

В известных работах по оценке влияния яркостного шума на ошибки совмещения изображений [1, 2] анализ основных закономерностей выполнен либо качественно, либо численными методами. Конечные выражения, связывающие статистические характеристики ошибок совмещения с параметрами корреляционных функций наблюдаемых изображений и шумов и размерами поля анализа, не приводятся. Это исключает возможность выполнения точного либо приближенного количественного анализа часто встречающихся на практике случаев без дополнительных достаточно громоздких вычислений. Настоящее сообщение имеет целью устранение этого недостатка путем количественного анализа одного из частных случаев, допускающих получение конечных выражений в явном виде.

Рассмотрим систему совмещения изображений, использующую метод максимума функции взаимной корреляции [3], при воздействии на нее аддитивного однородного яркостного шума, сечение пространственной функции корреляции которого имеет вид гауссоиды. В предположении, что изображение и шум являются нормальными случайными полями с нулевыми математическими ожиданиями, элементы ковариационной матрицы ошибок совмещения могут быть определены из выражения [3]

$$D_{ij} = \frac{-a_M^{-2} \int_{\infty} g(z) \left\{ \left[\frac{\partial^2}{\partial z_i \partial z_j} R_p(z) \right] R_p(z) + \frac{\partial}{\partial z_i} R_p(z) \frac{\partial}{\partial z_j} R_p(z) + \left(-\frac{\partial^2}{\partial z_i \partial z_j} R_p(z) \Big|_{z=0} \right)^2 + \left[\frac{\partial^2}{\partial z_i \partial z_j} R_N(z) \right] R_p(z) \right\} dz}{\rightarrow}, \quad (1)$$

где $R_p(z)$ и $R_N(z)$ — пространственные корреляционные функции изображения и шума соответственно; $g(z) = \int_{\infty} H(x) H(x+z) dx$; $H(x) = \begin{cases} 1, & x \in M; \\ 0, & x \notin M; \end{cases}$ M — область

опорного изображения; a_M — площадь опорного изображения; $z = (z_1, z_2)$, $i = 1, 2$, $j = 1, 2$.

Если $R_p(z) = D_p \exp \left\{ -\frac{1}{2} (z_1^2/\Delta_p^2 + z_2^2/\Delta_p^2) \right\}$; $R_N(z_1) = D_N \exp \left\{ -\frac{1}{2} (z_1^2/\Delta_N^2 + z_2^2/\Delta_N^2) \right\}$, где D_p , Δ_p , D_N , Δ_N — дисперсия и пространственный радиус корреляции изображения и шума соответственно и $H(x)$ центрирована относительно начала координат и имеет форму квадрата со стороной T , то ковариационная матрица ошибок является диагональной, а ее элементы, полученные с помощью несложных, но громоздких вычислений с использованием выражения (1), могут быть представлены в виде

$$D_{11} = D_{22} = \frac{\sqrt{\pi} \Delta_p^5}{T^3} \left[\Phi \left(\frac{T}{\Delta_p} \right) - \frac{\Delta_p}{\sqrt{\pi T}} \left(1 - e^{-\frac{T^2}{\Delta_p^2}} \right) \right] \left(1 - e^{-\frac{T^2}{\Delta_p^2}} \right) + \frac{2\pi D_N \Delta_p^4 \Delta_N^2 / \Delta_N^2}{D_p T^2 (1 + \Delta_p^2 / \Delta_N^2)^2} \left[\Phi \left(\frac{T}{\sqrt{2} \Delta_p} \sqrt{1 + \frac{\Delta_p^2}{\Delta_N^2}} \right) - \frac{\sqrt{2} \Delta_p (1 - \Delta_p^2 / \Delta_N^2)}{\sqrt{\pi T} \sqrt{1 + \Delta_p^2 / \Delta_N^2}} \times \left(1 - e^{-\frac{T^2}{2\Delta_p^2} (1 + \Delta_p^2 / \Delta_N^2)} \right) \right] \left[\Phi \left(\frac{T}{\sqrt{2} \Delta_p} \sqrt{1 + \frac{\Delta_p^2}{\Delta_N^2}} \right) - \frac{\sqrt{2} \Delta_p}{\sqrt{\pi T} \sqrt{1 + \Delta_p^2 / \Delta_N^2}} \times \left(1 - e^{-\frac{T^2}{2\Delta_p^2} (1 + \Delta_p^2 / \Delta_N^2)} \right) \right], \quad (2)$$

где $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$.

Так как на практике часто выполняется неравенство $T/\Delta_p > 2$, то выражение (2) может быть существенно упрощено:

$$D_{11} = D_{22} \simeq \frac{\sqrt{\pi} \Delta_p^5}{T^3} + 2\pi \frac{D_N \Delta_p^4 \Delta_p^2 / \Delta_N^2}{D_p T^2 (1 + \Delta_p^2 / \Delta_N^2)^2}. \quad (3)$$

Как видно из (3), в отсутствие шумов ($D_N = 0$) ошибки совмещения зависят от величины радиуса корреляции изображения и обратно пропорциональны отношению размера поля анализа к радиусу корреляции изображения. Шумовая составляющая ошибок совмещения (второе слагаемое в (3)), кроме того, прямо пропорциональна энергетическому отношению D_N/D_p и зависит от отношения радиусов корреляции изображения и шума. Исследование второго слагаемого в (3) на экстремум по переменной Δ_p^2/Δ_N^2 показывает, что максимальное значение шумовой составляющей ошибки совмещения достигается при равенстве радиусов корреляции изображения и шума. Таким образом, сделанные на основе анализа (3) выводы подтверждают закономерности, отмеченные в [1].

Если текущее изображение относительно опорного имеет ракурсные и масштабные искажения и матрицу искажений A можно представить в виде

$$A = \alpha \begin{Bmatrix} \cos \Theta & \sin \Theta \\ -\sin \Theta & \cos \Theta \end{Bmatrix},$$

где α и Θ характеризуют взаимное рассогласование изображений по масштабу и углу соответственно, то элементы ковариационной матрицы ошибок совмещения могут быть определены из выражения [3]

$$D_{ij} \simeq \frac{-a_M^{-2} \int_{\infty} g(z) \left\{ \left[\frac{\partial^2}{\partial z_i \partial z_j} R_p(Az) \right] R_p(z) + \frac{\partial}{\partial z_i} R_p(z) \frac{\partial}{\partial z_j} R_p(z) + \left[\frac{\partial^2}{\partial z_i \partial z_j} R_N(z) \right] R_p(z) \right\} dz}{\left\{ [a_M |\det(I-A)|]^{-1} \int_N \frac{\partial^2}{\partial z_i \partial z_j} R_p(z) dz \right\}^2},$$

здесь I — единичная матрица; N — отображение области M при преобразовании $z = (I-A)x$.

При принятых выше предположениях о виде $R_p(z)$, $R_N(z)$ и $H(x)$, а также при $|\det(I-A)| \approx \sqrt{(1-\alpha)^2 + \Theta^2}$ и $T/\Delta_p > 2$ выражение для дисперсии ошибок совмещения в отсутствие шумов имеет следующий вид:

$$D_{11} = D_{22} \simeq \frac{\Delta_p^3 [(1-\alpha)^2 + \Theta^2] e^{\frac{4\Delta_p^2}{T^2} [(1-\alpha)^2 + \Theta^2]}}{2\sqrt{\pi} T \Phi^2 \left(\frac{T}{2\sqrt{2}\Delta_p} \sqrt{(1-\alpha)^2 + \Theta^2} \right)}. \quad (4)$$

Анализ выражения (4) показывает, что при наличии искажений зависимость ошибок совмещения от отношения T/Δ_p носит экстремальный характер, минимум ошибок достигается для $T/\Delta_{pm} \simeq \sqrt{\frac{6}{(1-\alpha)^2 + \Theta^2}}$. Существует область отношений T/Δ_p ,

в которой ошибки совмещения близки к минимальным. Выход за пределы данной области ведет к существенному увеличению этих ошибок. При росте искажений размер области минимальных ошибок сужается, а уровень ошибок повышается.

При $T/\Delta_p < T/\Delta_{pm}$ аргумент функции $\Phi(x)$, входящей в знаменатель выражения (4), будет меньше 1, что позволяет существенно упростить (4), разложив функцию $\Phi(x)$ в ряд и ограничившись первым членом разложения:

$$D_{11} = D_{22} \simeq \frac{\sqrt{\pi} \Delta_p^5}{T^3} e^{\frac{T^2}{2\Delta_p^2} [(1-\alpha)^2 + \Theta^2]}.$$

При этом же допущении выражение для дисперсии ошибок совмещения с учетом шумов принимает следующий вид:

$$D_{11} = D_{22} \simeq \left[\frac{\sqrt{\pi} \Delta_p^5}{T^3} + \frac{2\pi D_N \Delta_p^4 \Delta_p^2 / \Delta_N^2}{D_p T^2 (1 + \alpha^2 \Delta_p^2 / \Delta_N^2)^2} \right] e^{\frac{T^2}{2\Delta_p^2} [(1-\alpha)^2 + \Theta^2]}.$$

Таким образом, полученные выражения подтверждают выявленные ранее в работах [1–3] закономерности и обеспечивают оперативное выполнение приближенного количественного анализа систем совмещения изображений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буймов А. Г. Анализ влияния корреляционных свойств неоднородного яркостного шума на ковариационную матрицу ошибок совмещения изображений // Автометрия.— 1985.— № 4.
2. Антипин В. В., Буймов А. Г. Статистический анализ ошибок совмещения изображений по методу наименьших квадратов в условиях окрашенного шума // Автометрия.— 1985.— № 3.
3. Mostafavi H., Smith F. W. Image correlation with geometric distortion. P. II // IEEE Trans.— 1978.— V. AES-14, N 3.— P. 494.

Поступило в редакцию 9 февраля 1987 г.

УДК 621.396.629 : 621.374(045)

В. А. ЖМУДЬ, Ю. П. КОНОНЕНКО, А. А. СТОЛПОВСКИЙ
(Новосибирск)

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ РАСШИРЕНИЯ ПОЛОСЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ФОТОПРИЕМНИКА

Одним из важнейших компонентов оптоэлектронных приборов, определяющим точностные характеристики прибора в целом, является фотоприемник. Задача приема оптических высокочастотных сигналов с наивысшим возможным отношением сигнал/шум актуальна при создании интерферометров и устройств волоконной связи.

В последнее время получили широкое распространение фотоприемники на основе пары лавинный фотодиод — операционный усилитель*, в которых фотодиод (ФД) действует как генератор тока, а операционный усилитель (ОУ) служит преобразователем тока в напряжение. Малое входное сопротивление ОУ снижает шунтирующее действие собственной емкости ФД, однако, поскольку это сопротивление резко возрастает на высоких частотах, паразитная емкость ФД ограничивает полосу пропускания.

Влияние паразитной емкости особенно заметно проявляется, когда оптические сигналы слабы (например, рассеянный свет) и сопротивление обратной связи ОУ необходимо делать большим для повышения чувствительности.

Авторами разработан фотоприемник с повышенным быстродействием при сохранении большой чувствительности (и как следствие с повышенным отношением сигнал/шум). Фотоприемник (рис. 1) дополнительно содержит повторитель, вход которого соединен с одним из выводов ФД, а выход — через емкость с другим выводом ФД. Входной оптический сигнал преобразуется фотодиодом в фототок, величина которого пропорциональна интенсивности падающего света. Приращение напряжения на аноде ФД, вызванное изменением его фототока, подается на вход повторителя, с выхода которого через емкость поступает на катод ФД. Таким образом, разность потенциалов анода и катода ФД не изменяется, вследствие чего не происходит перезаряда паразитной емкости ФД, которая поэтому практически не влияет на работу фотоприемника.

Данное техническое решение позволяет на порядок уменьшить влияние паразитной емкости, величина которой у лавинных ФД обычно составляет 20 пФ. Полоса фотоприемника расширяется в 10 раз при сохранении усиления, поскольку эффек-

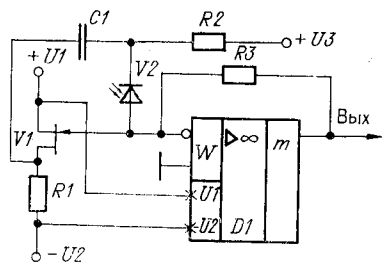


Рис. 1. Фотоприемник на базе операционного усилителя с компенсацией емкости фотодиода

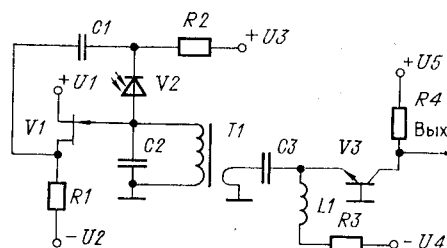


Рис. 2. Фотоприемник с трансформатором с компенсацией емкости фотодиода

* Алексеенко М. Д. и др. Микроэлектронные фотоприемные устройства.— М.: Энергоиздат, 1984.