

УДК 621.311

**Гюнель Вагиф гызы Алиева**Национальное аэрокосмическое агентство, Баку,  
Азербайджанская Республика**ОПТИМАЛЬНО-АДАПТИВНЫЕ ТЕРМАЛЬНЫЕ  
ВОСПРОИЗВОДЯЩИЕ СИСТЕМЫ ИНФРАКРАСНОГО  
ДИАПАЗОНА ДЛЯ РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ  
ВОСПЛАМЕНЕНИЯ**

Рассматривается оптимизация адаптивных термальных воспроизводящих систем инфракрасного диапазона. Показана возможность введения общего критерия оптимизации путем вычисления геометрической средней двух эквивалентных температурных показателей высокочастотных временных шумов. Составлена задача вариационной оптимизации, суть которой состоит в вычислении такой взаимосвязи времени интегрирования и пропускания атмосферы, при которой целевой функционал при некотором ограничительном условии, наложенном на эту функцию, достигает минимума, что эквивалентно минимальной разности указанных эквивалентных температур.

**Ключевые слова:** высокочастотные шумы, оптимизация, эквивалентная температура, адаптивный режим, целевой функционал.

**Gunel Vagif gizi Aliyeva**

National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan

**OPTIMALLY ADAPTIVE THERMAL REPRODUCING  
INFRARED SYSTEMS FOR EARLY FIRE DETECTION**

The article is devoted to the optimization of adaptive thermal reproducing systems in the infrared range. The possibility of introducing a general optimization criterion by calculating the geometric mean of two equivalent temperature indicators of high-frequency temporal noise is shown. A problem of variational optimization has been formulated, the essence of which is to calculate such a relationship between the integration time and atmospheric transmission at which the objective functional, under some restrictive condition imposed on this function, reaches a minimum, which is equivalent to the minimum difference between the indicated equivalent temperatures.

**Keywords:** high-frequency noise, optimization, equivalent temperature, adaptive mode, objective functional.

Как отмечается в работе [1], температурная разность, эквивалентная шумам, является параметром, характеризующим шумы термальных воспроизводящих систем. В общем случае шумы в термальных системах подразделяются на временные и пространственные. Согласно [1], основные искажения в термальных изображениях возникают из-за

высокочастотных временных шумов. Шумы пространственного характера в настоящее время могут быть минимизированы с помощью различных компьютерных программ. Высокочастотные временные шумы возникают из-за таких явлений, как генерация-рекомбинация, дробовые шумы детекторов и электронных устройств. Температурная разность, эквивалентная таким шумам, представляет собой показатель термальных воспроизводящих систем, обозначаемый как NEDT. Этот показатель определяется следующим образом:

$$\text{NEDT} = \frac{(T_1 - T_2)U_n}{U_2 - U_1}, \quad (1)$$

где  $T_1$  – температура фона;  $T_2$  – температура тестового объекта;  $U_1$  – сигнал, поступающий из фона;  $U_2$  – сигнал, поступающий с тестового объекта.

Согласно [2, 3], показатель  $S$ , обозначаемый как функция передачи сигнала, определяется как

$$S = \frac{U_2 - U_1}{T_1 - T_2}. \quad (2)$$

Следовательно,

$$\text{NEDT} = \frac{U_n}{S}. \quad (3)$$

Согласно [4], термальные воспроизводящие системы позволяют преобразовать термальную радиацию, существующую в конкретной сцене, в видимое изображение (рис. 1). При этом термальная радиация имеет хорошую проходимость через дым по сравнению с видимой радиацией.

Согласно [5], имеет место следующее отношение:

$$\text{NEDT}_1 = \frac{4f_1^2 (\Delta f)^{\frac{1}{2}}}{A^{\frac{1}{2}} \cdot t_{\text{оп}} \cdot M}, \quad (4)$$

где  $M$  определяется так:

$$M = \int_0^{\infty} \left( \frac{\delta L}{\delta T} \right) \tau_{\text{atm}, \lambda} \cdot D_{\lambda} d\lambda, \quad (5)$$

где  $f_1 = f/D$ ;  $f$  – фокусное расстояние;  $\left(\frac{\delta L}{\delta T}\right)$  – диаметр линзы;  $t_{op}$  – пропускание оптики;  $D_\lambda$  – показатель детектора;  $\left(\frac{\delta L}{\delta T}\right)_\lambda$  – спектральная зависимость эмитируемой объектом радиации;  $\lambda$  – длина волны;  $\tau_{atm}$  – пропускание атмосферы.

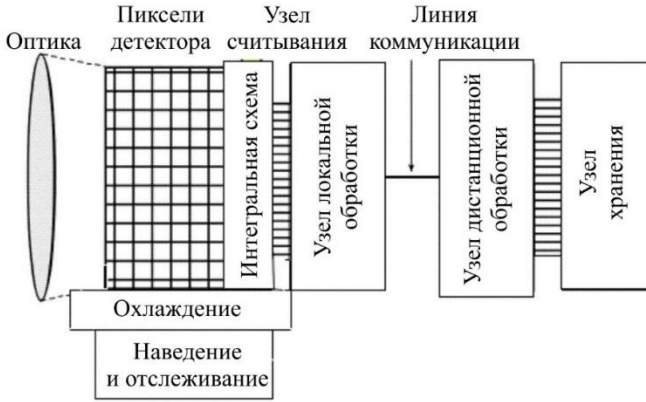


Рис. 1. Структурная схема термальной воспроизводящей системы

Вместе с тем, согласно [6], обычно работа термальных воспроизводящих систем ограничиваются точностными показателями узла считывания. Шумы этого узла можно учесть, введя аналогичный  $NETD_1$ .

$$NETD_2 = \left(\tau C \eta \sqrt{N_w}\right)^{-1}, \quad (6)$$

где  $\tau$  – квантовая эффективность;  $C$  – емкость фотодетектора;  $\eta$  – квантовая эффективность фотодетектора;  $N_w$  – количество фотогенерированных носителей, интегрируемых за время интегрирования  $t_{int}$ .

$$N_w = \eta \cdot t_{int} \cdot Q_r, \quad (7)$$

где  $Q_r$  – технологический коэффициент;  $t_{int}$  – время интегрирования.

С учетом (5) и (6) получим:

$$NETD_2 = \frac{1}{C_1 \cdot \sqrt{t_{int}}}, \quad (8)$$

где

$$C_1 = \tau C \cdot \eta \sqrt{\eta \cdot Q_T}. \quad (9)$$

Целью настоящей работы являются исследование возможности введения общего показателя NETD, учитывающего влияние на качество термальной воспроизводящей системы как NETD<sub>1</sub>, так и NETD<sub>2</sub>, и дальнейшая оптимизация этого показателя путем определения оптимальной взаимосвязи  $t_{\text{int}}$  и  $\tau_{\text{atm}}$  в адаптивном режиме работы системы воспроизведения.

В общем случае можно предложить мультипликативный показатель  $\beta$  качества термальных воспроизводящих систем в виде:

$$\beta = (\text{NETD}_1^{\alpha_1})(\text{NETD}_2^{\alpha_2}); \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1. \quad (10)$$

Отметим, что фактически (10) является формулой геометрического усреднения множителей, содержащихся в этой формуле.

Применительно к формуле (5) можно допустить, что термальное воспроизведение осуществляется в таком диапазоне длин волн, где  $\tau_{\text{atm}}$  практически не зависит от длины волны, однако подвержено временным флуктуациям, т.е.  $\tau_{\text{atm}} = \tau_{\text{atm}}(t)$ .

В этом случае с учетом (4) и (5) запишем:

$$\text{NETD}_1 = \frac{1}{C_2 \tau_{\text{atm}}(t)}, \quad (11)$$

где

$$C_2 = \frac{A^{\frac{1}{2}} \cdot t_{\text{op}} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left( \frac{\delta L}{\delta T} \right) \cdot D_{\lambda} \cdot d\lambda}{4 f_1^2 (\Delta f)^{\frac{1}{2}}}. \quad (12)$$

С учетом (8), (10), (11) напишем:

$$\beta = \left[ \frac{1}{C_2 \tau_{\text{atm}}(t)} \right]^{\alpha_1} \cdot \left[ \frac{1}{C_1 \cdot \sqrt{t_{\text{int}}}} \right]^{\alpha_2}. \quad (13)$$

Введем на рассмотрение функцию коррекции (далее запись  $t$  в качестве аргумента опускается):

$$t_{\text{int}} = \psi(t_{\text{atm}}). \quad (14)$$

Следовательно, имеем:

$$\beta = \left( \frac{1}{C_2 \tau_{\text{atm}}(t)} \right)^{\alpha_1} \cdot \left( \frac{1}{C_1 \cdot \sqrt{t_{\text{int}}(\tau_{\text{atm}})}} \right)^{\alpha_2}. \quad (15)$$

Введем на функцию:

$$\int_{\tau_{\text{atm},\text{min}}}^{\tau_{\text{atm},\text{max}}} t_{\text{int}}(\tau_{\text{atm}}) d\tau_{\text{atm}} = C. \quad (16)$$

На базе (15) сформируем следующий целевой функционал:

$$\gamma = \int_{\tau_{\text{atm},\text{min}}}^{\tau_{\text{atm},\text{max}}} \beta(\tau_{\text{atm}}) d\tau_{\text{atm}} = \int_{\tau_{\text{atm},\text{min}}}^{\tau_{\text{atm},\text{max}}} \left( \frac{1}{C_2 \tau_{\text{atm}}} \right)^{\alpha_1} \cdot \left( \frac{1}{C_1 \cdot \sqrt{t_{\text{int}}(\tau_{\text{atm}})}} \right)^{\alpha_2} d\tau_{\text{atm}}. \quad (17)$$

С учетом (16) и (17) сформируем задачу вариационной оптимизации:

$$\begin{aligned} \gamma = \int_{\tau_{\text{atm},\text{min}}}^{\tau_{\text{atm},\text{max}}} \left( \frac{1}{C_2 \tau_{\text{atm}}} \right)^{\alpha_1} \cdot \left( \frac{1}{C_1 \cdot \sqrt{t_{\text{int}}(\tau_{\text{atm}})}} \right)^{\alpha_2} d\tau_{\text{atm}} + \\ + \lambda \left[ \int_{\tau_{\text{atm},\text{min}}}^{\tau_{\text{atm},\text{max}}} t_{\text{int}}(\tau_{\text{atm}}) d\tau_{\text{atm}} - C \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

Решение (18) имеет вид:

$$-\left( \frac{1}{C_2 \tau_{\text{atm}}} \right)^{\alpha_1} \cdot \alpha_2 \left( \frac{1}{C_1 \cdot \sqrt{t_{\text{int}}(\tau_{\text{atm}})}} \right)^{\alpha_2 - 1} \cdot \frac{C_1 t_{\text{int}}(\tau_{\text{atm}})^{\frac{3}{2}}}{C_1^2 \cdot t_{\text{int}}(\tau_{\text{atm}})} + \lambda = 0, \quad (19)$$

в упрощенном случае примем  $\alpha = 0,5$ .

Из (19) получим:

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{C_2 \tau_{\text{atm}}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{C_1} \cdot C_1^{\frac{3}{2}} \cdot C_1^2 \cdot t_{\text{int}}^2(\tau_{\text{atm}})} = \lambda$$

ИЛИ

$$\frac{1}{2C_1^4 \cdot \sqrt{C_2} \cdot \sqrt{\tau_{\text{atm}}} \cdot t_{\text{int}}^2(\tau_{\text{atm}})} = \lambda. \quad (20)$$

Из (20) находим:

$$t_{\text{int}}(\tau_{\text{atm}}) = \sqrt{\frac{1}{2C_1^4 \cdot \sqrt{C_2} \cdot \sqrt{\tau_{\text{atm}}}}} = \frac{1}{\sqrt{\lambda} C_1} \sqrt[4]{\frac{1}{4\tau_{\text{atm}} \cdot C_2}}. \quad (21)$$

При (21)  $\gamma$  достигает минимума, так как повторная производная (19) по искомой функции всегда оказывается положительной величиной.

Вычислим величину  $\lambda$ . С учетом (16) и (21) имеем:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda} C_1} \int_{\tau_{\text{atm},\text{min}}}^{\tau_{\text{atm},\text{max}}} \sqrt{\frac{1}{4\tau_{\text{atm}} \cdot C_2}} d\tau_{\text{atm}} = C. \quad (22)$$

Из (22) находим:

$$\lambda = \frac{\left[ \int_{\tau_{\text{atm},\text{min}}}^{\tau_{\text{atm},\text{max}}} \sqrt{\frac{1}{4\tau_{\text{atm}} \cdot C_2}} d\tau_{\text{atm}} \right]^2}{C_1^2 \cdot C^2}. \quad (23)$$

С учетом (21) и (23) получим:

$$t_{\text{int}}(\tau_{\text{atm}}) = \frac{C_1 \cdot C_2 \sqrt{\frac{1}{4\tau_{\text{atm}}}}}{\left[ \int_{\tau_{\text{atm},\text{min}}}^{\tau_{\text{atm},\text{max}}} \sqrt{\frac{1}{4\tau_{\text{atm}} \cdot C_2}} d\tau_{\text{atm}} \right]^2}. \quad (24)$$

Таким образом, согласно (24), показатель  $\gamma$  будет минимизирован в том случае, если между  $t_{\text{int}}$  и  $\tau_{\text{atm}}$  имеется обратная связь под корнем 2, т.е. при увеличении пропускания атмосферы время интегрирования следует уменьшить, наоборот, т.е. при малом пропускании атмосферы время интегрирования следует увеличить.

Рассмотрена возможность оптимизации режима работы термальной системы воспроизведения. Показана возможность введения общего критерия оптимизации путем вычисления геометрической средней двух показателей NEDT, характеризующих соответственно входную оптику и детектор. Составлена задача вариационной оптимизации, суть которой состоит в такой взаимосвязи времени интегрирования и пропускания атмосферы, при которой целевой функционал при некотором

ограничительном условии, наложенном на эту функцию, достигает минимума, что эквивалентно минимальной разности температур, эквивалентной шумам в системе.

### Список литературы

1. Varela J., Firmanty K., Kastek M. Measurement and analysis of the parameters of modern long-range thermal imaging cameras // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – 5700. – URL: <https://doi.org/10.3390/s21175700>.
2. CI systems. – URL: <http://www.ci-systems.com> (дата обращения: 20.07.2021).
3. HGH infrared systems. – URL: Available online: <http://www.hgh.fr> (дата обращения: 20.07.2021).
4. Rogalski A., Chzanowski K. Infrared devices and techniques (revision) // *Metrology and measurement systems*. – No. 4. – P. 565–618.
5. Llyod J.M. Thermal imaging systems. – New York: Plenum, 1975.
6. Kozlowski L.J., Kosonocky W.F. Infrared detector arrays handbook of optics. – Chapter 23.
7. Эльсгольц Л.Е. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. – М.: Наука, 1974. – С. 432.

### References

1. Varela J., Firmanty K., Kastek M. Measurement and analysis of the parameters of modern long-range thermal imaging cameras. *Sensors*, 2021, 21, 5700, available at: <https://doi.org/10.3390/s21175700> (accessed 20 July 2021).
2. CI systems, available at: <http://www.ci-systems.com> (accessed 20 July 2021).
3. HGH infrared systems, available at: <http://www.hgh.fr> (accessed 20 July 2021).
4. Rogalski A., Chzanowski K. Infrared devices and techniques (revision). *Metrology and measurement systems*, 2014, vol. 4, pp. 565-618.
5. Llyod J.M. Thermal imaging systems. New York: Plenum, 1975.
6. Kozlowski L.J., Kosonocky W.F. Infrared detector arrays handbook of optics. Chapter 23.
7. El'sgol'ts L.E. *Differentsial'nye uravneniia i variatsionnoe ischislenie [Differential equations and calculus of variations]*. Moscow: Nauka, 1974, 432 p.

### Сведения об авторе

**АЛИЕВА ГЮНЕЛЬ ВАГИФ ГЫЗЫ**

e-mail: *gunelcelilova@mail.ru*

Кандидат технических наук, начальник отдела Института космических исследований природных ресурсов Национального аэрокосмического агентства, Баку, Азербайджанская Республика

### About the author

**АЛИЕВА ГЮНЕЛЬ ВАГИФ ГЫЗЫ**

e-mail: *gunelcelilova@mail.ru*

Кандидат технических наук, нач. отд. Института космических исследований природных ресурсов Национального аэрокосмического агентства, Baku, Republic of Azerbaijan

**Финансирование:** исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад автора:** 100 %.

**Получена:** 01.04.2023

**Одобрена:** 03.04.2023

**Принята к публикации:** 06.04.2023

**Conflict of Interest:** the authors declare no conflict of interest.

**Author Contributions:** all authors have made an equivalent contribution to the publication.

**Received:** 01/04/2023

**Approved:** 03/04/2023

**Accepted for publication:** 06/04/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Алиева, Гюнель Вагиф гызы. Оптимально-адаптивные термальные воспроизводящие системы инфракрасного диапазона для раннего обнаружения воспламенения / Гюнель Вагиф гызы Алиева // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 3. – С. 36–43.

Please cite this article in English as: Gunel Vagif gizi Aliyeva Optimally adaptive thermal reproducing infrared systems for early fire detection // Applied photonics, 2023, no. 3, pp. 36-43.