

ГАММА-КОРРЕКЦИЯ АМПЛИТУДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИДЕОТРАКТА ТЕЛЕВИЗИОННОГО ПИРОМЕТРА

© 2011 г. А. В. Кузнецов, канд. техн. наук

Научно-исследовательский институт промышленного телевидения “Растр”, Великий Новгород

E-mail: outling@inbox.ru

Получены выражения, определяющие для установленного коэффициента гамма-коррекции амплитудной характеристики видеотракта квазимонохроматического телевизионного пирометра диапазон измеряемых с заданной точностью температур, а также предельную измеряемую температуру, при известных значениях отношения сигнал/шум телевизионного модуля и канала связи. Показано, что применение гамма-коррекции наиболее целесообразно для расширения диапазона измерений в области температур, близких к предельной или превышающих ее.

Ключевые слова: телевизионный пирометр, видеотракт, гамма-коррекция.

Коды OCIS: 120.6820

Поступила в редакцию 03.06.2010

Максимальная точность измерения, обеспечиваемая телевизионным (ТВ) пирометром, зависит от диапазона измеряемых температур и определяется, в первую очередь, отношением сигнал/шум в его видеотракте. Основные соотношения, связывающие эти величины и позволяющие оптимизировать комплекс требований, предъявляемых к ТВ-пирометру, были проанализированы в работах [1, 2]. Однако при этом не было учтено распределение источников шума, хотя такой учет открывает возможности дальнейшего повышения точности измерения температуры. Действительно, в большинстве случаев шумы в видеотракте ТВ-пирометра могут быть отнесены к двум источникам: ТВ-модулю, генерирующему шум с эффективным напряжением u_m , и каналу связи, в котором каскады усиления, аналого-цифровое преобразование при вводе видеосигнала в компьютер и помехи, проникающие в канал извне, создают шум с эффективным напряжением u_k .

Анализируя такую структуру, можно предположить, что установка на входе канала связи корректора амплитудной характеристики, обеспечивающего подъем усиления в области малых сигналов, позволит улучшить отношение размаха сигнала от объектов с минимальной измеряемой температурой к шуму канала. Тем самым будет достигнуто повышение точности измерения температуры, или при заданной

точности – расширение диапазона измеряемых температур.

Подобная коррекция амплитудной характеристики, использующая степенную зависимость размаха выходного сигнала от размаха входного (при показателе степени как большем, так и меньшем единицы), так называемая гамма-коррекция, широко применяется в телевидении [3], в частности, для компенсации нелинейности преобразования сигнал–свет устройств отображения – кинескопов и жидкокристаллических панелей. В настоящее время встроенные предустановки нескольких режимов гамма-коррекции предусмотрены в большинстве ТВ-модулей. Это определяет целесообразность рассмотрения именно гамма-коррекции в качестве средства улучшения эксплуатационных характеристик ТВ-пирометров. Анализ условий оптимальной гамма-коррекции при заданных шумовых и точностных характеристиках квазимонохроматического ТВ-пирометра, а также оценка достижимого выигрыша в широте диапазона или точности измерения температуры и являются целью настоящей работы.

Характеристика преобразования свет–сигнал фотоприемников ТВ-модулей (матриц ПЗС) достаточно линейна. Поэтому, полагая для простоты излучательную способность объекта в пределах диапазона измеряемых температур постоянной, в соответствии с приближе-

нием Вина [4] характеристика преобразования температура–сигнал ТВ-пирометра с учетом гамма-коррекции может быть представлена в виде

$$U(T) = U_6 \left(\frac{B(T)}{B(T_{\max})} \right)^\gamma = U_6 \left\{ \exp \left[\frac{c_2}{\lambda_{\text{эфф}}} \left(\frac{1}{T_{\max}} - \frac{1}{T} \right) \right] \right\}^\gamma, \quad (1)$$

где U_6 – уровень “белого”, соответствующий максимальной измеряемой температуре T_{\max} ,

$$u_{\text{эфф}} = \left. \frac{dU(T)}{dT} \right|_{T=T_{\min}} \text{NETD} = \text{NETD} U_6 \gamma \frac{c_2}{\lambda_{\text{эфф}} T_{\min}^2} \left\{ \exp \left[\frac{c_2}{\lambda_{\text{эфф}}} \left(\frac{1}{T_{\max}} - \frac{1}{T_{\min}} \right) \right] \right\}^\gamma, \quad (2)$$

где $u_{\text{эфф}} = (u_\gamma^2 + u_k^2)^{0.5}$, u_γ – эффективное напряжение шума на выходе гамма-корректора, зависящее от мгновенного размаха входного видеосигнала. В соответствии с выражением (1) можно записать

$$u_\gamma(T, T_{\max}) = u_m \frac{d U(b)}{db} \frac{1}{U_6} = u_m \gamma \left\{ \exp \left[\frac{c_2}{\lambda_{\text{эфф}}} \left(\frac{1}{T_{\max}} - \frac{1}{T} \right) \right] \right\}^{\gamma-1},$$

где $b = B(T) / B(T_{\max})$ – нормированная энергетическая яркость объекта.

Тогда квадрат эффективного напряжения шума на выходе канала связи

$$u_{\text{эфф}}^2(T, T_{\max}) = u_k^2 + u_\gamma^2(T, T_{\max}) = u_k^2 + u_m^2 \gamma^2 \left\{ \exp \left[\frac{c_2}{\lambda_{\text{эфф}}} \left(\frac{1}{T_{\max}} - \frac{1}{T} \right) \right] \right\}^{2\gamma-2}. \quad (3)$$

Возводя правую часть выражения (2) в квадрат и подставляя уравнение (3) при $T = T_{\min}$, после преобразований получим

$$\text{NETD}^2 \left(\frac{c_2}{\lambda_{\text{эфф}} T_{\min}^2} \right)^2 \left[f(T_{\min}, T_{\max}) \right]^{2\gamma} - \frac{1}{\text{SNR}_M^2} \left[f(T_{\min}, T_{\max}) \right]^{2\gamma-2} - \frac{1}{\gamma^2 \text{SNR}_K^2} = 0, \quad (4)$$

где

$$f(T_{\min}, T_{\max}) = \exp \left[\frac{c_2}{\lambda_{\text{эфф}}} \left(\frac{1}{T_{\max}} - \frac{1}{T_{\min}} \right) \right],$$

$\text{SNR}_M = U_6/u_m$ – отношение сигнал/шум ТВ-модуля при $\gamma = 1$, $\text{SNR}_K = U_6/u_k$ – отношение сигнал/шум канала связи.

$B(T)$ – энергетическая яркость объекта при температуре T , γ – коэффициент гамма-коррекции, $c_2 = 1,43879 \times 10^{-2}$ м К – вторая постоянная излучения, $\lambda_{\text{эфф}}$ – эффективная длина волны.

Используем величину эквивалентной шуму разности температур NETD (*noise-equivalent temperature difference*) [5]: дифференцируя (1), приравняем приращение сигнала от изменения температуры, равного NETD, к эффективно-му напряжению шума на выходе канала связи $u_{\text{эфф}}$. Полученное выражение определит минимальную измеряемую температуру T_{\min} при заданных значениях T_{\max} и NETD

Полученное выражение (4) определяет для известных коэффициента гамма-коррекции и значений отношения сигнал/шум ТВ-модуля и канала связи диапазон температур (T_{\min} ; T_{\max}), измеряемых с точностью, заданной значением NETD. Можно показать, что на практике величину NETD можно считать численно равной среднеквадратическому отклонению случайной составляющей основной погрешности пирометра.

Вследствие необходимости согласования максимального размаха сигнала с уровнем “белого” $U(T_{\max}) = U_6$ при увеличении значения T_{\max} крутизна зависимости размаха сигнала от температуры снижается, при этом сужается диапазон температур, в котором обеспечивается заданная точность измерений. Для случая отсутствия гамма-коррекции в этом можно убедиться, дифференцируя выражение (1) и подставляя $\gamma = 1$ и $T = T_{\max}$

$$\left. \frac{dU(T)}{dT} \right|_{T=T_{\max}} = U_6 \frac{c_2}{\lambda_{\text{эфф}} T_{\max}^2}. \quad (5)$$

Из формулы (5), в частности, следует, что выше некоторого предельного значения температуры $T_{\text{пред}}$, при котором приращение сигнала от приращения температуры, равного NETD, снижается до величины $u_{\text{эфф}0} = (u_m^2 + u_k^2)^{0.5}$, измерение с заданной точностью невозможно

$$u_{\text{эфф}0} = U_6 \frac{c_2}{\lambda_{\text{эфф}} T_{\text{пред}}^2} \text{NETD},$$

откуда

$$T_{\text{пред}} = \sqrt{\lambda_{\text{эфф}}^{-1} c_2 \text{NETD} \frac{U_6}{u_{\text{эфф}0}}}, \quad (6)$$

где $U_6/u_{\text{эфф}0}$ – отношение сигнал/шум на выходе видеотракта при $\gamma = 1$.

Аналогичное выражение для $T_{\text{пред}}$ было получено в работе [2] для обобщенного случая многоцветовой пирометрии.

Введение гамма-коррекции увеличивает крутизну характеристики температура–сигнал и тем самым способствует расширению диапазона измерений. Однако зависимость этой крутизны от γ имеет максимум, зависящий от измеряемых температур и определяющий оптимальное значение $\gamma_{\text{опт}}$. Действительно, приравняв к нулю производную зависимости (1)

$$\frac{d^2 U(T, \gamma)}{dT d\gamma} = 0,$$

получим при $T = T_{\text{min}}$

$$\gamma_{\text{опт}} = \frac{\lambda_{\text{эфф}}}{c_2} \frac{1}{1/T_{\text{min}} - 1/T_{\text{max}}}. \quad (7)$$

Таким образом, при подстановке $\gamma = \gamma_{\text{опт}}$ из формулы (7) в уравнение (4) получим выражение, позволяющее при известных значениях отношения сигнал/шум ТВ-модуля и канала связи для максимальной температуры T_{max} , определить достижимую с использованием гамма-коррекции минимальную температуру T_{min} , измеряемую с точностью, заданной значением NETD.

В свою очередь, соответствующее оптимальное значение $\gamma_{\text{опт}}$ может быть определено из формулы (7) на основании уже известных значений T_{min} и T_{max} .

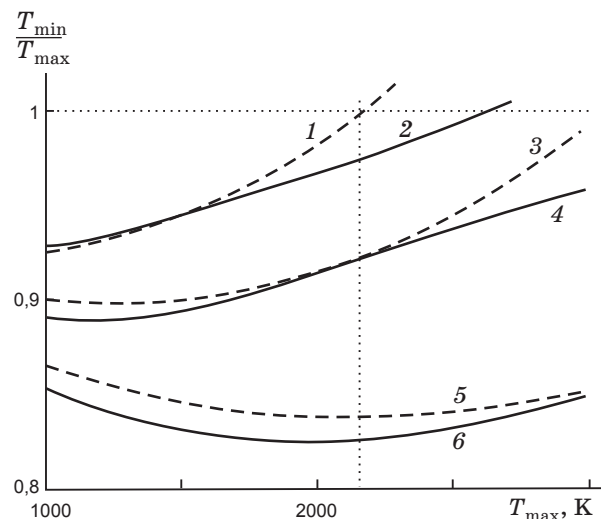
В отсутствие шумов канала связи гамма-коррекция не влияет на точность или границы диапазона измеряемых температур, поскольку приводит к одинаковому изменению коэффициента передачи как видеосигнала, так и шумов ТВ-модуля. Действительно, при $\text{SNR}_M \ll \text{SNR}_K$ формула (4) преобразуется в выражение, в котором отсутствует величина γ . Поэтому применение гамма-коррекции имеет смысл только при наличии заметных шумов канала связи, и эффект от ее введения тем больше, чем больше отношение $\text{SNR}_M/\text{SNR}_K$. Однако на практике обычно $\text{SNR}_M/\text{SNR}_K < 3$. Действительно, только за счет погрешности квантования при 8-разрядном аналого-цифровом преобразовании отношение сигнал/шум при максимальном размахе сигнала $U_6 = 1$ В составит величину порядка 58,9 дБ [6]. Учитывая возможный вклад

прочих источников шумов, можно полагать типичное значение отношения сигнал/шум в канале связи близким к отношению сигнал/шум на выходе ТВ-модулей (как правило, порядка 50 дБ [7]).

В качестве примера на рисунке приведены зависимости минимальной измеряемой температуры T_{min} , нормированной по величине T_{max} , от максимальной температуры T_{max} , построенные в результате численного решения уравнения (4) для случая $\lambda_{\text{эфф}} = 656$ нм, $\text{SNR}_M = \text{SNR}_K = 300$ (49,5 дБ) при различных значениях NETD, как при оптимальной гамма-коррекции (с учетом выражения (7)), так и без нее ($\gamma = 1$).

Как следует из формулы (7), оптимальное значение γ может быть как больше, так и меньше единицы. В некоторых случаях $\gamma_{\text{опт}} = 1$, и введение гамма-коррекции при любом, отличном от единицы, значении γ приводит к ухудшению ситуации (см., например, кривую 1 в окрестности $T_{\text{max}} = 1400$ К или кривую 3 в окрестности $T_{\text{max}} = 2050$ К).

Из анализа уравнения (4) с учетом выражения (7) и приведенных зависимостей видно, что коррекция при $\gamma_{\text{опт}} < 1$, как правило, оказывается малоэффективной. Например, при $\text{NETD} = 5$ К и $T_{\text{max}} = 2000$ К (см. кривую 5) введение гамма-коррекции с $\gamma_{\text{опт}} = 0,428$ позволяет уменьшить отношение $T_{\text{min}}/T_{\text{max}}$ с 0,838 до 0,825, что эквивалентно расширению диапазона измерений всего на 8,7%. При умень-



Зависимости отношения $T_{\text{min}}/T_{\text{max}}$ от значения T_{max} для случая $\lambda_{\text{эфф}} = 656$ нм, $\text{SNR}_M = \text{SNR}_K = 300$ при различных значениях NETD без гамма-коррекции с NETD = 1 К (1), 2 К (3), 5 К (5) и с оптимальной гамма-коррекцией при NETD = 1 К (2), 2 К (4), 5 К (6).

шении шумов ТВ-модуля эффективность гамма-коррекции повышается, однако даже при труднодостижимом на практике значении $SNR_M = 1000$ (60 дБ) широта диапазона измерений может быть увеличена лишь на 33,7% при $\gamma_{\text{опт}} = 0,279$. Поскольку встроенные средства ТВ-модулей предусматривают возможность установки не более двух-трех значений γ (как правило, 0,45, 0,7, 1), введение оптимальной гамма-коррекции требует дополнительных аппаратных затрат, что делает ее в большинстве случаев нецелесообразной.

Иногда коррекция с $\gamma < 1$ может быть оправдана с точки зрения улучшения зрительного восприятия формируемого изображения, поскольку при этом происходит частичная линеаризация характеристики преобразования температура–сигнал. Однако такая коррекция может быть выполнена и программными средствами перед выводом изображения на монитор, что значительно расширяет возможность оптимизации корректирующей функции, поскольку при этом отсутствует необходимость учета ее влияния на процесс измерения температуры.

Напротив, при необходимости измерения температур, сопоставимых с предельным значением $T_{\text{пред}}$ или превосходящих его, гамма-коррекция с коэффициентом $\gamma > 1$ не только обеспечивает существенное расширение диапазона, но и делает возможным само измерение с заданной точностью. Так, например, при $NETD = 1$ К и $T_{\text{max}} = 2000$ К (см. кривые 1 и 2), введение коррекции при $\gamma_{\text{опт}} = 2,715$ расширяет диапазон измерений почти в два раза (на 97%), а при температуре T_{max} от $T_{\text{пред}} = 2157$ К до 2600 К (см. кривую 2) измерение без коррекции вообще невозможно.

Таким образом, применение гамма-коррекции в ТВ-пирометре, по-видимому, наиболее оправданно при необходимости расширения диапазона измеряемых температур в области значений, сопоставимых с $T_{\text{пред}}$.

Выводы

Получены выражения (4) и (7), устанавливающие для известных значений отношения сигнал/шум ТВ-модуля и канала связи диапазон температур, измеряемых с заданной точностью при введении в видеотракт ТВ-пирометра гамма-коррекции, а также определяющие оптимальное значение коэффициента гамма-коррекции $\gamma_{\text{опт}}$.

Показано, что для встречающихся на практике значений отношения сигнал/шум ТВ-модуля и канала связи применение гамма-коррекции при $\gamma_{\text{опт}} < 1$, как правило, нецелесообразно. Однако, при необходимости измерения температур, сопоставимых с предельным значением $T_{\text{пред}}$, определяемым выражением (6), коррекция при $\gamma_{\text{опт}} > 1$ обеспечивает существенное расширение диапазона измерений. При максимальной измеряемой температуре $T_{\text{max}} > T_{\text{пред}}$ измерение без гамма-коррекции невозможно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов А.В. Оценка диапазона измерений телевизионного монохроматического пирометра // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 1. С. 39–42.
2. Кузнецов А.В. Оценка диапазона измерений телевизионного пирометра спектрального отношения // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 4. С. 50–54.
3. Лейтес Л.С. Аппаратура формирования сигнала черно-белого телевидения. М.: Связь, 1970. 464 с.
4. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука, 1982. 297 с.
5. Ллойд Дж. Системы тепловидения: Пер. с англ. / Под ред. Горячева А.И. М.: Мир, 1978. 414 с.
6. Горелик С.Л., Кац Б.М., Киврин В.И. Телевизионные измерительные системы. М.: Связь, 1980. 168 с.
7. Технические описания ТВ камер черно-белого изображения компании WATEC. – С сайта http://www.watec.com/english/bw_top.html.