Имитационная модель процесса выбора коэффициентов риска в математической форме может быть представлена следующим соотношением [2, 8, 9, 10]:

$$\left. \begin{aligned} & \left\{ \begin{aligned} \frac{\tilde{L}}{\sigma^2} \sum_{i=1}^N R_i - \frac{N(\tilde{L})^2}{2\sigma^2} \frac{H_1}{H_0} &\geq \ln \eta; \\ (C_{11} - C_{00}) + (C_{01} - C_{11})P_{\text{пр}} - (C_{10} - C_{00})P_{\text{л}} &= 0, \end{aligned} \right. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где \tilde{L} — средняя облученность зоны чувствительности детектора; σ^2 — дисперсия $n(t)$; $P_{\text{пр}}$ — вероятность пропуска ВсО $\langle (H_0 \rightarrow H_1) \Rightarrow (C_{01} - C_{11}) \rangle$; $P_{\text{л}}$ — вероятность ложной фиксации ВсО $\langle (H_1 \rightarrow H_0) \Rightarrow (C_{10} - C_{00}) \rangle$; N — число шагов накопления решений „да“/„нет“.

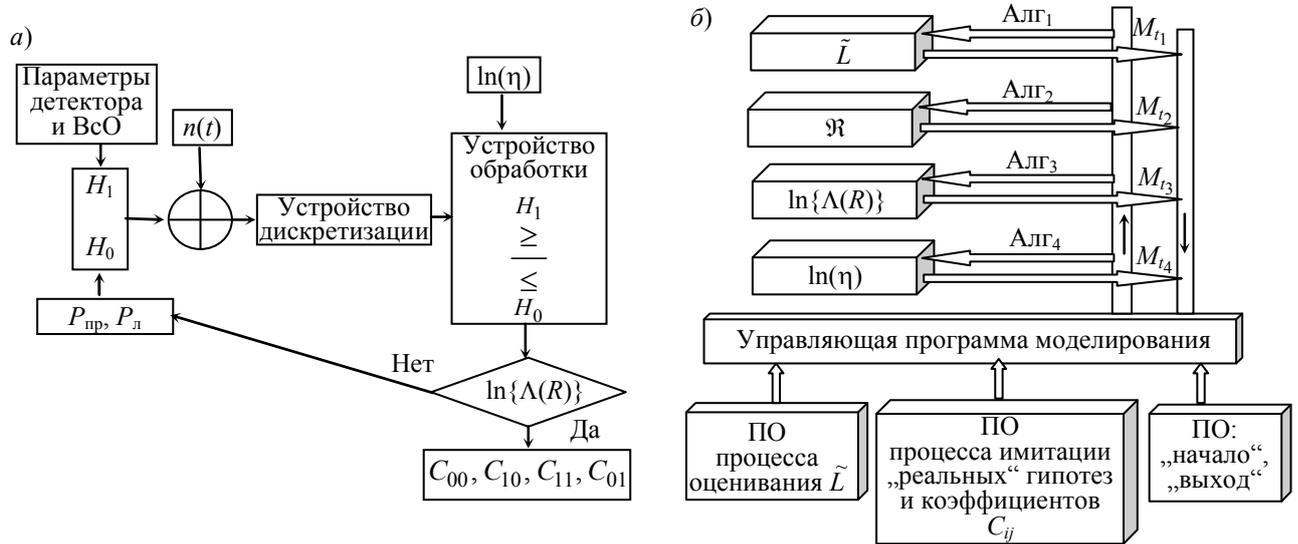
На рисунке *a, б* соответственно представлены алгоритм коррекции коэффициентов риска при наличии аддитивного гауссового шума и схема имитационного моделирования (ИМ) процесса обнаружения объекта детектором с целью выбора значений $C_{00}, C_{10}, C_{11}, C_{01}$, обеспечивающих минимизацию ожидаемой величины потерь. Схема ИМ содержит следующие блоки:

- средней облученности \tilde{L} зоны чувствительности детектора при известных оптико-физических параметрах детектора и ВсО;
- ожидаемой величины потерь \mathfrak{R} ;
- вариации отношения правдоподобия $\ln\{\Lambda(R)\}$ путем вариации коэффициентов $C_{00}, C_{10}, C_{11}, C_{01}$;
- ожидаемого порога обнаружения $\ln(\eta)$.

Поскольку принятие решений „да“/„нет“ есть результат параллельно-последовательных событий, регистрируемых реальным ОЭДЛА, то для синхронизации всех событий и выполнения алгоритмов имитации (Алг_{*i*}) введена переменная M_{t_i} , называемая модельным (системным)

временем (см. рисунок, б). При реализации схемы имитационного моделирования процесса обнаружения воспользуемся следующим представлением модельного времени [2, 10]:

- M_{t_R} — реальное время имитации;
- M_{t_0} — модельное время синхронизации событий;
- $M_{t_{ij}}$ — машинное время имитационного моделирования.



Корректировка временных координат t_i для нескольких блоков схемы ИМ осуществляется с помощью переменной M_{t_0} . В случае совпадения значений t_i реализуются $\{\text{Алг}_{ij}\}_j$ нескольких блоков (т.е. ОЭДЛА регистрирует одновременно несколько реальных событий). Тем самым последовательно обслуживаются $\{\text{Алг}_{ij}\}_j$, совпадающие по одинаковому времени выполнения, но при этом M_{t_0} не изменяется до окончания реализации этих алгоритмов. Таким образом, выполняется последовательность функциональных действий, осуществляемых ОЭДЛА, которые и являются объектом имитации, при этом каждая стадия функционального действия характеризуется номером j , а возможные вариации номером i . Корректировка временной координаты сводится к вычислению нового значения $M_{t_{ij}}$ по формуле $M_{t_{ij}} = M_{t_0} + \tau_{ij}$, которое используется в дальнейшем для определения момента новой активизации имитационной модели блока.

Вариация значений средней облученности \tilde{L} выполнялась для одного шага накопления. В рассматриваемом случае соотношение для \tilde{L} следует представить как среднее значение из N шагов накопления решений „да“, „нет“, например, в соответствии с методикой [4]:

$$\tilde{L} = \frac{1}{N} \sum_1^N \left\langle t_{\min} \nu \frac{\langle \rho \rangle S_{\text{ап}}}{f^2} \cos^4 \beta \int_{\Delta\lambda} \left\{ K_s(\lambda) K_r(\lambda) \left[\frac{1}{\pi} E_z(\lambda, h_s) \nu_{\text{атм}}^{1/\cos\beta}(\lambda) + B_d(\lambda, h_s, \psi) \right] \right\} d\lambda \right\rangle. \quad (4)$$

Оптико-электронный детектор имеет следующие параметры (в том числе, принятые в соотношении (4)): t_{\min} — минимально необходимое время действия облученности для получения одного отсчета (1,46 мс); $N = 7$; ν — интегральный коэффициент пропускания оптики (0,8); $\Delta\lambda$ — регистрируемый спектральный ИК-диапазон; $K_s(\lambda)$ — спектральный коэффициент пропускания оптики (максимальное значение 0,9); $K_r(\lambda)$ — спектральная чувствительность детектора (0,1 Вт/м²); $\langle \rho \rangle$ — среднее альbedo плоскости объекта (0,8); $E_z(\lambda, h_s)$ — спектральная облученность ВсО, зависящая от высоты Солнца h_s (0,2 Вт/м²); $\nu_{\text{атм}}(\lambda)$ — спектральный коэффициент пропускания атмосферы для трассы наблюдения (0,87); $B_d(\lambda, h_s, \psi)$ — спектральная яркость атмосферной дымки, зависящая от высоты Солнца и угла между плоскостью визирования и плоскостью солнечной вертикали (минимально допустимое значение

$1,2 \cdot 10^{-4}$ Вт/м²); β — угол между линией визирования и вертикалью ($4,5^\circ$); $S_{\text{ап}}$ — площадь действующей апертуры ОЭД ($0,03$ м²); f — фокусное расстояние объектива ($0,19$ м); $\varepsilon_{\text{ВсО}}$ — коэффициент, характеризующий ВсО как АЧТ ($0,7$); 2ω — угловое поле ОЭД ($2,5^\circ$).

Обнаружение ВсО в зоне чувствительности ОЭД_{ЛА} приводит к изменению структуры облученности спектрального состава зоны. Любой объект (в том числе, и ВсО) является источником излучения, и практически до 70 % излучения сосредоточено в диапазоне от $0,85 \varepsilon_{\text{ВсО}} \lambda_{\text{max}}$ до $1,15 \varepsilon_{\text{ВсО}} \lambda_{\text{max}}$, где λ_{max} — длина волны излучения, при которой энергия абсолютно черного тела максимальна. В процессе моделирования величины \tilde{L} оптико-физические параметры ОЭД и фона, приведенные выше в скобках, не изменялись.

Имитационное моделирование проводится при условии, что значения априорных плотностей вероятности решений „да“/„нет“ подчиняются закону равной вероятности, и соответственно $C_{00} = C_{11}$, тогда имитационная модель ожидаемых потерь для ОЭД_{ЛА} имеет вид

$$\mathfrak{R}_{0,5} = 0,5 \left\{ (C_{10} + C_{11}) + (C_{00} - C_{10}) \int_{Z_0} B_0 dR + (C_{01} - C_{11}) \int_{Z_0} B_1 dR \right\}, \quad (5)$$

$$(C_{01} - C_{11}) P_{\text{пр}} - (C_{10} - C_{00}) P_{\text{л}} = 0.$$

В результате компьютерного моделирования установлено, что значение $\mathfrak{R}_{\nabla} = \min \{ \mathfrak{R}_{0,5} \}$ достигается при выполнении условия $C_{01} - 2C_{10} = C_{11}$.

Особенности динамики и кинематики полета ВсО накладывают ограничение на число наблюдений, необходимых для принятия решения об обнаружении, но обязательное число отсчетов — $N \geq 3$. В этой связи для повышения достоверности принимаемого решения целесообразно в соотношениях (3) коэффициент риска пропуска цели C_{01} , учитывающий спектрально-энергетическую модель ВсО, определять в соответствии со следующим выражением [11]:

$$C_{01} = 1 - I/\hat{I} = 1 - (2898/\lambda_{\text{max}})^4 T^{-4}, \quad (6)$$

где I — облученность входного зрачка ОЭД, создаваемая ВсО; \hat{I} — интегральная сила излучения ВсО; T — температура ВсО.

В результате проведенных исследований предложен алгоритм коррекции коэффициентов риска при наличии аддитивного гауссового шума и разработана схема имитационного моделирования процесса обнаружения оптико-электронным детектором высокоскоростного объекта с целью выбора коэффициентов C_{00} , C_{10} , C_{11} , C_{01} , обеспечивающих минимизацию ожидаемой величины потерь при использовании критерия Байеса. Практическая реализация алгоритма в оптико-цифровой системе обнаружения высокоскоростных летательных аппаратов позволила повысить эффективность при выборе правильных решений „да“/„нет“ на 12 % [12]. Предложенные алгоритм и имитационная модель справедливы и для критерия Неймана — Пирсона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астапов Ю. М., Васильев Д. В., Заложнев Ю. И. Теория оптико-электронных следящих систем. М.: Наука, 328 с.
2. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции: Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1972.
3. Горелик А. Л., Барабаш Ю. Л., Кривошеев О. В., Эпштейн С. С. Селекция и распознавание на основе локационной информации. М.: Радио и связь, 1990. 240 с.
4. Красильников Н. Н. Теория передачи и восприятия изображений. М.: Радио и связь, 1986. 248 с.

5. Креков Г. М., Кавкянов С. П., Крекова М. М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987.
6. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Современные проблемы инфракрасной техники. М.: Изд-во МИИГАиК, 2011. 84 с.
7. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы „смотрящего“ типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
8. Бакут П. А., Жулина Ю. В., Иванчук Н. А. Обнаружение движущихся объектов / Под ред. П. А. Бакута. М.: Сов. радио, 1980. 288 с.
9. Тяжеев А. И. Оптимизация цифровых детекторов в приемниках по минимуму вычислительных затрат / Поволж. ин-т информатики, радиотехники и связи. Самара, 1994.
10. Демин А. В., Копорский Н. С. Имитационное моделирование информационно-измерительных и управляющих систем. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. 139 с.
11. Демин А. В., Лосев С. В. Алгоритм управления коэффициентами риска тепlopеленгатора // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2014. Вып. 2. С. 94.
12. Демин А. В., Сорокин А. В., Гордеев Д. М., Белянский М. А., Птицына А. С., Шалковский А. Г., Чуриков А. Б., Смолин А. С. Авиационный тепlopеленгатор // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 5. С. 93—98.

Сведения об авторе

Анатолий Владимирович Демин — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра оптико-цифровых систем и технологий; E-mail: dav_60@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-цифровых систем и технологий

Поступила в редакцию
31.08.15 г.

Ссылка для цитирования: Демин А. В. Алгоритм повышения эффективности обнаружения высокоскоростных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 11. С. 915—919.

ALGORITHM TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF HIGH-SPEED OBJECT DETECTION

A. V. Demin

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: dav_60@mail.ru

A scheme of imitation modeling of the process of high-speed aircraft detection with optical-electronic detector and an algorithm for correction of risk factors in the presence of additive Gauss noise are proposed. The approach provides minimization of expected loss value according to the Bayes criterion due to the optimal choice of the risk factors.

Keywords: optical-electronic detector, detection, efficiency, algorithm.

Data on author

Anatoly V. Demin — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Optical and Digital Systems and Technologies; E-mail: dav_60@mail.ru

For citation: Demin A. V. Algorithm to improve the efficiency of high-speed object detection // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 11. P. 915—919 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-11-915-919