

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.383.5.029.71/73

ПОРОГ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНФРАКРАСНЫХ ПРИБОРОВ, ПОСТРОЕННЫХ НА МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНИКАХ

© 2005 г. В. А. Маркин, канд. техн. наук

ВНЦ "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", Санкт Петербург

Предложена шумовая модель смотрящей ИК матрицы, учитывающая совместное действие пространственной и временной составляющих шума. На ее основе получены простые соотношения для расчета порога чувствительности смотрящих ИК приборов. Рассмотрено влияние остаточного пространственного шума на соотношение в чувствительности между смотрящей матрицей и сканирующей линейкой фоточувствительных элементов. Показано, что работа смотрящих ИК приборов в условиях неполного подавления пространственного шума допускает возможность сужения спектрального диапазона.

Коды OCIS: 040.1240, 120.0280.

Поступила в редакцию 29.04.2005.

1. Введение

Работающие в инфракрасном (ИК) диапазоне приборы наблюдения в соответствии с решаемыми задачами и особенностями построения принято [1, 2] делить на два класса: тепловизионные (по зарубежной классификации – FLIR) и тепlopеленгационные (IRST).

Перспективы радикального улучшения характеристик приборов обоих классов в настоящее время связываются [3, 4] с использованием матричных фотоприемных устройств (МФПУ). ИК приборы с МФПУ имеют ряд преимуществ, заключающихся в простоте и компактности оптической схемы, более высокой чувствительности, расширении возможностей алгоритмической обработки сигналов.

Основной режим работы, который используется в ИК приборах с МФПУ, получил название "смотрящий" (staring). В этом случае каждый детектор матрицы в течение всего времени кадра воспринимает фотонный поток от соответствующего ему элемента наблюдаемой картины, преобразует его в электрический ток, который интегрируется емкостным накопителем заряда. Считывание сигналов с накопителей на выход матрицы осуществляется последовательно, в циклическом режиме.

В идеализированном случае ожидаемое улучшение порога чувствительности прибора пропорционально квадратному корню из числа фоточувствительных элементов. К сожалению, практика применения МФПУ в ИК приборах не подтверждает этот оптимистический прогноз, реальный выигрыш в чув-

ствительности оказывается значительно меньшим. Основной причиной такого положения является неоднородность характеристик элементов МФПУ и вызываемый ею дополнительный шум, получивший название "шум фиксированной структуры" (fixed pattern noise (FPN)). Из-за низких радиационных контрастов, наблюдаемых в ИК области спектра, требования к пространственной однородности характеристик МФПУ оказываются очень жесткими [1]. Без применения специальных схем компенсации неоднородностей информация, получаемая с ИК МФПУ в смотрящем режиме, искажена структурным шумом настолько сильно, что, как правило, не годится для использования в высокочувствительных ИК приборах наблюдения. В настоящее время активно разрабатываются [5–9] построенные на различных принципах схемы автоматической компенсации неоднородностей характеристик смотрящих МФПУ. Они получили название схем NUC (от Non Uniformity Correction). Типичное решение заключается в периодически повторяющейся калибровке приемных каналов ИК прибора по однородным источникам излучения постоянной интенсивности. Разрабатываются [7, 8] также концепции и методы NUC, основанные на использовании статистики наблюдаемых прибором сцен и не требующие применения дополнительных источников калибровочного излучения. Поскольку структурный шум содержит несколько независимых составляющих, процедура определения корректирующих коэффициентов при любом методе должна быть многоточечной [10], на практике обычно применяется двухточечная NUC [5].

Если бы характеристики матрицы были абсолютно линейными и стабильными во времени, то было бы возможным с помощью системы NUC полностью устранить влияние пространственной неоднородности на порог чувствительности ИК прибора. Однако, как показано в ряде исследований [10–12], фотоприемные матрицы ИК диапазона не являются такими идеальными приборами. Из-за нелинейности амплитудных характеристик элементов матрицы, наличия избыточного $1/f$ -шума, разброса спектральных характеристик, случайного дрейфа рабочей температуры и других причин физического и технического характера влияние неоднородностей характеристик не может быть полностью компенсировано в широком диапазоне рабочих условий, характерном для FLIR- и IRST-приборов. Более того, уровень остаточной неоднородности (RNU) и соответствующее значение остаточного шума фиксированной структуры (RFPN) во многих случаях является [13] главным фактором, ограничивающим важнейшие характеристики охлаждаемых ИК матриц и ИК приборов, в первую очередь порога чувствительности и дальности действия. Поэтому способность систем NUC различной сложности корректировать неоднородности параметров, обеспечивая минимальное среднеквадратичное отклонение (СКО) выходного шума, является предметом важнейшего интереса при анализе характеристик ИК приборов. Методика и аппаратура экспериментального измерения параметров RFPN разработаны в работе [10].

Из вышеизложенного следует, что при системном анализе и оценках параметров чувствительности FLIR- и IRST-приборов необходимо в дополнение к временному шуму учитывать влияние RFPN. В последующих разделах получены и анализируются соотношения для расчета отношения сигнал/шум и порога чувствительности ИК смотрящих приборов с учетом совместного действия RFPN и временного шума. Простота и наглядность полученных формул обеспечиваются сделанными при их выводе упрощениями, вполне допустимыми для условий внутриатмосферного применения ИК приборов наблюдения.

2. Шумовая модель смотрящей матрицы и отношение сигнал/шум

Шумовая модель смотрящей ИК матрицы должна учитывать совместное действие временного и остаточного структурного шумов. Естественным является предположение об их статистической независимости. Предположим, что ИК прибор проводит наблюдение за точечным объектом на идеально однородном оптическом фоне, создающем в фокальной плоскости приемного объектива облученность со спектральной плотностью фотонного потока, равной b_λ .

Заряд, накопленный в некотором (i, j) приемном канале матрицы за время τ_n и выраженной числом носителей (N_n) в рабочем спектральном диапазоне $\Delta\lambda$, будет составлять

$$N_n = A\tau_n\eta_{ij}B, \quad (1)$$

где A – площадь фоточувствительного элемента, η_{ij} – квантовая эффективность, B – интегральная фоновая облученность фокальной плоскости,

$$B = \int_{\Delta\lambda} b_\lambda d\lambda. \quad (2)$$

Средний квадрат фоновой временной шум матрицы (в предположении применимости статистики Пуассона)

$$\overline{n_b^2} = N_b = A\tau_n\eta_{ij}B. \quad (3)$$

Другими составляющими временного шума матрицы являются [14] шум Джонсона сопротивления фотодиода при нулевом смещении (R_0) и шум электронной схемы мультиплексирования. По данным [14] нетрудно получить, что средний квадрат заряда, создаваемого шумом Джонсона,

$$\overline{n_j^2} = A\tau_n 2kT/R_0 Aq^2, \quad (4)$$

где k – постоянная Больцмана, q – заряд электрона, T – температура матрицы.

Шум мультиплексирования ($\overline{n_{ш}^2}$) может быть определен [15] только с учетом выбранной конфигурации электронной схемы.

Из-за остаточной неоднородности и разброса по полю матрицы параметра η_{ij} в выходном сигнале появится случайная составляющая – пространственный шум.

Пусть пространственный ансамбль величин $\eta(i, j)$ характеризуется средним значением η_a и СКО $\Delta\eta$. Тогда, как следует из (1), средний квадрат случайной составляющей, искажающей считываемый сигнал, будет иметь вид

$$\overline{n_R^2} = u_R^2 A^2 \tau_n^2 B^2 \eta_a^2, \quad (5)$$

где $u = \Delta\eta/\eta_a$ – параметр, характеризующий неоднородность чувствительности (коэффициент вариации).

Наблюдаемый точечный источник сигнала вызовет на выходе одного из элементов матрицы дополнительный заряд

$$n_s = \tau_n \eta_a \int_{\Delta\lambda} \Phi_s(\lambda) d\lambda. \quad (6)$$

Здесь Φ_s – спектральная плотность мощности принимаемого сигнала, выраженная в единицах интенсивности фотонного потока $\text{с}^{-1}\text{мкм}^{-1}$.

$$\text{SNR} = n_s / \sqrt{n_b^2 + n_j^2 + n_m^2 + n_R^2} = \tau_n \eta_a \int_{\Delta\lambda} \Phi_s d\lambda / \sqrt{A\tau_n \eta_a B + 2kT/(R_0 A q)^2 + n_m^2 + u^2 A^2 \tau_n^2 \eta_a^2 B^2}. \quad (7)$$

В ИК приборах наземного использования, работающих в длинноволновом (8–14 мкм) и средневолновом (3–5 мкм) окнах прозрачности атмосферы, доминирующей составляющей временного шума охлаждаемых детекторов является шум, вызванный флуктуациями фотонного потока (режим ОФ). В этом случае выражение (7) упрощается и преобразуется к виду

$$\text{SNR} = (\text{SNR})_{\text{ОФ}} / \sqrt{1 + u^2 A\tau_n \eta_a B}, \quad (8)$$

где

$$(\text{SNR})_{\text{ОФ}} = \int_{\Delta\lambda} \Phi_s d\lambda \sqrt{\tau_n \eta_a / AB}$$

– отношение сигнала к шуму на выходе идеально однородной матрицы, работающей в режиме ОФ, т. е. при отсутствии RFPN.

В полученном выражении (8) влияние RFPN выражено безразмерным множителем z :

$$z = 1 / \sqrt{1 + u^2 A\tau_n \eta_a B}, \quad (9)$$

который можно рассматривать как коэффициент ухудшения SNR за счет действия RFPN.

Формула (8) обеспечивает возможность проведения оценок влияния RFPN на SNR смотрящей матрицы и связанные с ним параметры ИК прибора в предельно простой форме.

Входящее в (9) произведение $A\tau_n \eta_a B$ по физическому смыслу представляет собой число электронов, накопленных на выходе приемного канала матрицы за период τ_n .

Предельное значение накапливаемого заряда определяется параметром (C_s) матрицы, получившим название “вместимость накопителя заряда” (charge storage capacity). В охлаждаемых фотоприемных матрицах ИК диапазона этот параметр ограничен значением $C_s = (3–5) \times 10^7$ электронов, поскольку максимальная плотность электронов, которые можно накопить в кремниевом МОП-конденсаторе, $N_m \approx 10^{12}$ эл/см² [16].

Таким образом, в предельном случае коэффициент ухудшения z будет зависеть только от площади чувствительного элемента матрицы и коэффициента вариации u :

$$z_{\text{max}} = 1 / \sqrt{1 + u^2 A N_m} = 1 / \sqrt{1 + u^2 C_s}. \quad (10)$$

Если принять во внимание, что наилучший порог чувствительности обеспечивается при макси-

мальном времени накопления τ_n и типичным является режим работы ИК прибора на границе зоны линейности накопителя, вблизи его переполнения, то выражение (10) можно использовать для количественных оценок ожидаемых потерь в SNR, вызванных пространственной неоднородностью характеристик матрицы.

На рис. 1 для нескольких значений линейных размеров чувствительных элементов, выбранных в диапазоне 10–100 мкм, показаны зависимости коэффициента ухудшения SNR от характеризующих RFPN коэффициентов вариации чувствительности. Представленные данные могут служить для определения требований к схеме NUC и оценок ожидаемого порога чувствительности ИК приборов с учетом действия структурного шума.

Технологическая неоднородность чувствительности современных глубокоохлаждаемых ИК матриц составляет величину порядка 10%, т. е. соответствует $u = 0,1$. Из выражения (10) и рис. 1 вид-

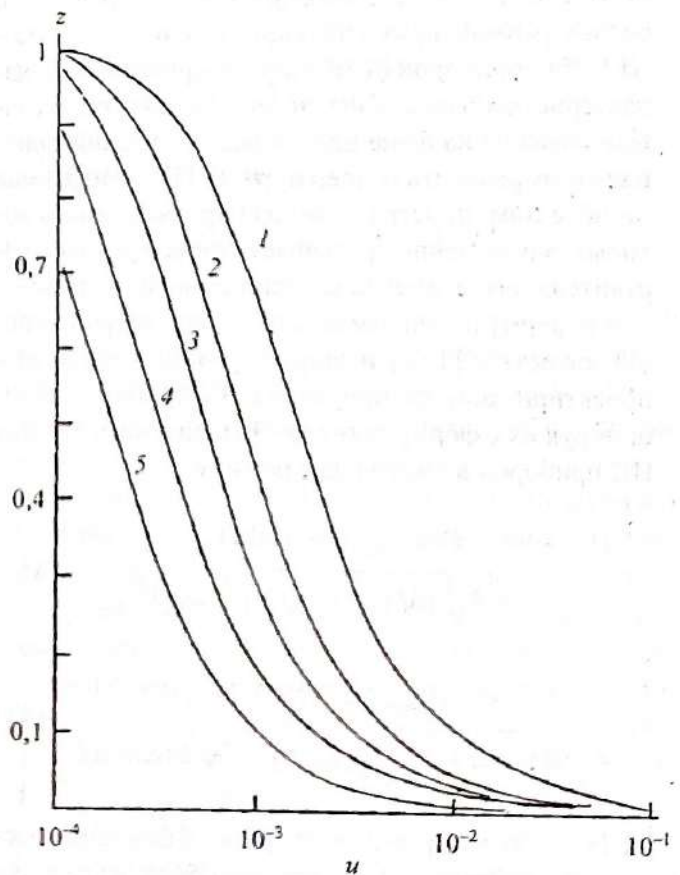


Рис. 1. Зависимости коэффициента потерь чувствительности матрицы от остаточной неоднородности. $a = 10$ (1), 20 (2), 30 (3), 50 (4), 100 мкм (5).

но, что в этом случае за счет действия RFPN отношение сигнал/шум будет ухудшено в 10^2 – 10^3 раз по сравнению с идеально однородной матрицей. Очевидно, что использование такой матрицы в высокочувствительных ИК приборах без применения схемы NUC нецелесообразно.

Из рис. 1 также видно, что для устранения влияния RFPN, например, по критерию $z \geq 0,5$ значение u должно быть уменьшено до 2×10^{-3} – 2×10^{-4} , т. е. на 2–3 порядка от значения технологической неоднородности. Возможность разработки системы NUC, отвечающей этим жестким требованиям, является важной и сложной задачей, без решения которой следование принципу увеличения формата матриц для улучшения чувствительности ИК приборов нельзя считать оправданным.

3. Порог чувствительности ИК приборов на двумерных матрицах с учетом действия RFPN

Параметры, характеризующие способность ИК приборов обнаруживать и наблюдать слабые сигналы, по определению всегда связаны с величиной SNR, получаемой по тест-объектам. Для приборовIRST в качестве такого параметра используется облученность входного зрачка, получаемая от удаленного точечного источника и вызывающая на выходе сигнал, равный шуму. Общепринятое обозначение – NEI. Для приборов FLIR широко применяемой характеристикой способности системы различать слабые сигналы на фоне шумов является эквивалентная шуму разность температур (NETD), измеряемая по объектам, пространственная протяженность которых существенно превышает угловой размер чувствительного элемента фотоприемника. Определения и формулы для расчета этих параметров хорошо известны [1, 2] и широко используются при проектировании сканирующих ИК приборов. Комбинируя их с формулами (8)–(10), получим, что для ИК приборов в смотрящем режиме

$$\begin{aligned} (NEI)_{\text{star}} &= z^{-1} (NEI)_{\text{OF}} = \\ &= 4 \sqrt{A \Delta f (1 + u^2 k_{\text{н}} C_s)} / \pi D^* D_0^2 \epsilon, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} (NETD)_{\text{star}} &= z^{-1} (NETD)_{\text{OF}} = \\ &= 4 \sqrt{\Delta f (1 + u^2 k_{\text{н}} C_s)} / \left[(D_0/f)^2 D^* \sqrt{A \epsilon \Delta W / \Delta T} \right], \end{aligned} \quad (12)$$

где D_0, f – диаметр входного зрачка и фокусное расстояние объектива, D^* – удельная обнаружительная способность (эффективное значение), ϵ – энергетический КПД оптической системы, Δf – эквивалентная шумовая полоса, $\Delta W / \Delta T$ – производная по тем-

пературе от плотности потока излучения наблюдаемой картины, u – коэффициент неоднородности чувствительности, C_s – вместимость накопительной системы, $k_{\text{н}}$ – коэффициент наполняемости, т. е. отношение фонового заряда, накопленного за время $\tau_{\text{н}}$, к величине C_s .

Для решения задач проектирования высокочувствительных ИК приборов представляют интерес априорные оценки выигрыша в отношении сигнала к шуму, получаемые при переходе от сканирующего линейчатого фотоприемника к матричному смотрящему. При этом необходимо учитывать, что в сканирующих приборах влияние структурного шума незначительно [17], что обусловлено особенностями применяемых схем обработки сигнала.

Пусть сканирующая линейка содержит m фоточувствительных элементов, а сравниваемая с ней двумерная матрица имеет формат $m \times n$. Очевидно, что при одинаковых поле зрения и периоде кадра время экспозиции элемента в сканирующем приборе будет в n раз меньше, чем в смотрящем. Делая соответствующие подстановки в выражение (7), можно получить, что выигрыш (γ) в отношении сигнала к шуму будет составлять

$$\gamma = (SNR)_{\text{star}} / (SNR)_{\text{scan}} = \sqrt{n} z. \quad (13)$$

Видно, что достигаемый выигрыш всегда меньше, чем ожидаемый в идеализированной схеме ($\gamma_{\text{ид}} = \sqrt{n}$). Он зависит от уровня остаточной неоднородности параметров матрицы (u) и накапливаемого заряда ($A \tau_{\text{н}} \eta_0 B$) и увеличивается с уменьшением фоновой засветки (B).

На рис. 2 дается графическое представление полученного результата. На нем показаны зависимости γ от соотношения между количествами фоточув-

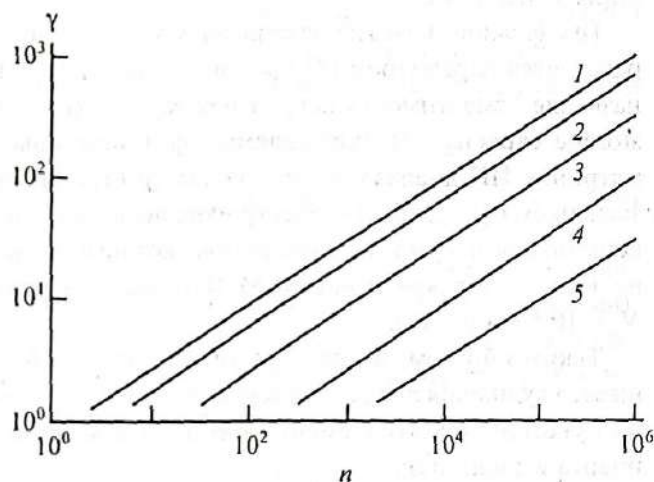


Рис. 2. Выигрыш в SNR, получаемый при замене сканирующей линейки смотрящим МФПУ, в зависимости от соотношения между количествами их элементов. $u = 10^{-4}$ (1), 3×10^{-4} (2), 10^{-3} (3), 3×10^{-4} (4), 10^{-2} (5).

Таблица 1. Параметры приемной системы

Параметр	Значение
Рабочая апертура (D_0), см	10
Фокусное расстояние (f), см	20
Размер фоточувствительного элемента (A), мкмхмкм	30х30
Формат смотрящей матрицы	256х256
Формат сканирующей матрицы	1х256
Рабочий спектральный диапазон, мкм	3,5–5
Квантовая эффективность элементов матрицы (η), %	60
Обнаружительная способность $D_{\lambda m}$ (при фоновой облученности $B \leq 2 \times 10^{14}$ л/см ² с), см Гц ^{1/2} Вт ⁻¹	4×10^{11}
Емкость накопителя заряда, е	3×10^7
Период интегрирования ($\tau_{\text{и}}$), мс	10
Полный энергетический КПД оптической системы	0,5

ствительных элементов матрицы и сканирующей линейки при различных значениях RFPN и в условиях максимально допустимого уровня фоновых засветок (т. е. при $\tau_{\text{и}} \eta_0 B \approx N_m$).

В качестве примера можно рассмотреть гипотетическое приемное устройство с диапазоном 3,5–5 мкм, параметры которого приведены в табл. 1.

В табл. 2 приведены результаты расчета по формулам (11) и (12) пороговых параметров NEI и NETD выбранной приемной системы для случаев использования в ней смотрящей матрицы и сканирующей линейки. При расчете было принято, что параметры сканирующей линейки точно соответствуют параметрам одного столбца смотрящей матрицы. Предполагалось также, что размеры кадра составляют $2^\circ \times 2^\circ$ и времена его однократного осмотра ($T_k = \tau_{\text{и}} = 10$ мс) в обоих случаях одинаковы, а радиационная температура фона $T_b = 290$ К.

Из данных табл. 2 видно, что в рассмотренном примере пороговые параметры прибора с двумерной смотрящей матрицей превосходят соответству-

Таблица 2. Порог чувствительности ИК приборов

Тип прибора. Качество схемы выравнивания (NUC)	NEI, Вт/см ²	NETD, мК
Сканирующий ($V_{\text{СК}} = 200$ град/с)	$2,1 \times 10^{-14}$	250
Смотрящий с идеальной NUC	$1,3 \times 10^{-15}$	16
Смотрящий без схемы NUC ($u = 6\%$)	25×10^{-14}	~3000
Смотрящий со схемой NUC, обеспечивающей остаточную неоднородность:		
$u = 1\%$	6×10^{-14}	715
$u = 0,3\%$	$1,9 \times 10^{-14}$	227
$u = 0,1\%$	8×10^{-15}	74
$u = 0,01\%$	$1,4 \times 10^{-15}$	17

ющие параметры прибора со сканирующей линейкой только в тех случаях, когда применяемая схема NUC уменьшает начальную (технологическую) неоднородность чувствительности (6%) не менее чем в 20 раз. Выигрыш по чувствительности, близкий к идеальному ($\sqrt{n} = 16$), мог бы быть достигнут при эффективности NUC в 600 раз большей.

4. Особенности выбора рабочего спектрального диапазона смотрящих ИК приборов

Остаточный структурный шум смотрящих ИК матриц не только ухудшает SNR, но и изменяет характер его зависимости от ряда параметров, выбираемых при проектировании ИК приборов, таких как период накопления, размер фоточувствительных элементов, границы рабочего спектрального диапазона.

Из уравнений (7) и (8) видно, что имеются две четко выраженные области такой зависимости. При выполнении условия $u^2 A \tau_{\text{и}} \eta B < 1$ прибор работает в режиме ограничения чувствительности флуктуациями фонового потока (ОФ-ограничение) с характерными для этого режима взаимозависимостями параметров: $\text{SNR} \sim \sqrt{\eta \tau_{\text{и}}} / \sqrt{AB}$.

В другом предельном случае, когда выполняется обратное условие $u^2 A \tau_{\text{и}} \eta B > 1$, смотрящая матрица работает в режиме ограничения чувствительности остаточным структурным шумом (RNU-ограничение). Из (8) легко видеть, что отношение сигнал/шум в этом режиме:

$$(\text{SNR})_{\text{RNU}} = \int_{\Delta\lambda} \Phi_s d\lambda / ABu. \quad (14)$$

SNR теперь не зависит от периода накопления и квантовой эффективности, но обратно пропорционален первой степени (а не корню) площади фоточувствительного элемента и плотности фотонной засветки.

В приборах IRST и FLIR внутриатмосферного применения, использующих сканирование, границы рабочего спектрального диапазона выбираются согласованными с границами соответствующего окна прозрачности атмосферы. Такой выбор рационален с точки зрения получения лучшего SNR, поскольку при сужении спектрального диапазона внутри окна прозрачности полезный сигнал убывает быстрее, чем временной шум.

В ИК приборах с двумерными матрицами, работающими в смотрящем режиме, картина может быть другой. В случае преобладания структурного шума сужение рабочего спектрального диапазона может и не приводить к потерям SNR, поскольку и сигнал,

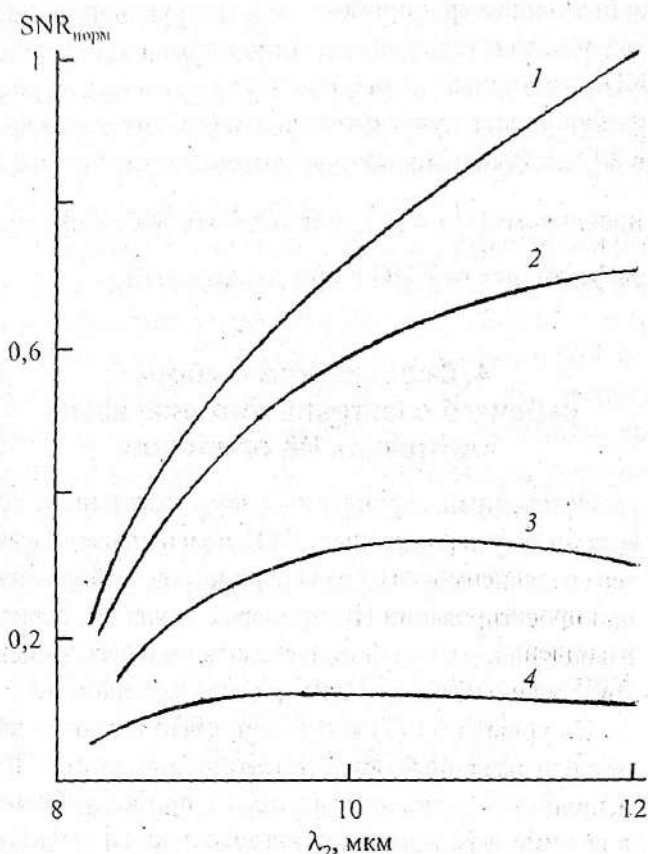


Рис. 3. Нормированные зависимости SNR от длинноволновой границы спектрального диапазона при различных уровнях RFPN. $u = 0$ (1), 10^{-4} (2), 3×10^{-4} (3), 10^{-3} (4).

и шум, как можно видеть из формулы (14), уменьшаются при этом примерно с одинаковой скоростью. Изменение границ рабочего спектрального диапазона матричного ИК прибора может оказаться вполне допустимым в тех пределах, пока чувствительные элементы матрицы остаются в режиме ОФ.

На рис. 3 для смотрящего прибора IRST, работающего в окне прозрачности 8–12 мкм, показаны рассчитанные в нормированном виде по формуле (8) зависимости SNR от длинноволновой границы (λ_2) при различных уровнях остаточного пространственного шума. При расчетах было принято, что спектральный состав фонового излучения соответствует абсолютно черному телу при 290 К (АЧТ290К), а наблюдаемый объект имеет спектральную характеристику излучения, соответствующую АЧТ330К. Период накопления выбран из условия наполнения накопителя заряда в условиях максимальной фоновой облученности ($\lambda_2 = 12$ мкм) и предполагался неизменным.

Из представленных на рис. 3 данных видно, что при остаточной неоднородности чувствительности 0,03% и большей уменьшение длинноволновой границы спектрального диапазона от 12 до 9 мкм не приводит к практически заметному ухудшению SNR.

В спектральном диапазоне 3,5–5 мкм характер зависимости SNR от λ_2 остается подобным приведенному на рис. 3. Для ИК приемной системы, па-

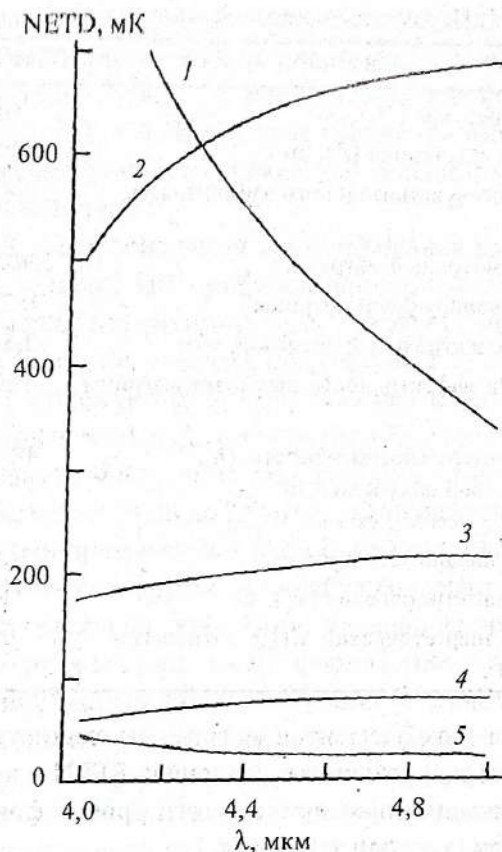


Рис. 4. Зависимости NETD от длинноволновой границы спектрального диапазона. 1 – сканирующий, 2 – смотрящий при $u = 10^{-2}$, 3 – при $u = 3 \times 10^{-3}$, 4 – при $u = 10^{-3}$, 5 при $u = 3 \times 10^{-4}$.

раметры которой даны в разд. 3, были рассчитаны абсолютные значения NETD в зависимости от λ_2 . Особенностью расчета NETD является необходимость учитывать изменение производной от плотности потока излучения ($\Delta W / \Delta T$) при изменении λ_2 . Полученные результаты представлены на рис. 4.

Для случаев чисто временного шума и при очень малых уровнях FPN ($u \leq 10^{-4}$) наблюдается ухудшение NETD (от 15 до 35 мК) при снижении длинноволновой границы с 5 до 4 мкм (кривая 5). По мере роста RFPN тенденция ухудшения исчезает, наблюдается даже некоторое улучшение NETD (с 220 до 180 мК при $u \approx 3 \times 10^{-3}$).

Длинноволновую границу рабочего спектрального диапазона выгодно уменьшать, если условия работы ИК прибора предполагают возможность появления в поле зрения источников помеховых засветок. Характерный пример, подтверждающий правильность описанного здесь подхода к выбору длинноволновой границы, рассмотрен в работе [17], где показано, что эффекты нагревающегося в поле обтекателя ракеты могут быть уменьшены без потери порога чувствительности ИК приемного устройства при сужении спектрального диапазона смотрящей матрицы с 3,6–4,8 до 3,6–4,2 мкм. Более низкий уровень засветок, полученный в узком спектральном диапазоне, приводил к уменьшению

структурных шумов, порог чувствительности (NEI) координатора повышался, что обеспечивало работу на предельной дальности, несмотря на уменьшение интенсивности полезного сигнала.

В целом рассмотренные особенности выбора рабочего спектрального диапазона смотрящих ИК приборов подтверждают возможность снижения требований к длинноволновой границе спектрального диапазона чувствительности двумерных матричных приемников, особенно с учетом вынужденной необходимости для современных ИК приборов работать в условиях неполного подавления структурных шумов.

4. Заключение

Результаты, полученные в данной работе, могут быть резюмированы следующим образом.

В приборах FLIR иIRST, работающих в приземном слое атмосферы и использующих двумерные смотрящие матрицы, влияние FPN на порог чувствительности оказывается очень сильным. Это объясняется малостью естественных радиационных контрастов, наблюдаемых в ИК диапазоне. Известные системы NUC позволяют уменьшить FPN, но не позволяют полностью устранить его влияние, особенно с учетом изменяющихся рабочих условий. Поэтому характеристики чувствительности ИК приборов должны оцениваться с учетом совместного действия остаточного структурного и временного шумов.

Рассмотренная в работе простейшая шумовая модель смотрящей матрицы позволяет проводить такие оценки в условиях, когда временной шум приемных каналов матрицы определяется величиной фоновой засветки (ОФ-режим).

Показано, что даже в условиях крайне низкой ($\sim 0,1\%$) остаточной неоднородности параметров, которая может быть обеспечена только при использовании высокоэффективной системы NUC, ухудшение SNR за счет действия RFPN может составлять до 3–5 раз.

При остаточной неоднородности порядка 1% величина потерь в SNR возрастает до 20–50 и более раз. Реальный выигрыш в чувствительности по сравнению со сканирующей линейкой оказывается существенно меньшим, чем $\sqrt{n}$, предсказываемый идеализированной теорией. Работа в условиях ограничения чувствительности структурным шумом допускает возможность снижения границ рабочего спектрального диапазона приборов без потери порога чувствительности. Поиск совершенствования схем NUC и работа над улучшением однородности характеристик ИК матриц не менее важны, чем работа над увеличением формата матриц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ллойд Дж. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978. 414 с.
2. De Jong A.IRST and its perspective // Proc. SPIE. 1995. V. 2552. P. 206–213.
3. Ерофейчев В.Г., Мирошников М.М. Перспективы использования ИК матриц в тепловидении // Оптический журнал. 1997. № 2. С. 5–13.
4. Coutris J.F., Dupoux T., Lonnoy J. Staring arrays – the new birth of thermal imager for the millenium // Proc. SPIE. 2000. V. 4130. P. 568–575.
5. Vencaswarlu R., Er M.H., Gan Y.H., Fong Y.C. Nonuniformity compensation for IR focal plane array sensors // Proc. SPIE. 1997. V. 3061. P. 915–926.
6. Schuls M., Caldwell L. Nonuniformity correction and correctability of infrared focal plane arrays // Infrared Phys. and Techn. 1995. V. 36. P. 763–777.
7. Павлова В.А., Тетерин В.В., Дегтярев Е.В., Рудний И.В. Иконический подход к решению проблемы неоднородностей чувствительности многоэлементных ФПУ в сканирующих тепловизорах // Оптический журнал. 1997. № 2. С. 21–29.
8. Torres S.N. et al. Adaptive scene-based nonuniformity correction method for infrared focal plane arrays // Proc. SPIE. 2003. V. 5076. P. 130–139.
9. Александров В.А., Кремень Н.В. Автоматическая компенсация неоднородностей интегральной чувствительности фотоприемного устройства тепловизионной системы // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 2. С. 25–30.
10. Scribner D.A., Kruer M.R., Sarkady K., Gridley J.E. Spatial noise in staring IR focal plane arrays // Proc. SPIE. 1988. V. 930. P. 56–63.
11. Scribner D.A. et al. Physical limitations to nonuniformity correction in IR focal plane arrays // Proc. SPIE. 1987. V. 865. P. 185–202.
12. Bluzer N. Sensitivity Limitations on IRFPA imported by detector nonuniformities // Proc. SPIE. 1988. V. 930. P. 64–75.
13. Tribolet Ph., Chorier Ph., Pistone Fr. Key performans drivers for cooler large IR staring arrays // Proc. SPIE. 2003. V. 5074. P. 173–183.
14. Ерофейчев В.Г. Инфракрасные фокальные матрицы // Оптический журнал. 1996. № 6. С. 4–17.
15. Fossum E.R., Pain B. Infrared Readout Electronics for space science sensors: state of art and future directions // Proc. SPIE. 1993. V. 2020. P. 262–285.
16. Богомолов П.А., Сидоров В.И., Усольцев И.Ф. Приемные устройства ИК систем. М.: Радио и связь, 1987. 208 с.
17. Naveh O. Sensitivity of scanning and staring infrared seekers for air-to-air missiles // Proc. SPIE. 1997. V. 3061. P. 692–711.