

УДК 536.5:004.02

ПОСЛОЙНЫЙ ИНФРАКРАСНЫЙ СИГНАТУРНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТОВ

Алиева Гюнель Вагиф гызы¹,

канд. техн. наук,

e-mail: gunelcalilova@mail.ru,

¹Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика

Статья посвящена пассивным информационным системам, применяемым для идентификации удаленных объектов в инфракрасном диапазоне волн на основе термальных сигнатур. Отмечается, что объективной характеристикой объекта, свободной от влияния фоновых излучений, является термальный контраст. Однако для идентификации тепловых объектов часто важно получение не интегральных оценок инфракрасной сигнатуры объекта, а пространственной структуры этой сигнатуры на наблюдаемой поверхности. В таких случаях основным информационным признаком для идентификации типа объекта является именно двухмерный закон распределения, определяемый поверхностной температурой, а не интегральный показатель излучаемого объектом радиационного потока. Предлагается метод анализа распределения температуры на поверхности удаленного объекта, формирование на изображении зон равной температуры и использование результатов обработки полученной информации для идентификации объекта. Для формирования указанных зон (слоев, сегментов) выбирается базовый элемент и для сравнения элементов изображения используется компаратор, что позволяет сократить время обработки за счет исключения операций отбора элементов изображения равной температуры.

Ключевые слова: инфракрасное излучение, сигнатура, температура, поверхность объекта, обработка данных

LAYERWISE INFRARED SIGNATURE METHOD FOR MONITORING THE SURFACE TEMPERATURE OF OBJECTS

Aliyeva G.V.¹,

candidate of technical sciences,

e-mail: gunelcalilova@mail.ru,

¹National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan

The article is devoted to passive information systems used to identify remote objects in the infrared infrared wavelengths based on calculated thermal signatures. It is noted that the objective characteristic of an object free from the influence of background radiation is thermal contrast. However, in order to identify thermal objects, it is often important to obtain not integral estimates of the IR signature of an object, but the spatial structure of this signature on the observed surface. In such cases, the main information feature for identifying the type of object is precisely the two-dimensional distribution law determined by the surface temperature, and not the integral indicator of the radiative flux emitted by the object. A method for analyzing the temperature distribution on the surface of a remote object, forming equal temperature zones on the image and using the results of processing the received information is proposed to identify the object. In order to form these zones (layers, segments), a base element is selected and a comparator is used to compare the image elements, which reduces processing time by eliminating the selection operations of image elements of equal temperature.

Keywords: infrared radiation, signature, temperature, object surface, data processing

DOI 10.21777/2500-2112-2023-2-93-99

Введение

Как отмечается в работе [1], инфракрасные информационные системы, применяемые для идентификации термальных удаленных объектов, в принципе являются пассивными системами и сильно подвержены влиянию погодных условий. Кроме этого, информативность инфракрасных изображений, выделенных такими системами, также зависит от фоновых излучателей, временного фактора, температуры и влажности воздуха.

Согласно [2], необходимость в точном обнаружении объектов с очень малым излучением требует проведения модификации способов обнаружения, использующих стратегию динамической модификации спектра. При этом классические системы обнаружения на основе фиксированной спектральной характеристики не способны эффективно обнаруживать «стелс» объекта из-за влияния таких факторов, как собственное излучение Земли и атмосферное ослабление оптической радиации. Согласно [3; 4], инфракрасная сигнатура летательных объектов не является статическим показателем и зависит от таких факторов, как форма и размеры объекта, температура, излучательность, переотражение внешних излучателей, время дня и др.

В работе [5] отмечается важность разработки специальных поверхностных материалов, позволяющих управлять инфракрасной сигнатурой путем выработки таких свойств, как спектрально-селективное отражение, малая степень поляризации, низкая инфракрасная излучаемость, управляемость оптическими характеристиками.

Вышеизложенное указывает на необходимость разработки новых сигнатурных характеристик тепловых объектов, максимально объективно характеризующих состояние самого объекта, а не источников фоновых излучений. Одной из таких характеристик является термальный контраст. Согласно [6; 7], термальный контраст определяется как

$$C = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda_1, T} * M_{\lambda, T} d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda_1, B} * M_{\lambda, B} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda_1, T} * M_{\lambda, T} d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda_1, B} * M_{\lambda, B} d\lambda}, \tag{1}$$

где ε – коэффициент спектральной эмиссии;

λ – длина волны оптической радиации;

M_{λ} – спектральная плотность радиационного потока абсолютно черного тела ($Вт \cdot м^{-2} \cdot мкм^{-1}$), определяемая законом Планка в виде

$$M_{\lambda} = \lambda^5 \left[\frac{C_1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \right], \tag{2}$$

где C_1 – первая радиационная постоянная, $C_1 = 3,74T \cdot 10^8 Вт \cdot м^{-2} \cdot мкм^4$;

C_2 – вторая радиационная постоянная, $C_2 = 1,44 \cdot 10^4 мкм \cdot К$;

T – температура объекта.

Выражения (1) и (2) позволяют определить минимально обнаруживаемую температуру, характеризующую требование к предельной способности термальных камер, используемых для обнаружения термальных объектов [8].

Как отмечается в известной монографии Ж. Госсорга [9], инфракрасная сигнатура объектов является важной характеристикой для обнаружения целей и обработки полученных данных. Согласно [9], в случае инфракрасной сигнатуры речь может идти о следующем:

- тепловом изображении или температурной карте;
- интегральной или спектральной силе излучения;
- распределении силы излучения в пространстве;
- статистических характеристиках тепловой картины.

Наиболее устоявшееся определение, на наш взгляд, было дано в работе [10]. Согласно этой работе, инфракрасная сигнатура S определяется в качестве контраста радиационной (излучательной) интенсивности в виде

$$S = \Delta I = I_T - I_B,$$

где $I_T = \varepsilon_T \cdot L_{T0} \cdot A_T$ – интенсивность излучения объекта;

$I_B = \varepsilon_B \cdot L_{B0} \cdot A_B$ – интенсивность излучения фона;

ε_T и ε_B – излучательная способность объекта (коэффициент теплового излучения) и фона соответственно;

$L_{T0} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_T(\lambda) \cdot d\lambda$, $L_{B0} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_B(\lambda) \cdot d\lambda$ – энергетические плотности потока излучения объекта и фона;

L_T, L_B – мощности излучения, соответственно, объекта и фона (или спектральные поверхностные плотности потока излучения);

A_T, A_B – площади, соответственно, объекта и фона в поле зрения приемника.

Вместе с тем, часто для идентификации тепловых объектов важно получение не интегральных оценок инфракрасной сигнатуры объекта, а пространственной структуры этой сигнатуры на наблюдаемой поверхности. Например, в зависимости от места расположения двигателя поверхностная температура транспортного средства обычно распределена неравномерно. В таких случаях основным информационным признаком для идентификации типа объекта является именно двухмерный закон распределения, определяемый поверхностной температурой, а не интегральный показатель излучаемого объектом радиационного потока.

Далее в настоящей статье излагается предлагаемый метод послойного инфракрасного сигнатурного анализа. Суть предлагаемого метода заключается в формировании слоев (сегментов) термального изображения, состоящих из пикселей с одинаковой температурой, путем выделения эталонного пикселя и дальнейшего выравнивания потоков с эталонного и остальных пикселей путем подбора длин волн у последних. Такое выравнивание позволяет вычислить температуру остальных, неэталонных пикселей, и далее составить слои (сегменты) анализируемого термального объекта.

Предлагаемый метод

Прежде всего, отметим известный факт о том, что при выполнении условия $\lambda < 5 \cdot 10^3 \text{ ВТм}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-4}$, закон Планка несколько упрощается и приобретает форму закона Вина в виде выражения (3)

$$M(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) \right]} \quad (3)$$

Рассмотрим в простейшем случае пассивно сканируемую двухмерную поверхность идентифицируемого объекта (рисунок 1). Примем, что поверхность объекта равномерно разделена на равные пиксели в виде прямоугольников.

T_{x11}	T_{x12}	T_{x13}	T_{x1n}
T_{x21}	T_{x22}	T_{x23}	T_{x2n}
T_{x31}	T_{x32}	T_{x33}		T_{x3n}
....
T_{xn1}	T_{xn2}	T_{xn3}	T_{xnn}

Рисунок 1 – Разбиение двухмерной поверхности идентифицируемого объекта на равные по площади пиксели

Предлагаемый метод относительного послойного инфракрасного сигнатурного анализа предусматривает выполнение следующих шагов:

1. Выделение базового элемента на поверхности объекта:
 - а) в виде одного из показанных на рисунке 1 пикселя;
 - б) в виде всей поверхности рассматриваемого объекта.

В любом из двух случаев необходимо определить температуру выбранного базового элемента, т.е. либо температуру выбранного пикселя, либо измеренную среднюю температуру всей поверхности.

Интегральный поток, измеренный на длине волны λ_1 с выбранного базового элемента в виде пикселя, определяется выражением (4)

$$M\delta_1 = S_{kb} * \frac{C_1}{\lambda_1^5} \exp \left[-\frac{C_2}{\lambda_1 T_0} \right], \quad (4)$$

где S_{kb} – площадь выбранного пикселя;

T_0 – температура базового пикселя.

Во втором случае, если в качестве базового пикселя выбрана вся исследуемая поверхность, то выражение (4) приобретает следующий вид

$$M\delta_2 = S_0 * \frac{C_1}{\lambda_1^5} \exp \left[-\frac{C_2}{\lambda_1 T_{ep}} \right], \quad (5)$$

где S_0 – площадь всей исследуемой поверхности.

Отметим, что при аппаратном измерении M_{δ_2} по формуле (5) на длине волны λ_1 вычисление T_{ep} не представляет собой особого труда.

2. В первом случае проводятся измерения площади радиационного потока с i -го пикселя, где $i = (1, n^2-1)$. В результате имеем

$$M\delta_i = S_{kb} * \frac{C_1}{\lambda_{var}} \exp \left[-\frac{C_2}{\lambda_{var} T_i} \right], \quad (6)$$

где λ_{var} – длина волны проводимых измерений;

T_i – температура i -го пикселя.

3. Изменением длины волны λ_{var} добиваемся выполнения следующих равенств:

в первом случае

$$M_{\delta_1} = M_{\delta_i}; \quad (7)$$

во втором случае

$$M_{\delta_2} = M_{\delta_i}. \quad (8)$$

В первом случае с учетом (4), (6), (7) получаем

$$\frac{1}{\lambda_1^5} \exp \left[-\frac{C_2}{\lambda_1 T_0} \right] = \frac{1}{\lambda_{var}^5} \exp \left[-\frac{C_2}{\lambda_{var} T_i} \right]. \quad (9)$$

Из (9) находим

$$\left(\frac{\lambda_{var}}{\lambda_1} \right)^5 = \exp \left[-\frac{C_2}{\lambda_{var} T_i} + \frac{C_2}{\lambda_1 T_0} \right]. \quad (10)$$

Из (10) получаем

$$T_i = \frac{\lambda_1 * T_0 C_2}{\lambda_{var} (C_2 - 5\lambda_1 T_0 \ln \frac{\lambda_{var}}{\lambda_1})}. \quad (11)$$

Таким образом, в рассматриваемом первом случае, проводя последовательные измерения $i, i+1, i+2, \dots$, можно получить множество $\{T_i\}$, элементы которых зависят от T_0 и λ_{var} , т.е. имеем $T_i = f(\lambda_{var}, T_0)$.

4. С учетом (11) сумму измеренных температур со всех пикселей в количестве n^2 определяем как

$$T_{\Sigma} = T_0 + \sum_{i=1}^{(n^2-1)} \frac{\lambda_1 * T_0 C_2}{\lambda_{var, i} (C_2 - 5\lambda_1 T_0 \ln \frac{\lambda_{var, i}}{\lambda_1})}.$$

Во втором с учетом (8) вся вышеописанная процедура проводится относительно усредненной температуры всей исследуемой поверхности, определяемой с учетом (11) как

$$T_{cp} = \frac{T_{\Sigma}}{n^2} = \frac{1}{n^2} \left[\sum_{i=1}^{n^2} \frac{\lambda_1 * T_0 C_2}{\lambda_{var, i} (C_2 - 5\lambda_1 T_0 \ln \frac{\lambda_{var, i}}{\lambda_1})} \right].$$

Основное преимущество предлагаемого метода относительного инфракрасного сигнатурного анализа заключается в возможности автоматизации проводимых измерений и построении функции $T_i = f(\lambda_{var}, T_0)$ или $T_i = f(\lambda_{var}, T_{cp})$.

Например, исходно задав фиксированную величину $\lambda_{var, x}$ и проводя последовательные измерения по всем пикселям, оптические потоки можно автоматически определить как слой тех квадратов, в которых температура равна

$$T_x = f(\lambda_{var, x}, T_0).$$

То есть определить все точки с одинаковой температурой

$$T_x = \frac{\lambda_1 * T_0 C_2}{\lambda_{var x} (C_2 - 5\lambda_1 T_0 \ln \frac{\lambda_{var x}}{\lambda_1})} \quad (12)$$

При этом выделение всех точек с температурой T_x осуществляется компаратором, фиксирующим выполнение равенства потоков

$$M_{\delta 1} = M(\lambda_{var x}). \quad (13)$$

Блок-схема алгоритма реализации предлагаемого метода послойного анализа инфракрасной сигнатуры приведена на рисунке 2. Принятые обозначения на рисунке 2: Р – разрешение; З – запрет проведения операции.

Следует отметить, что очевидным известным аналогом послойного анализа сигнатуры является метод обычного определения температуры объекта: используя формулу Вина, задав неизменную величину длины волны и дальнейшее составление слоя квадратов, имеющих некоторую температуру, представляющую определенный интерес. Сформированный таким образом слой квадратов единой температуры будет приблизительным, т.к. не осуществлен жесткий отбор таких квадратов, который имеет место в предлагаемом методе с использованием условия (13).

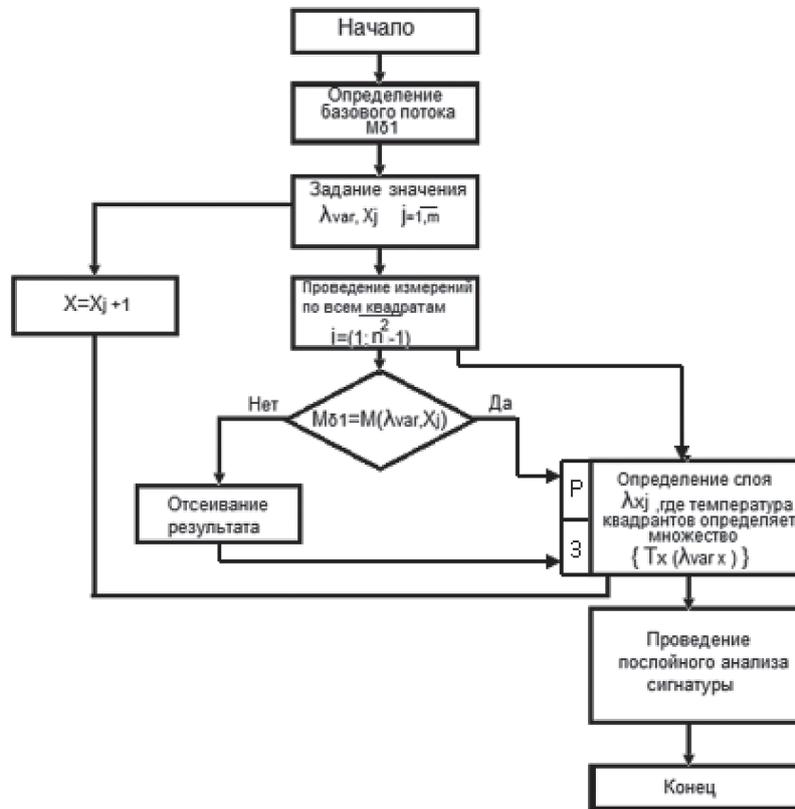


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма реализации предлагаемого метода послойного сигнатурного анализа

В целом время формирования слоя сигнатуры с пикселями, имеющими температуру T_x , в предлагаемом методе определяется следующим образом:

$$T_{\Sigma 1} = T_{10} + T_{11} + T_{12},$$

где T_{10} – время измерения T_0 ;

T_{11} – время задания длины волны $\lambda_{var x}$;

T_{12} – суммарное время измерения по всем квадратам.

В предполагаемом аналоге время формирования слоя T_x вычислим как

$$T_{\Sigma^2} = T_{21} + T_{22} + T_{23},$$

где T_{21} – время задания длины волны измерений;

T_{22} – время формирования всей сигнатуры;

T_{23} – время формирования слоя T_x .

При этом, если учесть, что целью является формирование некоторого слоя инфракрасной сигнатуры, в котором T_x известно, то вычисление $\lambda varx$ может быть осуществлено заранее. Используя формулу (12) и получив из нее следующее трансцендентное уравнение относительно $\lambda varx$, получим

$$T_x \lambda varx - \frac{\lambda_1 T_0 C_2}{C_2 - 5\lambda_1 T_0 \ln \frac{\lambda varx}{\lambda_1}} = 0.$$

Если учесть, что время вычисления $\lambda varx \rightarrow 0$, получим

$$T_{10} + T_{12} = T_{22},$$

$$T_{11} = T_{21}.$$

То есть выигрыш в быстродействии в предложенном методе определится временем T_{23} , затрачиваемым на отбор слоя T_x из всей сигнатуры.

Заключение

Предложен метод послойного инфракрасного сигнатурного анализа, целью которого является формирование некоторого двухмерного слоя пространственного распределения определенной температуры на поверхности объекта. Разработан алгоритм реализации метода. Дана оценка выигрыша в быстродействии предложенного метода. Приведены аналитические формулы для проведения необходимых вычислений режимных показателей проводимых измерений.

Список литературы

1. Kim S., Sun S.G., Kim K.T. Analysis of infrared signature variation and robust filter-based supersonic target detection // Research article. Hindwai Publishing Corporation. The scientific World Journal. – Vol. 2014. – Article ID 140930.
2. Ni X., Yu S., Su X., Chen F. Detection spectrum optimization of stealth aircraft targets from a space-based infrared platform // Optical and quantum electronics. – 2022. – Vol. 54. – Article ID 151.
3. Chopra K.N., Walia R. A short technical note on the IR signatures studies and designing aspects of the IR technology devices for defense aircraft // Journal of Aeronautics & Aerospace engineering. – 2020. – Vol. 9, Iss. 1, No. 220. – DOI 10.35248/2168-9792.20.9.220.
4. Andersson K. An exploratory case study on Swedish development of low observable vehicles // 2017 International Conference on Military Technologies. – 2017. – DOI 10.1109/MILTECHS.2017.7988743.
5. Andersson K., Akerlind C. A review of materials for spectral design coatings in signature management applications // SPIE European Defense and Security. – 2014. – Vol. 9253. – DOI 10.1117/12.2067167.
6. Richardson M.A. Complex Infrared Scenes to a Single Temperature Difference // Journal of defense science. – 1998. – Vol. 3, No. 3. – P. 397–403.
7. Richardson M.A., Coath J.A. Low resolution signature modelling of a main battle tank // Target and backgrounds IX: Characterization and representation. – 2003. – Vol. 5057. – P. 28–38.
8. Richardson M.A., King S.J. Modelling the signature vulnerability of a main battle tank // Journal of battle field technology. – 2000. – Vol. 3, No. 3. – P. 29–34.
9. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: пер. с фр. – М.: Мир, 1988. – 416 с.
10. Kim S., Kim J., Lee J., Ahn J. AS-CRI: A new metric of FTIR-Based apparent spectral-contrast radiant intensity for remote thermal signature analysis // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11. – 777 p. – DOI 10.3390/rs11070777.

References

1. *Kim S., Sun S.G., Kim K.T.* Analysis of infrared signature variation and robust filter-based supersonic target detection // Research article. Hindwai Publishing Corporation. The scientific World Journal. – Vol. 2014. – Article ID 140930.
2. *Ni X., Yu S., Su X., Chen F.* Detection spectrum optimization of stealth aircraft targets from a space-based infrared platform // Optical and quantum electronics. – 2022. – Vol. 54. – Article ID 151.
3. *Chopra K.N., Walia R.* A short technical note on the IR signatures studies and designing aspects of the IR technology devices for defense aircraft // Journal of Aeronautics & Aerospace engineering. – 2020. – Vol. 9, Iss. 1, No. 220. – DOI 10.35248/2168-9792.20.9.220.
4. *Andersson K.* An exploratory case study on Swedish development of low observable vehicles // 2017 International Conference on Military Technologies. – 2017. – DOI 10.1109/MILTECHS.2017.7988743.
5. *Andersson K., Akerlind C.* A review of materials for spectral design coatings in signature management applications // SPIE European Defense and Security. – 2014. – Vol. 9253. – DOI 10.1117/12.2067167.
6. *Richardson M.A.* Complex Infrared Scenes to a Single Temperature Difference // Journal of defense science. – 1998. – Vol. 3, No. 3. – P. 397–403.
7. *Richardson M.A., Coath J.A.* Low resolution signature modelling of a main battle tank // Target and backgrounds IX: Characterization and representation. – 2003. – Vol. 5057. – P. 28–38.
8. *Richardson M.A., King S.J.* Modelling the signature vulnerability of a main battle tank // Journal of battle field technology. – 2000. – Vol. 3, No. 3. – P. 29–34.
9. *Gossorg Z.H.* Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: пер. с фр. – М.: Mir, 1988. – 416 с.
10. *Kim S., Kim J., Lee J., Ahn J.* AS-CRI: A new metric of FTIR-Based apparent spectral-contrast radiant intensity for remote thermal signature analysis // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11. – 777 p. – DOI 10.3390/rs11070777.