

ОЦЕНКА ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЕНИЙ ТЕЛЕВИЗИОННОГО МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ПИРОМЕТРА

© 2008 г. А. В. Кузнецов, канд. техн. наук

НИИ промышленного телевидения “Растр”, Великий Новгород

E-mail: outling@inbox.ru

Предлагается методика оценки ширины диапазона измерений телевизионного монохроматического пирометра, исходя из известного отношения сигнал/шум в видеотракте и требуемой точности измерений. Проводится сравнение ширины диапазонов измерений, обеспечиваемых телевизионными и визуальными монохроматическими пирометрами.

Коды OCIS: 120.6820.

Поступила в редакцию 17.05.2007.

Телевизионные пирометры, позволяющие проводить наблюдение за раскаленными самосветящимися объектами с одновременным измерением температурного распределения по всему полю изображения, находят все более широкое применение в промышленности, совмещая в себе широкие возможности реализации известных пирометрических методов с функциями технологических телевизионных установок наблюдения [1, 2].

Одной из важнейших задач, решаемых при проектировании и использовании телевизионных пирометров, является оценка ширины диапазона измерений температуры, в котором обеспечивается заданная точность. Фактически задача сводится к определению нижней границы диапазона измерений при предварительном согласовании верхней границы температурного диапазона со значением максимальной рабочей освещенности датчика изображения [3, 4].

В работе [3] на основании эксперимента, проведенного с телевизионным датчиком изображения на основе ПЗС-матрицы при верхней границе диапазона измеряемых температур 700 °С, определено значение нижней границы 284 °С. При этом в качестве критерия использовалось снижение размаха сигнала до уровня шумов (отношение сигнал/шум равно 1). Однако такая оценка не позволяет напрямую учесть требования по точности измерения температуры. Кроме того, поскольку задача расширения диапазонов измерения актуальна и для более высоких температур, необходимо исследовать зависимость ширины диапазона измерений от значения верхней граничной температуры.

Целью настоящей работы является разработка методики оценки ширины диапазона измерений телевизионного монохроматического пирометра, исходя из известного отношения сигнал/шум в видеотракте и требуемой точности измерений.

Телевизионные модули на основе ПЗС-матриц обеспечивают линейное преобразование свет-сигнал. Поэтому размах выходного сигнала U_c телевизионного модуля от объекта с температурой T может быть нормирован по значению размаха сигнала U_{\max} (в идеальном случае равному уровню “белого” в видеосигнале), соответствующего верхней граничной температуре диапазона измерений T_{\max} . Тогда, полагая для простоты излучательную способность объекта в пределах диапазона постоянной, в соответствии с приближением Вина [5]

$$\frac{U_c}{U_{\max}} = \exp \left[\frac{c_2}{\lambda_{\text{эф}}} \left(\frac{1}{T_{\max}} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (1)$$

где $c_2 = 1,43879 \times 10^{-2}$ м К – вторая постоянная излучения, $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективная рабочая длина волны.

Для оценки точностных характеристик пирометров принято использовать среднее квадратичное отклонение σ случайной составляющей основной погрешности [6]. Однако более удобной для дальнейшего анализа является величина температурной разрешающей способности NETD (noise-equivalent temperature difference [7]), под которой понимается значение температурного перепада на объекте, размах сигнала с которого равен эффективному напряжению шума (отношение сигнал/шум равно 1). Можно показать, что при значениях случайной составляющей погрешности, достаточно малых, чтобы зависимость размаха сигнала от температуры в окрестностях измеренного значения считать линейной, что, как правило, имеет место на практике, σ и NETD значения равны.

Размах видеосигнала ΔU от малого температурного перепада ΔT в окрестности температуры T при $\Delta T \ll T$ можно определить, продифференцировав (1),

$$\Delta U(\Delta T) = U_{\max} \frac{c_2}{\lambda_{\text{эф}} T^2} \exp \left[\frac{c_2}{\lambda_{\text{эф}}} \left(\frac{1}{T_{\max}} - \frac{1}{T} \right) \right] \Delta T. \quad (2)$$

Приравняв левую часть выражения к эффективному напряжению шума $U_{\text{ш}}$, представляющего собой сумму шумов телевизионного модуля, канала связи и шумов аналого-цифрового преобразования, можно заменить ΔT в правой части (2) на NETD. Тогда, определив отношение сигнал/шум (SNR) в видеотракте как

$$\text{SNR} = U_{\max} / U_{\text{ш}}, \quad (3)$$

получим уравнение, определяющее нижнюю границу диапазона измерений T_{\min} в зависимости от T_{\max} , NETD и SNR,

$$\begin{aligned} & \text{SNR NETD} \frac{c_2}{\lambda_{\text{эф}} T_{\min}^2} \times \\ & \times \exp \left[\frac{c_2}{\lambda_{\text{эф}}} \left(\frac{1}{T_{\max}} - \frac{1}{T_{\min}} \right) \right] - 1 = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Непосредственно из (4) можно получить и зависимость температурного разрешения пирометра, определяемого величиной NETD, от температуры объекта T при заданной верхней границе диапазона измерения T_{\max} и известном отношении SNR в видеотракте

$$\text{NETD}(T) = \frac{T^2}{\text{SNR} \frac{c_2}{\lambda_{\text{эф}}} \exp \left[\frac{c_2}{\lambda_{\text{эф}}} \left(\frac{1}{T_{\max}} - \frac{1}{T} \right) \right]}. \quad (5)$$

Анализируя (4), можно заметить, что при снижении отношения сигнал/шум заданная ширина диапазона измерений (значение T_{\min}) может быть обеспечена соответствующим снижением требований к температурному разрешению (увеличением NETD) и наоборот. Поэтому оправдано введение параметра

$$\gamma = \text{SNR NETD}, \quad (6)$$

позволяющего эффективно оценивать обменные соотношения величин SNR и NETD с точки зрения обеспечения требуемой ширины диапазона измеряемых температур. Кроме того, это позволяет сравнивать различные телевизионные пирометры, поскольку равенство значений параметра γ фактически определяет в известном смысле равенство их потенциальных возможностей. Таким образом, уравнение (4) с учетом (6) примет вид

$$\gamma \frac{c_2}{\lambda_{\text{эф}} T_{\min}^2} \exp \left[\frac{c_2}{\lambda_{\text{эф}}} \left(\frac{1}{T_{\max}} - \frac{1}{T_{\min}} \right) \right] - 1 = 0. \quad (7)$$

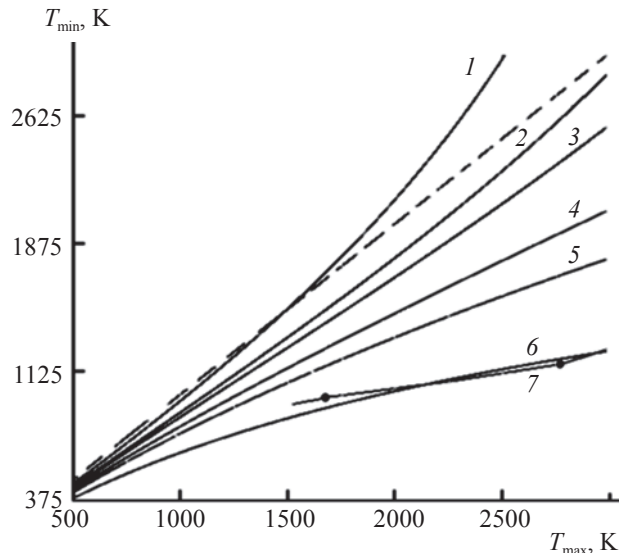


Рис. 1. Зависимости нижней границы диапазона измерений T_{\min} от верхней границы T_{\max} . Кривые 1–6 – для телевизионных пирометров с параметром γ : 1 – 100, 2 – 500, 3 – 1000, 4 – 5000, 5 – 2×10^4 , 6 – 2×10^6 К, кривая 7 – для визуальных пирометров [6].

Семейство кривых, описывающих зависимость нижней границы диапазона измерений T_{\min} от верхней границы T_{\max} при различных значениях параметра γ , построенные в соответствии с (7), представлено на рис. 1.

Штриховая линия на поле графика, соответствующая случаю $T_{\min} = T_{\max}$, определяет пограничный случай физической реализуемости пирометра, ситуацию, когда при существующем отношении сигнал/шум заданная точность обеспечивается только в точке T_{\max} , т. е. при максимальном значении сигнала.

Рассмотрим кривую 1, описывающую пирометр, имеющий значение параметра $\gamma = 100$ К, что соответствует, например, заданному температурному разрешению NETD = 2 К при SNR = 50 (34 дБ). В этом случае до температуры порядка 1500 К требуемая точность обеспечивается только вблизи T_{\max} , вследствие чего ширина диапазона измерений чрезвычайно мала, а при более высоких температурах заданное температурное разрешение вообще недостижимо, что выражается на графике соотношением $T_{\min} > T_{\max}$.

Характерной особенностью зависимостей, представленных на рис. 1, является наличие максимума относительной ширины диапазона $(T_{\max} - T_{\min}) / T_{\max}$, значение которого, а также значение верхней границы диапазона измерений T_{\max} , при котором обеспечивается этот максимум, зависят от параметра γ , что иллюстрирует рис. 2.

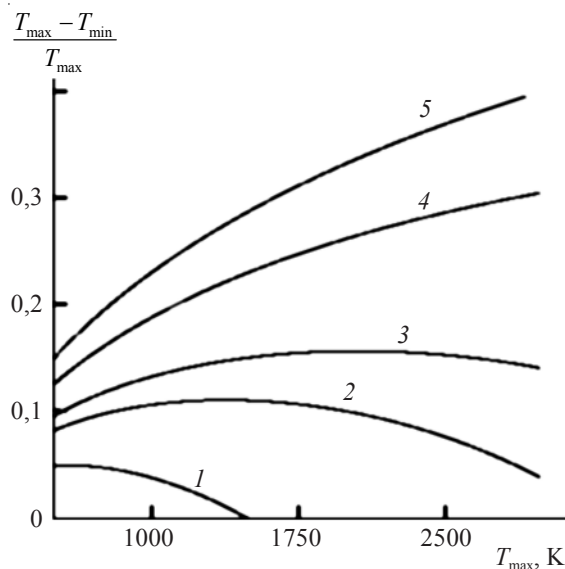


Рис. 2. Зависимости относительной ширины диапазона измерений от его верхней границы T_{\max} для различных значений параметра γ : 1 – 100, 2 – 500, 3 – 1000, 4 – 5000, 5 – 2×10^4 К.

Из приведенных зависимостей видно, что телевизионный пирометр при $\gamma = 100$ не может обеспечить относительную ширину диапазона измерений более 5% кроме того, измерение температур выше 1500 К вообще невозможно. При $\gamma = 1000$ уже обеспечивается измерение температур, превышающих 3000 К, при этом достижимая относительная ширина диапазона измерений составляет 10–15% в зависимости от выбора значения T_{\max} .

Причиной появления максимума относительной ширины диапазона измерений является нормирование размаха сигнала по максимальному значению, соответствующему температуре T_{\max} , что обусловлено необходимостью согласования яркости объекта и рабочего светового диапазона преобразователя свет–сигнал. Можно показать, что при таком нормировании смещение диапазона измерений в низкотемпературную область приводит к более быстрому уменьшению размаха сигнала при уменьшении измеряемой температуры, а смещение в область высоких температур – к уменьшению крутизны преобразования температура–размах сигнала. Поскольку нормирование проводится за счет изменения ослабления светового потока в оптической системе пирометра или чувствительности ТВ модуля, оно не оказывает существенного влияния на уровень шумов в видеотракте. Поэтому в обоих случаях происходит уменьшение ширины диапазона измерений.

Для сравнения на рис. 1 приведена зависимость для границ диапазонов измерений, установленных

для визуальных пирометров [6]. Видно, что телевизионный пирометр для обеспечения аналогичной ширины диапазонов измерения должен иметь параметр $\gamma = 2 \times 10^6$ К. Допустимое среднее квадратичное отклонение σ случайной составляющей основной погрешности при температуре 2273 К (2000 °С) для визуальных пирометров 1 класса составляет 3 К [6]. Приняв $\sigma = \text{NETD}$, из (6) можно получить оценку требуемого отношения сигнал/шум для телевизионного пирометра, обеспечивающего точность измерений и ширину диапазона измерений, аналогичные визуальному $\text{SNR} = 6,67 \times 10^5$ (116,5 дБ). Учитывая, что типичное отношение сигнал/шум на выходе современных телевизионных модулей составляет около 50 дБ [8], т. е. отличается более чем на три порядка, полученное значение труднодостижимо даже за счет пространственной или временной фильтрации изображения после аналого-цифрового преобразования.

С другой стороны, известно, что неопределенность визуального определения равенства яркостей двух полей, положенного в основу работы визуальных пирометров, определяемая контрастной чувствительностью адаптированного глаза наблюдателя, составляет 1–2% и только при особой организации полей наблюдения может достигать 0,25% [9, 10]. Примем значение 0,5% в качестве оценки контрастной чувствительности эквивалентного телевизионного модуля, которая, с учетом линейности его свет-сигнальной характеристики, может быть определена как величина, обратная отношению сигнал/шум. Тогда требуемое отношение сигнал/шум

$$\text{SNR} = 1/0,005 = 200 \text{ (46 дБ)}.$$

Такое несоответствие объясняется механизмом адаптации глаза к условиям наблюдения. Действительно, в широком диапазоне яркостей поля адаптации контрастная чувствительность глаза наблюдателя, т. е. фактически отношение шумов зрительной системы к размаху сигнала от объекта остается практически неизменной [9]. Тем самым обеспечивается максимальная контрастная чувствительность в относительно узком диапазоне яркостей объекта в окрестности значения, соответствующего яркости поля адаптации [9], что эквивалентно применению в телевизионном модуле систем автоматической регулировки времени накопления или автоматической регулировки диафрагмы объектива. Однако возможность использования этих систем в телевизионных пирометрах, по-видимому, весьма ограничена вследствие неоднозначности критериев определения зон на изображении, по которым производится автоматическая регулировка экспозиции, особенно в случае широкого поля зрения. Кро-

ме того, для телевизионных пирометров, реализующих принцип измерения “с исчезающей нитью” без постоянно присутствующего в поле изображения эталонного источника [11, 12], значительно усложняется процедура калибровки.

Выводы

Предложенная методика позволяет оценить ширину диапазона измерений телевизионного монохроматического пирометра, исходя из известного отношения сигнал/шум в видеотракте и требуемого температурного разрешения. Установлено, что ширина диапазона измерений не является постоянной величиной и имеет максимум, соответствующий некоторой верхней граничной температуре диапазона измерений, значение которой, а также значение максимума определяются параметром $\gamma = \text{SNR NETD}$.

Ширина диапазона измерений, обеспечиваемая телевизионными пирометрами на основе ПЗС-матриц, существенно меньше, чем у визуальных пирометров, при сравнимых значениях контрастной чувствительности глаза и телевизионного модуля, что объясняется адаптацией глаза наблюдателя к яркости объекта измерения. Основными путями расширения диапазона измерений телевизионного пирометра при заданной точности измерений являются повышение отношения сигнал/шум (в том числе и за счет пространственной или временной фильтрации изображения) и разбиение требуемого диапазона на поддиапазоны; использование автоматической регулировки экспозиции в общем случае нецелесообразно.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Карачинов В.А., Карачинов Д.В., Торицин С.Б.* Зондовые методы телевизионной пирометрии нагретых га-

зовых потоков. Великий Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2006. 108 с.

2. *Карачинов В.А., Ильин С.В., Торицин С.Б., Кузнецов А.В.* Пирометрическая телевизионная система в технологии выращивания кристаллов карбида кремния // *Материалы VI Международной конференции “Кристаллы: рост, свойства, реальная структура, применение”*. Александров: ВНИИСИМС, 2003. 324 с.
3. *Порев В.А., Порев Г.В.* Экспериментальное определение температурного диапазона телевизионного пирометра // *Оптический журнал*. 2004. Т. 71. № 1. С. 70.
4. *Кузнецов А.В.* Выбор поддиапазонов измерения при проектировании телевизионных пирометров // *Проектирование и технология электронных средств*. 2007. № 1.
5. *Линевег Ф.* Измерение температур в технике. Справочник: Пер. с нем. / Под ред. Чарихова Л.А. М.: Металлургия, 1980. 544 с.
6. ГОСТ 8335-81. Пирометры визуальные с исчезающей нитью. Общие технические условия. М.: Издательство стандартов, 1981. 12 с.
7. *Ллойд Дж.* Системы тепловидения: Пер. с англ. / Под ред. канд. техн. наук А.И. Горячева М.: Мир, 1978. 414 с.
8. Телевизионные камеры. Цифровые системы видеонаблюдения. ЗАО “ЭВС”. Каталог продукции. Санкт-Петербург, 2006. 76 с.
9. *Богатов Г.Б.* Контрастные искажения в телевидении и их коррекция. М.–Л.: Энергия, 1965, 284 с.
10. *Кривошеев М.И., Кустарев А.К.* Световые измерения в телевидении. М.: Связь, 1973. 224 с.
11. *Коротких В.М., Гуляев П.Ю., Гумиров М.А.* Способ измерения яркостной температуры объекта // Патент РФ № 2099674. 1997.
12. *Торицин С.Б., Карачинов В.А.* Способ измерения яркостной температуры объекта // Патент РФ № 2247338. 2005.