

ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ

УДК 621.391

О. М. Ляшук, С. В. Вишневий, С. Я. Жук
Національний технічний університет України “КПІ ім. Ігоря Сікорського”

АЛГОРИТМ ДВУХЭТАПНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ВНУТРИКАДРОВОЙ НЕКАУЗАЛЬНОЙ ОБРАБОТКОЙ ПРИ НАЛИЧИИ НЕКОРРЕЛИРОВАННОЙ ПОМЕХИ

© Ляшук А. Н., Вишневий С. В., Жук С. Я., 2018

Синтезирован двухэтапный алгоритм фильтрации многоканального изображения на фоне белого шума, в котором на первом этапе выполняется совместная одномерная фильтрация каждого изображения по строкам и столбцам, а на втором – объединение полученных оценок изображений в каждой точке. Этот алгоритм позволяет существенно увеличить точность фильтрации по сравнению с алгоритмом межкадрового усреднения и обеспечить при этом приемлемую вычислительную сложность по сравнению с оптимальным алгоритмом.

Ключевые слова: многоканальные изображения, фильтрация изображения, объединение оценок, апостериорная плотность вероятности, случайное поле.

O. Liashuk, S. Vyshnevyi, S. Zhuk
National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

TWO-STAGE FILTRATION ALGORITHM WITH INTERFRAME NON-CAUSAL PROCESSING FOR MULTICHANNEL IMAGE WITH PRESENCE OF UNCORRELATED NOISE

© Liashuk O., Vyshnevyy S., Zhuk S., 2018

In many modern information and technical systems multichannel images have several applications. The multichannel image can be presented as a set of images of an object of a research which are received in various areas of a frequency range. Such images can be exposed to the distorting influence of the noise. One of the most widespread types of the noise is the additive uncorrelated noise. Optimal filtration algorithms are characterized by huge computing complexity that often limits their practical realization. Therefore development of algorithms of a filtration of multichannel images which provide the acceptable precision characteristics at moderate computing expenses is an important task. With use of property of conditional independence an expression for calculation of a posteriori density of probability of pixels of the multichannel image at a two-stage filtration with non causal frame and causal interframe processing in the presence of an additive uncorrelated noise is created. Expressions for the image pixel estimate calculation and dispersion of estimate error at a two-stage non-causal frame and causal interframe filtration for a Gaussian images filtration are created. Developed algorithm allows to lower a mean square deviation of estimate error more than twice in comparison with an algorithm of interframe averaging for a model example when

processing the sequence of the Gaussian images distorted by additive white Gaussian noise. One-dimensional processing along each of coordinates is carried out at the first stage of an algorithm, and at the second stage union of the obtained data is made. The created algorithm is concretized for a case of processing of the Gaussian images distorted by additive white Gaussian noise. The two-stage approach implemented in the synthesized algorithm allows to reduce significantly computing complexity in comparison with an optimal algorithm, providing at the same time the acceptable precision characteristics and considering dimension of the multichannel image.

Key words: multi-channel image, image filtration, combine estimates, a posteriori probability density, random field.

Введение

Постоянное совершенствование систем дистанционного мониторинга, видеонаблюдения, технической и медицинской диагностики стимулируют потребность в развитии методов и средств автоматической и автоматизированной обработки последовательностей цифровых изображений. Процесс формирования и передачи изображений всегда связан с возникновением помех, затрудняющих не только их восприятие человеком, но и решение любых задач в автоматическом режиме. При этом одним из наиболее часто встречающихся видов помех на изображениях является аддитивный гауссовский шум с некоррелированными отсчетами.

Устраняют негативное воздействие помех фильтрацией, которая чаще всего является начальным этапом обработки, направленным на улучшение отношения сигнал/шум для повышения эффективности последующих этапов, к которым относятся сегментация, классификация и др.

Учитывая двухмерный характер изображений, реализация оптимальных методов фильтрации сопряжена с необходимостью выполнения огромного числа вычислительных операций и огромной вычислительной сложностью, что часто является главным препятствием при их практической реализации. В [1] предложен подход для фильтрации однородных текстурных изображений, основу которого составляет разбиение процедуры фильтрации изображения на два этапа. На первом этапе выполняется одномерная фильтрация отсчетов изображения независимо вдоль строк и вдоль столбцов. На втором этапе происходит объединение полученных результатов. Такая методика позволяет использовать преимущество одномерных алгоритмов фильтрации, заключающегося в простоте их практической реализации, учитывая при этом двумерный характер обрабатываемых данных. Точностные характеристики таких двухэтапных алгоритмов занимают промежуточное положение между одномерными и двумерными алгоритмами.

Для ряда многоканальных изображений и видеопоследовательностей коэффициент межканальной (межкадровой) корреляции может находиться в пределах 0,8–1 [2]. При этом отсчеты изображения соседних каналов (кадров) выступают в качестве дополнительных данных, которые могут быть использованы для повышения эффективности обработки отсчетов текущего канала (кадра).

Переход к обработке многоканальных изображений и видеопоследовательностей приводит к увеличению объема обрабатываемых данных. Таким образом, еще более актуальной становится проблема вычислительной сложности и практической реализуемости алгоритмов фильтрации таких изображений.

В работе [3], с использованием свойства условной независимости, получено выражение для апостериорной плотности вероятности (ПВ) отсчетов многоканальных изображений при двухэтапной фильтрации с внутриканальной (внутрикадровой) каузальной обработкой при наличии некоррелированной помехи, а также выражения для вычисления ее первого и второго моментов в случае гауссовских многоканальных изображений.

В данной статье получен алгоритм, который в отличие от [3], позволяет проводить двухэтапную фильтрацию некоррелированной помехи в многоканальных изображениях с внутрикадровой некаузальной обработкой, что позволяет учитывать отсчеты изображения, которые не только находятся в “прошлом” относительно обрабатываемого отсчета, но и в “будущем”. Это

позволяет учитывать все элементы, расположенные в соответствующей строке и столбце, тем самым улучшая точность обработки по сравнению с [3].

Постановка задачи

Неискаженное помехой многоканальное изображение, представляется в виде трехмерной матрицы, состоящей из элементов $x(n, m, k)$, $n = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M}$, $k = \overline{1, K}$, которые соответствуют значениям яркости пикселей изображения. Его геометрическое представление показано на рис.1. Элементы изображения в k -м канале, которые расположены в n -й строке и m -м столбце за исключением отсчета $x(n, m, k)$, запишем с помощью следующих векторов:

$$X_{n1} = (x(n, 1, k), \dots, x(n, m-1, k)) \quad X_k = (x(n, m, 1), x(n, m, 2), \dots, x(n, m, k-1)),$$

$$X_{n2} = (x(n, M, k), x(n, M-1, k), \dots, x(n, m-1, k)),$$

$$X_{m1} = (x(1, m, k), \dots, x(n-1, m, k)),$$

$$X_{m2} = (x(N, m, k), x(N-1, m, k), \dots, x(n+1, m, k)).$$

Элементы изображения, находящиеся на пересечении с координатами (n, m) , но расположенные в предыдущих каналах относительно текущего k -го канала, запишем в виде вектора. Индексы k в векторах X_{n1} , X_{n2} , X_{m1} и X_{m2} , а также n, m в векторе X_k не указываются для сокращения объема обозначений.

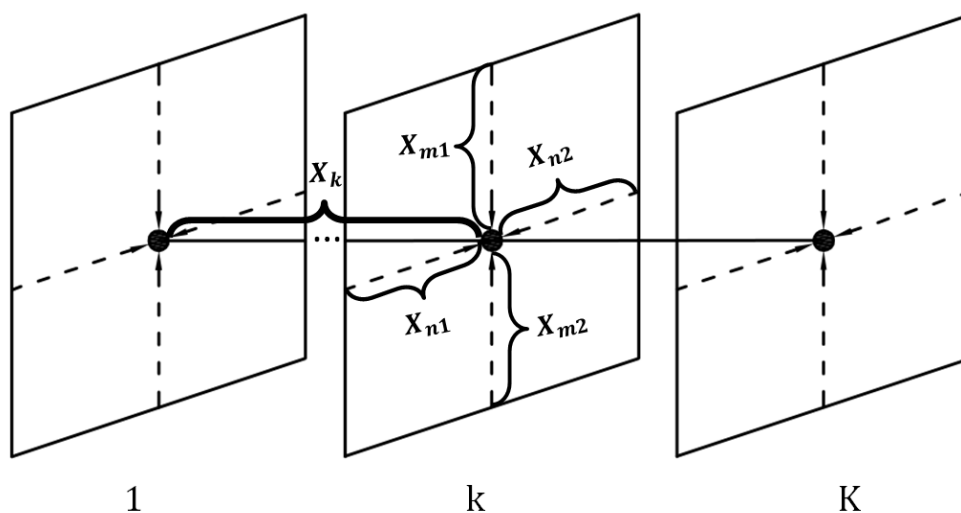


Рис. 1. Модель многоканального изображения

Искаженные некоррелированной помехой наблюдения опишем, соответственно в виде трехмерной матрицы $y(n, m, k)$, $n = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M}$, $k = \overline{1, K}$. Также по аналогии введем векторы:

$$Y_{n1} = (y(n, 1, k), \dots, y(n, m-1, k)),$$

$$Y_{n2} = (y(n, M, k), y(n, M-1, k), \dots, y(n, m-1, k)),$$

$$Y_{m1} = (y(1, m, k), \dots, y(n-1, m, k)),$$

$$Y_{m2} = (y(N, m, k), y(N-1, m, k), \dots, y(n+1, m, k))$$

$$Y_k = (y(n, m, 1), y(n, m, 2), \dots, y(n, m, k-1)).$$

Векторам $X_{n1}, X_{n2}, X_{m1}, X_{m2}, X_k$ соответствуют наблюдения $Y_{n1}, Y_{n2}, Y_{m1}, Y_{m2}, Y_k$, а текущей точке $x(n,m,k) = x$ соответствует текущее наблюдение $y(n,m,k) = y$.

Будем полагать, что на первом этапе, с помощью оптимального алгоритма нелинейной рекуррентной одномерной фильтрации [4] вдоль соответствующих координат n, m, k вычислены (от начала строки и столбца – в прямом направлении, и от конца строки и столбца – в обратном направлении): апостериорная ПВ $f(x|y, Y_{n1})$ по наблюдениям (y, Y_{n1}) ; экстраполированные ПВ $f(x|Y_{n2}), f(x|Y_{m1}), f(x|Y_{m2})$ по наблюдениям Y_{n2}, Y_{m1}, Y_{m2} , расположенным в k -м канале (кадре); экстраполированная ПВ $f(x|Y_k)$ по наблюдениям Y_k , расположенных в предыдущих каналах.

В общем случае алгоритм двухэтапной фильтрации многоканальных изображений с внутрикадровой некаузальной обработкой при наличии некоррелированной помехи подразумевает использование свойства условной независимости отсчетов изображения, которые расположены вдоль каждой из координат, что позволяет на втором этапе вычислять апостериорную ПВ $f(x|y, Y_{n1}, Y_{n2}, Y_{m1}, Y_{m2}, Y_k)$ в каждой точке путем объединения ПВ $f(x|y, Y_{n1}), f(x|Y_{n2}), f(x|Y_{m1}), f(x|Y_{m2}), f(x|Y_k)$, вычисленных на первом этапе при одномерной фильтрации вдоль координат n, m, k . Для случая, когда значения интенсивностей отсчетов изображения описываются гауссовской ПВ, полученный двухэтапный алгоритм конкретизируется для вычисления на втором этапе апостериорных оценок, путем объединения оценок, вычисленных на первом этапе с помощью одномерного алгоритма калмановской фильтрации при обработке отсчетов, расположенных вдоль каждой из координат.

Алгоритм двухэтапной фильтрации многоканальных изображений с внутрикадровой некаузальной обработкой

Совместная ПВ элементов изображения, расположенных в векторах $X_{n1}, X_{n2}, X_k, X_{m1}, X_{m2}$ с учетом текущей обрабатываемой точки x описывается выражением $f(X) = f(X_{n1}, X_{m1}, X_{n2}, X_{m2}, X_k, x)$. Применяя теорему умножения вероятностей, ее можно представить в виде:

$$f(X) = f(x) f(X_{n1}, X_{m1}, X_{n2}, X_{m2}, X_k | x). \quad (1)$$

В соответствие с методикой, приведенной в [1, 3], будем полагать, что отсчеты изображения, содержащиеся в векторах $X_{n1}, X_{m1}, X_{n2}, X_{m2}, X_k$, являются условно независимыми относительно текущей обрабатываемой точки x , что позволяет переписать второй множитель в выражении (1) следующим образом

$$f(X_{n1}, X_{m1}, X_{n2}, X_{m2}, X_k | x) = f(X_{n1} | x) f(X_{m1} | x) f(X_{n2} | x) f(X_{m2} | x) f(X_k | x) \quad (2)$$

Выражения (1), (2) позволяют представить ПВ $f(X)$ в виде

$$f(X) = f(x, X_{n1}) f(X_{m1} | x) f(X_{n2} | x) f(X_{m2} | x) f(X_k | x). \quad (3)$$

Функция правдоподобия $f(Y|X)$ наблюдений $Y = (Y_{n1}, Y_{m1}, Y_{n2}, Y_{m2}, Y_k, y)$, соответствующих вектору X , при некоррелированных ошибках измерения имеет вид

$$f(Y|X) = f(y, Y_{n1} | x, X_{n1}) f(Y_{m1} | X_{m1}) f(Y_{n2} | X_{n2}) f(Y_{m2} | X_{m2}) f(Y_k | X_k). \quad (4)$$

С использованием формулы Байеса, а также выражений (3) и (4), апостериорная ПВ $f(X|Y)$ может быть записана в виде

$$f(X|Y) = \frac{c_1}{f^4(x)} f(x, X_{n1}|y, Y_{n1}) f(x, X_{m1}|Y_{m1}) f(x, X_{n2}|Y_{n2}) \times \\ \times f(x, X_{m2}|Y_{m2}) f(x, X_k|Y_k), \quad (5)$$

где $f(x, X_{n1}|y, Y_{n1})$, $f(x, X_{m1}|Y_{m1})$, $f(x, X_{n2}|Y_{n2})$, $f(x, X_{m2}|Y_{m2})$, $f(x, X_k|Y_k)$ – совместные апостериорные ПВ, определяемые по формулам

$$f(x, X_{n1}|y, Y_{n1}) = \frac{f(y, Y_{n1}|x, X_{n1}) f(x, X_{n1})}{f(y, Y_{n1})},$$

$$f(x, X_{m1}|Y_{m1}) = \frac{f(Y_{m1}|X_{m1}) f(x, X_{m1})}{f(Y_{m1})},$$

$$f(x, X_{n2}|Y_{n2}) = \frac{f(Y_{n2}|X_{n2}) f(x, X_{n2})}{f(Y_{n2})},$$

$$f(x, X_{m2}|Y_{m2}) = \frac{f(Y_{m2}|X_{m2}) f(x, X_{m2})}{f(Y_{m2})},$$

$$f(x, X_k|Y_k) = \frac{f(Y_k|X_k) f(x, X_k)}{f(Y_k)},$$

где $f(y, Y_{n1})$, $f(Y_{m1})$, $f(Y_{n2})$, $f(Y_{m2})$, $f(Y_k)$ – совместные ПВ соответствующих измерений, выполняющие роль нормирующих множителей; c_1 – общий нормирующий множитель, определяемый по формуле

$$c_1 = \frac{f(y, Y_{n1}) f(Y_{m1}) f(Y_{n2}) f(Y_{m2}) f(Y_k)}{f(Y)}. \quad (6)$$

Выполнив в (5) интегрирование по X_{n1} , X_{m1} , X_{n2} , X_{m2} , X_k получим выражение для апостериорной ПВ $f(x|Y)$

$$f(x|Y) = \frac{c_1}{f^4(x)} f(x|y, Y_{n1}) f(x|Y_{m1}) f(x|Y_{n2}) f(x|Y_{m2}) f(x|Y_k). \quad (7)$$

Выражение (7) описывает выполняемый на втором этапе алгоритм вычисления апостериорной ПВ $f(x|Y)$ в каждой точке изображения с использованием полученных на первом этапе апостериорных ПВ $f(x|y, Y_{n1})$, $f(x|Y_{m1})$, $f(x|Y_{n2})$, $f(x|Y_{m2})$, $f(x|Y_k)$. Реализация полученного алгоритма предусматривает некаузальную внутрикадровую обработку и каузальную межкадровую (межканальную).

Алгоритм, описываемый выражением (7), может быть модифицирован в соответствии с особенностями формирования изображения устройством регистрации. Например, при построчном получении измерений для вычисления апостериорной ПВ $f(x|Y)$ в k -м канале могут учитываться отсчеты, которые расположены в текущей обрабатываемой строке, а также отсчеты, расположенные в “прошлом” в соответствующем столбце относительно обрабатываемой точки (используются элементы изображения, расположенные в векторах Y_{n1} , Y_{n2} и Y_{m1}), а также отсчеты,

расположенные в векторе Y_k . Такой подход позволяет получить алгоритм двухэтапной фильтрации с полукаузальной внутрикадровой обработкой:

$$f(x|Y) = \frac{c_2}{f^3(x)} f(x|y, Y_{n1}) f(x|Y_{m1}) f(x|Y_{n2}) f(x|Y_k), \quad (8)$$

где c_2 – общий нормирующий множитель, определяемый по формуле:

$$c_2 = \frac{f(y, Y_{n1}) f(Y_{m1}) f(Y_{n2}) f(Y_k)}{f(Y)}.$$

В случае, если для нахождения апостериорной ПВ $f(x|Y)$ в k -м канале многоканального изображения учитываются только отсчеты, расположенные в “прошлом” как по строке, так и по столбцу относительно обрабатываемой точки (используются элементы изображения, расположенные в векторах Y_{n1} и Y_{m1}), тогда апостериорная ПВ $f(x|Y)$ вычисляется с помощью алгоритма двухэтапной фильтрации с каузальной внутрикадровой обработкой [3]

$$f(x|Y) = \frac{c_3}{f^2(x)} f(x|y, Y_{n1}) f(x|Y_{m1}) f(x|Y_k), \quad (9)$$

где c_3 – общий нормирующий множитель, определяемый по формуле

$$c_3 = \frac{f(y, Y_{n1}) f(Y_{m1}) f(Y_k)}{f(Y)}.$$

Алгоритм двухэтапной фильтрации многоканальных изображений с внутрикадровой некаузальной обработкой для фильтрации гауссовских изображений

Многоканальное изображение может быть рассмотрено как набор реализаций гауссовских случайных полей, при этом для описания статистических связей между отсчетами в k -м канале изображения может быть использована векторная модель динамической системы вида

$$X_n(l) = F^r X_n(l-1) + V^r(l), \quad l = \overline{1, M}, \quad (10)$$

где $X_n(l)$ – вектор размерности Δ_1 , который содержит отсчеты $X_n(l) = (x(n, l, k), x(n, l-1, k), \dots, x(n, l-\Delta_1, k))$; F^r – известная матрица; $V^r(l)$ – вектор, содержащий некоррелированные гауссовские случайные величины.

Модель наблюдения вдоль n -й строки в k -м канале

$$y_n(l) = H^r X_n(l) + m + u^r(l), \quad l = \overline{1, M}, \quad (11)$$

где $H^r = (h \ 0 \ \dots \ 0)$; m – математическое ожидание случайного поля, $u^r(k)$ – некоррелированная гауссовская ошибка наблюдения с нулевым математическим ожиданием и дисперсией S_u^2 .

Модели, описывающие статистические связи, вдоль остальных осей обработки будут иметь вид, аналогичный (10)–(11).

На первом этапе алгоритма двухэтапной фильтрации осуществляется обработка отсчетов с помощью векторного фильтра Калмана.

Алгоритм фильтрации отсчетов в k -м канале изображения при обработке от начала строки описан в [3]. Фильтрация на первом этапе отсчетов изображения от конца строки описывается выражениями [5]

$$\begin{aligned} X^*(n, m, k) &= F^r \hat{X}(n, m+1, k); \\ P^*(n, m, k) &= F^r \hat{P}(n, m+1, k) F^{rT} + D; \end{aligned}$$

$$K(n, m, k) = P^*(n, m, k) H^{rT} (H^r P^*(n, m, k) H^{rT} + S_u)^{-1};$$

$$\hat{P}(n, m, k) = P^*(n, m, k) - K(n, m, k) H^r P^*(n, m, k);$$

$$\hat{X}(n, m, k) = X^*(n, m, k) + K(n, m, k) (y(n, m, k) - m - H^r X^*(n, m, k)),$$

где $X^*(n, m)$, $\hat{X}(n, m)$ – векторы экстраполированных и апостериорных оценок; $P^*(n, m)$, $\hat{P}(n, m)$ – корреляционные матрицы ошибок экстраполированной и апостериорной оценок; $K(n, m)$ – коэффициент усиления фильтра; D – корреляционная матрица векторной случайной величины $V^r(l)$.

Апостериорные оценки $\hat{x}_{n1}, \hat{S}_{n1}^2$ являются первыми элементами в векторе $\hat{X}(n, m, k)$ и матрице $\hat{P}(n, m, k)$. Аналогичным образом с помощью векторного фильтра Калмана осуществляется обработка вдоль остальных координат изображения и определение экстраполированных оценок x_{m1}^*, S_{m1}^{*2} , x_{n2}^*, S_{n2}^{*2} , x_{m2}^*, S_{m2}^{*2} , x_k^*, S_k^{*2} в каждой точке изображения в k -м канале, которые затем используются на втором этапе.

Полагая, что для гауссовских изображений ПВ, входящие в (7), имеют вид: $p(x|y, Y_{n1}) = N(\hat{x}_{n1}, \hat{S}_{n1}^2)$, $p(x|Y_{m1}) = N(x_{m1}^*, S_{m1}^{*2})$, $p(x|Y_{n2}) = N(x_{n2}^*, S_{n2}^{*2})$, $p(x|Y_{m2}) = N(x_{m2}^*, S_{m2}^{*2})$, $p(x|Y_k) = N(x_k^*, S_k^{*2})$, $p(x) = N(\bar{x}, \bar{S}^2)$. Тогда апостериорная ПВ $p(x|Y)$ также будет гауссовской: $p(x|Y) = N(\hat{x}, \hat{S}^2)$.

В соответствии с методикой, приведенной в [5], второй этап фильтрации отсчетов изображения в k -м канале осуществляется с помощью набора выражений:

$$\hat{S}^2 = S_{m1}^{*2} - S_{m1}^{*4} / (\hat{S}_{n1}^2 + S_{m1}^{*2}); \quad (12) \quad \hat{x} = \hat{x}_{n1} + (x_{m1}^* - \hat{x}_{n1}) \hat{S}^2 / S_{m1}^{*2}; \quad (13)$$

$$\hat{S}^2 = -\bar{S}^2 - \bar{S}^4 / (\hat{S}^2 - \bar{S}^2); \quad (14) \quad \hat{x} = \hat{x} - (\bar{x} - \hat{x}) \hat{S}^2 / \bar{S}^2; \quad (15)$$

$$\hat{S}^2 = S_{n2}^{*2} - S_{n2}^{*4} / (\hat{S}^2 + S_{n2}^{*2}); \quad (16) \quad \hat{x} = \hat{x} + (x_{n2}^* - \hat{x}) \hat{S}^2 / S_{n2}^{*2}; \quad (17)$$

$$S'^2 = -\bar{S}^2 - \bar{S}^4 / (\hat{S}^2 - \bar{S}^2); \quad (18) \quad x' = \hat{x} - (\bar{x} - \hat{x}) S'^2 / \bar{S}^2; \quad (19)$$

$$S''^2 = S_{m2}^{*2} - S_{m2}^{*4} / (S'^2 + S_{m2}^{*2}); \quad (20) \quad x'' = x' + (x_{m2}^* - x') S''^2 / S_{m2}^{*2}; \quad (21)$$

$$\hat{S}^2 = -\bar{S}^2 - \bar{S}^4 / (S''^2 - \bar{S}^2); \quad (22) \quad \hat{x} = x'' - (\bar{x} - x'') \hat{S}^2 / \bar{S}^2; \quad (23)$$

$$\hat{S}^2 = S_k^{*2} - S_k^{*4} / (\hat{S}^2 + S_k^{*2}); \quad (24) \quad \hat{x} = \hat{x} + (x_k^* - \hat{x}) \hat{S}^2 / S_k^{*2}; \quad (25)$$

$$\hat{S}^2 = -\bar{S}^2 - \bar{S}^4 / (\hat{S}^2 - \bar{S}^2); \quad (26) \quad \hat{x} = \hat{x} - (\bar{x} - \hat{x}) \hat{S}^2 / \bar{S}^2. \quad (27)$$

где \hat{x} и \hat{S}^2 – апостериорная оценка и дисперсия ошибки оценки, вычисленные на втором этапе. Для вычисления \hat{x} и \hat{S}^2 используются апостериорные оценки и дисперсии ошибки оценки \hat{x}_{n1} , \hat{S}_{n1}^2 , которые вычисляются в k -м канале, при обработке элементов, в векторе Y_{n1} , а также экстраполированные оценки и дисперсии ошибки оценки x_{m1}^* , S_{m1}^{*2} , x_{n2}^* , S_{n2}^{*2} , x_{m2}^* , S_{m2}^{*2} при

обработке отсчетов в векторах Y_{m1}, Y_{n2}, Y_{m2} . Также учитываются экстраполированная оценка и дисперсия ошибки оценки x_k^*, S_k^{*2} , которые вычисляются при обработке вектора Y_k , включающего в себя отсчеты из предыдущих каналов изображения.

Результаты экспериментальных исследований

В качестве примера рассмотрим модель последовательности гауссовских изображений с разделимой корреляционной функцией $R(n, m, k) = S^2 r_1^{|n|} r_2^{|m|} r_3^{|k|}$. Ее параметры полагались $S = 1$, $r_1 = 0.9$, $r_2 = 0.9$, $r_3 = 1$, а СКО ошибки измерения $S_u = 1$. Размеры последовательности изображений $N \times M \times K$ полагались $N = M = 130$, $K = 6$.

На рис. 2 кривые 1–3 представляют полученные путем усреднения по всему кадру зависимости фактических СКО ошибки оценки S'_C на каждом кадре при многоканальной двухэтапной фильтрации с некаузальной, полукаузальной и каузальной внутрикадровой обработкой соответственно. С целью сравнительного анализа кривой 4 показана зависимость СКО ошибки оценки на каждом кадре, полученного методом Монте-Карло на основе алгоритма межкадрового усреднения [6] для рассмотренных вариантов последовательностей изображений.

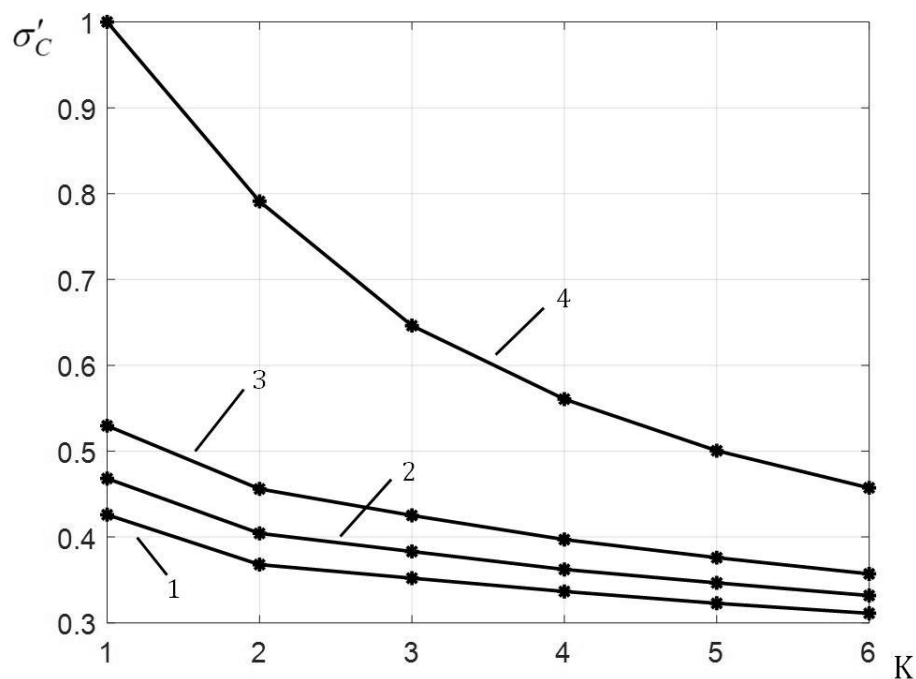


Рис. 2. Зависимость СКО ошибки на каждом кадре для рассмотренных алгоритмов фильтрации

Из рис. 2 следует, что на втором кадре алгоритм некаузальной обработки позволяет снизить СКО ошибки оценки в 2,1 раза по сравнению с алгоритмом межкадрового усреднения. Алгоритм межкадрового усреднения даже на шестом кадре не позволяет достичь точности оценивания некаузального алгоритма, полученной для второго кадра изображения.

Также исследована работа алгоритма на последовательности статических изображений. На рис. 3 представлено исходное изображение, из которого формируется последовательность из пяти кадров. Каждый кадр последовательности искажается белым шумом с СКО $S_u = 1$. Искаженное шумом изображение представлено на рис. 4.

На рис. 5, 6 представлены изображения, полученные методом усреднения и с помощью разработанного алгоритма многоканальной фильтрации с некаузальной внутрикадровой обработкой

на пятом кадре соответственно. Так как визуальная оценка качества фильтрации является субъективной, можно продемонстрировать значение фильтрации для последующих задач автоматической обработки на примере задачи выделения контуров. На рис. 7, рис. 8 соответственно представлены результаты выделения контуров на изображениях рис. 5, рис. 6 с помощью метода Собеля [7]. Применение предварительной многоканальной фильтрации с некаузальной внутрикадровой обработкой обеспечивает выделение контуров на изображении, а метод межкадрового усреднения для решения данной задачи неприменим.

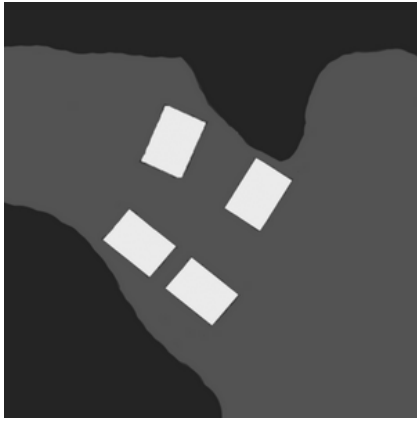


Рис. 3. Исходное изображение

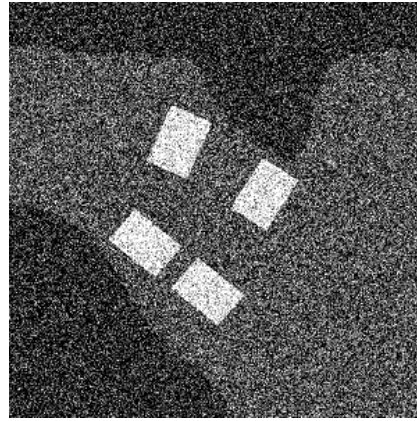


Рис. 4. Зашумленный кадр многоканального изображения

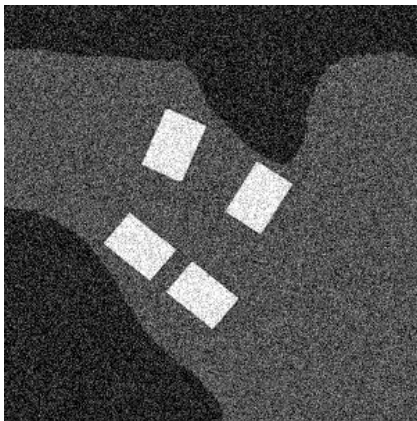


Рис. 5. Результат фильтрации межкадровым усреднением

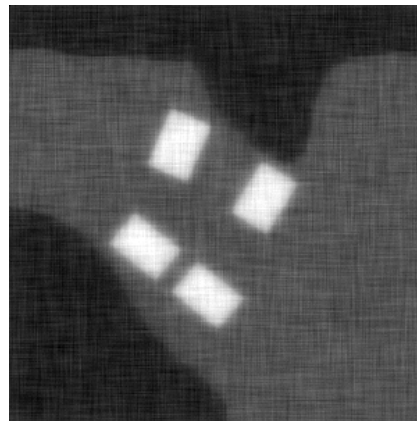


Рис. 6. Результат фильтрации предложенным алгоритмом

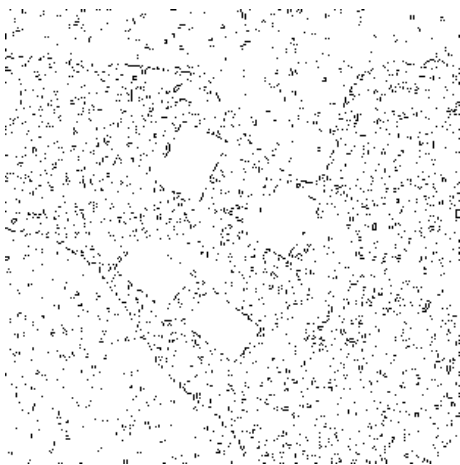


Рис. 7. Обнаруженные контуры для рис. 5

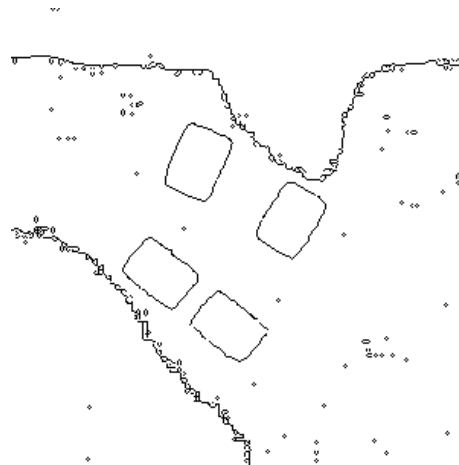


Рис. 8. Обнаруженные контуры для рис. 6

Выводы

С использованием свойства условной независимости получено выражение (7) для апостериорной ПВ отсчетов многоканальных изображений при двухэтапной фильтрации с внутрикадровой некаузальной обработкой при наличии аддитивной некоррелированной помехи.

Для случая гауссовских многоканальных изображений получен алгоритм определения оценки отсчета изображения и дисперсии ошибки оценки при некаузальной внутрикадровой и каузальной межкадровой обработкой (12)–(20).

Для рассмотренного примера разработанный алгоритм позволяет получить увеличение точности фильтрации последовательности однородных гауссовских изображений на 30–53 % по сравнению с алгоритмом межкадрового усреднения.

1. Грузман И. С., Микерин В. И., Спектор А. А. Двухэтапная фильтрация изображений на основе использования ограниченных данных // *Радиотехника и электроника*. – 1995. – Вып. 5. – С. 817–822. 2. Лукин В. В. Современные методы и проблемы фильтрации многоканальных изображений, Труды НТК “Цифровая обработка сигналов и ее применение”, Москва, Россия, март 2011, вып. XIII-1. – Т. 1. – С. 3–6. 3. Ляшук О. М., Вишневый С. В., Жук С. Я. Алгоритм двухэтапной фильтрации многоканальных изображений с внутрикадровой каузальной обработкой при наличии некоррелированной помехи // *Вісник НТУУ “КПІ” Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2015. – Вып. 63. – С. 46–54. 4. Вишневый С. В. Двухэтапная совместная некаузальная фильтрация и сегментация неоднородных изображений / С. В. Вишневый, С. Я. Жук // *Радиоэлектроника*. – 2011. – Т. 54. – № 10. – С. 37–47. 5. Жук С. Я. Методы оптимизации дискретных динамических систем со случайной структурой: монография. – К.: НТУУ “КПИ”, 2008. – 232 с. 6. Борзов С. М., Узилов С. Б. Разработка многокадрового алгоритма подавления шума для мобильных тепловизионных систем наблюдения // *Вестник НГУ Серія “Информационные технологии”*. 2013. – Т. 11. – Вып. 1. – С. 16–23. 7. Kanopoulos N., Vasanthavada N., Baker R. L. Design of an image edge detection filter using the Sobel operator. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. vol. 23, no. 2, pp 358–367, April 1988.

References

1. Gruzman, I. S., Mikerin, V. I. & Spektor, A. A., 1995, Two-step image filtration with limited data usage: *Radiotechnique and electronics*, vol. 5, pp. 817–822. 2. Lukin V. V., 2011, Modern methods and problems of multichannel image filtration, *NTK Works “Digital image processing and application”*, Moscow, Russia, no. XIII-1, vol. 1, pp. 3–6. 3. Lyashuk O. M., Vishnevyy S. V., Zhuk S. Ja, 2015, Two-stage filtration algorithm with interframe causal processing for multichannel image with presence of uncorrelated noise, *Visnik NTUU “KPI” section Radiotechnique, Radioaparotobuduvannja*, no. 63, pp. 46–54. 4. Vishnevyy S. V. & Zhuk S. Ya., 2011, Two-stage joint non-causal filtration and segmentation of non-uniform images, *Radioelectronics*, vol 54, no. 10, pp. 37–47. 5. Zhuk S. Ja. 2008, Optimization methods for discrete dynamic systems with random structure, *Monography*. K, NTUU “KPI”, pp. 232. 6. Borzov S. M., Uzilov S. B., 2013, Creation of multichannel algorithm for noise suppression for mobile thermal imager surveillance systems, *Vestnik NGU Serija – Information technologies*, vol. 11, no. 1, pp. 16–23. 7. Kanopoulos N., Vasanthavada N & Baker R. L, 1988, Design of an image edge detection filter using the Sobel operator, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 23, no. 2, pp. 358–36.