

ОПТИМАЛЬНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ВИДЕОСИГНАЛА В ДВУХКАНАЛЬНОМ ТЕЛЕВИЗИОННОМ ПИРОМЕТРЕ

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

НИИ промышленного телевидения “Растр”, г. Великий Новгород

E-mail: outling@inbox.ru

Проведен анализ параметров телевизионного пирометра, построенного на основе двух каналов фотоэлектрического преобразования с различными временами накопления. Показано, что даже при отношении значений времени накопления, ограниченном возможностями антиблуминга ПЗС-матриц, достигается существенное расширение диапазона измеряемых температур при заданной точности измерений и известном отношении сигнал/шум в каналах.

Ключевые слова: телевизионный пирометр, диапазон измерений, погрешность измерения температуры.

Коды OCIS: 120.0120.

Поступила в редакцию 07.07.2010.

Повышение инструментальной точности измерения температуры телевизионными (ТВ) пирометрами, ограниченной шумами видеотракта, включая аналого-цифровое преобразование при вводе видеосигнала в компьютер, может рассматриваться как расширение светового динамического диапазона ТВ пирометра в область малых энергетических яркостей объектов измерения [1]. Основным ограничительным фактором при этом является световой динамический диапазон ТВ модуля (как правило, на основе ПЗС-матрицы), обычно не превышающий 50 дБ.

Аналогичная проблема встречается чрезвычайно часто в задачах ТВ контроля высокотемпературных производственных процессов, таких как сварка, наблюдение за горячим прокатом и расплавленным металлом, где светимость раскаленных объектов на несколько порядков превышает освещенность технологического оборудования и производственных площадей, что делает невозможным их одновременное наблюдение в одном кадре. Известным вариантом решения этой проблемы является формирование нелинейной свет-сигнальной характеристики за счет взвешенного суммирования видеосигналов двух и более ТВ каналов, работающих с различными временами накопления [2–5]. При этом участки изображения, сформированного низкоуровневыми каналами, не содержащие информации о части сцены вследствие из-

быточной освещенности, дополняются изображением, сформированным каналами с меньшей чувствительностью, т. е. высокоуровневыми. Физически это может быть реализовано как в реальном времени (с использованием светоделительной оптики), так и путем поочередной экспозиции с запоминанием и последующим программным суммированием кадров в компьютере.

В идеальном случае динамический диапазон ТВ системы может быть расширен в некоторое число раз, равное отношению времен накопления в низкоуровневом и высокоуровневом каналах [3–5]. Однако на практике достижимое расширение динамического диапазона, как правило, не превышает одного порядка, поскольку определяется возможностями антиблуминга, предотвращающего растекания заряда в ПЗС-матрице при световой перегрузке [6].

Тем не менее представляется целесообразным проведение анализа предельных возможностей расширения диапазона измеряемых температур ТВ пирометров при расширении рабочего диапазона яркостей объектов, достигаемом рассмотренным способом. Следует заметить, что увеличение числа каналов больше двух существенно усложняет светоделительную оптику или, в случае использования компьютерной обработки, приводит к пропорциональному снижению частоты кадров в выходном видеосигнале. Учитывая также упомяну-

тые ограничения, налагаемые возможностями антиблуминга, оптимальной, по-видимому, следует считать двухканальную систему.

В двухканальной системе высокоуровневый канал с линейной характеристикой преобразования “свет-сигнал” $u_1(E)$ обеспечивает заданное верхнее предельное значение светового динамического диапазона E_{\max} (соответствующее максимальной измеряемой температуре T_{\max}), при котором размах сигнала равен уровню “белого” U_6 (см. рис. 1).

Расширение рабочего диапазона освещенностей достигается введением второго, низкоуровневого канала с линейной характеристикой преобразования “свет-сигнал” $u_2(E)$ с верхним предельным значением освещенности βE_{\max} , где β – отношение времен накопления высокоуровневого и низкоуровневого каналов, определяемое возможностями антиблуминга и допустимыми потерями информации при растекании заряда вследствие “пересвета”.

Выходной сигнал системы определяется взвешенным суммированием сигналов каналов в соответствии с соотношением

$$u_{\Sigma}(E) = \alpha u_2(E) + (1 - \alpha)u_1(E), \quad (1)$$

где α – коэффициент.

Сигнал $u_2(E)$ ограничивается на уровне U_6 при освещенности $E > \beta E_{\max}$, поэтому результирующая зависимость $u_{\Sigma}(E)$ имеет перегиб в точке $E = \beta E_{\max}$, соответствующей температуре объекта T_{β} . Поскольку величина β числен-

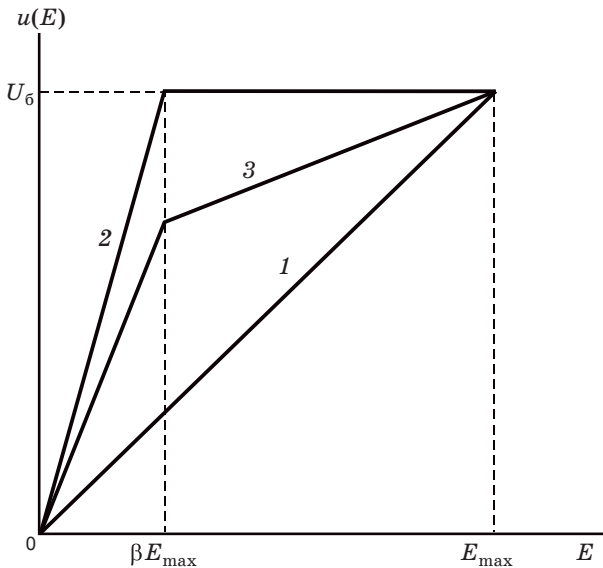


Рис. 1. Характеристики преобразования “свет-сигнал”. 1 – высокоуровневого канала $u_1(E)$, 2 – низкоуровневого канала $u_2(E)$, 3 – результирующая $u_{\Sigma}(E)$.

но равна отношению значений спектральной энергетической яркости объекта при температурах T_{β} и T_{\max} , для определения T_{β} можно воспользоваться известной пирометрической формулой [7]

$$\frac{1}{T_{\beta}} = \frac{1}{T_{\max}} - \frac{\lambda_{\text{эфф}}}{c_2} \ln \beta, \quad (2)$$

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

Для упрощения анализа допустимо предположить, что в сигнале $u_2(E)$ вследствие ограничения при $E > \beta E_{\max}$ шум отсутствует, поэтому, в соответствии с (1), эффективное напряжение шума в выходном сигнале может быть определено как

$$u_{\text{ш}\Sigma} = \begin{cases} u_{\text{ш}} \sqrt{2\alpha^2 - 2\alpha + 1} & \text{при } T < T_{\beta}, \\ u_{\text{ш}}(1 - \alpha) & \text{при } T \geq T_{\beta}, \end{cases} \quad (3)$$

где $u_{\text{ш}}$ – эффективное напряжение шума в каждом канале.

Полагая для простоты излучательную способность объекта постоянной и пользуясь приближением Вина [7], можно определить зависимость выходного сигнала u_{Σ} от температуры объекта как (см. рис. 1)

$$u_{\Sigma}(T) = U_6 \left(\frac{\alpha}{\beta} - \alpha + 1 \right) \exp \left[\frac{c_2}{\lambda_{\text{эфф}}} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\max}} \right) \right] - \quad (4)$$

при $T < T_{\beta}$

и

$$u_{\Sigma}(T) = U_6(1 - \alpha) \exp \left[\frac{c_2}{\lambda_{\text{эфф}}} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\max}} \right) \right] - \quad (5)$$

при $T \geq T_{\beta}$.

Определим минимальную измеряемую температуру T_{\min} как температуру, при которой приращение выходного сигнала ТВ пирометра от заданного приращения температуры NETD (эквивалентной шуму разности температур [1]) равно эффективному напряжению шума. Тогда, дифференцируя (4), с учетом (3) можно записать

$$\frac{\beta \sqrt{2\alpha^2 - 2\alpha + 1}}{\alpha + (1 - \alpha)\beta} = \quad (6)$$

$$= \text{SNR NETD} \frac{c_2}{\lambda_{\text{эфф}} T_{\min}^2} \exp \left[\frac{c_2}{\lambda_{\text{эфф}}} \left(\frac{1}{T_{\max}} - \frac{1}{T_{\min}} \right) \right],$$

где $\text{SNR} = U_6/u_{\text{ш}}$ – отношение сигнал/шум в каждом канале.

Полученная зависимость (6) определяет обеспечиваемую точность измерений (значение NETD) в требуемом диапазоне температур при известном отношении сигнал/шум в каналах ТВ пирометра с установленными параметрами формирования выходного видеосигнала α и β .

Для расширения светового динамического диапазона и, следовательно, диапазона измеряемых температур ТВ пирометра необходимо увеличивать крутизну зависимости (4), т. е. увеличивать коэффициент α . Однако при этом снижается крутизна зависимости (5). Очевидно, что аналогично соотношению (6) должна обеспечиваться необходимая крутизна преобразования “температура-сигнал” для самой низкой температуры после точки перегиба зависимости $u_{\Sigma}(E)$, т. е. для T_{β} . Дифференцируя (5) и приравнявая приращение сигнала от температурного перепада, равного NETD, эффективному напряжению шума в соответствии с (3), можно записать

$$u_{\text{ш}}(1-\alpha) = U_6(1-\alpha) \frac{c_2}{\lambda_{\text{эфф}} T_{\beta}^2} \exp \left[\frac{c_2}{\lambda_{\text{эфф}}} \left(\frac{1}{T_{\text{max}}} - \frac{1}{T_{\beta}} \right) \right] \text{NETD},$$

откуда, с учетом (2), получим

$$1 = \text{SNR NETD} \beta \frac{c_2}{\lambda_{\text{эфф}}} \left(\frac{1}{T_{\text{max}}} - \frac{\lambda_{\text{эфф}}}{c_2} \ln \beta \right)^2. \quad (7)$$

В полученном выражении (7) отсутствует коэффициент α , что означает, что в пределах допущения об отсутствии шумов в низкоуровневом канале при $T \geq T_{\beta}$ значение α может быть выбрано произвольно, при этом характеристики пирометра будут определяться соотношением (6). Это объясняется тем, что при увеличении α уменьшение крутизны преобразования (5) сопровождается пропорциональным снижением эффективного напряжения шума $u_{\text{ш}\Sigma}$ в соответствии с (3).

Поскольку средства антиблуминга современных ПЗС-матриц обеспечивают отсутствие растеканий заряда при приблизительно десятикратной световой перегрузке, минимальное приемлемое на практике отношение времен накопления в каналах ТВ пирометра ориентировочно составит $\beta = 0,1$. При этом увеличение коэффициента α будет приводить к расширению диапазона измеряемых температур, что иллюстрируют зависимости, приведенные на рис. 2, построенные в соответствии с (6) для случая $\lambda_{\text{эфф}} = 656 \text{ нм}$, $\beta = 0,1$, $\text{SNR NETD} = 600$.

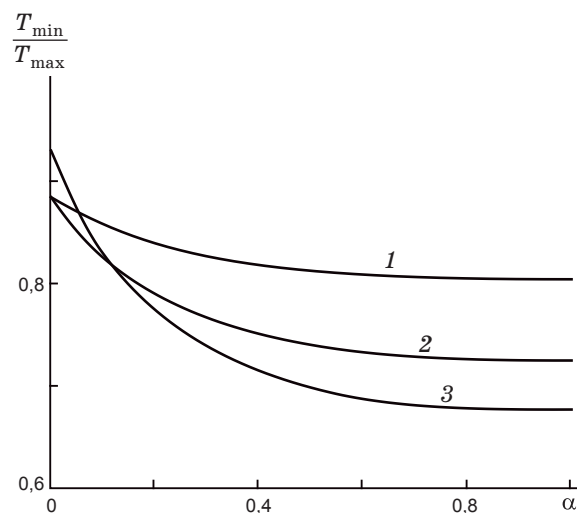


Рис. 2. Зависимость ширины диапазона измерений от коэффициента α при $\lambda_{\text{эфф}} = 656 \text{ нм}$, $\beta = 0,1$, $\text{SNR NETD} = 600$ и температурах объекта 1000 (1), 2000 (2), 3000 К (3).

Из приведенных зависимостей видно, что двухканальное формирование выходного сигнала позволяет существенно расширить диапазон измерений ТВ пирометра, особенно в области температур, близких к предельному значению, при котором заданная точность обеспечивается только при $T = T_{\text{max}}$ [8]. Так, при $\alpha = 0$, что соответствует одноканальному пирометру, ширина диапазона измерений в рассмотренном случае составляет всего 6,6% при $T_{\text{max}} = 3000 \text{ К}$ (см. кривую 3 на рис. 2). Введение низкоуровневого канала при $\alpha = 0,8$ увеличивает ее до 32,2%, т. е. в 4,88 раза.

Необходимо отметить, что увеличение коэффициента α до значений, близких к единице, не имеет смысла, поскольку в реальных системах полное устранение шумов принципиально невозможно, и сделанное выше допущение о снижении размаха сигнала в области $T \geq T_{\beta}$ при пропорциональном снижении эффективного напряжения шума до сколь угодно малых значений некорректно. По-видимому, ориентировочно можно полагать оптимальным значение $\alpha = 0,5-0,6$ (см. рис. 2), при котором обеспечивается расширение диапазона измеряемых температур, близкое к теоретическому пределу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов А.В. Оценка диапазона измерений телевизионного монохроматического пирометра // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 1. С. 39-42.

2. *Смелков В.М.* Иду на растр: Эссе об изобретениях по классу H04N. Великий Новгород: ИПЦ НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2007. 176 с.
 3. *Смелков В.М.* Альтернативный метод расширения динамического диапазона телевизионной камеры на матрице ПЗС // Вопросы радиоэлектроники. Серия “Техника телевидения”. 2008. № 1. С. 88–96.
 4. *Виленчик Л.С., Гончаренко Б.Г., Курков И.Н., Разин А.И., Розвал Я.Б.* Способ расширения динамического диапазона передаваемых градаций яркости и/или освещенности в телевизионной системе // Патент РФ № 2199827. 2003.
 5. *Смелков В.М.* Аналитическая оценка многоканального способа расширения динамического диапазона телевизионной системы // Спец. техника. 2007. № 2. С. 25–29.
 6. *Кузнецов А.В.* О возможности расширения динамического диапазона телевизионной системы за счет увеличения числа каналов // Вопросы радиоэлектроники. Серия “Техника телевидения”. 2010. № 1. С. 51–56.
 7. *Свет Д.Я.* Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука, 1982. 297 с.
 8. *Кузнецов А.В.* Оценка диапазона измеряемых температур телевизионного пирометра спектрального отношения // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 4. С. 50–54.
-