

Р. Н. Абдулов, Н. А. Абдуллаев, Х. Г. Асадов

ТЕОРИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ТОЧЕЧНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИЗМЕНЧИВЫХ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЯХ

R. N. Abdulov, N. A. Abdullaev, Kh. G. Asadov

THEORY OF DETECTION OF HIGH-SPEED POINT TYPE OBJECTS UPON CHANGING ATMOSPHERIC CONDITIONS

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является система обнаружения высокоскоростных точечных объектов при изменчивых атмосферных условиях. Предметом исследования является оптимизация обнаружения высокоскоростных точечных объектов при изменчивых атмосферных условиях. Целью исследований является оптимизация всего цикла обнаружения и идентификации высокоскоростных точечных нагретых объектов. *Материалы и методы.* Сформулирована и решена математическая задача оптимизации, смысл которой заключается в достижении максимально возможной величины усредненного сигнала принимаемого от объекта ИК обнаружителем при принятой модели изменения оптической толщины атмосферы. *Результаты.* На основании решения сформулированной оптимизационной задачи с применением теории вариационного исчисления сделан вывод о возможности реализации более безопасного режима обнаружения и идентификации объекта при выявленной благоприятной атмосферной обстановке. *Выводы.* Основной вывод проведенных исследований заключается в выяснении дополнительной возможности организации более безопасного обнаружения и идентификации высокоскоростного нагретого объекта за счет введения адаптивного режима всего цикла идентификации объекта.

A b s t r a c t. *Background.* The object of researches is the system for detection of high-speed point-type objects upon changing atmospheric conditions. The subject of researches is the optimization of detection of high-speed point type objects in changing atmospheric conditions. The aim of researches is optimization of whole cycle of detection and identification of high-speed point type heated objects. *Materials and methods.* The mathematical task of optimization that is reaching the maximum value of averaged value of signal received from the object by infrared detector upon accepted model of variation of atmospheric optical depth is formulated and solved. *Results.* On the basis of solution of formulated optimization task using the variation calculation theory the resolution on feasibility of realization of more safety regime for detection and identification of object upon revealed auspicious atmospheric condition is drawn. *Conclusions.* The concluded major outcome of held researches is that the additional possibility for organization of more safety detection and identification of high-speed heated is found due to realization of adaptive regime of object identification.

К л ю ч е в ы е с л о в а: оптимизация, обнаружение, идентификация, инфракрасное излучение, атмосфера, оптическая толщина.

К e y w o r d s: optimization, detection, identification, infrared radiation, atmosphere, optical depth.

Вопросам оптимизации обнаружения и сопровождения высокоскоростных точечных объектов различного назначения в настоящее время уделяется значительное внимание (см. напр. [1–7]). При этом в литературе уделяется внимание в основном частным вопросам обнаружения и сопровождения таких объектов. Так, например, в работе [1] рассмотрены вопросы синтеза оптимального фильтра для достоверного обнаружения нагретых малоразмерных летательных объектов, а в работе [2] того же автора исследуется влияние фона на достоверность их обнаружения.

В работе [3] на основе анализа процессов пассивного обнаружения нагретых движущихся малоразмерных объектов в инфракрасном (ИК) диапазоне показано, что обнаружение нагретых точечных объектов целесообразно проводить в спектральном диапазоне 8–14 мкм, и с этой целью могут быть применены тепловизоры с неохлаждаемыми фотоприемными устройствами. В работе [4] рассмотрены вопросы создания математической модели процесса формирования инфракрасного излучения объекта в условиях естественного фонового излучения. Показано, что соответствующая модель должна учитывать комплексный характер ИК излучения объекта, обусловленного собственным и отраженным излучением. При этом такая модель также должна учитывать особенности спектральных оптических характеристик поверхности объекта на суммарное эффективное излучение. В работе [5] проанализированы вопросы влияния пропускания атмосферы на достоверность пеленгации высокоскоростных летательных объектов в оптическом диапазоне спектра. Сообщается о разработке инвариантной по отношению к дальности видимости модели оценки коэффициента пропускания атмосферы при мониторинге объектов. В работе [6] убедительно показано, что ИК диапазон 8–14 мкм является не абсолютно прозрачным из-за наличия достаточно сильных поглощений различных малых газов на краях указанного диапазона. В работе [7] изложена предлагаемая методика расчета радиационного контраста наземных объектов в ИК диапазоне. Показано, что применение мер теплоизоляции позволяет существенно уменьшить радиационный контраст в диапазонах 3–5 и 8–14 мкм.

Вместе с тем существующие результаты детального анализа различных аспектов обнаружения и сопровождения малоразмерных нагретых летательных объектов должны быть дополнены общей теорией оптимизации процесса обнаружения таких объектов и их сопровождения в условиях нестабильности атмосферного воздействия. В настоящей статье будут проанализированы вопросы оптимизации обнаружения в условиях нестабильной атмосферы и сопровождения нагретых летательных точечных объектов в пределах заданного геометрического промежутка, размещенного между удаленным объектом и обнаружителем.

Общая схема обнаружения высокоскоростного малоразмерного нагретого объекта с помощью ИК камеры показана на рис. 1. Задача обнаружения объекта ставится следующим образом. задается интервал A_1A_2 , где должна быть определена траектория полета объекта и выполнено его распознавание. Точка A_1 является левой предельной точкой, где процесс обнаружения должен быть завершен и дальнейший полет объекта в направлении обнаружителя непозволителен.

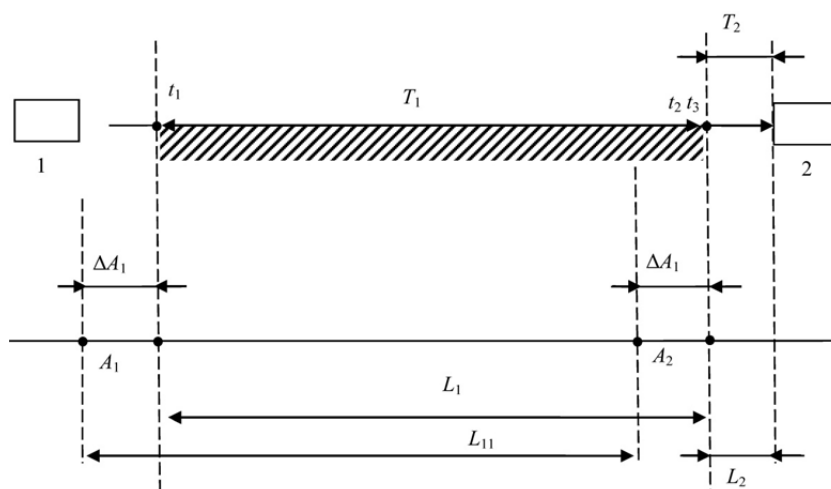


Рис. 1. Общая схема обнаружения и сопровождения нагретого точечного летательного объекта с помощью ИК камеры. Цифрами обозначены: 1 – точечный нагретый летательный объект; 2 – ИК обнаружитель. Буквенные обозначения: A_1 – предельная точка завершения обнаружения; A_2 – предельная точка завершения идентификации объекта

Рассматривается случай нестабильной атмосферы, где оптическая толщина в течение интервала t_2-t_1 на исследуемой дистанции может как увеличиться, так и уменьшиться.

Очевидно, что с позиции обнаруживающей стороны целесообразно сместить точки A_1 и A_2 влево на равные шаги ΔA_1 , чтобы гарантированно обезопасить себя от летательного объекта.

Рассмотрим базовые положения предлагаемой методики оптимизации.

Геометрический показатель L_1 определяется как

$$L_1 = V_{ob} T_1 = V_{ob} (t_2 - t_1). \quad (1)$$

Принимаем, что удельная оптическая толщина атмосферы в интервале $T_1 = t_2 - t_1$ изменяется равновероятным образом по следующим выражениям (рис. 2):

$$\tau(t) = \tau_{\max} - kt, \quad (2)$$

$$\tau(t) = \tau_{\min} + kt, \quad (3)$$

где

$$t_1 \leq t \leq t_2. \quad (4)$$

При этом

$$\int_0^{T_1} \tau(t) dt = C_1, \quad (5)$$

где

$$C_1 = \text{const}. \quad (6)$$

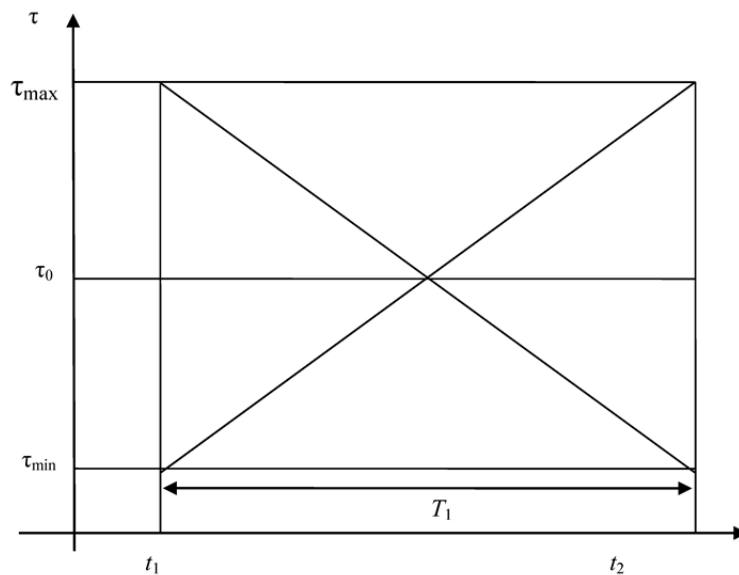


Рис. 2. Графики функций (2) и (3)

Согласно закону Бугера – Бера, а также закону обратных квадратов расстояния от точечного источника до приемника [8] при нахождении объекта на интервале T_1 имеем

$$I_{\text{вх}}(t, A_1) = \frac{I_0 e^{-V_{ob} \tau(t)}}{V_{ob} (T_1 - t)^2}, \quad (7)$$

где

$$t_2 - t_1 = T_1. \quad (8)$$

Среднее значение $I_{\text{вх}}$ в интервале t_2-t_1 вычислим как

$$I_{\text{вх.ср.}} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} \frac{I_0}{V_{ob}(T_1-t)^2} e^{-V_{ob}(T_1-t)\tau(t)} dt. \quad (9)$$

С учетом выражений (5) и (9) можем составить полный функционал безусловной вариационной оптимизации

$$F = \int_0^{T_1} F_1(T_1, t_1, t_2, V_{ob}, \tau(t)) dt = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} \frac{I_0 e^{-V_{ob}(T_1-t)\tau(t)}}{V_{ob}(T_1-t)^2} dt + \lambda \int_0^{T_1} \tau(t) dt. \quad (10)$$

Смысл проводимой оптимизации заключается в нахождении такой функции $\tau(t)$, при которой F достиг бы экстремального значения. Согласно уравнению Эйлера [9, 10] оптимальная функция $\tau(t)_{opt}$ должна удовлетворить условия

$$\frac{dF_1(T_1, t_1, t_2, V_{ob}, \tau(t))}{d\tau(t)} = -\frac{I_0 e^{-V_{ob}\tau(t)}}{T_1[V_{ob}(T_1-t)]} + \lambda = 0. \quad (11)$$

Из выражения (11) получим

$$e^{-V_{ob}\tau(t)} = \frac{\lambda T_1[V_{ob}(T_1-t)]}{I_0}. \quad (12)$$

Логарифмируя выражение (12), получим

$$\tau(t) = \frac{1}{V_{ob}(T_1-t)} \ln \frac{I_0}{\lambda T_1[V_{ob}(T_1-t)]}. \quad (13)$$

С учетом (5) и (13) имеем

$$\int_0^{T_1} \frac{1}{V_{ob}(T_1-t)} \ln \frac{I_0}{\lambda T_1[V_{ob}(T_1-t)]} dt = C_1. \quad (14)$$

Выражение (14) позволяет вычислить величину множителя Лагранжа. Опустив математические подробности вычисления этой постоянной величины и обозначив ее как λ_0 , выражение (13) запишем как

$$\tau(t) = \frac{1}{V_{ob}(T_1-t)} \ln \frac{I_0}{\lambda_0 T_1[V_{ob}(T_1-t)]}. \quad (15)$$

Таким образом, при условии (15) функционал (10), обозначающий среднюю величину усредненного сигнала получаемого от объекта, при нахождении его в интервале t_1-t_2 достигает экстремального значения. Для проверки типа экстремума достаточно вычислить вторую производную интегранта в (10) и убедиться, что она всегда положительна.

Следовательно, функционал (10) при условии (13) достигает минимальной величины. Отсюда можно сделать логический вывод о том, что для увеличения средней величины функционала (10) необходимо обеспечить обратно пропорциональную зависимость между τ и t , т.е. модель (2) более благоприятна в рассматриваемых целях. Некоторый прирост величины $I_{\text{вх.ср.}}$, получаемый при этом, можно интерпретировать как возможность некоторого смещения всего интервала T_1 влево, как это условно показано на рис. 1, на величину ΔA_1 .

Таким образом, показано, что оптимизация процесса обнаружения малоразмерных высокоскоростных нагретых объектов позволяет несколько повысить безопасность всего цикла их обнаружения и идентификации в случае наличия благоприятных атмосферных условий.

В заключение сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования:

1) сформирована общая задача оптимизации всего цикла обнаружения и идентификации высокоскоростных точечных нагретых объектов;

2) сформулирована и решена математическая задача оптимизации, смысл которой заключается в достижении максимально возможной величины усредненного сигнала, принима-

емого от объекта ИК обнаружителем при принятой модели изменения оптической толщины атмосферы;

3) на основании решения сформулированной оптимизационной задачи сделан вывод о возможности реализации более безопасного режима обнаружения идентификации объекта при выявленной благоприятной атмосферной обстановке.

Библиографический список

1. Kim, S. Double layered background removal filter for detecting small infrared targets in heterogeneous backgrounds/ S. Kim // Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves.– 2011. – Vol. 32, № 1. –P. 79–101.
2. Kim, S. Analysis of Infrared Signature Variation and Robust Filter Based Supersonic Target Detection. Research Article. Hindawi Publishing Corporation / S.Kim, S. G. Sun, K. T. Kim // The Scientific World Journal. – 2014. – ID 140930. – 17 p. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3942398/pdf/TSWJ2014-140930.pdf>
3. Головкин, В. А. Обнаружение нагретых движущихся малоразмерных объектов в ИК диапазоне / В. А. Головкин, В. Н. Емельянов, С. В. Солк // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2013. – Т. 56, № 5. – С. 40–44.
4. Кучерин, Р. Н. Математическая модель формирования инфракрасного излучения объекта в условиях естественного фонового излучения / Р. Н. Кучерин, В. И. Лопин, А. В. Лопин, О. Ю. Макаров. – <https://cyberleninka.ru/article/n/matematiceskaya-model-formirovaniya-infrakrasnogo-izlucheniya-obekta-v-usloviyah-estestvennogo-fonovogo-oblucheniya>
5. Демин, А. В. Инвариантная модель для оценки коэффициента пропускания атмосферы при мониторинге объектов в оптическом диапазоне спектра / А. В. Демин, М. И. Моисеева // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 1 (77). – С. 10–15.
6. Пропускание излучения атмосферой – Системы тепловидения. – URL: <http://leg.co.ua/arhiv/raznoe-arhiv/sistemy-teplovideniya-7.html>
7. Афанасьева, Е. М. Аналитическая методика и результаты расчета радиационного контраста наземных объектов в инфракрасном диапазоне длин волн / Е. М. Афанасьева, В. Г. Кечков. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiticheskaya-metodika-i-rezultaty-rascheta-radiatsionnogo-kontrasta-nazemnyh-obektov-v-infrakrasnom-diapazone-dlin-voln>
8. Мирошников, М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов / М. М. Мирошников. – Л. : Машиностроение, 1983. – 696 с.
9. Эльсгольц, Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л. Э. Эльсгольц. – М. : Наука, 1974. – 432 с.
10. Васильев, Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач / Ф. П. Васильев. – М. : Наука, 1988. – 552 с.

Абдулов Рауф Нусрат оглы

кандидат технических наук,
заместитель главного инженера,
НИИ Министерства оборонной промышленности
Азербайджанской Республики
(Азербайджанская Республика,
г. Баку, ул. Рахиба Мамедова, 9)
E-mail: rauf.abdulov@yandex.ru

Abdulov Rauf Nusrat oglu

candidate of technical sciences,
deputy chief engineer,
Research Institute of Ministry of Defense Industry
of Azerbaijan Republic
(9 Rahib Mammadov street, Baku,
Republic of Azerbaijan)

Абдуллаев Новруз Алмамед оглы

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
НИИ Министерства оборонной промышленности
Азербайджанской Республики
(Азербайджанская Республика,
г. Баку, ул. Рахиба Мамедова, 9)
E-mail: nabdullayev@mail.ru

Abdullaev Novruz Almamed ogly

candidate of technical sciences,
senior researcher,
Research Institute of Ministry of Defense Industry
of Azerbaijan Republic
(9 Rahib Mammadov street, Baku,
Republic of Azerbaijan)

Асадов Хикмет Гамид оглы

доктор технических наук, профессор,
НИИ Аэрокосмической информатики
Национального аэрокосмического агентства
(Азербайджанская Республика,
г. Баку, ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: asadzade@rambler.ru

Asadov Khikmet Gamid ogly

doctor of technical sciences, professor,
Research Institute of Aerospace Informatics
of National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundov street, Baku,
Republic of Azerbaijan)

УДК 623.55.022; 681.7.015.2; 681.7.067

Абдулов, Р. Н.

Теория обнаружения высокоскоростных точечных объектов при изменчивых атмосферных условиях/ Р. Н. Абдулов, Н. А. Абдуллаев, Х. Г. Асадов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 4 (22). – С. 44–49. DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-6.