

УДК 621.391.2

И. С. Грузман

(Новосибирск)

КОМПЕНСАЦИЯ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ
ПРИ КОРРЕКЦИИ ЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Для компенсации краевых эффектов при коррекции линейных искажений предложено учитывать усечение наблюдаемого изображения на этапе синтеза линейного фильтра. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований эффективности полученного корректирующего фильтра.

В ряде устройств отображения встречаются линейные искажения, приводящие к снижению четкости наблюдаемого изображения. Они вызываются, например, дефокусировкой камеры, «смазом» [1, 2] и т. п. Изображение может быть подвергнуто воздействию аддитивной помехи. Для коррекции линейных искажений широко используются методы оптимальной линейной фильтрации.

Вследствие того что искаженное изображение записывается в кадре конечного размера, в усеченном изображении происходит потеря информации, содержащейся в исходном изображении вблизи границ. Поэтому при коррекции линейных искажений усеченного изображения возникают рябь, полосы и т. п. [3]. Для устранения краевых эффектов используются различные эвристические методы предварительной обработки: взвешивание усеченного изображения или импульсной характеристики корректирующего фильтра функцией окна [1, 3], экстраполяция [1], четное продолжение изображения [2] и т. п. Следует отметить, что эти методы при малых уровнях шума практически не компенсируют рябь и полосы [3], а их параметры зависят от свойств искажающей системы и определяются опытным путем, что затрудняет практическое применение предварительной обработки.

Ниже предлагается учесть усечение наблюдаемого изображения на этапе синтеза фильтра Винера, что позволит исключить предварительную обработку линейно-искаженных изображений.

Пусть двумерное наблюдаемое неусеченное случайное поле

$$y(t_1, t_2) = x(t_1, t_2) \otimes l(t_1, t_2) + n(t_1, t_2), \quad (1)$$

где $x(t_1, t_2)$ — исходное двумерное стационарное случайное поле; $l(t_1, t_2)$ — импульсная характеристика искажающей системы; $n(t_1, t_2)$ — аддитивная стационарная помеха; \otimes — операция двумерной свертки.

Частотная характеристика фильтра Винера, минимизирующая среднеквадратическую ошибку восстановления $x(t_1, t_2)$, имеет вид [1]

$$H(\omega_1, \omega_2) = \frac{L^*(\omega_1, \omega_2) G_x(\omega_1, \omega_2)}{|L(\omega_1, \omega_2)|^2 G_x(\omega_1, \omega_2) + G_n(\omega_1, \omega_2)}, \quad (2)$$

где $G_x(\omega_1, \omega_2)$ и $G_n(\omega_1, \omega_2)$ — энергетические спектры исходного поля и помехи соответственно; $L(\omega_1, \omega_2) = F\{l(t_1, t_2)\}$ — частотная характеристика искажающей системы; «*» обозначает комплексно-сопряженное значение; $F\{\cdot\}$ — двумерное преобразование Фурье.

Для описания усеченного изображения $y_w(t_1, t_2)$ используем оператор «пространственного стробирования», т. е. умножим неусеченное поле $y(t_1, t_2)$ на двумерное квадратное окно $f(t_1, t_2)$. В результате получим усеченное изображение

$$y_w(t_1, t_2) = y(t_1, t_2)f(t_1, t_2) = y(t_1, t_2)f(t_1)f(t_2), \quad (3)$$

где

$$f_i(t_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } |t_i| \leq 0,5T_w, \\ 0, & \text{если } |t_i| > 0,5T_w, \end{cases} \quad i = 1, 2, \quad (4)$$

$T_w \times T_w$ — размер усеченного изображения.

Для оговоренных условий автокорреляционная функция (АКФ) совокупности реализаций усеченного поля $y_w(t_1, t_2)$ и взаимная корреляционная функция (ВКФ) совокупности реализаций усеченных полей $y_w(t_1, t_2)$ и $x_w(t_1, t_2) = x(t_1, t_2)f(t_1, t_2)$ имеют вид [4]:

$$B_{y_w}(\tau_1, \tau_2) = B_y(\tau_1, \tau_2)\psi_1(\tau_1)\psi_2(\tau_2), \quad (5)$$

$$B_{y_w x_w}(\tau_1, \tau_2) = B_{yx}(\tau_1, \tau_2)\psi_1(\tau_1)\psi_2(\tau_2), \quad (6)$$

где $B_y(\tau_1, \tau_2)$ и $B_{yx}(\tau_1, \tau_2)$ — АКФ и ВКФ полей $y(t_1, t_2)$ и $x(t_1, t_2)$ соответственно;

$$\psi_i(\tau_i) = \begin{cases} 1 - |\tau_i|/T_w, & \text{если } |\tau_i| \leq T_w, \\ 0, & \text{если } |\tau_i| > T_w, \end{cases} \quad i = 1, 2, \quad (7)$$

— окно Фейера [5]. Подставляя (5) и (6) в уравнение Винера — Хинчина [6] и решая его, получим коэффициент передачи фильтра для усеченного изображения:

$$H_w(\omega_1, \omega_2) = \frac{\{L^*(\omega_1, \omega_2)G_x(\omega_1, \omega_2)\} \otimes \Psi(\omega_1, \omega_2)}{\{|L(\omega_1, \omega_2)|^2 G_x(\omega_1, \omega_2) + G_n(\omega_1, \omega_2)\} \otimes \Psi(\omega_1, \omega_2)}, \quad (8)$$

где $\Psi(\omega_1, \omega_2) = F\{\psi_1(\tau_1)\psi_2(\tau_2)\}$. Следует подчеркнуть, что импульсная характеристика фильтра (8) не сводится к произведению импульсной характеристики фильтра (2) и регуляризирующего двумерного окна Фейера.

Анализ эффективности полученного фильтра проводился для поля $x(t_1, t_2)$ с биэкспоненциальной АКФ:

$$B_x(\tau_1, \tau_2) = \sigma_x^2 \exp(-\alpha(|\tau_1| + |\tau_2|)), \quad (9)$$

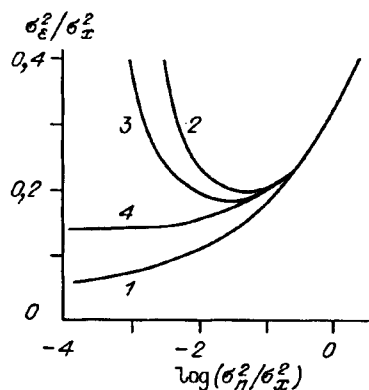


Рис. 1

где σ_x^2 — дисперсия поля $x(t_1, t_2)$, наблюдаемого на фоне аддитивной помехи с равномерной спектральной плотностью мощности в полосе частот $|\omega_1| \leq \pi$, $|\omega_2| \leq \pi$ при $\alpha = 0,1$, $T_w = 128$ и $l(t_1, t_2) = l_1(t_1)\delta(t_2)$,

$$l_1(t_1) = \begin{cases} 1/(0,1T_w) & \text{при } |t_1| \leq 0,05T_w, \\ 0 & \text{при } |t_1| > T_w, \end{cases} \quad (10)$$

$\delta(t_2)$ — дельта-функция.

На рис. 1 приведены зависимости нормированной среднеквадратической ошибки фильтрации σ_e^2/σ_x^2 от отношения шум/сигнал



Рис. 2

σ_n^2/σ_x^2 , где σ_n^2 — дисперсия помехи $n(t_1, t_2)$. Зависимость 1 соответствует результатам обработки неусеченного поля $y(t_1, t_2)$ фильтром Винера (2), 2 — усеченного поля $y_w(t_1, t_2)$ фильтром Винера (2), 3 — усеченного поля $y_w(t_1, t_2)$ фильтром Винера (2), импульсная характеристика которого была умножена на окно Фейера (параметрокна подбирался из условия минимума среднеквадратической ошибки фильтрации), 4 — усеченного поля $y_w(t_1, t_2)$ фильтром (8). Характер зависимостей 1—3 хорошо согла-

суется с результатами экспериментальных исследований, приведенных в [3]. На рис. 2 даны результаты обработки реального изображения: *a* — исходное изображение; *b* — наблюдаемое линейно-искаженное усеченное изображение (отношение шум/сигнал $\sigma_n^2/\sigma_x^2 = 0,001$); *c* — результат обработки фильтром Винера (2) ($\sigma_e^2/\sigma_x^2 = 1,31$); *d* — результат обработки фильтром Винера (2) с предварительной обработкой окном Фейера ($\sigma_e^2/\sigma_x^2 = 0,49$); *e* — результат обработки фильтром (8) ($\sigma_e^2/\sigma_x^2 = 0,09$).

Из приведенных данных следует, что фильтр (8) практически полностью компенсирует краевые эффекты даже при малых уровнях помехи (ошибки фильтрации стабилизируются при $\sigma_n^2/\sigma_x^2 \rightarrow 0$, см. рис. 1), что позволяет не проводить предварительную обработку. Параметры фильтра (8) определяются исходными данными и не требуют дополнительной подстройки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. Кн. 2.
2. Ярославский Л. П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии. М.: Радио и связь, 1987.
3. Бейтс Р., Мак-Доннелл М. Восстановление и реконструкция изображений. М.: Мир, 1989.
4. Миддлтон Д. Введение в статистическую теорию связи. М.: Сов. радио, 1961. Кн. 1.
5. Сиберт У. М. Цепи, сигналы, системы. М.: Мир, 1988. Кн. 2.
6. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989.

Поступила в редакцию 10 июля 1994 г.

Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!