

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.384.326.2

ВОЗМОЖНОСТЬ И УСЛОВИЯ АДАПТИВНОГО ВЫРАВНИВАНИЯ КАНАЛОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ С МНОГОЭЛЕМЕНТНЫМ ФОТОПРИЕМНИКОМ ПО СИГНАЛАМ НАБЛЮДАЕМОЙ СЦЕНЫ

© 2004 г. Ю. Н. Раковский, канд. техн. наук

ВНЦ "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", Санкт-Петербург

Рассмотрены условия применимости метода выравнивания каналов оптико-электронной аппаратуры с многоэлементным фотоприемным устройством, основанного на использовании выходных сигналов от наблюдаемой сцены.

Коды OCIS: 100.2550.

Поступила в редакцию 13.05.2003.

Существенное различие параметров и характеристик каналов оптико-электронной аппаратуры с многоэлементным фотоприемником, называемое структурным или "геометрическим" шумом, приводит к значительному искажению изображения наблюдаемой сцены. Известные методы компенсации этих искажений можно разделить на методы, использующие специальные тест-объекты, и методы, использующие для выравнивания каналов аппаратуры непосредственно сигналы от наблюдаемой сцены.

Под "выравниванием" понимается такая операция над выходными сигналами, в результате которой одинаковые входные воздействия на каналы вызывают на их выходах равные сигналы.

Символически выходной сигнал i -го канала может быть представлен в виде

$$u_i = A_i(I) + h_i. \quad (1)$$

Здесь I – входное воздействие на канал ("интенсивность" излучения сцены в области чувствительности фоточувствительного элемента канала); "полезный сигнал", т. е. оператор $A_i(I)$, полагается таким, что $A_i(0) = 0$; аддитивная составляющая сигнала $h_i = u_i(0)$ обычно называется смещением ("подставкой").

В основе методов выравнивания лежит использование сигналов разных каналов от одного и того же входного воздействия и сигналов одного и того же канала от разных входных воздействий. Если известен алгоритм выравнивания двух (как правило, соседних) каналов, то так же, последовательно, можно выравнивать остальные, приведя все каналы к какому-то одному (произвольно выбранному). Поэтому для анализа условий применимости методов выравнивания достаточно рассмотреть выходные сигналы двух каналов.

Используются сигналы, соответствующие двум входным воздействиям

$$\begin{aligned} u_1 &= A_1(I) + h_1, \quad u'_1 = A_1(I') + h_1, \\ u_2 &= A_2(I) + h_2, \quad u'_2 = A_2(I') + h_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Способы получения сигналов (2) могут быть различными. Могут использоваться две равномерные освещенности как в виде специальных тест-объектов [1], так и в виде расфокусированных изображений сцены [2]. В этом случае интенсивности I и I' не зависят от координат на поверхности изображения сцены.

При выравнивании каналов по сигналам от (сфокусированного) изображения используются определенные пространственные сдвиги поля чувствительности относительно изображения [3]. В этом случае $I = I(r)$, $I' = I(r')$, где $r \neq r'$ – координаты фоточувствительного элемента (ФЧЭ) канала на поверхности изображения (вектор $r = \{x, y\}$).

Введем обозначение для отношения полезных сигналов в каналах

$$A_1(I)/A_2(I) = \gamma_{12}. \quad (3)$$

Величина γ_{12} не может быть получена непосредственно из-за наличия неизвестных смещений h_1 и h_2 . Если, однако, потребовать выполнения условия

$$A_1(I)/A_2(I) = A_1(I')/A_2(I') \quad (4)$$

для любых I и I' , то (по свойству пропорции)

$$\gamma_{12} = \frac{A_1(I) - A_1(I')}{A_2(I) - A_2(I')} = \frac{u_1 - u'_1}{u_2 - u'_2}. \quad (5)$$

Таким образом, при условии (4) параметр γ_{12} может быть получен по выходным сигналам каналов (2).

Введем величину

$$\Delta h_{12} = u_1 - \gamma_{12} u_2 = h_1 - \gamma_{12} h_2, \quad (6)$$

которая тоже выражается через выходные сигналы каналов. Используемое далее последнее равенство в (6) справедливо, если только параметр γ_{12} имеет смысл, определенный отношением (3).

Зная параметры γ_{12} и Δh_{12} , можно преобразовать сигнал второго канала таким образом, чтобы при одном и том же входном воздействии выходные сигналы обоих каналов были равными.

Действительно, с учетом (3) и (4)

$$\begin{aligned} \tilde{u}_2 &= u_2 \gamma_{12} + \Delta h_{12} = [A_2(I) + h_2] \gamma_{12} + \Delta h_{12} = \\ &= A_1(I) + \gamma_{12} h_2 + h_1 - \gamma_{12} h_2 = u_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Далее можно выравнивать третий канал со вторым

$$\tilde{u}_3 = (u_3 \gamma_{23} + \Delta h_{23}) \gamma_{12} + \Delta h_{12} = u_1, \quad (8)$$

четвертый с третьим

$$\tilde{u}_4 = [(u_4 \gamma_{34} + \Delta h_{34}) \gamma_{23} + \Delta h_{23}] \gamma_{12} + \Delta h_{12} = u_1 \quad (9)$$

и т. д.

Доказательство равенств (8), (9) и т. д. основано на использовании соотношения $\gamma_{km} \gamma_{nk} = \gamma_{nm}$, являющегося следствием условия (4).

Приведенная выше схема преобразований использована только для доказательства возможности выравнивания каналов. Алгоритм вычислений в конкретной аппаратуре может быть оптимизирован по заданным критериям с учетом ограничений по объему памяти, быстродействию, потреблению и т. п.

Таким образом, возможность выравнивания каналов по выходным сигналам от наблюдаемой сцены основана на выполнении условия (4). Для физической интерпретации этого условия необходимо рассмотреть выходные сигналы каналов более детально.

В линейном приближении полезный выходной сигнал представляет собой оператор взаимной корреляции по пространству и времени и функционал по спектру (по длинам волн)

$$\begin{aligned} U_i(r, t) &= \iiint_{(\lambda)(S)(T)} E_\lambda(\lambda, \rho + r, \tau + t) \times \\ &\times k_i(\lambda, \rho, \tau) d\tau d\sigma d\lambda. \end{aligned} \quad (10)$$

Сигнал $U_i(r, t)$ зависит от положения (r) ФЧЭ i -го канала в системе координат сцены и от времени (t). В выражении (10) $E_\lambda(\lambda, r, t)$ – спектральная освещенность на длине волны λ ; $k_i(\lambda, r, t)$ – функция преобразования лучистой энергии в полезный выходной сигнал i -го канала; $d\sigma = dx dy$ – элемент площади поверхности ФЧЭ; (λ) , (S) , (T) – спектральная, пространственная и временная области, в которых за-

даны функции преобразования (далее для краткости области интегрирования опущены).

Введем обозначения

$$\max_{\lambda, r, t} k_i(\lambda, r, t) = K_i, \quad \frac{k_i(\lambda, r, t)}{K_i} = g_i(\lambda, r, t). \quad (11)$$

В (11) $g_i(\cdot)$ – относительная спектрально-пространственно-временная характеристика i -го канала, т. е. нормированная реакция на воздействие вида

$$E_\lambda(\lambda, r, t) = W_\lambda(\lambda) \delta(t - t_0) \delta(r - r_0), \quad (12)$$

где $W_\lambda(\lambda)$ – спектральная плотность лучистой энергии, K_i – крутизна преобразования (по энергии).

Условие применимости метода выравнивания каналов (4) по сигналам от наблюдаемой сцены можно представить в виде

$$\frac{U_i(r, t)}{U_j(r, t)} = \frac{U_i(r', t')}{U_j(r', t')}. \quad (13)$$

Для выполнения этого условия достаточно, чтобы отношение полезных выходных сигналов разных каналов от одного и того же входного воздействия не зависело от координат и времени. Это означает, что отношение

$$\frac{\iiint E_\lambda(\lambda, \rho + r, \tau + t) g_i(\lambda, \rho, \tau) d\tau d\sigma d\lambda}{\iiint E_\lambda(\lambda, \rho + r, \tau + t) g_j(\lambda, \rho, \tau) d\tau d\sigma d\lambda} \quad (14)$$

не должно зависеть от переменных r и t .

Очевидно, что такое требование при $g_i(\cdot) \neq g_j(\cdot)$ может быть выполнено только в некоторых частных случаях.

Будем считать, что в течение времени наблюдения сцена неизменна, а также, что в области чувствительности ФЧЭ любого канала освещенность пространственно постоянна (равномерна). Такие допущения уместны, когда поле яркости наблюдаемой сцены относительно медленно меняется, а интервал корреляции этого поля много больше телесного угла ФЧЭ всех каналов (другими словами, наименьшие детали сцены должны быть больше размеров ФЧЭ). Если теперь ввести относительную спектральную характеристику i -го канала

$$\phi_i(\lambda) = \frac{\iint \tilde{g}_i(\lambda, \rho, \tau) d\sigma d\tau}{\max_\lambda \iint \tilde{g}_i(\lambda, \rho, \tau) d\sigma d\tau}, \quad (15)$$

то с учетом принятых допущений условие (13) сводится к требованию, чтобы отношение

$$\frac{\int E_\lambda(\lambda, r) \phi_i(\lambda) d\lambda}{\int E_\lambda(\lambda, r) \phi_j(\lambda) d\lambda} \quad (16)$$

не зависело от r .

При $\phi_i(\lambda) \neq \phi_j(\lambda)$ это требование выполняется, если спектральная освещенность представима в виде

$$E_{\lambda}(\lambda, r) = E_{\lambda}(\lambda) f(r), \quad (17)$$

где $f(r)$ – безразмерная функция координат (“спектрально чистая” сцена).

Частными случаями факторизации (17) являются:

1) равномерная спектральная освещенность во всех точках сцены

$$E_{\lambda}(\lambda, r) = E_{\lambda}(\lambda); \quad (18)$$

2) спектрально неселективная сцена

$$E_{\lambda}(\lambda, r) = E_{\lambda} f(r), \quad (19)$$

где спектральная освещенность E_{λ} не зависит от длины волны в области спектральной чувствительности всех каналов;

3) спектрально селективная сцена

$$E_{\lambda}(\lambda, r) = E \delta(\lambda - \lambda_0) f(r) \quad (20)$$

(практически – узкополосная спектральная фильтрация).

В этой связи интересно рассмотреть чисто “тепловую” сцену

$$E_{\lambda}(\lambda, r) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T(r)} - 1}, \quad (21)$$

где $T(r)$ – температура сцены в точке r , c_1 и c_2 – известные постоянные. Для такой сцены факторизация (17) достигается только в пределе:

$$E_{\lambda}(\lambda, r) \approx \frac{c_1 c_2}{\lambda^4} T(r) \text{ при } \lambda T_{\min} \gg c_2. \quad (22)$$

Можно, конечно, заменив экспоненциальную зависимость от температуры на линейную, положить

$$E_{\lambda}(\lambda, r) \approx \frac{c_1 c_2}{\lambda^5} \frac{T(r)/T_{\max}}{e^{c_2/\lambda T_{\max}} - 1}, \quad (23)$$

однако аналитически оценить допустимость такого приближения, по меньшей мере, трудно.

Вместе с тем, если пренебречь различием спектральных характеристик каналов, т. е. считать, что

$$g_i(\lambda, r, t) = \varphi(\lambda) \psi_i(r, t), \quad (24)$$

то

$$\frac{U_i}{U_j} \sim \frac{\iint E(\rho + r, \tau + t) \psi_i(\rho, \tau) d\sigma d\tau}{\iint E(\rho + r, \tau + t) \psi_j(\rho, \tau) d\sigma d\tau}, \quad (25)$$

где $E(r, t) = \int_{(\lambda)} E_{\lambda}(\lambda, r, t) \varphi(\lambda) d\lambda$ – эффективная освещенность.

В этом случае, очевидно, достаточно только упомянутых выше допущений об относительно силь-

ной коррелированности и практической неизменности сцены во времени, так как при этом эффективная освещенность в (25) может быть вынесена за знаки интегралов и сокращена.

Если, кроме того, допустить факторизацию

$$\psi_i(r, t) = \xi_i(r) \eta_i(t) \quad (26)$$

и положить $\xi_i(r) = \xi(r)$ либо $\eta_i(t) = \eta(t)$, то в первом случае можно снять требование относительно сильной коррелированности сцены, а во втором – требование о ее неизменности во времени.

Если все относительные характеристики каналов одинаковы ($g_i(\cdot) = g_j(\cdot)$), то отношение (14) равно единице, а полезные сигналы в каналах различаются только мультипликативным параметром K_i (крупной по энергии), т. е. в этом случае

$$\gamma_{ij} = \frac{K_i}{K_j}. \quad (27)$$

Таким образом, возможность выравнивания каналов по сигналам от наблюдаемой сцены ограничена условиями, которые, как правило, могут быть удовлетворены только приближенно.

Заметим, что записанное в общем (операторном) виде условие (4) заведомо выполняется для наиболее часто используемой модели сигнала

$$u_i = R_i I + h_i, \quad (28)$$

где R_i и h_i – параметры канала, а I – не зависящая от них “интенсивность”. Однако, как следует из вышеизложенного, сама модель (28) справедлива, строго говоря, только в определенных частных случаях.

Анализ факторов, негативно влияющих на точность выравнивания каналов (шумы, квантование, неточность пространственных сдвигов), представляет собой сложную задачу, заслуживающую специального рассмотрения. Очевидно, однако, что алгоритм, основанный на использовании разностей сигналов, может быть эффективным только при достаточно большом отношении разностного сигнала к шуму.

ЛИТЕРАТУРА

1. Carrison C.L., Foss N.A. // Proc. SPIE. 1979. V. 178. P. 99–109.
2. Патент EP 0468474 HO4 № 5/33 // Изобретения стран мира. 1993. В. 111. № 5. P. 120.
3. Kober V., Saptzin V. Adaptive Nonuniformity Compensation for Infrared Focal Plane Array Sensors // <http://sipl.kjist.ac.kr/~smryoo/ITS>.