УДК 612.55.022

Оптимальное обнаружение динамических объектов в инфракрасном диапазоне методом парного детектирования

Optimum detection of dynamic objects in infrared band using method of pairwise detection

Агаев / Agayev F.
Фахраддин Гюльали оглы
(Direktor-tekti@mail.ru)
доктор технических наук, профессор.
Институт космических исследований природных ресурсов Национального аэрокосмического агентства, директор.
г. Баку, Азербайджанская Республика

Алиева / Alieva G.
Гюнель Вагиф гызы
(celilova.gunel@mail.ru)
кандидат технических наук.
Институт космических исследований природных ресурсов Национального аэрокосмического агентства, начальник отдела.
г. Баку, Азербайджанская Республика

Асадов / Asadov H.
Хикмет Гамид оглы
(asadzade@rambler.ru)
доктор технических наук, профессор, иностранный член Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова.
Национальное аэрокосмическое агентство, начальник отдела НИИ Аэрокосмической информатики.
г. Баку, Азербайджанская Республика

Ключевые слова: инфракрасное излучение – infrared radiation; оптимизация – optimization; двухдетекторное обнаружение – two-detector detection; приемник сигнала – signal receiver; функционал – functional.

Рассматривается задача оптимального двухдетекторного обнаружения летательного объекта, нацеленного на противоположную сторону, ведущую наблюдение за объектом в инфракрасном диапазоне. Составлена и решена задача определения оптимальной функциональной зависимости приемного сигнала от расстояния между объектом и принимающей стороной. Решение данной задачи показало, что интегрированный по расстоянию комбинированный сигнал, получаемый от пары приемников на приемной стороне, достигнет минимума, если принимаемый сигнал будет в обратном порядке зависеть от расстояния, пройденного наблюдаемым объектом, что физически соответствует заходу двигающегося объекта в зону с разряженным воздухом.

The problem of optimal two-detector detection of an approaching object aimed at the opposite side, leading the observation of the object in the infrared range, is considered. The problem of determining the optimal functional dependence of the receiving signal on the distance between the object and the receiving side is formulated and solved. The solution of this problem showed that the distance-integrated combined signal received from a pair of receivers on the receiving side will reach a minimum if the received signal depends in reverse order on the distance traveled by the observed object, which physically corresponds to the entry of a moving object into a zone with discharged air.

Введение

Задача обнаружения точечных летательных объектов имеет значительную актуальность при построении систем защиты зданий, сооружений или технических средств от контакта с такими объектами. Например, своевременное обнаружение предмета противника, приближающегося к защищаемым сооружениям, позволяет оперативно запустить систему активной защиты для устранения потенциальной угрозы. Схематическое представление процесса взаимодействия такого объекта в виде приближающегося предмета и детектора излучения обороняющейся стороны приведено на рис. 1.

Очевидно, что процесс взаимодействия двух сторон, т. е. приближающегося предмета и обороняющейся стороны, происходит в открытой среде, т. е. в пределах атмосферы, что послужило основой для появления значительных исследований, посвященных роли атмосферы в данном процессе [1–5].

Разумно предположить, что приближающийся предмет, движущийся с околозвуковой или сверхзвуковой скоростью, оказывается достаточно нагретым из-за трения об атмосферу и должен быть охарактеризован точечной инфракрасной сигнатурой. В качестве основы рассмотрим соответствующую модель, связывающую все факторы, воздействующие в процессе приближения предмета к цели [6].

4 2023.indd 103 13.12.2023 15:56:00

$$\Delta V = G \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_d(\lambda) \frac{I(\lambda, \Delta T) \cdot A_0}{R^2} \cdot PVF \cdot \cdot \tau_0(\lambda) \cdot T_{atm}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

где: $I(\lambda, \Delta T)$ – радиационная интенсивность приближающегося предмета на длине волны λ при наличии температурной разницы ΔT между приближающимся предметом и фоном;

R – расстояние между ИК камерой обороняющейся стороны и приближающимся предметом;

ΔV – сигнал на выходе термального детектора;

T_{atm} (λ) – пропускание атмосферы;

A_0 – входная апертура ИК камеры;

$\tau_0(\lambda)$ – оптическое пропускание ИК камеры;

PVF – коэффициент видимости точечного объекта;

λ_1, λ_2 – граничные длины волн оптического диапазона;

$R_d(\lambda)$ – чувствительность детектора;

G – коэффициент усиления детектора.

В работе [6] было показано, что если воспользоваться усредненными величинами пропускания атмосферы и оптики приемника, а также чувствительности детектора, то выражение (1) можно упростить и записать в следующем виде:

$$\Delta V = \Delta I \cdot T_{atm} \frac{A_0}{R^2} \cdot \tau_0 PVF \cdot R_d \cdot G. \quad (2)$$

Выражение (2) можно представить в более компактной форме

$$\Delta V = \frac{\Delta I \cdot T_{atm} \cdot A_0 \cdot C}{R^2}, \quad (3)$$

где $C = PVF \cdot R_d G$ =const.

Таким образом, обработке и анализу предстоит сигнал, определяемый выражением (3), для обработки которого используется фильтр и аналого-цифровой преобразователь. Вместе с тем разумно предположить, что на приемной стороне будет осуществлено интегрирование сигнала в некотором диапазоне (R_1–R_2) перемещения приближающегося предмета для усиления отношения сигнал/шум. Следовательно, необходимо исследовать те оптимальные соотношения, которые появляются в связи с дальнейшей обработкой сигнала.

Материалы и методы

В настоящей работе нами предлагается двухдетекторная схема обнаружения летательного объекта в инфракрасном диапазоне. Хорошо известно, что фотоприемные устройства, работающие на основе явления фотоэффекта, являются по сути преобразователем потока оптического сигнала – ток или напряжение электрического сигнала. Следовательно, чтобы сформировать преобразователь типа «мощность оптического сигнала – мощность электрического сигнала», следует применить два параллельно работающих фотодетектора и далее осуществить перемножение сигналов фотодетекторов. Эквивалентная схема предлагаемого устройства приема показана на рис. 2.

Если обозначить сигнал U_1 на выходе первого детектора, то

$$U_1 = K_1 \cdot \Phi, \quad (1)$$

где Ф – поток ИК излучения на входе детекторов.

Соответствующим образом для второго детектора имеем

$$U_2 = K_2 \cdot \Phi. \quad (2)$$

При K_1=K_2 из (1) и (2) получим

$$U_1 \cdot U_2 = U^2_{\text{вых}} = (K \cdot \Phi)^2. \quad (3)$$

Таким образом, представим $U^2_{\text{вых}}$ в виде мощностного сигнала на выходе всего комплекса, приняв известное соотношение

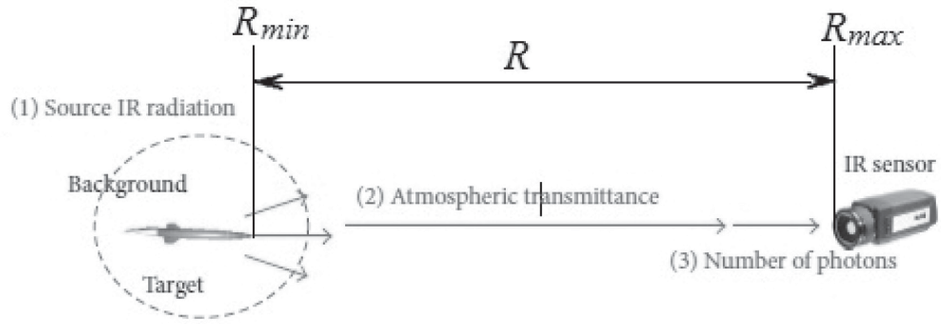

Рис. 1. Схематическое представление взаимодействия приближающегося предмета и приемных узлов обороняющейся стороны

4 2023.indd 104 13.12.2023 15:56:01

$$P_{\text{вых}} = U^2_{\text{вых}} / R_{\text{Н}}, \quad (4)$$

где $U^2_{\text{вых}}$ – выходной сигнал перемножителя.

С учетом (3) и (4) получим, приняв

$$U_{\text{вых}} = \Delta V \quad (5)$$

$$\frac{U^2_{\text{вых}}}{R_{\text{н}}} = \left(\frac{\Delta I \cdot T_{atm} \cdot A_0 \cdot C}{R} \right)^2, \quad (6)$$

Из (6) получим

$$\Delta I^2 = \frac{U_{\text{вых}}(R)^2 \cdot R}{R_{\text{н}} \cdot T_{atm} \cdot A_0 \cdot C}. \quad (7)$$

где учитываем $U_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}(R)$.

Таким образом, на выходе двухдетекторного приемника имеем сигнал (7). Интегрируя (7) в диапазоне ($R_{\min}$–$R_{\max}$), получим

$$\Phi = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \Delta I^2 dR = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \frac{U^2(R) \cdot R}{R_{\text{н}} \cdot T_{atm} \cdot A_0 \cdot C} dR, \quad (8)$$

где $R_{\min}$ – расстояние до точки контакта приближающегося предмета с целью;

Ф – суммарный принимаемый сигнал.

Очевидно, что чувствительность двухдетекторного приемника будет намного лучше, чем однодетекторного, так как для двухдетекторного имеем

$$\frac{d\Phi}{dR} = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \left[\frac{2U(R) \cdot U'(R) \cdot R + U^2(R)}{R_{\text{н}} \cdot T_{atm} \cdot A_0 \cdot C} \right] dR,$$

что существенно выше чувствительности однодетекторного приемника.

Учитывая возможные воздействия случайных факторов (турбулентность, влияние ветра и т. д.), можно наложить на функцию $U(R)$ следующее ограничительное условие:

$$\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} U(R) dR = C_2; \quad C_2 = \text{const}. \quad (9)$$

Отметим, что условие (9) физически интерпретируется следующим образом. Если атмосферный воздух плотнее на начальном участке полета объекта, чем на конечном участке, то температура объекта на втором участке полета будет снижаться. Соответственно, сигнал от объекта будет уменьшаться во времени. Однако если плотность воздуха по мере продвижения объекта к приемной стороне возрастает, то температура объекта будет увеличиваться, соответственно тому увеличится и тепловой сигнал, принятый от объекта. Следовательно, можно считать, что суммарный по пути сигнал в этих двух рассмотренных случаях будет неизменным, т. е. равным постоянной величине. С учетом (8) и (9) сформируем следующий целевой функционал вариационной оптимизации F

$$F = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \frac{U^2(R) \cdot R}{R_{\text{н}} \cdot T_{atm}} dR + \lambda \left[\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} U(R) dR - C_2 \right], \quad (10)$$

где λ – множитель Лагранжа.

Для решения оптимизационной задачи (10) воспользуемся методом Эйлера, согласно которому оптимальный вид искомой функции должен удовлетворять условию

$$\frac{d\left\{ R \frac{U^2(R) \cdot R}{R_{\text{н}} \cdot T_{atm}} + \lambda dR \right\}}{dU(R)} = 0. \quad (11)$$

Из (11) получаем

$$\frac{2U(R) \cdot R}{R_{\text{н}} T_{atm}} + \lambda = 0. \quad (12)$$

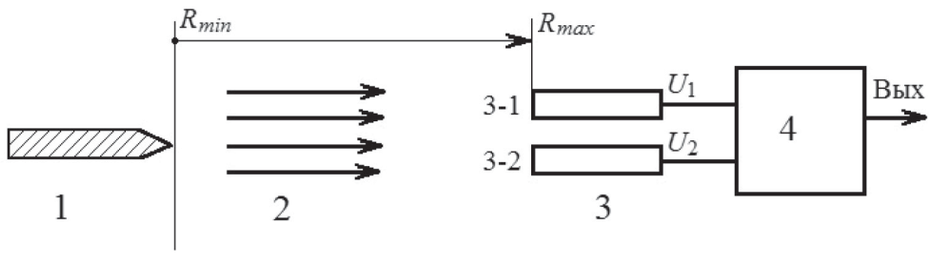

Рис. 2. Схема двухдетекторного приема инфракрасного излучения: 1 – приближающийся предмет; 2 – ИК излучение; 3-1, 3-2 – пара приемников; 4 – перемножитель

4 2023.indd 105 13.12.2023 15:56:02

Из выражения (12) находим

$$U(R) = -\frac{\lambda \cdot R_н \cdot T_{atm}}{2R}. \quad (13)$$

С учетом (9) и (13) получим

$$-\int_{R_{min}}^{R_{max}} \frac{2R_н T_{atm}}{2R} dR = C_2. \quad (14)$$

Из (14) находим

$$\lambda = -\frac{C_2}{\int_{R_{min}}^{R_{max}} \frac{R_н \cdot T_{atm}}{2R} dR} = -\frac{C_2}{\frac{R_н \cdot T_{atm}}{2} \ln\left(R_{max}/R_{min}\right)}. \quad (15)$$

С учетом (13) и (15) запишем

$$U(R) = \frac{R_н \cdot T_{atm}}{2R} \cdot \frac{C_2 \cdot 2}{R_н \cdot T_{atm} \ln\left(R_{max}/R_{min}\right)} = \frac{C_2}{R \cdot \ln\left(R_{max}/R_{min}\right)} = \frac{C_2}{R \cdot \ln\left(R_{max}/R_{min}\right)}. \quad (16)$$

При решении (16) целевой функционал (11) достигает минимума, т. к. вторая производная интегранта (10) всегда имеет плюсовой знак.

Согласно (16) в худшем режиме слежения объекта приемный детектор при малых R должен принимать большой сигнал и наоборот. При этом общий масштаб принимаемого сигнала обратно пропорционален величине $\ln(R_{max}/R_{min})$. Очевидно, что на практике этого наихудшего режима следует максимально избегать.

Заключение

Сформулирована и решена задача оптимального двухдетекторного обнаружения летательного объекта, нацеленного на противоположную сторону, ведущую наблюдение за полетом объекта в инфракрасном диапазоне. В качестве основы в работе использована известная модель, отображающая зависимость величины принимаемой интенсивности излучения объекта от различных воздействующих факторов, включая расстояние между объектом и приёмным радиометром.

С учетом ограничения налагаемого на функцию зависимости приемного сигнала от указанного расстояния составлена вариационная задача определения оптимального вида этой функции. Решение данной задачи показало, что интегральный сигнал, получаемый от пары приемников на атакуемой стороне, может достичь минимума, если принимаемый сигнал будет в обратном порядке зависеть от расстояния, пройденного атакующим объектом.

Литература

1. Jacobs, P. A. Thermal Infrared Characterization of Ground Targets and Backgrounds / P.A. Jacobs. – Bellingham : SPIE Press, 2006. – 190 p.

2. Optical characterisation of small surface targets / P.B.W. Schwering, D.F. Bezuidenhout, W.H. Gunter [et al.] // Electro-Optical Remote Sensing, Detection, and Photonic Technologies and Their Applications : proceedings of SPIE (Florence, Italy, 17–20 September, 2007). – 2007. – Vol. 6739. – P. 14.

3. IRST infrared background analysis of bay environments / P.B.W. Schwering, D.F. Bezuidenhout, W.H. Gunter [et al.] // Infrared Technology and Applications XXXIV : proceeding of SPIE (Orlando, Fla, USA, March 2008). – 2008. – Vol. 6940. – P. 69401E.

4. Optical characteristics of small surface targets, measured in the False Bay, Souith Africa; June 2007 / A.N. de Jong, P.B.W. Schwering, P.J. Fritz, W.H. Gunter // Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XX : proceeding of SPIE (Orlando, Fla, USA, April 2009). – 2009. –Vol. 7300.

5. Holst, G. C. Electro-Optical Imaging System Performance / G.C.Holst. – Bellingham : SPIE Press, 2008. – 538 p.

6. Kim, S. Analysis of Infrared Signature Variation and Robust Filter-Based Supersonic Target Detection / S. Kim, S.-G. Sun, K.-T. Kim // The Scientific World Journal. – 2014. – Vol. 2014.

7. Эльсгольц, Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л.Э. Эльсгольц. – Москва : Наука, 1974. – 472 с.

8. Бояринов, А. И. Методы оптимизации в химической технологии / А.И. Бояринов, В.В. Кафаров. – Москва : Химия, 1975. – 576 с.

4 2023.indd 106 13.12.2023 15:56:02