

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗ-ЗА НИЗКОЧАСТОТНОГО ДРЕЙФА СИГНАЛА ПРИ ТЕРМОГРАФИЧЕСКОМ ОБСЛЕДОВАНИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Д.т.н., проф. Таджикибаев А.И. ¹, Соловьёв Ю.В. ¹ (ПЭИПК, г. Санкт-Петербург)

АННОТАЦИЯ. Рассмотрены недостатки термографических камер, связанные с погрешностями терморadiометрических измерений температуры контролируемого объекта и конкретные факторы, определяющие инструментальные погрешности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: эффективная светимость абсолютно чёрного тела, термографическая камера, инструментальные погрешности, пространственные и временные шумы, низкочастотный дрейф сигнала.

Современные термографические камеры являются оптико-электронными приборами, в которых использованы последние достижения технологии фотоприёмников, электронной и компьютерной техники. Однако и эти приборы не лишены недостатков, связанных с погрешностями терморadiометрических измерений температуры контролируемого объекта. Погрешности измерений разделяют на инструментальные, связанные с параметрами и характеристиками прибора, и методические, которые зависят в основном от знаний и квалификации оператора и могут быть минимизированы в каждом конкретном случае термографических измерений.

Для понимания процесса дистанционного измерения температуры объекта по его излучению рассмотрим кратко рабочие уравнения термографической ИК камеры. На вход оптической системы термографической камеры поступает суммарное излучение от контролируемого объекта. Поскольку освещённость приёмника и светимость объекта линейно связаны через параметры прибора, запишем уравнение суммарной светимости непрозрачного объекта [1]:

$$R(T_r) = \varepsilon \cdot \tau_a \cdot R(T_o) + (1 - \tau_a) \cdot R(T_{at}) + (1 - \varepsilon) \cdot \tau_a \cdot R(T_{am})$$

Левая часть уравнения равна суммарной светимости объекта или эффективной светимости абсолютно чёрного тела при эффективной или радиационной температуре T_r . Температура T_r определяется с помощью калибровочных данных по величине сигнала с приёмника излучения камеры, но на дисплее камеры определяется оценка термодинамической температуры T_o объекта с известным коэффициентом излучения ε и расчётным пропусканием атмосферы τ_a . В правой части уравнения первое слагаемое определяет собственное излучение поверхности объекта, второе слагаемое определяет вклад излучения

трассы атмосферы между объектом и камерой при температуре атмосферы T_{at} , а третье слагаемое определяет вклад полусферической фоновой засветки, отражённой от объекта, характеризующей эквивалентной температурой чёрного тела T_{am} .

Эффективная светимость абсолютно чёрного тела при температуре T_o К в градусах Кельвина рассчитывается как интеграл по длине волны λ от функции Планка с учётом относительной спектральной чувствительности тепловизора $S(\lambda)$. Но можно упростить вычисления эффективной светимости, введя граничные длины волн на уровне $S(\lambda_1) = S(\lambda_2) = 0,5$ и положив $S(\lambda) = 1$ в пределах граничных длин волн. Приняв, что λ_1 — коротковолновая граница спектрального диапазона чувствительности тепловизора, а λ_2 — длинноволновая граница, получим

$$R(T) \cong \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{S(\lambda) \cdot C_1 \cdot d\lambda}{(\exp(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}) - 1) \cdot \lambda^5}, \quad (1)$$

где коэффициенты $C_1 = 3,7415 \cdot 10^8$ Вт·м⁻²·мкм⁴, $C_2 = 1,43879 \cdot 10^4$ мкм·°К.

Поскольку в результате измерений должна быть решена обратная задача по нахождению температуры по измеренной или рассчитанной светимости, а формула расчёта (1) не позволяет получить явную функциональную зависимость $T = f(R(T))$, кроме табличной, то в процессорах некоторых термографических камер, например, типа Thermovision FLIR System, используют приближённое уравнение, которое имеет явную функциональную связь между светимостью и температурой чёрного тела.

$$R'(T) \approx \frac{P_1}{(e^{\frac{P_2}{T}} - 1)},$$

где коэффициент p_1 , определяется при калибровке камеры, а p_2 определяется как

¹196135, г. Санкт-Петербург, Авиационная ул., 23; т. (812) 708-48-46

$$p_2 = \frac{2 \cdot C_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

Тогда температура чёрного тела в градусах Кельвина может быть определена через измеренную или расчётную светимость $R'(T)$, как

$$T \approx \frac{P_2}{\ln(p_1 + R'(T)) - \ln(R'(T))} \quad (2)$$

Инструментальные погрешности связаны с уравнением, в соответствии с которым по величине сигнала с приёмника излучения с помощью калибровочных параметров определяется эффективная светимость объекта. Параметры объекта и окружающей среды, входящие в уравнение, связаны с методическими погрешностями терморадиометрических измерений.

Инструментальные погрешности определяются следующими факторами:

1. Пространственным шумом, вызванным в основном неравномерностью распределения чувствительности по площади приёмной матрицы.

2. Временным шумом, обусловленным случайным шумом приёмника излучения и электронного тракта, среднее квадратическое отклонение (СКО) которого, оцененное в градусах, принимается в качестве определения порога температурной чувствительности термографической камеры. Для приёмной матрицы он определяется по ансамблю кадров пространственного шума.

3. Низкочастотным дрейфом сигнала, который, вероятно, вызывается низкочастотным изменением коэффициента передачи фотоэлектронного тракта.

4. Погрешностями калибровки на низких пространственных частотах, которые возникают вследствие использования приближённого уравнения (2) для определения температуры, погрешности определения температуры калибровочных чёрных тел и температуры опорного встроенного в камеру излучателя (шторки), некоторой нелинейности сигнала микроболометрической матрицы в зависимости от светимости источника и т. д.

5. Погрешностью передачи пространственных частот объекта вследствие влияния аберраций оптической системы и конечных размеров пиксела приёмника излучения, определяющего мгновенное поле зрения термографической камеры.

Кратко рассмотрим конкретные факторы, определяющие инструментальные погрешности, на примере термографической камеры ThV 570, работающей в длинноволновой области спектра 7,5 – 13 мкм и находившейся в эксплуатации около 5 лет, в которой в качестве приёмника используется микроболометрическая неохлаждаемая матрица размером 320x240 элементов. Методика исследований шумовых свойств термографической камеры заключалась в получении ИК

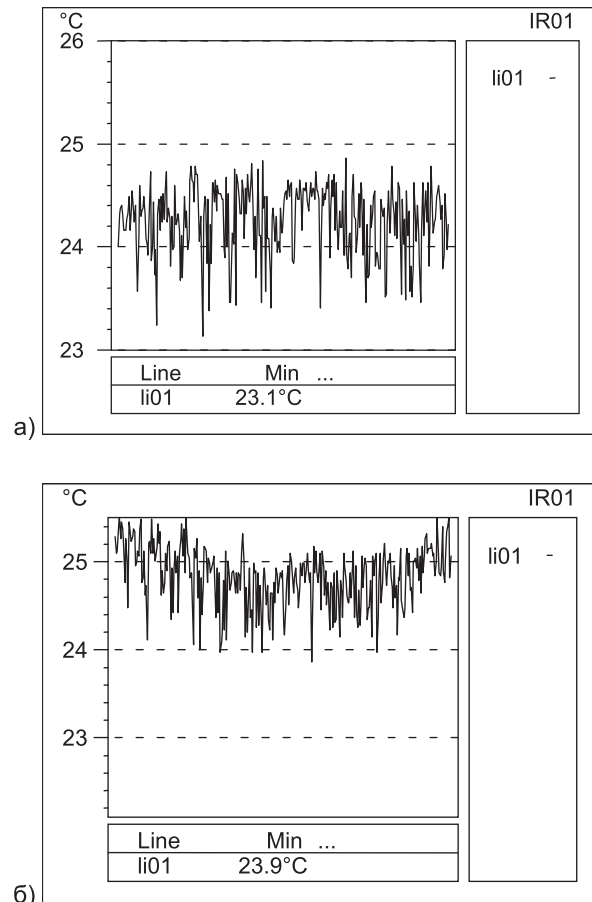


Рис. 1. Распределение температуры на горизонтальном сечении изображения:

- а) через 14 секунд после внутренней калибровки камеры;
б) через 3 мин 35 секунд после внутренней калибровки

изображений имитатора абсолютно чёрного тела с равномерно распределённой по поверхности температурой и анализе статистических характеристик этих изображений для отыскания условий минимизации влияния пространственного шума на погрешность измерений. На рис. 1 приведён характер распределения температуры, который позволяет отметить наличие общего дрейфа и значительное возрастание сигнала на краях матрицы тепловизора. На рис. 2 приведён график зависимости СКО пространственных шумов в зависимости от температуры излучателя. На основании исследований пространственных шумов и низкочастотного дрейфа термографической камеры можно сделать следующие выводы:

1. Поскольку пользователь термографической камеры не может разделить пространственные и временные шумы, испытанная камера обладает шумовыми характеристиками, заявленными в технических параметрах инструкции по эксплуатации, только в узком температурном диапазоне измеряемых объектов 38 – 40°C, где достигается температурная чувствительность, равная СКО шумов 0,15°C. Вне этого диапазона температур объекта уровень пространственных шумов увели-

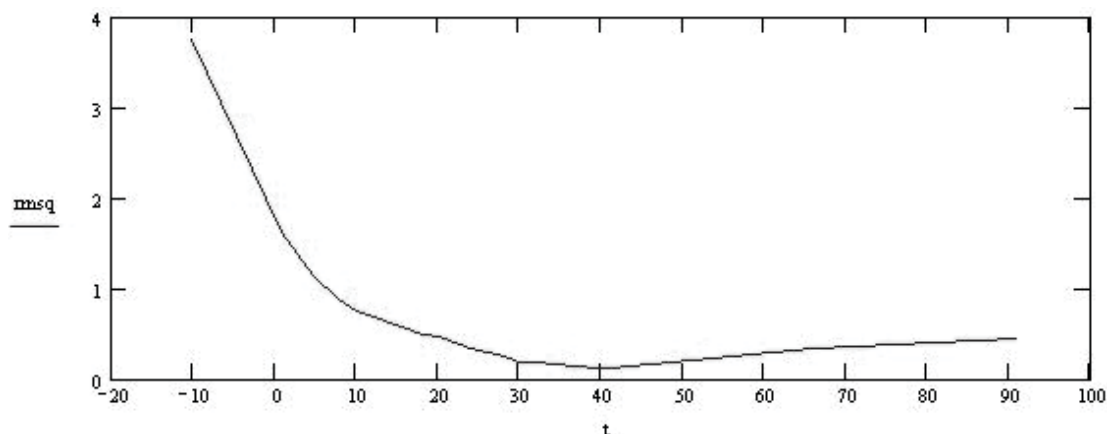


Рис. 2. График зависимости СКО пространственных шумов от температуры излучателя в °C

чивается, особенно в области малых температур. Например, при средней температуре чёрного тела равной 90°C СКО шума достигает 0,4°C, при 10°C равно 0,8°C, а при температуре –10°C оно составляет 3,7°C.

2. Случайная составляющая шума, определённая по ансамблю ИК изображений, мала и средняя величина СКО шумов для рабочих пикселей соответствует 0,15°C. Поскольку большие пространственные шумы, зависящие от уровня освещённости матрицы, имеют практически систематический характер, то это свойство позволяет минимизировать их влияние на результаты измерений пространственного распределения температуры по поверхности объекта даже на одиночном кадре с помощью автоматизированной обработки по специальной программе. Процедура этой обработки эквивалентна выравниванию чувствительности по пикселям матрицы, только значительно проще и даёт лучшие результаты.

3. Величина ярко выраженного низкочастотного дрейфа сигнала за время между моментами внутренней калибровки около 4 минут составляет ~1,1 – 1,2°C. Для минимизации влияния низкочастотного дрейфа ИК изображения, как при калибровке, так и при измерениях должны быть зарегистрированы в течение 1,0 – 2,5 минут по-

сле внутренней калибровки тепловизора. На этом временном отрезке низкочастотный дрейф имеет случайный характер и практически не имеет тренда. Следует отметить, что временная изменчивость низкочастотного дрейфа зависит ещё от степени разряда батареи питания, т. е. изменяется длительность временного отрезка, на котором дрейф имеет случайный характер и практически не имеет тренда. В конце работы батарей ещё до появления информации о необходимости их замены длительность упомянутого отрезка практически уменьшается до 10 секунд. Таким образом, хотя эта составляющая погрешности и уменьшается за счёт правильного выбора момента съёмки, но при проведении измерений контрастов температур, зарегистрированных у объектов на разных ИК изображениях, она имеет существенное значение.

Литература

1. Афонин А.В. Погрешности измерений при проведении термографического обследования высоковольтного электрооборудования // Промышленная энергетика. 2005. №6. – С.16–18.
2. Афонин А.В., Андреев Д.В., Бельцер В.Р. Метод повышения точности термографического обследования и оценки состояния измерительных трансформаторов тока // Промышленная энергетика. 2006. №12. – С. 22–26.

