

**М.М. Байрамова, А.Ф. Гамидова,
С.М. Кулиева, М.Р. Магеррамова**

Расчет параметров приемных систем

В работе показано, что в матрицах с накоплением сигнала, как и в многоэлементных матрицах мгновенного действия, постоянная составляющая фонового излучения вызывает появление «геометрического» шума, связанного с различием в чувствительности отдельных элементов матрицы.

Ключевые слова: сканирующие и несканирующие системы; геометрический шум; фокусное расстояние; абсолютное черное тело; апертурный угол; флуктуация.

Сканирующие системы. Предположим, что на расстоянии L от оптической системы с эффективной площадью входного зрачка A_0 и фокусным расстоянием F находится протяженный источник излучения, представляющий собой абсолютно черное тело с температурной T_1 . Источник наблюдается на некотором фоне, излучение которого представляет собой также излучение абсолютно черного тела при температуре T_0 .

Спектральный поток излучения, собираемый оптической системой и падающий на приемник излучения, можно отразить так:

$$P(\lambda) = \frac{R(\lambda, T_1) A_0}{\pi L^2} L^2 \omega = \frac{R(\lambda, T_1) A_0 \omega}{\pi}, \quad (1)$$

а сигнал, снимаемый с приемника, определить следующим образом:

$$U_s = S(\lambda) \frac{R(\lambda, T_1) A_0 \omega}{\pi}, \quad (2)$$

где $S(\lambda)$ — абсолютная вольтова чувствительность приемника, В / Вт; $R(\lambda, T_1)$ — спектральная плотность потока излучения абсолютно черного тела при температуре T_1 , Вт/см² мкм; ω — угол мгновенного поля зрения приемной системы (апертурный угол отдельного элемента приемника).

Отношение «сигнал – шум» для немонахроматического излучения имеет следующую форму выражения:

$$\frac{U_s}{U_N} = \frac{A_0}{\pi U_N} \cdot \int_0^{\infty} S(\lambda) R(\lambda, T_1) d\lambda. \quad (3)$$

Обычно вместо абсолютной вольтовой чувствительности $S(\lambda)$ используют приведенную обнаружительную способность:

$$D^* = (A \Delta f)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{P_{th}}, \quad (4)$$

где A — площадь чувствительного элемента, для простоты предполагаемого квадратным со стороной a ; Δf — пропускания электронного тракта усиления сигнала и шума; p_{th} — энергетический поток излучения, при котором отношение «сигнал – шум» равно единице. Поскольку по определению $S(\lambda) = \frac{U_s}{ps}$, то

$$P_{th}(\lambda) = \left(\frac{U_s}{S(\lambda)} \right)_{U_s=U_N} = \frac{U_N}{S(\lambda)} \quad (5)$$

и

$$D^*(\lambda) = \frac{\sqrt{A}\sqrt{\Delta f}}{U_N} \cdot S(\lambda). \quad (6)$$

В этом случае выражение (3) отношения «сигнал – шум» принимает вид:

$$\frac{U_s}{U_N} = \frac{A_0\omega}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{a^2}\sqrt{\Delta f}} \cdot \int_0^\infty D^*(\lambda)R(\lambda, T_1)d\lambda. \quad (7)$$

Оптимальная величина полосы пропускания электронного тракта оптико-электронных приборов зависит от назначения приемной системы, а также от спектральных характеристик сигнала и шума. Обычно используется фильтр с полосой частот, занимаемой сигналом [1]. В первом приближении можно принять, что ширина полосы Δf связана со временем, приходящимся на один элемент разложения наблюдаемой тепловой картины τ_e , соотношением:

$$\Delta f = \frac{c}{\tau_e}, \quad (8)$$

где c — некоторая постоянная порядка единицы. Учитывая, что угол мгновенного поля зрения равен угловому размеру чувствительного элемента приемника излучения

$$\omega = \frac{a^2}{F^2}, \quad (9)$$

можно заключить, что разностный сигнал, определяющий контраст теплового изображения цели с температурой T_1 , вычисляется по формуле:

$$\frac{\Delta U}{U_N} = \frac{A_0 a \tau_e^{\frac{1}{2}}}{\pi F^2 c^{\frac{1}{2}}} \cdot \int_0^\infty D^*(\lambda) \cdot [D^*(\lambda)[R(\lambda, T_1) - R(\lambda, T_0)]] \cdot d\lambda. \quad (10)$$

При малых температурных $\Delta T = T_1 - T_0 \ll T_1$, T_0 разность в подынтегральном выражении может быть заменена дифференциальной разностью $\left[\frac{dR(\lambda, T)}{dT} \right] \Delta T$,

и тогда выражение для теплового контраста примет вид:

$$\frac{\Delta U}{U_N} = \Delta T \cdot \frac{A_0 a \tau_e^{\frac{1}{2}} D_{\max}^*}{\pi F^2 c^{\frac{1}{2}}} \cdot \int_0^\infty S(\lambda) \frac{dR(\lambda, T)}{dT} \cdot d\lambda, \quad (11)$$

где $D_{\max}^* = \frac{D^*(\lambda)}{S(\lambda)}$, а $S(\lambda)$ — относительная спектральная характеристика

приемника излучения.

Время τ_e , приходящееся на один элемент разложения, определяется длительностью кадра t_k и соотношением между величинами углов мгновенного поля зрения ω и полного поля обзора Ω :

$$\tau_e = \frac{m\omega}{\Omega} t_k, \tag{12}$$

где $n = M \times N$ — полное число элементов в многоэлементной матрице приемника; M — число строк; N — столбцов.

Таким образом, контрастный сигнал

$$\frac{\Delta U}{U_N} = \Delta T \cdot \frac{D_{\max}^* A_0 \omega}{\pi F} \cdot \left(\frac{nt_k}{c\Omega} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \int_0^{\infty} S(\lambda) \frac{dR(\lambda, T)}{dT} \cdot d\lambda. \tag{13}$$

При конструировании приемной системы, исходя из ее назначения, обычно задаются значениями длительности кадра t_k , полного поля обзора Ω , мгновенного угла зрения ω , также разницей температур объекта ΔT фона.

Значение параметра c , а также задается, поскольку оно определяется функциональным назначением системы. Таким образом, в ходе разработки приемной системы для обеспечения заданного соотношения «сигнал – шум» можно варьировать только величины A_0 , F , $D^*(\lambda)$ и т. п.

Увеличение размеров входного отверстия оптической системы A_0 приводит к резкому увеличению массы и габаритов устройства, что не всегда допустимо. Уменьшение фокусного расстояния при неизменной величине A_0 приводит к росту aberrаций в оптической системе, к необходимости ее усложнения и сопутствующим этому отрицательным явлениям. Поэтому относительное отверстие $\frac{A_0}{F}$ оптической системы приемного устройства фактически является заранее заданной величиной. В правильно сконструированных приемных системах значение приведенной обнаружительной способности $D^*(\lambda)$ приемника излучения близко или равно максимально возможному, определяемому флуктуациями излучения фона (режим ограничения фоном *OB* или *BLIP*-режим) [2]:

$$D_{\text{оф}}^*(\lambda) = \frac{\lambda}{2hc_0} \cdot \left(\frac{\eta_0}{Q_B} \right)^{\frac{1}{2}}, \tag{14}$$

где h — постоянная Планка, c_0 — скорость света, η_0 — квантовая эффективность преобразования излучения, Q_B — интенсивность фонового излучения, падающего на чувствительный элемент.

Таким образом, все параметры (за исключением h), которыми может управлять разработчик, равны или близки к своим максимальным значениям, и для существенного увеличения отношения «сигнал – шум» у современных

приемных систем есть фактически только одна возможность — увеличивать число элементов n в многоэлементном приемнике излучения.

Если не учитывать особенности изготовления и функционирования многоэлементных ФПУ (фотоприемные устройства), которые будут рассмотрены в последующих главах, и исходить из допущения, что в распоряжении разработчика имеются многоэлементные приемники с любым требуемым числом элементов, то максимально возможное число элементов в матрицах приемных систем.

Одним из основных условий, которое должно выполняться в правильно сконструированной приемной системе, является преобладание шумов приемного элемента над шумами последующей электронной схемы считывания и усиления сигнала. При выводе уравнения для контрастного сигнала предполагалось, что это условие выполняется. Ширина полосы Δf , в которой происходит накопление шумов, определяется частотой опроса элементов в матрице. Последняя, в свою очередь, зависит от времени кадра и числа элементов в матрице, которые должны быть опрошены за время кадра. Как следствие, при заданных разработчиком исходных данных в виде времени кадра t_k и уровня шума предварительного усилителя максимально допустимое число элементов в матрице устанавливается автоматически.

Несканирующие системы. Для описания фотоэлектрических характеристик приемников с накоплением приятно использовать параметры, очень близкие по своему определению к параметрам приемников мгновенного действия. По аналогии с приведенной обнаружительной способностью приемников мгновенного действия (9) предельную чувствительность приемников с накоплением сигнала характеризуют величиной:

$$T^*(\lambda) = \left(\frac{A}{t_i} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{S(\lambda)}{U_N}, \quad (15)$$

где t_i — время накопления заряда в чувствительном элементе.

Сравнивая (15) и (9), видим, что параметру «время накопления» t_i несканирующей системы соответствует параметр $\frac{\tau_e}{c} = \frac{\tau}{\Delta f}$ сканирующей системы. Если первый фактически равен времени кадра, то второй, определяемый уравнением (15), зависит от числа элементов в матрице и стремится к i_k , когда число элементов матрицы приближается к числу элементов разложения изображения.

Введение величины $T^*(\lambda)$ вместо $D^*(\lambda)$ позволяет использовать приведенные ранее выражения, описывающие характеристики сканирующих систем, для описания соответствующих характеристик несканирующих систем. Так, вместо уравнения (10), определяющего отношение «сигнал – шум» в сканирующей системе, имеем:

$$\frac{U_S}{U_N} = \frac{A_0 \omega}{\pi} \cdot \left(\frac{t_i}{A} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \int_0^{\infty} T^*(\lambda) R(\lambda, T_1) \cdot d\lambda, \quad (16)$$

а вместо уравнения (14), определяющего контраст теплового изображения объекта по отношению к фону при $\Delta T \ll T$, имеем:

$$\frac{\Delta U}{U_N} = \Delta T \frac{A_0}{\pi F^2} (At_i)^{\frac{1}{2}} T_{\max}^* \cdot \int_0^{\infty} S(\lambda) \frac{dR(\lambda, T)}{dT} d\lambda, \quad (17)$$

где t_i — время накопления заряда в чувствительном элементе.

Сравнивая (17) и (9), видим, что параметру «время накопления» t_i сканирующей системы соответствует параметр $\frac{\tau_e}{c} = \frac{1}{\Delta f}$ сканирующей системы. Если

первый фактически равен времени кадра, то второй, определяемый уравнением (15), зависит от числа элементов в матрице и стремится к i_k , когда число элементов матрицы приближается к числу элементов разложения изображения.

Введение величины $T^*(\lambda)$ вместо $D^*(\lambda)$ позволяет использовать приведенные ранее выражения, описывающие характеристики сканирующих систем. Так, вместо уравнения (10), определяющего отношение «сигнал – шум» в сканирующей системе, имеем:

$$\frac{U_S}{U_N} = \frac{A_0 \omega}{\pi} \cdot \left(\frac{t_i}{A}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \int_0^{\infty} T^*(\lambda) R(\lambda, T_1) \cdot d\lambda, \quad (18)$$

а вместо уравнения (11), определяющего контраст теплового изображения объекта по отношению к фону при $\Delta T \ll T$, имеем:

$$\frac{\Delta U}{U_N} = \Delta T \frac{A_0}{\pi F^2} (At_i)^{\frac{1}{2}} T_{\max}^* \cdot \int_0^{\infty} S(\lambda) \frac{dR(\lambda, T)}{dT} d\lambda, \quad (19)$$

где $T_{\max}^* = \frac{T^*(\lambda)}{S(\lambda)}$, $S(\lambda)$ — относительная спектральная характеристика приемника излучения.

Как и приемники мгновенного действия, приемники с накоплением сигнала достигают предельно возможной чувствительности в условиях, когда их шумы определяются флуктуациями фонового излучения, т. е. работают в режиме ОФ [3]. В этом случае шум (измеряемый числом электронов) равен квадратному корню из числа носителей заряда, накопленных фоточувствительной ячейкой за счет поглощения потока фонового фоточувствительного излучения AQ_B :

$$U_N = (\eta_0 t_i AQ_B)^{\frac{1}{2}}. \quad (20)$$

Если при облучении ячейки энергетическим потоком излучения от объекта:

$$p_S = \frac{hc_0}{\lambda} Q_S A \quad (21)$$

ячейкой накапливается сигнал (также измеряемый числом электронов):

$$U_S = \eta_0 t_i A Q S(\lambda), \quad (22)$$

то из выражения:

$$T^*(\lambda) = \left(\frac{A}{t_i}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{S(\lambda)}{U_N} = c \left(\frac{A}{t_i}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{P_S} \frac{U_S}{U_N} \quad (23)$$

получим значения $T^*(\lambda)$ в условиях ограничения флуктуациями фона:

$$T_{\text{оф}}^*(\lambda) = \left(\frac{A}{t_i}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{\lambda \eta_0 t_i A Q_S(\lambda)}{hc_0 Q_S A (\eta_0 t_i A Q_B)^{\frac{1}{2}}} = \frac{\lambda}{hc_0} \left[\frac{\eta_0(\lambda)}{Q_B} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (24)$$

Поставив $T^*(\lambda)$ в уравнения (16) и учитывая (1) и (21), получим:

$$\left(\frac{U_S}{U_N}\right)_{\text{оф}} = \frac{A_0 t_i^{\frac{1}{2}}}{\pi A^{\frac{1}{2}}} \cdot \int_0^{\infty} \eta_0^{\frac{1}{2}}(\lambda) \cdot \frac{Q_S(\lambda)}{Q_B^{\frac{1}{2}}} \cdot d\lambda. \quad (25)$$

Уравнение (25) показывает, что в режиме ограничения фоном приемник с накоплением может обеспечить высокое отношение «сигнал – шум», если велико время накопления сигнала.

Важнейшим фактором, определяющим максимальное значение времени накопления, является время заполнения потенциальной ямы t_0 , в которой накапливается заряд. Время заполнения, в свою очередь, зависит от емкости потенциальной ямы и скорости ее заполнения. В том случае, когда необходимое для обеспечения заданной пороговой чувствительности (или заданного отношения «шум – сигнал») время наполнения сигнала превышает время заполнения потенциальной ямы t_0 , указанная пороговая чувствительность не может быть реализована с помощью рассматриваемого приемника с накоплением без принятия специальных мер, исключающих переполнение потенциальных ям.

Время заполнения потенциальной ямы МДП (металл – диэлектрик – полупроводник) — ячейки можно оценить по формуле:

$$t_0 = \frac{N_{\text{max}}}{\eta_0 Q_\lambda \cdot \sin^2 \theta}, \quad (26)$$

где $N_{\text{max}} \approx 10^{12}$ эл. см⁻² — максимальная плотность электронов, которые можно накопить в кремниевом МОП (металл – окись – полупроводник) — конденсаторе, Q_λ — спектральная плотность излучения абсолютно черного тела при температуре 300 К, равная $\approx 6 \cdot 10^{15}$ фотон \cdot см⁻² \cdot с⁻¹ \cdot мкм⁻¹ при $\lambda = 4$ мкм и $\approx 1,7 \cdot 10^{17}$ фотон \cdot см⁻² \cdot с⁻¹ \cdot мкм⁻¹ при $\lambda = 12$ мкм соответственно (рис. 1). θ — апертурный угол, в пределах которого фоновое излучение попадает на приемник. Оценки показывают, что времена заполнения потенциальных ям для приемников коротковолнового и длинноволнового окон ИК-прозрачности атмосферы отличаются в десятки раз, например, как $\approx 10^{-2}$ с и $\approx 10^{-2}$ с и $\approx 4 \cdot 10^{-4}$ с при $\lambda = 4$ мкм и 12 мкм соответственно. Еще больше отличаются времена заполнения потенциальных ям приемников излучения ближнего ИК и видимого излучений, так как в видимом диапазоне спектра интенсивность

собственного излучения окружающего фона при температуре 300 К очень мала.

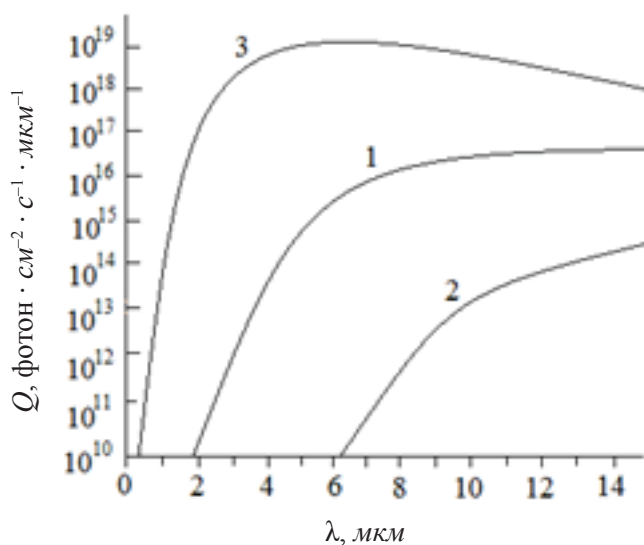


Рис. 1. Спектральные зависимости плотности потока фотонов при различных температурах:
1 — 300 К, 2 — 100 К, 3 — 900 К

Если приемная система предназначена для обнаружения объекта с минимальным перепадом температуры ΔT на фоне, который излучает как абсолютно черное тело с температурой T_0 , то требуемая для реализации заданного отношения «сигнал – шум» $\frac{\Delta U}{U_N}$ величина времени накопления t_i должна быть меньше времени заполнения потенциальных ям фоновым излучением.

Закключение. Следует подчеркнуть особое воздействие интенсивного фонового излучения на работу многоэлементных приемников излучения с накоплением сигнала. В матрицах с накоплением сигнала, как и в многоэлементных матрицах мгновенного действия, постоянная составляющая фонового излучения вызывает появление «геометрического» шума, связанного с различием в чувствительности отдельных элементов матрицы. Но, кроме этого, она определяет скорость заполнения потенциальных ям, а следовательно, и максимально возможное время накопления сигнала. Для приемников с накоплением сигнала должна обеспечиваться тщательная экранировка охлаждаемыми диафрагмами, а апертурный угол, в котором фоновое излучение попадает на чувствительный элемент, не должен существенно превышать апертурный угол, в котором излучение объекта собирается на приемник излучения.

Литература / Literature

1. *Yudasaka M., Zhang M., Jabs C. et al.* Effect of an organic polymer in purification and cutting of single-wall carbon nanotubes // *Appl. Phys. A.* 2000. V. 71. № 4. P. 449–451.
2. *Zhai Hua-Jin, Wang Lai-Sheng.* Probing the Electronic Structure and Band Gap Evolution of Titanium Oxide Clusters $(\text{TiO}_2)_n$ ($n = 1 - 10$) Using Photoelectron Spectroscopy // *J. Am. Chem. Soc.* 2007. V. 129. P. 3022.
3. *Zhu S., Van R., Detugernier C. et al.* Barrier height inhomogeneities of epitaxial CoSi_2 Schottky contacts on n-Si (100) and (111) // *Chin. J. Semiconductor.* 2000. V. 21. № 5. P. 143–147.

*M.M. Bayramova, A.F. Hamidova,
S.M. Quliyeva, M.R. Maherramova*

Calculation of Parameters of Reception Systems

In matrixes with accumulation of a signal, as well as in mutielement matrixes of instant action, the constant component of background radiation causes appearance of the «geometrical» noise connected with distinction in sensitivity of separate elements of a matrix.

Keywords: scanning systems; not scanning systems; noise; geometric noise; focal length; blackbody; aperture angle; fluctuation; sensitivity.