

УДК 004.932.2

Е.П. Петров, И.С. Трубин, Е.В. Медведева, И.А. Частиков

## АДАПТИВНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ СИЛЬНО ЗАШУМЛЕННЫХ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

*Рассматривается метод адаптивной нелинейной фильтрации видеопоследовательности цифровых полутоновых изображений при большой интенсивности белого гауссовского шума, полностью маскирующего передаваемое изображение. Метод фильтрации видеопоследовательности базируется на представлении последовательности цифровых полутоновых изображений трехмерным дискретнозначным марковским процессом с несколькими значениями. Особенностью приведенного алгоритма адаптивной нелинейной фильтрации является его высокая эффективность при небольшом времени адаптации.*

### Введение

Рост требований к объему и качеству передаваемой информации приводит к поиску носителей информации, обладающих большой информационной емкостью. В этом смысле предпочтение отдается полутоновым изображениям, обладающим большой информационной избыточностью, реализация которой является значительным резервом повышения помехоустойчивости приема изображений в шумах.

В приложениях по обработке изображений при отсутствии статистических априорных данных наибольший интерес представляет адаптивная фильтрация видеопоследовательностей. Учитывая характер статистической связи между элементами внутри и между кадрами видеопоследовательностей, можно предположить, что видеопоследовательность представляет собой трехмерный дискретнозначный марковский процесс (МП) с несколькими значениями, имеющий разделимую автокорреляционную функцию вида [1]

$$r_{i,j,k} = \sigma_{\mu}^2 \exp\{-\alpha_1 |f| - \alpha_2 |s| - \alpha_3 |t|\}, \quad (1)$$

где  $i, j, k$  – дискретные пространственные координаты по горизонтали, вертикали и времени (по кадру) соответственно;  $\sigma_{\mu}^2$  – дисперсия трехмерного дискретнозначного марковского процесса;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – множители, зависящие от ширины спектральной плотности мощности случайных процессов по трем измерениям;  $f, s, t$  – шаги корреляции по горизонтали, вертикали и времени.

Если полутоновые изображения в видеопоследовательности представлены  $g$ -разрядными двоичными числами, то видеопоследовательность цифровых полутоновых изображений (ЦПИ) является трехмерным дискретнозначным МП с несколькими значениями, а последовательность разрядных двоичных изображений (РДИ)  $l$ -го разряда образует трехмерный МП с двумя равновероятными дискретными значениями [2].

На рис. 1 показаны два соседних кадра  $l$ -го разряда видеопоследовательности ЦПИ, разделенных на области  $F_{ik}^{(l)}$  ( $i = \overline{1, 4}, k = \overline{1, 2}, \dots$ ), элементы которых являются цепью Маркова различной размерности. Алгоритмы фильтрации элементов первых трех областей известны и хорошо изучены [1]. Наибольшую сложность представляет алгоритм фильтрации элементов области  $F_{4k}^{(l)}$ . Фильтруемый элемент  $v_4^{(l)} = \mu_{i,j,k}^{(l)}$  области  $F_{4k}^{(l)}$  зависит от семи соседних элементов, входящих в его окрестность (рис. 2), где  $v_1^{(l)} = \mu_{i,j-1,k}^{(l)}$ ,  $v_2^{(l)} = \mu_{i-1,j,k}^{(l)}$ ,  $v_3^{(l)} = \mu_{i-1,j-1,k}^{(l)}$ ,  $v_1'^{(l)} = \mu_{i,j-1,k-1}^{(l)}$ ,  $v_2'^{(l)} = \mu_{i-1,j,k-1}^{(l)}$ ,  $v_3'^{(l)} = \mu_{i-1,j-1,k-1}^{(l)}$ ,  $v_4'^{(l)} = \mu_{i,j,k-1}^{(l)}$ .

При известных на приемной стороне статистических данных о фильтруемом процессе в работе [1] был синтезирован оптимальный алгоритм нелинейной фильтрации видеопоследовательности ЦПИ. В реальных условиях статистические данные полностью или частично неиз-

вестны. В этом случае целесообразно применять адаптивные алгоритмы обработки видео-последовательности ЦПИ, позволяющие непосредственно в процессе приема ЦПИ вычислять недостающие статистические данные и использовать их для повышения качества восстановления ЦПИ, разрушенных шумом.

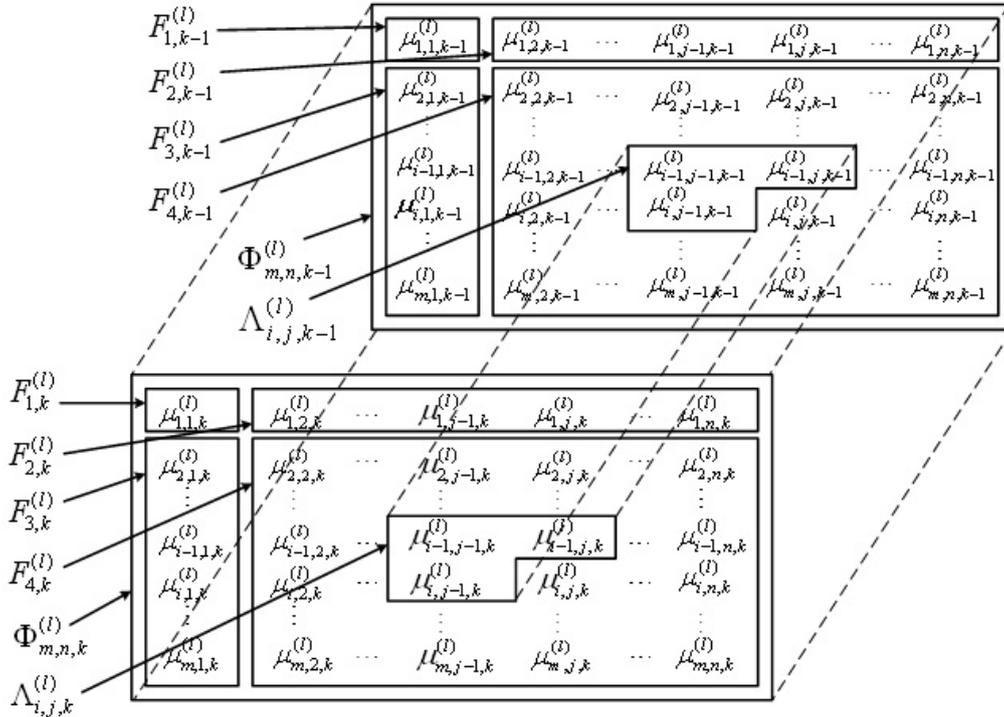


Рис. 1. Соседние кадры последовательности РДИ  $l$ -го разряда ЦПИ

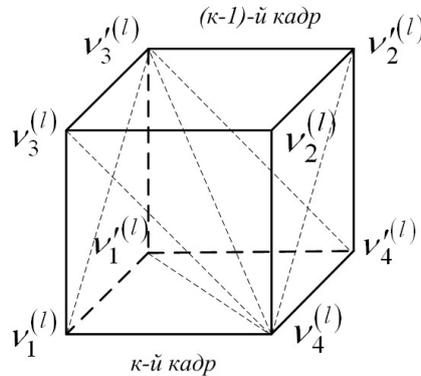


Рис. 2. Окружность  $\Lambda_{i,j,k}^{(l)}$  элемента  $v_4^{(l)}$

Широко распространенные методы адаптации, например, основанные на методах средне-квадратичной ошибки [2] или наименьших квадратов [3], требуют больших вычислительных ресурсов и трудно реализуемы в реальном масштабе времени. Поэтому в адаптивном алгоритме обработки ЦПИ механизм адаптации должен быть простым, эффективным и сравнимым по вычислительной сложности с самим алгоритмом фильтрации.

В настоящей работе предложен оригинальный метод адаптации, в котором процесс адаптации сведен к измерению на основе принимаемого сигнала неизвестных значений элементов одношаговых матриц вероятностей переходов (МВП) в сложной цепи Маркова с несколькими значениями и подстановке их в алгоритм фильтрации.

### 1. Метод адаптивной нелинейной фильтрации видеопоследовательности ЦПИ

Необходимо разработать адаптивный алгоритм нелинейной фильтрации видеопоследовательности  $g$ -разрядных ЦПИ марковского типа при наличии белого гауссовского шума (БГШ)  $\eta(t)$  с нулевым средним и дисперсией  $\sigma_\eta^2$ .

Полагая, что ЦПИ состоит из  $g$  РДИ, при разработке адаптивного алгоритма фильтрации видеопоследовательности ЦПИ воспользуемся уравнением, полученным в [1] для оптимальной нелинейной фильтрации последовательности  $l$ -го РДИ ( $l \in g$ ) с известными МВП по горизонтали  ${}^1\Pi^{(l)}$ , вертикали  ${}^2\Pi^{(l)}$  и по времени  ${}^4\Pi^{(l)}$ , и заменим в нем элементы всех МВП на их оценки:

$$\begin{aligned} u^{(l)}(v_4) = & \left[ f\left(M_1^{(l)}(v_4^{(l)})\right) - f\left(M_2^{(l)}(v_4^{(l)})\right) \right] + u^{(l)}(v_1^{(l)}) + z_1^{(l)} \left[ u^{(l)}(v_1^{(l)}), {}^1\hat{\pi}_{ij}^{(l)} \right] + \\ & + u^{(l)}(v_2^{(l)}) + z_2^{(l)} \left[ u^{(l)}(v_2^{(l)}), {}^2\hat{\pi}_{ij}^{(l)} \right] + u^{(l)}(v_4^{(l)}) + z_4^{(l)} \left[ u^{(l)}(v_4^{(l)}), {}^4\hat{\pi}_{ij}^{(l)} \right] + u^{(l)}(v_3^{(l)}) + \\ & + z_7^{(l)} \left[ u^{(l)}(v_3^{(l)}), {}^7\hat{\pi}_{ij}^{(l)} \right] - u^{(l)}(v_3^{(l)}) - z_3^{(l)} \left[ u^{(l)}(v_3^{(l)}), {}^3\hat{\pi}_{ij}^{(l)} \right] - u^{(l)}(v_1^{(l)}) - \\ & - z_5^{(l)} \left[ u^{(l)}(v_1^{(l)}), {}^5\hat{\pi}_{ij}^{(l)} \right] - u^{(l)}(v_2^{(l)}) - z_6^{(l)} \left[ u^{(l)}(v_2^{(l)}), {}^6\hat{\pi}_{ij}^{(l)} \right] \geq H, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $u^{(l)}(v_4^{(l)}) = \ln \frac{p_1^{(l)}(v_4^{(l)})}{p_2^{(l)}(v_4^{(l)})}$ , ( $l = \overline{1, g}$ ) – логарифм отношения апостериорных вероятностей значе-

ний двоичных элементов  $l$ -го РДИ в точке  $v_4^{(l)}$  (см. рис. 2);  $\left[ f\left(M_1^{(l)}(v_4^{(l)})\right) - f\left(M_2^{(l)}(v_4^{(l)})\right) \right]$  – разность логарифмов функций правдоподобия значений двоичных элементов  $l$ -го РДИ в элементе изображения  $v_4^{(l)}$ ;  $H$  – порог, выбранный в соответствии с критерием идеального наблюдателя (для алгоритма (2)  $H = 0$ );

$$z_p^{(l)}(\cdot) = \ln \frac{{}^p\hat{\pi}_{\alpha\alpha}^{(l)} + {}^p\hat{\pi}_{\beta\alpha}^{(l)} \exp\{-u^{(l)}(v_q^{(l)})\}}{{}^p\hat{\pi}_{\beta\beta}^{(l)} + {}^p\hat{\pi}_{\alpha\beta}^{(l)} \exp\{u^{(l)}(v_q^{(l)})\}}, \quad p = q = \overline{1, 2, 3}, \quad \alpha, \beta = \overline{1, 2}; \quad (3)$$

$$z_p^{(l)}(\cdot) = \ln \frac{{}^p\hat{\pi}_{\alpha\alpha}^{(l)} + {}^p\hat{\pi}_{\beta\alpha}^{(l)} \exp\{-u^{(l)}(v_q^{(l)})\}}{{}^p\hat{\pi}_{\beta\beta}^{(l)} + {}^p\hat{\pi}_{\alpha\beta}^{(l)} \exp\{u^{(l)}(v_q^{(l)})\}}, \quad p = \overline{4, 7}, \quad q = \overline{1, 4}, \quad (4)$$

где  ${}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$ ,  ${}^2\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$ ,  ${}^4\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$  – оценки элементов одношаговых МВП:

$${}^1\Pi^{(l)} = \begin{vmatrix} {}^1\pi_{11}^{(l)} & {}^1\pi_{12}^{(l)} \\ {}^1\pi_{21}^{(l)} & {}^1\pi_{22}^{(l)} \end{vmatrix}, \quad {}^2\Pi^{(l)} = \begin{vmatrix} {}^2\pi_{11}^{(l)} & {}^2\pi_{12}^{(l)} \\ {}^2\pi_{21}^{(l)} & {}^2\pi_{22}^{(l)} \end{vmatrix}, \quad {}^4\Pi^{(l)} = \begin{vmatrix} {}^4\pi_{11}^{(l)} & {}^4\pi_{12}^{(l)} \\ {}^4\pi_{21}^{(l)} & {}^4\pi_{22}^{(l)} \end{vmatrix}.$$

Из алгоритма (2) адаптивной нелинейной фильтрации последовательности РДИ  $l$ -го разряда ЦПИ следует, что для эффективной работы алгоритма приемного устройства, реализующего его, необходимо разработать процедуру вычисления оценок элементов трех МВП.

Фильтруемый элемент  $v_{4k}^{(l)}$   $l$ -го РДИ в  $k$ -м кадре вместе с его окрестностью  $\Lambda_{ijk}^{(l)} = \{v_1^{(l)}, v_2^{(l)}, v_3^{(l)}, v_4^{(l)}, v_1^{(l)}, v_2^{(l)}, v_3^{(l)}, v_4^{(l)}\}$  (см. рис. 2) образуют сложную цепь Маркова с двумя

равновероятными  $p_1^{(l)} = p_2^{(l)}$  значениями  $M_1$  и  $M_2$  и МВП  $\mathbf{\Pi}^{(l)}$ , элементы которой вычисляются по формулам, полученным в работе [4]. Например, элементы первой строки МВП  $\mathbf{\Pi}^{(l)}$  определяются по выражениям

$$\pi_{iii}^{(l)} = 1 - \frac{{}^1\pi_{ij}^{(l)} \cdot {}^2\pi_{ij}^{(l)} \cdot {}^4\pi_{ij}^{(l)} \cdot {}^7\pi_{ij}^{(l)}}{{}^3\pi_{ii}^{(l)} \cdot {}^5\pi_{ii}^{(l)} \cdot {}^6\pi_{ii}^{(l)}}, \quad \pi_{ijj}^{(l)} = \frac{{}^1\pi_{ij}^{(l)} \cdot {}^2\pi_{ij}^{(l)} \cdot {}^4\pi_{ij}^{(l)} \cdot {}^7\pi_{ij}^{(l)}}{{}^3\pi_{ii}^{(l)} \cdot {}^5\pi_{ii}^{(l)} \cdot {}^6\pi_{ii}^{(l)}}, \quad i, j = \overline{1, 2}, \quad (5)$$

а элементы второй строки МВП  $\mathbf{\Pi}^{(l)}$  – по выражениям

$$\pi_{jii}^{(l)} = 1 - \frac{{}^1\pi_{ii}^{(l)} \cdot {}^2\pi_{ij}^{(l)} \cdot {}^4\pi_{ij}^{(l)} \cdot {}^7\pi_{ii}^{(l)}}{{}^3\pi_{ij}^{(l)} \cdot {}^5\pi_{ij}^{(l)} \cdot {}^6\pi_{ii}^{(l)}}; \quad \pi_{jij}^{(l)} = \frac{{}^1\pi_{ii}^{(l)} \cdot {}^2\pi_{ij}^{(l)} \cdot {}^4\pi_{ij}^{(l)} \cdot {}^7\pi_{ii}^{(l)}}{{}^3\pi_{ij}^{(l)} \cdot {}^5\pi_{ij}^{(l)} \cdot {}^6\pi_{ii}^{(l)}}, \quad i \neq j. \quad (6)$$

Из формул (5) и (6) следует, что для вычисления элементов МВП  $\mathbf{\Pi}^{(l)}$  требуется семь вспомогательных МВП, представляющих собой различные произведения одношаговых МВП  ${}^1\mathbf{\Pi}^{(l)}$ ,  ${}^2\mathbf{\Pi}^{(l)}$  и  ${}^4\mathbf{\Pi}^{(l)}$ :

$$\begin{aligned} {}^3\mathbf{\Pi}^{(l)} &= {}^1\mathbf{\Pi}^{(l)} \cdot {}^2\mathbf{\Pi}^{(l)}, \\ {}^5\mathbf{\Pi}^{(l)} &= {}^1\mathbf{\Pi}^{(l)} \cdot {}^4\mathbf{\Pi}^{(l)}, \\ {}^6\mathbf{\Pi}^{(l)} &= {}^2\mathbf{\Pi}^{(l)} \cdot {}^4\mathbf{\Pi}^{(l)}, \\ {}^7\mathbf{\Pi}^{(l)} &= {}^3\mathbf{\Pi}^{(l)} \cdot {}^4\mathbf{\Pi}^{(l)} = {}^1\mathbf{\Pi}^{(l)} \cdot {}^2\mathbf{\Pi}^{(l)} \cdot {}^4\mathbf{\Pi}^{(l)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Элементы остальных строк МВП  $\mathbf{\Pi}^{(l)}$  вычисляются по аналогичным формулам с учетом значений элементов окрестности  $\Lambda_{ijk}^{(l)}$ .

Из формул (5) и (6) видно, что элементы МВП  $\mathbf{\Pi}^{(l)}$  зависят от элементов МВП  ${}^1\mathbf{\Pi}^{(l)}$ ,  ${}^2\mathbf{\Pi}^{(l)}$  и  ${}^4\mathbf{\Pi}^{(l)}$ , оценки которых неизвестны на приемной стороне системы связи и должны быть вычислены и подставлены в уравнение адаптивной фильтрации (2). Оценки элементов МВП  ${}^1\mathbf{\Pi}^{(l)}$  и  ${}^2\mathbf{\Pi}^{(l)}$  могут быть вычислены с помощью методов, приведенных ранее в работах [2, 3], а оценки элементов МВП  ${}^4\mathbf{\Pi}^{(l)}$  можно определить из формул (5) при условии, что известна оценка элемента  $\hat{\pi}_{iii}^{(l)}$  первой строки МВП  $\mathbf{\Pi}^{(l)}$ .

В общем случае для вычисления оценки  ${}^4\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$  можно выбрать элементы любой строки МВП  $\mathbf{\Pi}^{(l)}$ , однако оценка  $\hat{\pi}_{iii}^{(l)}$ , соответствующая комбинации значений  $\nu_1^{(l)} = \nu_2^{(l)} = \nu_4^{(l)} = \nu_1'^{(l)} = \nu_2'^{(l)} = \nu_3^{(l)} = \nu_3'^{(l)}$  окрестности  $\Lambda_{ijk}^{(l)}$   $l$ -го РДИ, предпочтительнее, так как чаще встречается в  $l$ -м РДИ реальных ЦПИ, чем другие комбинации, что ускоряет процесс адаптации.

Учитывая, что последовательность бинарных элементов  $l$ -го РДИ по строке является цепью Маркова с двумя состояниями  $M_1^{(l)}$  и  $M_2^{(l)}$ , оценка вероятности перехода по горизонтали может быть вычислена по формуле, полученной в работе [5]:

$${}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l)} = 1 - \frac{2p_1^{(l)}}{\hat{\chi}_i^{(l)}}, \quad i = 1, 2, \quad (8)$$

где  $\hat{\chi}^{(l,r)}$  – оценка средней длины цуга (средняя длина последовательности двоичных символов одного знака)  $l$ -го разряда на  $r$ -м шаге адаптации;  $p_i^{(l)}$  – априорная вероятность значения  $M_i^{(l)}$ , одинаковая для всех разрядов ( $p_i^{(l)}=0,5$ ;  $i=\overline{1,2}$ ;  $l=\overline{1,g}$ ).

Используя трехмерную модель (см. рис. 2), содержащую множества элементов  $\psi_1 = \{v_1^{(l)}, v_2^{(l)}, v_3^{(l)}, v_4^{(l)}\}$ ,  $\psi_2 = \{v_1^{(l)}, v_4^{(l)}, v_1'^{(l)}, v_4'^{(l)}\}$  и  $\psi_3 = \{v_2^{(l)}, v_4^{(l)}, v_2'^{(l)}, v_4'^{(l)}\}$ , вероятности перехода для сложной цепи Маркова можно вычислить в каждом множестве  $\psi_3 \{i=\overline{1,3}\}$  по формулам

$$\pi_{iii} = 1 - \frac{{}^1\pi_{ij} \cdot {}^2\pi_{ij}}{{}^3\pi_{ii}}; \quad (9)$$

$$\pi_{iii}^* = 1 - \frac{{}^1\pi_{ij} \cdot {}^4\pi_{ij}}{{}^5\pi_{ii}}; \quad (10)$$

$$\pi_{iii}^{**} = 1 - \frac{{}^2\pi_{ij} \cdot {}^4\pi_{ij}}{{}^6\pi_{ii}}. \quad (11)$$

Если известны оценки вероятностей перехода  ${}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$  и  $\hat{\pi}_{iii}^{(l)}$ , то, подставив их в уравнение (9), можно вычислить оценку вероятности перехода по вертикали:

$${}^2\hat{\pi}_{ii}^{(l)} = \hat{\pi}_{iii}^{(l)} \frac{1 - {}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l)}}{{}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l)} - \hat{\pi}_{iii}^{(l)} (2 \cdot {}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l)} - 1)}. \quad (12)$$

Аналогично, имея оценки вероятностей перехода  ${}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$  и  $\hat{\pi}_{iii}^{*(l)}$ , из уравнения (10) или (11) можно вычислить оценку вероятности перехода между кадрами  ${}^4\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$  по формулам

$${}^4\hat{\pi}_{ii}^{(l)} = \hat{\pi}_{iii}^{*(l)} \frac{1 - {}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l)}}{{}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l)} - \hat{\pi}_{iii}^{*(l)} (2 \cdot {}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l)} - 1)}; \quad (13)$$

$${}^4\hat{\pi}_{ii}^{(l)} = \hat{\pi}_{iii}^{**(l)} \frac{1 - {}^2\hat{\pi}_{ii}^{(l)}}{{}^2\hat{\pi}_{ii}^{(l)} - \hat{\pi}_{iii}^{**(l)} (2 \cdot {}^2\hat{\pi}_{ii}^{(l)} - 1)}. \quad (14)$$

## 2. Результаты исследования

Процесс адаптивной фильтрации исследовался на последовательности из 10 искусственных РДИ с размером кадра  $512 \times 512$  элементов (пикселей) и заданными вероятностями переходов  ${}^1\pi_{ii}^{(l)} = {}^2\pi_{ii}^{(l)} = {}^4\pi_{ii}^{(l)} = 0,9$ . Относительная погрешность вычисления оценок вероятностей перехода не превосходила 1%. Качество фильтрации определялось объективной оценкой выигрыша по мощности сигнала:

$$\eta^{(l)} = 10 \lg(\rho_{\text{эвых}}^2 / \rho_s^2), \quad (15)$$

где  $\rho_s^2$ ,  $\rho_{\text{эвых}}^2$  – отношение сигнал-шум по мощности сигнала в элементе  $l$ -го РДИ на входе и выходе устройства фильтрации. Отношение сигнал-шум на входе  $\rho_s^2$  априорно принято одина-

ковым для всех  $g$  РДИ, а  $\rho_{\text{эвых}}^2$  определяется по средней ошибке различения двоичных элементов  $l$ -го РДИ и имеет различное значение для всех  $g$  РДИ.

Выигрыш фильтрации  $\eta^{(l)}$  последовательности РДИ  $l$ -го разряда ЦПИ оптимальным (известные априорные данные) и адаптивным алгоритмами при различных  $\rho_s^2$  отличаются не более чем на 1 дБ (рис. 3). Оценки элементов  ${}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$ ,  ${}^2\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$  и  ${}^4\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$  МВП  ${}^1\Pi^{(l)}$ ,  ${}^2\Pi^{(l)}$  и  ${}^4\Pi^{(l)}$  для каждого разряда корректировались с помощью формул (16), полученных в [4, 5] для различных отношений сигнал-шум на входе приемного устройства фильтрации ЦПИ:

$${}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l)} = \frac{{}^1\hat{\pi}_{ii}^{(l)} - 2p_{i\theta}^{(l)}(1 - p_{i\theta}^{(l)})}{(1 - p_{i\theta}^{(l)})^2}, \quad (16)$$

где  $p_{i\theta}^{(l)}$  – средняя вероятность ошибки распознавания элементов  $l$ -го РДИ.

На рис. 4 показана зависимость оценки элемента  ${}^4\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$  МВП  ${}^4\Pi^{(l)}$  от номера шага адаптации  $r$  (номер строки РДИ во втором кадре) при  $\rho_s^2 = -6$  дБ.

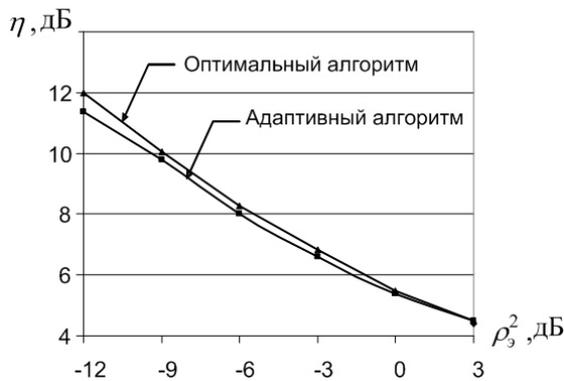


Рис. 3. Выигрыш по мощности сигнала при оптимальной и адаптивной фильтрации последовательности РДИ  $l$ -го разряда ЦПИ

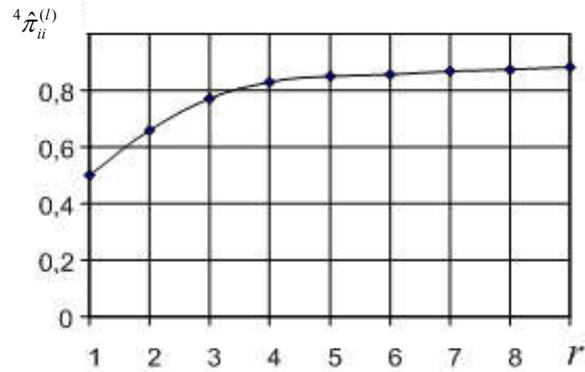


Рис. 4. Зависимость вероятности перехода  ${}^4\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$  от номера шага (строки) адаптации  $r$  во втором кадре при  $\rho_s^2 = -6$  дБ

Значение вероятности перехода  ${}^4\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$  после 14 шагов адаптации (строк во втором кадре) достигло 0,893, что соответствует погрешности не более 1 % от истинного значения  ${}^4\pi_{ii} = 0,9$ . При этом процесс адаптации по времени (по кадрам) завершается. При моделировании предполагалось, что начальное значение элемента МВП  ${}^4\hat{\pi}_{ii} = 0,5$ , что соответствует независимой цепи Маркова. В реальных условиях можно устанавливать среднестатистическое для телевизионных сигналов значение  ${}^4\hat{\pi}_{ii} = 0,9$ . В этом случае процесс адаптации ограничивается вторым кадром при отношениях сигнал-шум  $\rho_s^2 = -3$  дБ.

На рис. 5 показан процесс адаптивной нелинейной фильтрации видеопоследовательности восьмиразрядных ЦПИ «Дорога», зашумленных белым гауссовским шумом, при  $\rho_s^2 = -18$  дБ в 1-м и 25-м кадрах, полученных в реальном масштабе времени.

Результаты адаптивной нелинейной фильтрации видеопоследовательности реальных ЦПИ подтверждают возможность реализации системы для скрытой в шумах передачи ЦПИ.

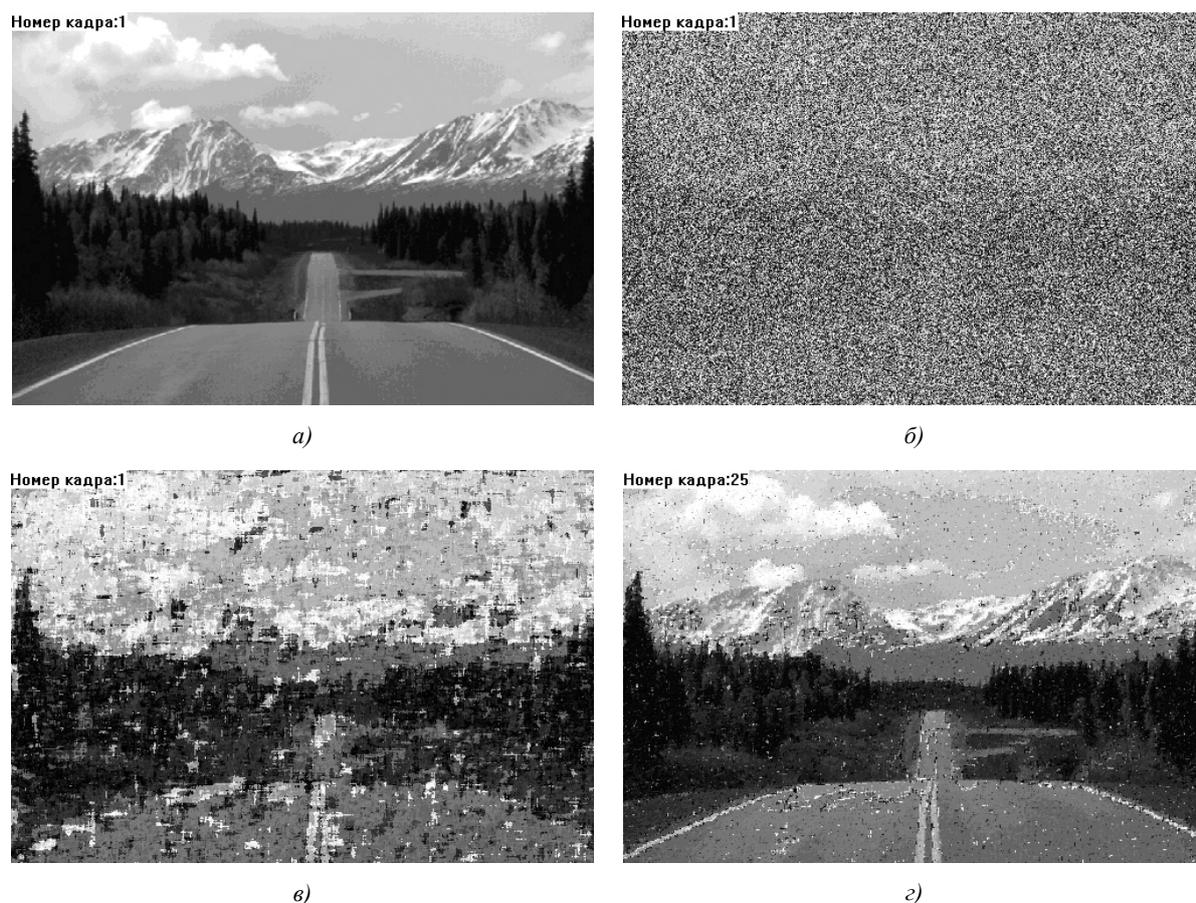


Рис. 5. Нелинейная фильтрация ЦПИ: а) исходное изображение; б) зашумленное изображение; в) отфильтрованный 1-й кадр; г) 25-й кадр

### Заключение

Разработанный алгоритм адаптивной нелинейной фильтрации видеопоследовательности ЦПИ обладает высокой эффективностью, особенно при малых отношениях сигнал-шум по мощности  $\rho_s^2 \ll 1$ . Скорость адаптации фильтрации видеопоследовательности ЦПИ не превышает двух-трех кадров при среднестатистических значениях вероятности переходов по времени (кадрам)  $\pi_{ii} = 0,9$  и отношении сигнал-шум  $\rho_s^2 \approx -1$  дБ. Адаптивный алгоритм, учитывая его однородную структуру, прост в реализации, особенно при малой разрядности представления ЦПИ ( $g \leq 8$ ).

### Список литературы

1. Петров, Е.П. Нелинейная фильтрация последовательности цифровых полутоновых изображений / Е.П. Петров, И.С. Трубин, Е.Л. Буторин // Радиотехника и электроника. – 2005. – Т. 50, № 10. – С. 1265–1272.
2. Стационарные и нестационарные характеристики обучения адаптивных фильтров, использующих критерий минимума СКО / Б. Уидроу [и др.] // ТИИЭР. – 1976. – Т. 64, № 8. – С. 37–51.
3. Уидроу, Б. Адаптивная обработка сигналов : пер с англ. / Б. Уидроу, С. Стирнз ; под ред. В.В. Шахгильдяна. – М. : Радио и связь, 1988. – 440 с.

4. Петров, Е.П. Нелинейная фильтрация видеопоследовательностей цифровых полутонных изображений марковского типа / Е.П. Петров, И.С. Трубин, И.А. Частиков // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 6. – С. 3–31.

5. Трубин, И.С. Нелинейная фильтрация видеопоследовательностей цифровых полутонных изображений / И.С. Трубин, Е.В. Медведева, О.П. Булыгина // Инфокоммуникационные технологии. – 2007. – Т. 5, № 4. – С. 29–35.

Поступила 12.09.08

*Вятский государственный университет,  
г. Киров, ул. Московская, 36  
e-mail: EMedv@mail.ru*

**E.P. Petrov, I.S. Trubin, E.V. Medvedeva, I.A. Chastikov**

**ADAPTIVE NONLINEAR FILTRATION  
OF VIDEO SEQUENCES AFFECTED BY HEAVY NOISE**

A method of adaptive nonlinear filtration of a video sequence of digital grayscale images is considered. It is supposed that the video sequence of digital grayscale images is three-dimensional Markov process with discrete values. The advantages of suggested algorithm of adaptive filtration are its high performance and short adaptation time.