

УДК 621.383

Связь режима опроса микроболометрической матрицы и величины, эквивалентной шуму разности температур, при преобладании тепловых и температурных шумов чувствительных элементов

Ю. М. Эскин

ФГУП «Научно-производственное объединение «Орион»», Москва, Россия

Рассмотрены соотношения между значениями эквивалентной шуму разности температур тепловизионной системы на основе неохлаждаемой микроболометрической матрицы и тепловой энергии, выделяемой в чувствительном элементе при опросе, для случая преобладания его тепловых и температурных шумов. Величина этой энергии через параметры режима опроса матрицы связана с диапазоном допустимых значений электрического сопротивления микроболометров и, соответственно, особенностями их изготовления. Рассмотрение проведено на примере четырех схем построения матриц: с поэлементным токовым считыванием; с построчным токовым считыванием и накоплением в столбце; с поэлементным считыванием с делителя напряжения; с построчным считыванием с делителя напряжения и накоплением в столбце.

На характеристики, определяющие свойства микроболометрических матриц (МБМ) как неохлаждаемых преобразователей теплового излучения, важное влияние, помимо теплофизических параметров микроболометра (МБ), оказывают такие факторы, как его избыточные ($1/f$ -типа) шумы, шумы и нестабильность источников питания, схем опроса и предобработки сигнала и др. Однако принципиальными для получения наилучших значений эквивалентной шуму разности температур (*NETD*) являются ограничения, связанные с тепловыми (наиквистовыми) шумами МБ и флуктуациями его темпе-

ратуры за счет излучательного теплообмена и оттока тепла к подложке кристалла. Существуют также ограничения, вызываемые разогревом МБ за счет джоулева тепла, выделяемого в нем при опросе. Последний фактор сужает диапазон температур тепловой сцены при заданной степени нелинейности отклика прибора, так как возможно изменение фазового состояния термочувствительного слоя (для широко используемого материала VO_x это происходит при температуре ~ 60 °С). При дальнейшем "джоулевым" разогреве возможно "выгорание" чувствительного элемента [1].

Влияние разогрева МБ при опросе на возможности МБМ отмечалось в работах [2, 3].

В настоящей работе рассматривается подход к оценке соотношения между эквивалентной шуму разностью температур, фиксируемой МБ, и тепловой энергией, выделяемой в нем при опросе. Через параметры режима работы МБМ величина *NETD* связана с диапазоном допустимых значений сопротивления чувствительного элемента и, следовательно, с технологическими особенностями его изготовления.

Рассмотрим применимость указанного подхода на примере четырех вариантов построения МБМ с импульсным опросом:

- схема с поэлементным токовым считыванием (см. рисунок, а), родственная реализованной разработчиками из NEC Corp. (Япония) [4];
- схема с построчным токовым считыванием и накоплением в столбце (см. рисунок, б), близкая примененной специалистами Sofradir (Франция) [5];
- схема с поэлементным потенциальным считыванием с делителя напряжения (см. рисунок, в), реализованная в разработке фирмы Mitsubishi Electric Corp. (Япония) [3];
- схема с построчным потенциальным считыванием с делителя напряжения и накоплением в столбце (см. рисунок, г), модификация которой используется в разработках фирмы Boeing [2].

Варианты построения МБМ с импульсным опросом ячеек:

- а — схема с поэлементным токовым считыванием;
 - б — схема с построчным токовым считыванием и накоплением в столбце;
 - в — схема с поэлементным потенциальным считыванием с делителя напряжения;
 - г — схема с поэлементным потенциальным считыванием с делителя напряжения и накоплением в столбце;
- R_B — микроболометр; R_n — нагрузочный резистор; U_p — напряжение питания МБ-ячейки; МПл строк и МПл столбцов — мультиплексоры строк и столбцов, соответственно; СИТ и СИН — стробируемые инверторы тока и напряжения, соответственно

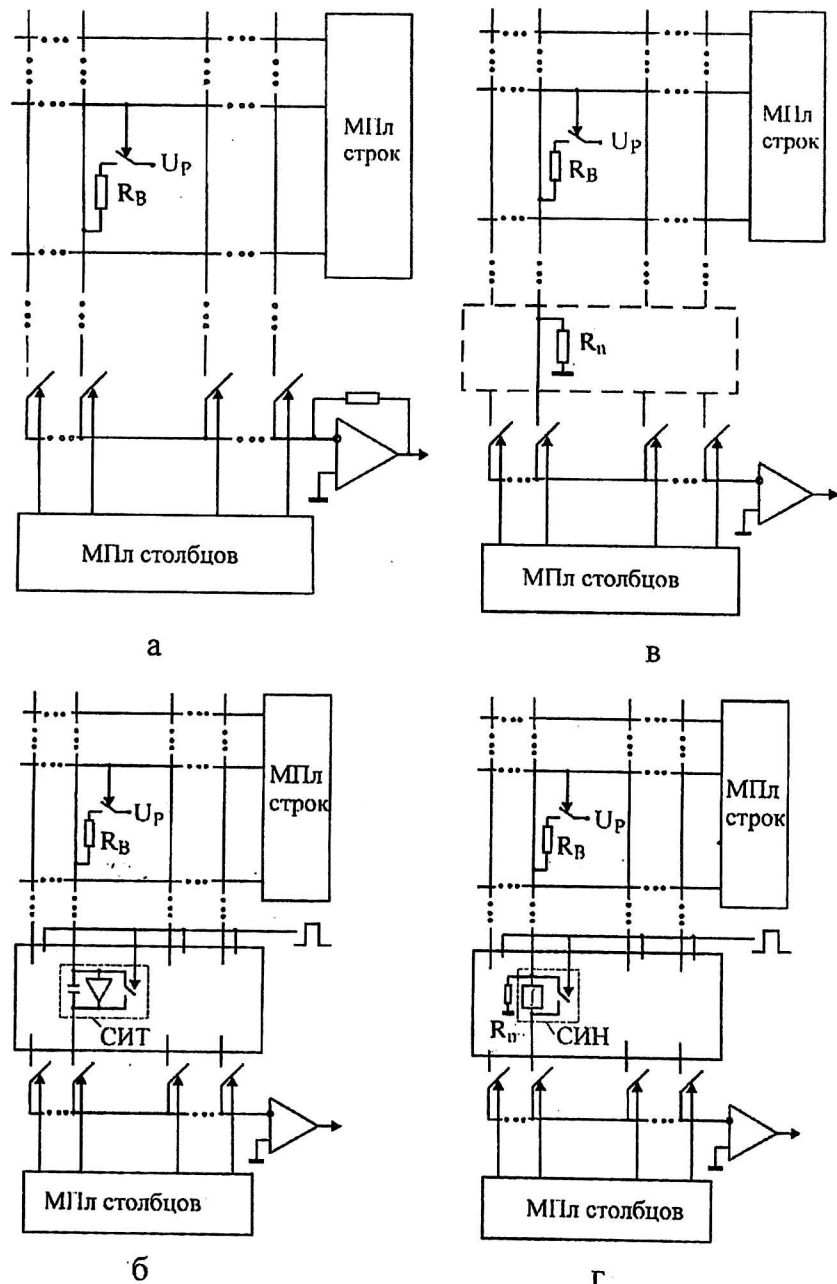


Схема с поэлементным токовым считыванием

Анализируя схему на рисунке, а в предположении преобладания тепловых (найквистовых) шумов МБ и его температурных шумов за счет теплообмена с окружением, можно записать следующие соотношения:

$$\Delta I_B = (U_B / R_B)(\Delta R_B / R_B) = (U_B / R_B)\alpha \Delta T_B; \quad (1)$$

$$I_{sh.nike}^2 = 4kT_B \Delta f_{TR} / R_B; \quad (2)$$

$$\Delta T_{B.NETD} = R_T \eta_{\Delta\lambda} K_{A,\Delta\lambda} NETD_{AB} M'_{\Delta\lambda} / (4F_z^2 + 1); \quad (3)$$

$$\Delta T_{B.ex}^2 = kT_B^2 / C_T; \quad (4)$$

$$E_{B,j} \leq C_T \Delta T_{B.compl}, \quad (5)$$

где ΔI_B , ΔR_B и ΔT_B — (малые) приращения тока, сопротивления и температуры МБ, соответственно;

U_B — напряжение на МБ при опросе;

R_B — электрическое сопротивление собственно терморезистивного слоя МБ;

α — тепловой коэффициент сопротивления;

$I_{sh.nike}$ — действующее значение шумового тока МБ;

k — постоянная Больцмана;

T_B — температура МБ;

Δf_{TR} — эффективная шумовая полоса электронного тракта (для упрощения анализа полагается, что этот тракт имеет частотную характеристику с резкими границами);

$\Delta T_{B.NETD}$ — приращение температуры МБ, вызванное изменением температуры рассматриваемой тепловой сцены на величину $NETD$;

R_T — тепловое сопротивление МБ;

$\eta_{\Delta\lambda} K_{A,\Delta\lambda}$ — эффективное значение произведения коэффициентов пропускания оптической среды и входного окна корпуса и поглощения излучения микроболометром для спектрального диапазона $\Delta\lambda$ его чувствительности;

A_B — площадь МБ;

$$M'_{\Delta\lambda, T_{sc}} = \int_{\Delta\lambda} [\partial P_{em}(\lambda, T_{sc}) / \partial T_{sc}]_{T_{sc}} d\lambda,$$

P_{em} — спектральная плотность мощности излучения тепловой сцены с температурой T_{sc} ;

F_z — величина, обратная относительному отверстию объектива;

$\Delta T_{B.ex}$ — действующее значение температурного шума (флуктуации температуры МБ, вызванной теплообменом за счет излучения и тепловой связи с кристаллом);

C_T — теплоемкость МБ;

$E_{B,j} = (U_B^2 / R_B) t_{el}$ — тепловая энергия, рассеиваемая в МБ при опросе;

$\Delta T_{B.compl}$ — соответствующее допустимое изменение температуры МБ.

Введем безразмерный параметр $\beta_{el} = \Delta f_{TR} \cdot t_{el}$, где t_{el} — время (импульсного) опроса элемента, и примем, что

$$t_{el} = t_K / (mn), \quad (6)$$

где t_K — время кадра; m и n — число ячеек МБМ по горизонтали и вертикали, соответственно.

Обычно значение β_{el} выбирают близким к 1, так как при этом полоса частот электронного тракта достаточна для передачи сигнала без существенного затягивания его длительности и одновременно не вызывает излишнего увеличения результирующего найквистова шума.

Из (1)–(4) следует, что эквивалентная шуму разность температур будет

$$NETD = \frac{4F_z^2 + 1}{R_T \eta_{\Delta\lambda} K_{A,\Delta\lambda} A_B M'_{\Delta\lambda}} \times \sqrt{\frac{kT_B}{C_T} \left(\frac{4\beta_{el}}{\alpha^2 \Delta T_{B,j}} + T_B \right)}, \quad (7)$$

где $\Delta T_{B,j}$ — изменение температуры МБ, вызванное опросом.

Для типичного случая при $F_z = 1$; $R_T = 1 \cdot 10^7$ К/Вт; $\eta_{\Delta\lambda} K_{A,\Delta\lambda} = 0,8$; $A_B = 1,6 \cdot 10^{-5}$ см²; $M'_{\Delta\lambda} = 2,6 \cdot 10^{-4}$ Вт·см⁻²·К⁻¹ ($\lambda \in 8-14$ мкм); $T_B = 300$ К; $C_T = 1 \cdot 10^{-9}$ Дж/К получим, что достижимые в соответствии с (7) значения $NETD$ ограничиваются величиной 5,2 мК, определяемой температурными шумами. При этом для $1/\alpha = 2,5 \cdot 10^{-2}$ К⁻¹; $\beta_{el} = 1$ и $\Delta T_{B,j} = 10$ К ухудшение температурного разрешения составит всего ~1,8 раза. В наиболее широко используемом материале термочувствительного слоя — оксидах ванадия VO_x — достижению этих значений мешает наличие избыточного шума, который растет при попытках увеличить значение $\Delta T_{B,j}$ за счет повышения тока опроса. Поэтому поиск способов устранения влияния избыточного шума — одна из главных задач разработчиков МБМ.

Из (1)–(4) следует также, что если указанные шумы невелики и требуется получить значения $NETD \leq NETD_M$, где последняя величина определяет соответствующее максимально допустимое значение, то необходимо выполнение условия

$$\beta_{el} \Psi \leq E_{B,j} \leq C_T \Delta T_{B.compl} \quad (8)$$

или адекватного ему

$$\frac{U_{B^{el}}^2}{C_T \Delta T_{B.compl}} \leq R_B \leq \frac{U_{B^{el}}^2}{\beta_{el} \Psi}, \quad (9)$$

где величина

$$\Psi = \frac{4kT_B}{\alpha^2 \left[R_T \eta_{\Delta\lambda} K_{A,\Delta\lambda} NETD_m \frac{A_B M'_{\Delta\lambda}}{4F_z^2 + 1} \right]^2 - \frac{kT_B^2}{C_T}} \quad (10)$$

имеет размерность энергии и определяется геометрическими, электро- и теплофизическими параметрами МБ, свойствами оптического тракта, условиями тепловой сцены и требованиями по ее температурному разрешению. Физическая реализуемость этих требований соответствует конечному и положительному значению Ψ .

В качестве примера, сохраняя прежними значения введенных ранее величин и полагая $\Delta T_{B.compl} = 10$ К, $NETD_m = 0,015$ К ("передний край" современных достижений в области МБМ), $U_B = 3$ В, $t_K = 40$ мс и $m \times n = 320 \times 240$, получим для (8)–(10) $\Psi = 2,9 \cdot 10^{-9}$ Дж и следующие ориентировочные интервалы значений $E_{B,j}$ и R_B :

$$2,9 \cdot 10^{-9} \text{ Дж} \leq E_{B,j} \leq 1 \cdot 10^{-8} \text{ Дж};$$

$$4,7 \cdot 10^2 \text{ Ом} \leq R_B \leq 2,3 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Эти величины, как и результаты оценок для других рассматриваемых схем, приведены в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ЗНАЧЕНИЙ $E_{B,j}$ И R_B ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ СХЕМ ПОСТРОЕНИЯ МБМ

Тип схемы	Значение	
	$E_{B,j}$, Дж	R_B , Ом
С поэлементным токовым считыванием	$2,9 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-8}$	$4,7 \cdot 10^2 - 2,3 \cdot 10^3$
С построчным токовым считыванием и накоплением в столбце	$1,5 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^5 - 1,0 \cdot 10^6$
С поэлементным потенциальным считыванием с делителя напряжения	$8,7 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-8}$	$4,7 \cdot 10^2 - 7,7 \cdot 10^2$
С построчным потенциальным считыванием с делителя напряжения и накоплением в столбце	$4,5 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^5 - 3,3 \cdot 10^5$

Отметим два существенных фактора: во-первых, выражение (1) предполагает преобладание величины R_B над величиной последовательного сопротивления элементов электрической

схемы (включая сопротивление "ног" МБ при "мостовой" его конструкции). Невыполнение этого условия равнозначно снижению величины $1/\alpha$; во-вторых, здесь и далее следует иметь в виду, что при величине удельного сопротивления болометрического слоя $R_{B.appor} < 10$ кОм/□ значения $1/\alpha$ оказываются менее приведенного выше [6], так что требуется корректировка исходных данных до получения "сопрягаемых" с ними результатов.

Схема с построчным токовым считыванием и накоплением в столбце

Для схемы на рисунке, б, где имеется линейка стробируемых интеграторов тока (СИТ), при построчном опросе и тех же источниках шума справедливы следующие соотношения:

$$\Delta Q_{NETD} = (U_B / R_B) t_{str} \alpha R_T \eta_{\Delta\lambda} \times K_{A,\Delta\lambda} NETD A_B M'_{\Delta\lambda} / (4F_z^2 + 1); \quad (11)$$

$$Q_{sh.nike}^2 = (4kT_B / R_B) t_{str} / 2; \quad (12)$$

$$Q_{sh.ex}^2 = (U_B / R_B)^2 (t_{str} / \alpha)^2 (kT_B^2 / C_T); \quad (13)$$

$$E_{B,j} \leq \min\{C_T \Delta T_{B.compl}; P_{mbm.compl} t_{str} / m\}, \quad (14)$$

где ΔQ_{NETD} — величина полезного заряда, определяемого изменением температуры тепловой сцены, равным $NETD$;

t_{str} — время одновременного опроса всех ячеек конкретной строки и накопления заряда в столбцовом СИТ;

$Q_{sh.nike}$ — среднеквадратичное значение найквистова шумового заряда СИТ;

$Q_{sh.ex}$ — среднеквадратичное значение шумового заряда СИТ за счет температурного шума;

$P_{mbm.compl}$ — допустимое значение мощности, потребляемой регулярной частью МБМ.

Выражение (12) учитывает, что шумовой ток с "белым" спектром накапливается в течение времени t_{str} . Выражение (13) отражает тот факт, что МБ можно рассматривать как однозвенный тепловой фильтр с постоянной времени $\tau_T = R_T C_T \sim t_K \gg t_{str}$, и за время t_{str} значение флуктуации температуры МБ остается практически неизменным. Выражение (14) связано с возможностью существования ограничения на рассеиваемую в ячейке мощность со стороны схем управления.

По аналогии с (16) запишем

$$t_{str} = t_K/n. \quad (15)$$

Из выражений (11)—(15) можно получить следующие соотношения:

$$\beta_{str}\Psi \leq E_{B,j} \leq \min\left\{C_T\Delta T_{B.compl}; \frac{P_{mbm.compl}t_{str}}{m}\right\}; \quad (16)$$

$$\frac{U_{B'_{str}}^2}{\min\{C_T\Delta T_{B.compl}; \frac{P_{mbm.compl}t_{str}}{m}\}} \leq R_B \leq \frac{U_{B'_{str}}^2}{\beta_{str}\Psi}, \quad (17)$$

где

$$\beta_{str} = 0,5. \quad (18)$$

Из сравнения (8), (9) и (16), (17) видно, сколь значительно могут отличаться интервалы значений R_B для двух рассмотренных схем из-за различия величин t_{el} и t_{str} . Результаты численных оценок при прежних допущениях относительно действующих ограничений также приведены в таблице.

Схема с поэлементным потенциальным считыванием с делителя напряжения

В схеме (см. рисунок, в) при прежних условиях по шумам справедливы следующие соотношения:

$$\Delta U_{NETD} \approx -U_p \frac{k_n}{(1+k_n)^2} \alpha R_T \eta_{\Delta\lambda} K_{A,\Delta\lambda} NETD \frac{A_B M'_{\Delta\lambda}}{4F_z^2 + 1}; \quad (19)$$

$$U_{sh.nike}^2 \approx 4kT_B \frac{k_n}{1+k_n} \Delta f_{TP}; \quad (20)$$

$$U_{sh.ex}^2 \approx [-U_p \frac{k_n}{(1+k_n)^2} \alpha]^2 kT_B^2 / C_T; \quad (21)$$

$$E_{B,j} \leq C_T \Delta T_{B.compl}, \quad (22)$$

где ΔU_{NETD} — полезный сигнал на шине столбца, соответствующий изменению температуры тепловой сцены, равному $NETD$;

U_p — напряжение питания, приложенное к делителю напряжения, состоящему из МБ и нагрузочного сопротивления R_n столбца;

$k_n = R_n/R_B$ — коэффициент деления напряжения питания;

$U_{sh.nike}$ — действующее значение напряжения теплового шума на столбцовой шине МБМ;

$U_{sh.ex}$ — действующее значение напряжения, соответствующего температурному шуму, на той же шине.

Из этих выражений следует, что

$$\frac{1+k_n}{k_n} \beta_{el}\Psi \leq E_{B,j} \leq C_T \Delta T_{B.compl}; \quad (23)$$

$$\left(\frac{U_p}{1+k_n}\right)^2 \frac{t_{el}}{C_T \Delta T_{B.compl}} \leq R_B \leq \frac{U_p^2 t_{el}}{\beta_{el}\Psi} \frac{k_n}{(1+k_n)^3}. \quad (24)$$

У коэффициента k_n есть оптимальное значение

$$k_{n.opt} = 0,5, \quad (25)$$

которое можно обычным образом получить, анализируя отношение выражения типа (19) к выражению для действующего значения результирующего шума, получаемому из (20), (21). Результаты вычислений для (23) и (24) с учетом (25) и приведенных ранее значений соответствующих параметров отражены в таблице.

Схема с построчным потенциальным считыванием с делителя напряжения с накоплением в столбце

Для этой схемы (см. рисунок, г), содержащей линейку стробируемых интеграторов напряжения (СИН), можно записать следующие соотношения:

$$\Delta U_{NETD_j} = (-U_p) S_j [k_n / (1+k_n)^2] \times \\ \times t_{str} \alpha R_T \eta_{\Delta\lambda} K_{A,\Delta\lambda} NETD \frac{A_B M'_{\Delta\lambda}}{4F_z^2 + 1}; \quad (26)$$

$$U_{sh.nike}^2 = S_j^2 4kT_B R_B \frac{k_n}{1+k_n} \frac{t_{str}}{2}; \quad (27)$$

$$U_{sh.ex}^2 = S_j^2 \left[U_p \frac{k_n}{(1+k_n)^2} \alpha t_{str} \right]^2 \frac{kT_B^2}{C_T}; \quad (28)$$

$$E_{B,j} \leq \min\{C_T \Delta T_{B.compl}; P_{mbm.compl} t_{str} / m\}, \quad (29)$$

где ΔU_{NETD_j} — полезный отклик на выходе СИН при изменении температуры тепловой сцены на величину $NETD$;

S_j — крутизна преобразования СИН;

$U_{sh.nike}$ и $U_{sh.ex}$ — действующие значения найквистова и температурного шумов на его выходе.

При прежних допущениях относительно преобладающих шумов из (26)—(29) можно получить следующие выражения:

$$\frac{1+k_n}{k_n} \beta_{str}\Psi \leq E_{B,j} \leq \min\{C_T \Delta T_{B.compl}; \\ P_{mbm.compl} t_{str} / m\}; \quad (30)$$

$$\left(\frac{U_p}{1+k_n}\right)^2 \frac{t_{str}}{\min\left\{C_T \Delta T_{B.compl}; \frac{P_{mbm.compl} t_{str}}{m}\right\}} \leq \leq R_B \leq \frac{U_p^2 t_{str}}{\beta_{str} \Psi} \frac{k_n}{(1+k_n)^3} \quad (31)$$

Сохраняются значения величин t_{str} и $k_{n,opt}$ из (18), (25). На основании (30) и (31) для прежних значений входящих в них аргументов вычисляются искомые величины джоулевой энергии и электрического сопротивления МБ, также отраженные в таблице. Этот способ оценки может быть легко распространен и на вариант электрической мостовой схемы МБ-ячейки, используемой в [2].

Заключение

Предложенный в работе подход к проектированию элементов МБМ позволяет сделать обоснованный выбор оптимальной структуры прибо-

ра, учитывающей возможности разработчика, в условиях отработанной технологии изготовления малошумящих микроболометрических приемников. При таком выборе ищется компромисс между сложностью электрической схемы, осуществляющей предобработку сигнала, и электрическими и теплофизическими параметрами МБ, доступными разработчику.

Литература

1. Tanaka A. et al. Influence of Bias Heating on Titanium Bolometer Infrared Sensor// SPIE. 1997. V. 3061. P. 198–209.
2. Howard P. et al. Advances in Microbolometer Focal Plane Technology et Boeing// Ibid. 1998. V. 3379. P. 47–57.
3. Tanaka A. et al. Infrared Focal Plane Array Incorporating Silicon IC Process Compatible Bolometer// IEEE Trans. on Electron. Dev. 1996. V. 43. №. 11. P. 1844–1850.
4. Wada H. et al. Design and Performance of 256x256 Bolometer-Type Uncooled Infrared Detector// SPIE. 1998. V. 3379. P. 90–100.
5. Tissot J.-L. et al. LETI/LIR's amorphous silicon uncooled microbolometer development// Ibid. P. 139–144.
6. Performance of new handheld IR camera using uncooled bolometer FPA// Ibid. 1996. V. 2744. P. 52–59.

Microbolometer matrix's interrogation mode relationships with NETD at the sensitive element's Nyquist and temperature noises predominance

Yu. M. Eskin

ORION Federal R&P Association, Moscow, Russia

The relationships between uncooled microbolometer matrix-based thermal imager's noise equivalent temperature difference and thermal energy dissipated in the sensitive element during the interrogation time values are discussed at microbolometer's Nyquist and temperature noises predominance. This dissipated energy is linked, by the mean of matrix operation mode, with the sensitive element resistance allowed values interval, and, hence its fabricating technology features. Four types of uncooled microbolometer matrix design are under consideration: element-by-element current read-out circuit; row-by-row current read-out circuit with column integrators; element-by-element voltage divider read-out circuit, and row-by-row voltage divider read-out circuit with column integrators.