

Исследование метода коррекции остаточной неоднородности тепловизионного канала с микросканированием

И. И. Кремис

В работе обоснована необходимость учета качества коррекции неоднородности чувствительности фотоприемника при проектировании тепловизионных приборов. Изложены результаты исследования эффективности метода фильтрации остаточной неоднородности с использованием микросканирования. Показано, что использование метода фильтрации снижает уровень шумов: временного – в 1,57 раза, пространственного – в 5,2 раз. Это улучшает показатель РТЭШ тепловизионного канала в 3,24 раза.

Ключевые слова: остаточная неоднородность, чувствительность, микросканирование.

Введение

В настоящее время существует ряд работ, которые развивают понимание процессов, определяющих возможности формирования качественного изображения тепловизионного прибора (ТВП) [1, 2]. Здесь можно отметить работы, касающиеся методов коррекции геометрического шума [3, 4, 8], методов обработки скорректированного изображения [3–5], работ, посвященных исследованиям выходного сигнала фотоприемных устройств [6, 7, 10] и методам оптимизации инфракрасной системы (ИКС) [11–13, 16].

Каждая из указанных работ позволяет решить задачу получения качественного изображения отдельно и в разной степени эффективности [3, 4, 9] при оптимальной компоновке тракта ИКС [11]. При этом, одним из оптимизируемых параметров – критериев качества, определяющих эффективность ТВП, – является его пороговая чувствительность ΔT_n [11, 12].

Известные выражения расчёта пороговой температурной чувствительности (т. е. разность температур, эквивалентная шуму – РТЭШ), представленные в [13, 16], позволяют оптимизировать параметры ИКС в различных условиях и с различными допущениями. Здесь могут быть учтены параметры оптической системы, атмосферы, распределения температуры фона и объекта,

параметры фотоприемника и др. Другими словами, расчет ΔT_n выполняется с учетом факторов, участвующих в формировании изображения и расположенных до фотоприемника включительно. Поэтому рассчитанный параметр не является пороговой чувствительностью всего тепловизионного канала, т. к. в нем не учитывается разброс параметров сигналов фотоэлементов, в частности, геометрический (пространственный) шум (ГШ).

В реальных тепловизионных каналах выходной сигнал с фотоприемника корректируется специальной системой обработки сигналов. При этом эффективность коррекции сигнала фотоприемника оценивается коэффициентом степени коррекции C_k , равном отношению среднего квадратического отклонения (СКО) шума геометрического σ_r к СКО шума временного $\sigma_{вр}$ [14, 16]. C_k позволяет оценивать качество выравнивания сигнала фотоприемника, а именно, наличие остаточного геометрического шума в выходном сигнале ТВП [3].

В источниках [13, 15, 16] были найдены выражения, позволяющие связать величину ГШ с температурной чувствительностью тепловизора. Выражения получены, исходя из понимания иерархии качества ТВП, когда показатели назначения имеют более высокий уровень, чем уровень иконический, определяющий свойства ИКС как информационного канала: качество ТВП отождествляется с качеством формируемого им изображения [17, 18]. Величина C_k как параметр качества изображения в [17] не рассматривается.

В настоящей работе представлены результаты исследования эффективности метода фильтрации остаточного шума неоднородности (ОНЧ) матричных фотоприемников в тепловизорах с микросканированием, её цель – показать необходимость учета качества коррекции геометрического шума при проектировании тепловизионных приборов.

Кремис Игорь Иванович, зав. отделом, к.т.н.
Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ».
Россия, 630090, Новосибирск, проспект Академика
Лаврентьева, 2/1.
E-mail: ktipm@oesd.ru

Статья поступила в редакцию 14 мая 2018 г.

Теория проблемы

При всем многообразии вариантов расчета РТЭШ для различных условий [2, 12, 16, 17] величина ΔT_{Π} рассчитывается для порогового шума фотоприемника σ_{Π} как совокупности внутренних шумов фотоприемника: фотонного, теплового, $1/f$, генерационно-рекомбинационного и шума считывания [16]. При этом величина σ_{Π} имманентно присутствует в формулах расчета чувствительности в величине удельной обнаружительной способности или порогового потока излучения.

Вместе с тем существуют работы, показывающие необходимость учета бóльшего количества шумов при оценке и проектировании ТВП. Так, учет шума неоднородности фона при расчёте ΔT_{Π} показан в работе [12], учет шумов считывания и геометрического шума – в работах [11, 14–16]. Существуют работы [11, 16], где используется расчет чувствительности ТВП раздельно для разных компонент шума: разность температур эквивалентной внутреннему шуму, разность температур, эквивалентной шуму фона, и разность температур, эквивалентная пространственному шуму. Данная работа выполнена с использованием идеи трехмерной модели шума [14, 20], позволяющей более полно описать шумы ТВП.

Так, в работе [11] значение ΔT_{Π} вычисляется как композиция случайных величин [1] для значений разности температур, эквивалентной временному шуму $\Delta T_{вр}$, разности температур, эквивалентной внутреннему шуму $\Delta T_{в}$, разности температур, эквивалентной пространственному шуму $\Delta T_{пр}$ и разности температур, эквивалентной шуму фона $\Delta T_{ф}$:

$$\Delta T_{\Pi} = \sqrt{\Delta T_{вр}^2 + \Delta T_{пр}^2}, \quad \Delta T_{вр} = \sqrt{\Delta T_{в}^2 + \Delta T_{ф}^2}, \quad (1)$$

тогда как значения $\Delta T_{вр}$, $\Delta T_{в}$, $\Delta T_{ф}$ и $\Delta T_{пр}$ являются постоянными и рассчитанными значениями для случайной величины шума. Поэтому, исходя из теории статистики (среднее квадратическое отклонение суммы взаимно независимых случайных величин, а в данном случае шумы – не коррелированы [11, 14, 15]) для суммирования шумов предлагается использовать правило композиции нормальных законов случайных величин [1, 16], чтобы попытаться получить выражение для расчета ΔT_{Π} с использованием изложенных замечаний.

В рамках данной работы предлагается метод расчета РТЭШ, позволяющий учитывать пространственный шум при проектировании ТВП. В данном методе, согласно [14], учитываются компоненты трехмерной модели шума, содержащиеся в выходном сигнале тепловизионного прибора. Отличие от методики, предложенной в [11],

состоит в подходе получения результирующего значения ΔT_{Π} .

Основываясь на результатах [12, 13], найдем выражение, учитывающее значения временного и пространственного шумов при расчете ΔT_{Π} ТВП.

Для производной изменения выходного сигнала приемника при воздействии на него излучения от объекта с изменяющейся температурой [12] получим выражение:

$$\frac{\partial u}{\partial T} = \frac{\alpha \beta A_0 u_{\Pi}}{\pi \sqrt{ab \Delta f_R}} \int_0^{\infty} \frac{\partial W_{\lambda}}{\partial T} \tau_0(\lambda) D_{\lambda}^* d\lambda \quad (2)$$

где u_{Π} – среднеквадратичное напряжение шума приемника в полосе частот Δf_R электрического фильтра; D_{λ}^* – спектральная обнаружительная способность фотоприемника; λ – длина волны излучения; a , b – размеры чувствительного элемента приемника излучения; A_0 и α , β – площадь входного зрачка и линейные углы мгновенного поля зрения объектива тепловизора по строке и по кадру; W_{λ} – спектральная поверхностная плотность потока излучения объекта; $\partial W_{\lambda} / \partial T$ – производная плотности потока излучения; τ_0 – спектральный коэффициент пропускания оптической системы тепловизора.

Запишем выражение для общего шума на выходе ИКС как сумму σ_{Σ} двух составляющих: временного шума на выходе ИКС $\sigma_{вр}$ и геометрического шума на выходе ИКС $\sigma_{г}$:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{вр}^2 + \sigma_{г}^2}. \quad (3)$$

Вынесем из под корня первое слагаемое $\sigma_{вр}$ [2, 16], получим формулу:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{вр} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_{г}}{\sigma_{вр}} \right)^2}. \quad (4)$$

Здесь соотношение под корнем $\sigma_{г} / \sigma_{вр}$ – показатель качества коррекции C_k [14, 16].

В логике работы [13], для определения остаточной неоднородности запишем отношение сигнал/шум как отношение (2) к (4):

$$\frac{C}{\Pi} = \frac{\Delta T \frac{\alpha \beta A_0 u_{\Pi}}{\pi \sqrt{ab \Delta f_R}} \int_0^{\infty} \frac{\partial W_{\lambda}}{\partial T} \tau_0(\lambda) D_{\lambda}^* d\lambda}{\sigma_{вр} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_{г}}{\sigma_{вр}} \right)^2}}. \quad (5)$$

Так как $\Delta T_{пор}$ определяется для величины «сигнал/шум» на выходе ИКС, равной единице, то

приняв отношение $C/\text{Ш} = 1$, получим выражение для расчёта пороговой температурной чувствительности ТВП с учетом величины временного и геометрического шума на выходе ИКС:

$$\Delta T_{\text{п}} = \frac{\pi \sqrt{ab \Delta f_R} \sigma_{\text{вр}} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_{\Gamma}}{\sigma_{\text{вр}}} \right)^2}}{\alpha \beta A_0 u_{\text{п}} \int_0^{\infty} \frac{\partial W_{\lambda}}{\partial T} \tau_0(\lambda) D_{\lambda}^* d\lambda}. \quad (6)$$

При определении $\Delta T_{\text{п}}$ по излучению черного тела, когда плотность излучения определяется по функции Планка, задав спектральный рабочий диапазон от λ_1 до λ_2 , имеем выражение для $\Delta T_{\text{п}}$:

$$\Delta T_{\text{п}} = \frac{\pi T^2 \sqrt{ab \Delta f_R} \sigma_{\text{вр}} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_{\Gamma}}{\sigma_{\text{вр}}} \right)^2}}{\alpha \beta A_0 u_{\text{п}} C_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_{\lambda} \tau_0(\lambda) D_{\lambda}^* \frac{d\lambda}{\lambda}}, \quad (7)$$

где $C_2 = 1,44 \times 10^4$ мкм К.

Используя форму записи для шумов фотоприёмника, согласно модели [14], выражение (4) можно представить в следующем виде:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{\text{вр}} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_h}{\sigma_{\text{вр}}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_{\text{вр}}} \right)^2} \dots \quad (8)$$

Полученная формула (6) в совокупности с (8) позволяет оценивать чувствительность ИКС относительно компонент временного и геометрического шума на выходе ТВП, что при проектировании ТВП позволит, в свою очередь, учитывать эффективность коррекции систем обработки сигналов. При равенстве значений $u_{\text{п}}$ и $\sigma_{\text{вр}}$ (при отсутствии накопления или фильтрации временного шума), и при $\sigma_{\text{вр}} = 0$ (идеальный случай – геометрический шум равен нулю) выражение (7) сводится к распространенной формуле [12, 13] расчета пороговой температурной чувствительности ТВП.

Подтвердим справедливость полученной формулы (7) сходимостью с формулой, приведенной в [13] в интерпретации [11].

Формула расчета $\Delta T_{\text{п}}$ в [11] получена с учетом интегральной чувствительности $S(\lambda)$ и определяется следующим образом:

$$\Delta T_{\text{пр}} = \frac{T^2 \sigma_{\text{отн}} \int_0^{\infty} W(\lambda) S(\lambda) \tau_{\phi}(\lambda) d\lambda}{C_2 \int_0^{\infty} W(\lambda) S(\lambda) \tau_{\text{об}}(\lambda) \tau_{\phi}(\lambda) \frac{d\lambda}{\lambda}}; \quad (9)$$

где $\tau_{\text{об}}(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания объектива, $\tau_{\phi}(\lambda)$ – спектральный коэффициент

пропускания фильтра, $S(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность ФПУ, $\sigma_{\text{отн}}$ – относительное СКО разброса интегральной чувствительности элементов ФПУ.

При этом выражение расчета отношения сигнал/шум, приведенное в [13], получено для частного случая единственности составляющей шума, а именно, шума неоднородности чувствительности фотоприемника:

$$\frac{C}{\text{Ш}} = \frac{\Delta T (dW / dT) \bar{S}}{\sigma_{\text{отн}} W_{\phi} \bar{S}}, \quad (10)$$

так как $u = WS$ [2], то запишем формулу (10) в виде:

$$\frac{C}{\text{Ш}} = \frac{\Delta T (dW / dT) \bar{S}}{W_{\phi} \bar{S}}. \quad (11)$$

В выражении (10) \bar{S} – средняя чувствительность фотоприемника. При подстановке (11) в (10), и приняв $W_{\phi} = 1,72 \times 10^{-2}$ Вт/см², $dW / dT = 2,62 \times 10^{-4}$ Вт/(см² К), получаем $\Delta T = 65$ К. Таким образом, не выполняя коррекцию тепловизионного сигнала с фотоприемника (полагаем в (11) неоднородность $\sigma_{\text{отн}} = 100\%$), получаем чувствительность, эквивалентную геометрическому шуму в размере 65 К. Задавая неоднородность в (10), мы тем самым определяем долю сигнала в виде реакции на поток излучения. Иначе (10) можно записать следующим образом:

$$\frac{C}{\text{Ш}} = \frac{\Delta T (dW / dT) \bar{S}}{\sqrt{(W_{\phi} \bar{S} - W_{\phi} S_{mn})^2 / (NM)}} \quad (12)$$

где NM – формат матрицы фотоэлементов, m – номер пикселя в строке, n – номер пикселя в столбце.

Исходя из [13], где описана ситуация вычитания фона из текущего сигнала (при оценке эффективности выравнивания неоднородности), получаем, что для получения значения среднеквадратичного отклонения неоднородности чувствительности необходимо вычитать два потока приблизительно равной температуры.

Предполагая для упрощения теоретических выкладок линейность зависимости чувствительности от температуры и учитывая вычитание как способ коррекции составляющей геометрического шума, запишем формулу (11) в следующем виде:

$$\frac{C}{\text{Ш}} = \frac{\Delta T (dW / dT) \bar{S}}{(W_{\phi} - W'_{\phi}) \bar{S}}. \quad (13)$$

При подстановке в (13) $W_\phi = 1,72 \times 10^{-2}$ Вт/см² для $T = 300$ К и $W'_\phi = 1,7 \times 10^{-2}$ Вт/см² для $T = 299$ К при $dW/dT = 2,62 \times 10^{-4}$ Вт/(см² К) получаем $\Delta T = 0,76$ К.

Учитывая, что если в выражении (9) источника [11, 17] подразумевается получение потока,

$$\frac{C}{\Pi} = \frac{\Delta T \frac{C2}{T^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_\lambda(T_{об}) S(\lambda) \tau_{об}(\lambda) \tau_\phi(\lambda) \frac{d\lambda}{\lambda}}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_\lambda(T_{об}) S(\lambda) \tau_{об}(\lambda) \tau_\phi(\lambda) d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_\lambda(T_\phi) S(\lambda) \tau_{об}(\lambda) \tau_\phi(\lambda) d\lambda}. \quad (14)$$

Учитывая, что $S_\lambda = u_\pi D_\lambda^* / \sqrt{ab\Delta f_R}$, и что суммарный шум фотоприемника состоит из композиции отдельных шумов, выражение (14) запишем следующим образом:

$$\frac{C}{\Pi} = \frac{\frac{\Delta Tu_\pi}{\sqrt{ab\Delta f_R}} \frac{C2}{T^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_\lambda(T_{об}) D_\lambda^* \tau_{об}(\lambda) \tau_\phi(\lambda) \frac{d\lambda}{\lambda}}{\sqrt{\sigma_{вр}^2 + \Omega_\Gamma^2}}, \quad (15)$$

$$\Omega_\Gamma = \sqrt{\sum (\phi - \phi_{ij})^2 / (NM)}, \quad (16)$$

$$\phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (W_\lambda(T_{об}) - W_\lambda(T_\phi)) S_{ij}(\lambda) \tau_{об}(\lambda) \tau_\phi(\lambda) d\lambda. \quad (17)$$

Вынесем $\sigma_{вр}$ из под корня, тогда получим формулу:

$$\frac{C}{\Pi} = \frac{\frac{\Delta Tu_\pi}{\sqrt{ab\Delta f_R}} \frac{C2}{T^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_\lambda(T_{об}) D_\lambda^* \tau_{об}(\lambda) \tau_\phi(\lambda) \frac{d\lambda}{\lambda}}{\sigma_{вр} \sqrt{1 + \frac{\Omega_\Gamma^2}{\sigma_{вр}^2}}}. \quad (18)$$

Принимая отношение $C/\Pi = 1$, получаем выражение:

$$\Delta T = \frac{\sqrt{ab\Delta f_R} \sigma_{вр} \sqrt{1 + \frac{\Omega_\Gamma^2}{\sigma_{вр}^2}}}{u_\pi C2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_\lambda(T_{об}) D_\lambda^* \tau_{об}(\lambda) \tau_\phi(\lambda) \frac{d\lambda}{\lambda}}. \quad (19)$$

Формула (19) соответствует (7), если в (19) учесть геометрические параметры оптики и фотоприемника, умножив (19) на отношение $\pi / (\alpha\beta A_0)$.

В конечном итоге отличие формул (7) и (19) состоит в способе получения величины ГШ канала. В формуле (7) значение пространственного шума задается как известная величина. Для формирующего неоднородность чувствительности от объектива (т. е. $\tau_{об}$ – не учитывается), то в реальных приборах эталонный фоновый поток и поток сигнала формируется с потерями в объективе. Для случая разницы между объектом и вычитаемым потоком, с учетом [11], выражение (13) записывается в виде:

мулы (19) ГШ вычисляется через потоки входного излучения объекта и фона.

Результаты исследования

Исследование метода [3] проводилось с использованием тепловизионного канала в составе следующих блоков: матрица фоточувствительных элементов (диапазон 8–12 мкм, формат 320×256, шаг фоточувствительных элементов 30 мкм, производство ИФП СО РАН); газокриогенная машина Ricor K508; микросканер – электромагнитный, на основе смещения оптического компонента, сдвиг проекции 75 мкм [19]; система коррекции остаточной неоднородности – на основе фильтрации, показана ранее в [3].

На рисунке показано изменение величины пространственного шума в течение выборки $K = 20000$ кадров j за время 800 с при частоте выборки – 25 Гц.

Для расчета временного и пространственного шума на входном зрачке оптической системы тепловизионного канала формировался однородный поток заданной температуры. После фиксации в памяти прибора фонового сигнала (начало отсчета по оси абсцисс, см. рисунок) выполнялась запись видеопотока в память ПК для следующих режимов работы системы [3]:

- режим «Корр»: двухточечная коррекция, микросканирование не используется;
- режим «Замещ»: двухточечная коррекция с замещением сигнала дефектных пикселей, микросканирование не используется;
- режим «Удв»: двухточечная коррекция с фильтрацией ОНЧ, с увеличением пространственного разрешения, микросканирование на 75 мкм, по квадрату;
- режим «Мед»: двухточечная коррекция с фильтрацией ОНЧ и временной медианной фильтрацией сигнала дефектных пикселей, микросканирование на 60 мкм, по квадрату;
- режим «200/4»: двухточечная коррекция с суммированием кадров фотоприемника, кадровая частота ФПУ – 200 Гц, после суммирования – 50 Гц, микросканирование не используется.

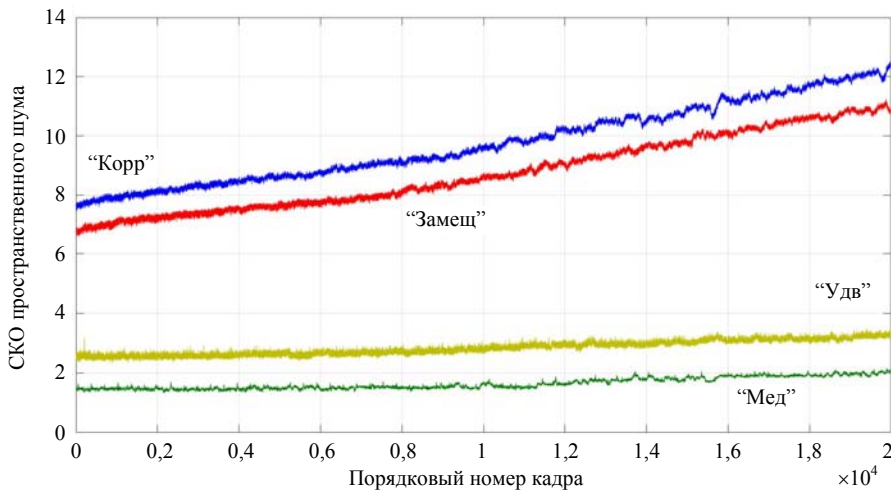


Рисунок. Изменение величины пространственного шума во времени. Подробности в тексте.

Временной шум рассчитывался по следующей формуле:

$$\sigma_{\text{вр}} = \frac{1}{NM} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^L (\bar{s} - s_i)^2}{L}}, \quad (20)$$

где $L = 100$ количество кадров из выборки K (полагаем флуктуации во времени сигнала отдельного пикселя эргодическим процессом), s – сигнал фотоэлемента n, m в кадре выборки L ; i – номер кадра в выборке L ; \bar{s} – среднее значение сигналов фотоэлементов в кадре выборки L . Сигнал x получен в результате двухточечной коррекции сигнала фотоприемника.

Пространственный шум для кадра j в выборке K (рисунок) рассчитывался, исходя из предположения, что каждый кадр j является смесью некоррелированных временного и пространственного шумов. Справедливость данного предположения подтвердил эксперимент. Последовательность расчета:

1. рассчитывался временной шум $\sigma_{\text{вр}}$ по формуле (20).

2. рассчитывался шум кадра по формуле:

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{1}{NM} \sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (\bar{s} - s_{nm})^2}. \quad (21)$$

3. При включении режима «200/4» наблюдалось снижение σ_{Σ} на величину $\sigma_{\text{вр}}$ в соответствии с формулой:

$$\sigma_{\text{вр}} = \sqrt{\sigma_{\Sigma}^2 - \sigma_{\Gamma}^2}. \quad (22)$$

Величина $\sigma_{\text{вр}}$, полученная по формуле (22), равна значению $8,3^2 - 7,6^2 = 3,34^2$; величина $\sigma_{\text{вр}}$ полученная по формуле (20), равна 3, что позволяет определить содержание смеси шумов кадра изображения как композицию геометрического и временного шумов.

Из рисунка (на начальный момент времени, т. е. непосредственно после калибровки) видно следующее:

- метод фильтрации [3] эффективно подавляет остаточную неоднородность: в режиме «Мед» подавление ОНЧ составляет 5,2 раза (на 81 %) по сравнению с использованием алгоритма двухточечной коррекции;

- режим «Замещ» снижает уровень ГШ в 1,12 раза (на 10,5 %) относительно режима «Корр», ГШ превышает временной шум;

- режим «Удв» снижает ГШ в 2,82 раза (на 64,5 %) относительно режима «Корр», ГШ сопоставим с временным шумом;

- режим «Мед» снижает ГШ в 5,2 раза (на 81 %) относительно режима «Корр», ГШ меньше временного шума.

Одновременно графики рисунка позволяют оценить необходимый период времени для выполнения обновления фонового компонента при двухточечной калибровке. Так, зададим условие, что при превышении уровня ГШ в 3,0 раза над временным шумом (для выбранного режима) следует запускать процедуру калибровки фона. В этой логике для данного тепловизионного канала из рисунка следует, что по истечении 440 с ГШ для режима «Корр» превысил $3,0\sigma_{\text{вр}}$ и требуется выполнение процедуры калибровки фона. Замещение дефектов сдвигает момент калибровки дополнительно на 160 с.

Режимы «Удв» и «Мед» сдвигают калибровку на существенно большее время: для указанных режимов уровень ГШ в течение 800 с не превысил значения $3,0\sigma_{\text{вр}}$. Причем режим «Мед» наиболее существенно повышает стабильность сигнала фотоприемника.

Так как скорость изменения ГШ для режима «Корр» составляет 4,5 ед./(800 с), а для режима «Мед» скорость составляет 0,5 ед./(800 с), то с

учетом соответствующего уровня временного шума можно определить (предположив неизменность тенденции изменения скорости в течение длительного времени) следующее правило: для режима «Мед» калибровка потребует через $((6,3-1,46)/0,5) \times 800 = 7744$ с. или 2,15 часа. Это в 17,6 раз больше чем при использовании режима «Корр». При этом стабильность сигнала фотоэлементов приемника повышается в 9 раз ($4,5 \text{ ед.}/0,5 \text{ ед.} = 9$).

В табл. 1 приведены значения временного, суммарного и пространственного шумов используемого канала (для начального момента времени по рис. 1), рассчитанных по формулам (20), (21) и (22).

В табл. 2 показаны относительные значения шумов канала, определяющие коэффициент коррекции C_k и степень влияния шумов канала на значение пороговой чувствительности.

Таблица 1

Значения шумов канала

Шум	Корр.	Замещ.	Удв.	Мед.	200/4
Временной шум $\sigma_{вр}$	3,3	3,25	2,4	2,1	1,8
Композиция шумов σ_{Σ}	8,3	7,55	3,61	2,56	7,6
Геометрический шум σ_r	7,61	6,81	2,7	1,46	7,4

Таблица 2

Относительные значения шумов канала

Шум	Корр.	Замещ.	Удв.	Мед.	200/4
Коэффициент качества коррекции $C_k = \sigma_r/\sigma_{вр}$	2,3	2,1	1,125	0,695	4,1
Уменьшение значения РТЭШ ИКС, рассчитывается как σ_{Σ} (для режима «Корр» таблицы 1) / σ_{Σ} (режим из таблицы 1), раз	1	1,1	2,3	3,24	1,1

Из табл. 1 и 2 видно, что замещение дефектов соседним элементом в малой степени изменяет общий шум канала, а именно, в 1,1 раза; режим с временной медианой является наиболее эффективным с минимальными шумами – шум канала уменьшается в 3,24 раза. Режим с увеличенным разрешением также эффективен – шум канала уменьшается в 2,3 раза (возможная причина снижения эффективности фильтрации ГШ – в [3] для микросканов «2-4» используются коэффициенты двухточечной коррекции полученные от микроскана «1» – тем самым возможно несоответствие используемых коэффициентов коррекции распределению фонов при положениях микросканера «2-4»). Режим суммирования кадров, используемый с целью уменьшения временного шума, уменьшает общий шум канала незначительно, а именно, в 1,1 раза, что является основанием необходимости учета ГШ при расчете РТЭШ.

Таким образом, с учетом значений временного шума табл. 1, режим «Мед» увеличивает чувствительность ΔT_n канала в 3,24 раза в сравнении с режимом «Корр», режим «Замещ» в 1,1 раза, режим «Удв» в 2,3 раза. Использование режим «200/4» – способа суммирования кадров, предназначенного для уменьшения временного шума фотоприемника – увеличивает чувствительность канала в 1,1 раза, что нивелирует преимущества данного режима в случае учета ГШ при оценке чувствительности ТВП.

Полученные значения показателя качества коррекции, представленные в табл. 2, показывают увеличение величины C_k канала при преобладании пространственного шума над временным шумом, что прослеживается в ухудшении визуального восприятия изображения. В случае режима «200/4» временной шум уменьшается, и уровень C_k также растет. В данном случае увеличение C_k означает усиление требования на снижение ГШ канала, т. к. снижение временного шума без снижения ГШ ограничивает потенциально достижимое значения РТЭШ.

Для оценки изменения влияния ГШ на чувствительность канала была рассчитана зависимость влияния доли σ_r на величину пороговой чувствительности по выражению (4). По результатам расчета для режима «Корр» получено:

– при $\sigma_{вр} = 3,3$ и $\sigma_r = 7,61$ ГШ увеличивает значение ΔT_n в 2,51 раза (в начале выборки K);

– при $\sigma_{вр} = 3,3$ и $\sigma_r = 12,2$ ГШ увеличивает значение ΔT_n в 3,83 раза (в конце выборки K).

Таким образом, в режиме двухточечной коррекции за время 800 с чувствительность канала уменьшается в 1,53 раза.

По выражению (4) для режима «Мед» (в начале выборки K) ГШ увеличивает значение РТЭШ канала ($\sigma_{вр} = 2,1$ и $\sigma_r = 1,46$) в 1,22 раза; для режима «Удв» ГШ увеличивает значение РТЭШ канала ($\sigma_{вр} = 2,4$ и $\sigma_r = 2,7$) в 1,5 раза – здесь подавление ГШ менее эффективно, в сравнении с режимом

«Мед», что может быть объяснено исключением временной медианы из схемы фильтрации дефектов [3].

Также следует отметить, что широко используемую на практике известную формулу расчета РТЭШ источника [13], в соответствии с вышеизложенным, следует записать следующим образом:

$$\Delta T_{\Pi} = \frac{(T_2 - T_1)\sigma_{\text{вр}} \sqrt{1 + (\sigma_{\Gamma} / \sigma_{\text{вр}})^2}}{U_2 - U_1}, \quad (23)$$

где T_2 и T_1 – значения высокой и низкой температуры черного тела, U_2 и U_1 – значения сигнала фотоприёмника при воздействии потоков от температуры T_2 и T_1 .

В соответствии с (23), значения РТЭШ для тепловизионных каналов приведенных в [3], следует скорректировать в сторону увеличения с учетом полученных выше значений $C_{\text{к}}$.

Выводы

В работе получен метод расчета РТЭШ учитывающий компоненты трехмерной модели шума при оценке и проектировании ТВП. Используемый в расчетах коэффициент степени коррекции $C_{\text{к}}$ является количественным критерием, связывающим температурную чувствительность ΔT_{Π} и качество тепловизионного изображения. Таким образом, коэффициент $C_{\text{к}}$ позволяет включить показатель качества изображения в процесс оптимизации ТВП и тем самым определить преимущество в показателях назначения разрабатываемого изделия перед аналогами.

Вывод по результатам исследований: эффективность подавления ГШ разработанным методом [3] высокая, его использование в ТВП позволит:

- снизить уровень пространственного шума до 5,2 раза, временного шума до 1,57 раза;
- улучшить показатель пороговой чувствительности в 3,24 раза;
- повысить стабильность сигнала фотоэлементов приемника в 9 раз.

Преимущества накопления кадров фотоприемника (для снижения временного шума в итоговом изображении) сомнительны: в случае учета ГШ при расчете чувствительности ТВП улучше-

ние составляет 1,1 раза. Целесообразность использования накопления кадров просматривается только в случае достаточного снижения уровня пространственного шума – до значений $\sigma_{\Gamma} / \sigma_{\text{вр}} < 1$, т. е. когда временная компонента общего шума канала будет преобладать над пространственной компонентой.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 1999.
2. *Изнар А. Н., Павлов А. В., Федоров Б. Ф.* Оптико-электронные приборы космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1972.
3. *Кремис И. И., Толмачев Д. А., Гладков Р. А.* // Прикладная физика. 2017. № 1. С. 58.
4. *Кремис И. И., Толмачев Д. А.* // Прикладная физика. 2016. № 6. С. 109.
5. *Кремис И. И.* // Прикладная физика. 2010. № 1. С. 108.
6. *Кремис И. И.* // Прикладная физика. 2010. № 4. С. 91.
7. *Кремис И. И.* // Научно-технические технологии. 2010. № 2. С. 11.
8. *Жегалов С. И.* // Прикладная физика. 2017. № 5. С. 42.
9. *Жегалов С. И., Соляков В. Н.* // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 4. С. 398.
10. *Балиев Д. Л., Болтарь К. О.* // Прикладная физика. 2015. № 3. С. 57.
11. *Иванов В. П., Овсянников В. А., Филиппов В. Л.* // Оптический журнал. 2012. № 3. С. 4.
12. *Тымкул В. М., Тымкул Л. В.* Оптико-электронные приборы и системы. Теория и методы энергетического расчета. – Новосибирск: СГГА, 2005.
13. *Ллойд Дж.* Системы тепловидения. – Издательство «Мир», 1978.
14. *Driggers R. G. et al.* / Optical Engineering. 1999. Vol. 38. No. 5.
15. *Holst G.* Electro-optical imaging system performance. – SPIE press, USA, 2003.
16. *Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г.* Инфракрасные системы «смотрящего типа». – Москва, Логос, 2004.
17. *Иванов В. П., Курт В. И.* Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. – Казань, изд. Отечество, 2006.
18. *Алеев Р. М., Иванов В. П.* Несканирующие тепловизионные приборы. – Казань: Изд-во Казанск. Унив. 2004.
19. *Кремис И. И., Мусеев В. А., Шатунов К. П., Ульянова Е. О., Гладков Р. А., Горшков А. А.* // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 2. С. 189.
20. *Agostino J. D., Webb C.* 3-D Analysis Framework and Measurement Methodology for Imaging System Noise, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling and Testing // SPIE Proceedings. 1991. Vol. 1488. P. 110.

Study of the method of correction of residual heterogeneity of thermal imaging channel with micro-scanning

I. I. Kremis

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics «Technological Design Institute of Applied Microelectronics», Siberian Branch of The Russian Academy of Sciences
(NB ISP SB RAS «TDIAM»)
8 Nikolaeva str., Novosibirsk, 630090, Russia
Email: igor21738@ngs.ru

Received May 14, 2018

The paper substantiates the need to take into account the quality of the correction of the heterogeneity of the sensitivity of the photodetector in the design of thermal imaging devices. The results of studies of the effectiveness of the method of filtering the residual heterogeneity using micro-scanning. It is shown that the use of the filtering method reduces the noise level: temporary – by 1.57 times, spatial-by 5.2 times, which improves the NETD index of the thermal imaging channel by 3.24 times.

Keywords: residual heterogeneity, sensitivity, micro-scanning.

REFERENCES

1. E. S. Ventcel. Theory of probability (Vyssh. Shkola, Moscow, 1999) [in Russian].
2. A. N. Iznar, A. V. Pavlov, and B. F. Fedorov, Devices of space vehicles (Mashinostr., Moscow, 1972) [in Russian].
3. I. I. Kremis, D. A. Tolmachev, and R. A. Gladkov, Prikl. Fiz., No. 1, 58 (2017).
4. I. I. Kremis and D. A. Tolmachev, Prikl. Fiz., No. 6, 109 (2016).
5. I. I. Kremis, Prikl. Fiz., No. 1, 108 (2010).
6. I. I. Kremis, Prikl. Fiz., No. 4, 91 (2010).
7. I. I. Kremis, Naukoemkie Tekhnologii, No. 2, 11 (2010).
8. S. I. Zhegalov, Prikl. Fiz., No. 5, 42 (2017).
9. S. I. Zhegalov and V. N. Solyakov, Usp. Prikl. Fiz. **2** (4), 398 (2014).
10. D. L. Baliev and K. O. Boltar, Prikl. Fiz., No. 3, 57 (2015).
11. V. P. Ivanov, V. A. Ovsyannikov, and V. L. Filippov, Optich. Zhurnal., No. 3, 4 (2012).
12. V. M. Tymkul and L. V. Tymkul, Devices and system. (Novosibirsk, SGGGA, 2005) [in Russian].
13. J. M. Lloyd. Thermal Imaging Systems. (Mir, Moscow, 1978) [in Russian].
14. R. G. Driggers et. al., Optical Engineering 38 (5), 46 (1999).
15. G. Holst, Electro-optical imaging system performance. (SPIE press, USA, 2003).
16. V. V. Tarasov and Yu. G. Yakushenkov, Infrared systems. (Logos, Moscow, 2004) [in Russian].
17. V. P. Ivanov and V. I. Kurt, Modeling and Evaluation of Modern Thermal Imaging Devices (Kazan, Otechestvo, 2006) [in Russian].
18. R. M. Aleev and V. P. Ivanov, Non-scanning Thermal Imaging Devices (Kazan, Kazan Univer. 2004) [in Russian].
19. I. I. Kremis, V. A. Moiseev, K. P. Shatunov, et al., Usp. Prikl. Fiz. **5** (2), 189 (2017).
20. J. D. Agostino and C. Webb, SPIE Proceedings **1488**, 110 (1991).