

УДК 621.397: 004.932

В. Ю. Кононова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АЛГОРИТМЕ ДВУМЕРНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ЦИФРОВЫХ ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Областью исследований в данной работе являются методы повышения помехоустойчивости приёма цифровых полутоновых изображений алгоритмом двумерной нелинейной фильтрации. В качестве объекта исследования взят алгоритм двумерной оптимальной нелинейной фильтрации цифровых полутоновых изображений, синтезированный Е. П. Петровым на основе представления математической модели многоуровневых цифровых полутоновых изображений набором математических моделей разрядных двоичных изображений, каждое из которых является двумерной цепью Маркова с разделёнными корреляционными функциями по горизонтали и вертикали с двумя состояниями. Выявлены причины возникновения переходных процессов в алгоритме, показано, что они приводят к снижению качества восстановления цифровых полутоновых изображений. Предложены методы ослабления влияния переходных процессов, позволяющие улучшить качество восстановления на краях изображения и границах областей разной яркости.

Ключевые слова: нелинейная фильтрация изображений, повышение помехоустойчивости приёма изображений, алгоритм двумерной нелинейной фильтрации, математическая модель цифрового изображения, двумерная цепь Маркова с двумя состояниями, переходные процессы в алгоритме нелинейной фильтрации.

В настоящее время во многих областях (в экологических исследованиях, картографии и т. д.) широко используются цифровые полутоновые изображения (ЦПИ) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) большого разрешения. При этом от систем приема-передачи ЦПИ требуется обеспечение

качественного восстановления ЦПИ не только от искажений, внесенных шумами в канале связи при их передаче, но и от искажений, вызванных переходными процессами (ПП) в алгоритмах нелинейной фильтрации ЦПИ, возникающих на краях изображений и на границах локальных областей разной яркости. Научные работы, посвященные исследованию указанных ПП и методов устранения искажений, вызванных ими, отсутствуют. Разработка таких методов позволит повысить качество восстановления границ локальных областей разной яркости на изображении и помехоустойчивость приема реальных ЦПИ. Поэтому исследование ПП в алгоритмах нелинейной фильтрации ЦПИ и разработка методов борьбы с ними является актуальной задачей.

Алгоритмы восстановления ЦПИ синтезируют согласно их математическим моделям (ММ). В настоящее время разработано большое число ММ ЦПИ на основе случайных полей марковского типа. Значительный вклад в разработку двумерных ММ марковского типа внесли российские ученые В. В. Быков [1], К. К. Васильев [2], В. Р. Крашенинников [3], В. Г. Бондур [4], А. А. Спектор [5], В. Н. Васюков [6], Я. А. Фурман [7], Е. П. Петров [8], а также зарубежные ученые А. К. Джайн [9] К. Абенд [10], Дж. Вудс [11], Дж. Безаг [12], Р. Кашьяп [13], Г. Винклер [14] и др.

Особый интерес представляют ММ ЦПИ, состоящих из разрядных двоичных изображений (РДИ), на основе цепей Маркова с двумя равновероятными состояниями, разработанные в научной школе Петрова Евгения Петровича. В указанных ММ ЦПИ, пиксели которых являются многоразрядными двоичными числами с числом разрядов g , разбивают на РДИ, число которых соответствует количеству разрядов g . ММ каждого l -ого РДИ ($l = \overline{1, g}$) строится на двумерной цепи Маркова, которая является суперпозицией одномерных цепей Маркова по горизонтали и по вертикали (рис. 1) с двумя дискретными состояниями M_1 и M_2 с вектором начальных вероятностей состояний (ВНВС)

$$P^{(l)}(0) = \left\| p_1^{(l)}(0) \quad p_2^{(l)}(0) \right\|^T = \left\| p(\mu_{1,1}^{(l)} = M_1) \quad p(\mu_{1,1}^{(l)} = M_2) \right\|^T, \quad (1)$$

и матрицами вероятностей переходов (МВП) от состояния M_i к состоянию M_j ($i, j = \overline{1, 2}, \quad i \neq j$) по горизонтали и по вертикали соответственно

$${}^1\Pi^{(l)} = \left\| \begin{matrix} {}^1\pi_{11}^{(l)} & {}^1\pi_{12}^{(l)} \\ {}^1\pi_{21}^{(l)} & {}^1\pi_{22}^{(l)} \end{matrix} \right\|, \quad {}^2\Pi^{(l)} = \left\| \begin{matrix} {}^2\pi_{11}^{(l)} & {}^2\pi_{12}^{(l)} \\ {}^2\pi_{21}^{(l)} & {}^2\pi_{22}^{(l)} \end{matrix} \right\|. \quad (2)$$

$\mu_{1,1}^{(l)}$	$\mu_{1,2}^{(l)}$	...	$\mu_{1,j-1}^{(l)}$	$\mu_{1,j}^{(l)}$	...	$\mu_{1,n}^{(l)}$
$\mu_{2,1}^{(l)}$	$\mu_{2,2}^{(l)}$	...	$\mu_{2,j-1}^{(l)}$	$\mu_{2,j}^{(l)}$	...	$\mu_{2,n}^{(l)}$
...
$\mu_{i-1,1}^{(l)}$	$\mu_{i-1,2}^{(l)}$	...	$\mu_{i-1,j-1}^{(l)}$	$\mu_{i-1,j}^{(l)}$	...	$\mu_{i-1,n}^{(l)}$
$\mu_{i,1}^{(l)}$	$\mu_{i,2}^{(l)}$	...	$\mu_{i,j-1}^{(l)}$	$\mu_{i,j}^{(l)}$	...	$\mu_{i,n}^{(l)}$
...
$\mu_{m,1}^{(l)}$	$\mu_{m,2}^{(l)}$	...	$\mu_{m,j-1}^{(l)}$	$\mu_{m,j}^{(l)}$	...	$\mu_{m,n}^{(l)}$

Рис. 1. Множество элементов двоичного изображения

На основе представления ММ многозарядных ЦПИ набором ММ РДИ, каждое из которых является двумерной цепью Маркова с разделенными корреляционными функциями по горизонтали и вертикали РДИ, синтезирован оптимальный алгоритм двумерной нелинейной фильтрации ЦПИ [15], превосходящий известные алгоритмы по скорости и точности восстановления ЦПИ при наличии БГШ. Указанному алгоритму соответствует следующее уравнение фильтрации

$$u_{i,j}^{(l)} = f(\mu_{i,j}^{(l)} = M_1) - f(\mu_{i,j}^{(l)} = M_2) + u_{i,j-1}^{(l)} + z(u_{i,j-1}^{(l)}, {}^1\pi_{\beta\gamma}^{(l)}) + u_{i-1,j}^{(l)} + z(u_{i-1,j}^{(l)}, {}^2\pi_{\beta\gamma}^{(l)}) - u_{i-1,j-1}^{(l)} - z(u_{i-1,j-1}^{(l)}, {}^3\pi_{\beta\gamma}^{(l)}) \leq H; \quad (3)$$

где $f(\mu_{i,j}^{(l)} = M_1) - f(\mu_{i,j}^{(l)} = M_2)$ - разность логарифмов функции правдоподобия значений дискретного параметра двоичного сигнала;

$u_{i,j}^{(l)} = \ln \frac{p^{ac}(\mu_{i,j}^{(l)} = M_2)}{p^{ac}(\mu_{i,j}^{(l)} = M_1)}$ - логарифм отношения апостериорных вероятностей

состояний M_1 и M_2 в $\mu_{i,j}^{(l)}$ элементе РДИ; $z(u_{i,j}^{(l)}, {}^r\pi_{\beta\gamma}^{(l)})$ - нелинейное преобразование

$$z(u_{i,j}^{(l)}, {}^r\pi_{\beta\gamma}^{(l)}) = \ln \left[\frac{{}^r\pi_{22}^{(l)} + {}^r\pi_{12}^{(l)} \cdot \exp(-u_{ij}^{(l)})}{{}^r\pi_{11}^{(l)} + {}^r\pi_{21}^{(l)} \cdot \exp(u_{ij}^{(l)})} \right]; \quad (4)$$

${}^r\pi_{\beta\gamma}^{(l)}$ - элементы МВП ${}^1\Pi$, ${}^2\Pi$ и ${}^3\Pi = {}^1\Pi \cdot {}^2\Pi$, H - порог, выбранный по критерию идеального наблюдателя ($j = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, m}$, $\beta, \gamma = 1, 2$, $r = \overline{1, 3}$).

Исследования показали, что при фильтрации РДИ, составляющих ЦПИ, в алгоритмах нелинейной фильтрации возникают ПП, следствием которых является появление артефактов на верхнем и левом краях изображения, а так же на границах переходов из области одной яркости в другую. ПП в алгоритмах фильтрации можно классифицировать по причине возникновения. Первый тип ПП возникает в верхнем и левом углу изображения, он связан с отсутствием накопленных данных о предыдущих элементах последовательности. Второй тип ПП возникает на границах переходов из области одной яркости в другую, он связан с инерционностью алгоритма нелинейной фильтрации.

Для борьбы с ПП на краях изображения необходимо изменять порог на каждом шаге фильтрации [16] согласно выражению

$$H_{i,j}^{(l)} = \ln \frac{p_{ap}(\mu_{i,j}^{(l)} = M_2)}{p_{ap}(\mu_{i,j}^{(l)} = M_1)}, \quad (5)$$

где $p_{ap}(\mu_{i,j}^{(l)} = M_\alpha)$ ($\alpha = 1, 2$) - априорная вероятность состояния M_α в $\mu_{i,j}^{(l)}$ элементе РДИ.

Пример № 1. В качестве примера рассмотрим результаты фильтрации искусственного РДИ (рис. 2а) с вектором вероятностей начальных значений $P^{(l)}(0) = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \end{bmatrix}^T$ и МВП по горизонтали и по вертикали ${}^1\Pi^{(l)} = {}^2\Pi^{(l)} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \\ 0.1 & 0.9 \end{bmatrix}$ ($l = \overline{1, 8}$) размером 30×30 пикселей, искаженного в канале связи БГШ (ОСШ = -9 дБ). Восстановленное РДИ, полученное при

нелинейной фильтрации с переменным порогом приведено на рис. 2б. РДИ, восстановленное с нулевым порогом, приведено на рис. 2г. Видно, что в обоих случаях фильтрации РДИ возникают ошибки (отмечены черным цветом на рис. 2в и 2д), их число больше в РДИ, восстановленном с нулевым порогом. Эти дополнительные искажения, возникшие за счет неучтенного ПП, отображены на рис. 2е.

При фильтрации реальных ЦПИ ограниченного размера метод с использованием переменного порога позволяет уменьшить артефакты на верхнем и левом краях изображения, но это не даёт значительного увеличения выигрыша фильтрации в целом по всему изображению. Например, при фильтрации старших РДИ реальных ЦПИ размером 800×600 преимущество метода с переменным порогом незначительное $0.01 - 0.03$ дБ при ОСШ в диапазоне от -9 до 0 дБ.

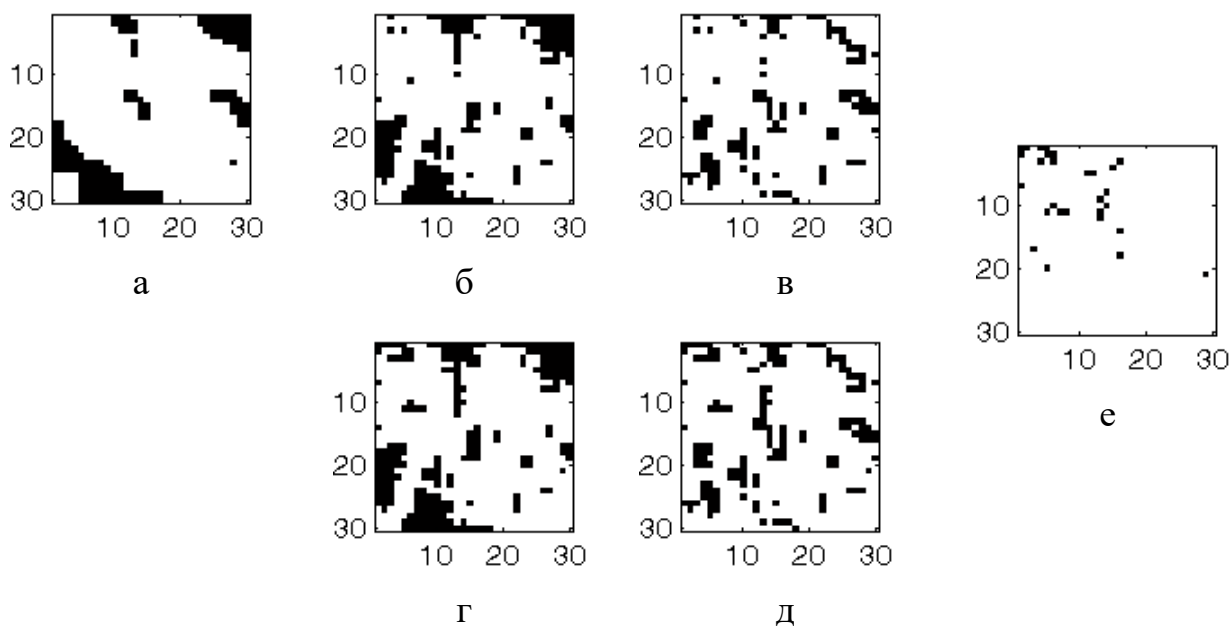


Рис. 2. Результаты двумерной нелинейной фильтрации искусственного изображения размером 30×30

Для борьбы с ПП, возникающими на границах областей, использование переменного порога не представляется возможным потому, что заранее не известно, когда и где будет переход с одного уровня яркости на другой.

Исследования ПП на границах областей разной яркости показали: 1) вероятность ошибки на границе областей тем выше, чем больше значение вероятностей перехода ${}^r\pi_{ii}^{(l)}$ (элемент МВП ${}^r\Pi^{(l)}$, $r = \overline{1,2}$); 2) чем меньше значение вероятностей перехода ${}^r\pi_{ii}^{(l)}$ (элемент МВП, $r = \overline{1,2}$), тем больше вероятность ошибки при приеме пикселей находящихся внутри областей одной яркости; 3) для некоторых комбинаций пикселей (рис. 3) значение вероятности ошибок больше 0.5 при значениях вероятностей перехода ${}^r\pi_{ii}^{(l)} > 0.8$. Для снижения влияния ПП на границах предлагается использовать дополнительную обработку, исправляющую ошибки в комбинациях (рис. 4). Это позволяет снизить вероятность ошибок фильтрации внутри и на границах областей разной яркости. При фильтрации старших РДИ реальных ЦПИ использование метода с исправлением ошибок даёт преимущество фильтрации 0.20 - 0.50 дБ при ОСШ в диапазоне от -9 до 0 дБ.



Рис. 3. Комбинации пикселей, в нижнем правом элементе которых вероятность

ошибки максимальная и превышает 0.5 при значениях вероятностей перехода ${}^r\pi_{ii}^{(l)} > 0.8$

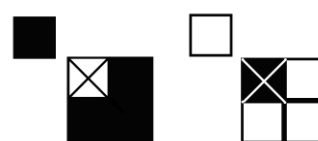


Рис. 4. Исправление ошибок в уже принятых комбинациях

Несогласованность усредненных статистических характеристик ${}^r\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$ априорно заданных в алгоритме фильтрации и реальных характеристик ${}^r\pi_{ii}^{(l)}$ принимаемого РДИ приводит: 1) к снижению вероятности ошибок фильтрации внутри областей одной яркости, но при этом увеличивается вероятности ошибок фильтрации на границах областей разной яркости в случае, если ${}^r\pi_{ii}^{(l)} < {}^r\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$; 2) к снижению вероятности ошибок фильтрации на границах областей разной яркости, но при этом увеличивается вероятности ошибок фильтрации внутри областей одной яркости в случае, если ${}^r\pi_{ii}^{(l)} > {}^r\hat{\pi}_{ii}^{(l)}$.

Пример № 2. На рис. 5 приведены результаты фильтрации РДИ с неоднородной структурой (рис. 5а), имеющего три области с отличными друг от друга статистическими характеристиками (рис. 5д). РДИ, восстановленное с постоянными усредненными по всему РДИ статистическими характеристиками, представлено на рис. 5б. РДИ, восстановленное с изменяющимися характеристиками в соответствии с выделенными областями, – на рис. 5е. Изображения на рис. 5б и рис. 5е отличаются: в центральной области РДИ на рис. 5е меньше искажений. На рис. 5в черным цветом отмечены пиксели, восстановленные с ошибкой при фильтрации с усредненными априорно заданными статистическими характеристиками в алгоритме фильтрации (3). На рис. 5ж приведена аналогичная диаграмма распределения ошибок в случае фильтрации с разными МВП для каждой области. Видно, что фильтрация с переменными статистическими характеристиками приводит к уменьшению вероятности ошибки внутри областей одной яркости, а вероятность ошибки на границах областей остаётся высокой.

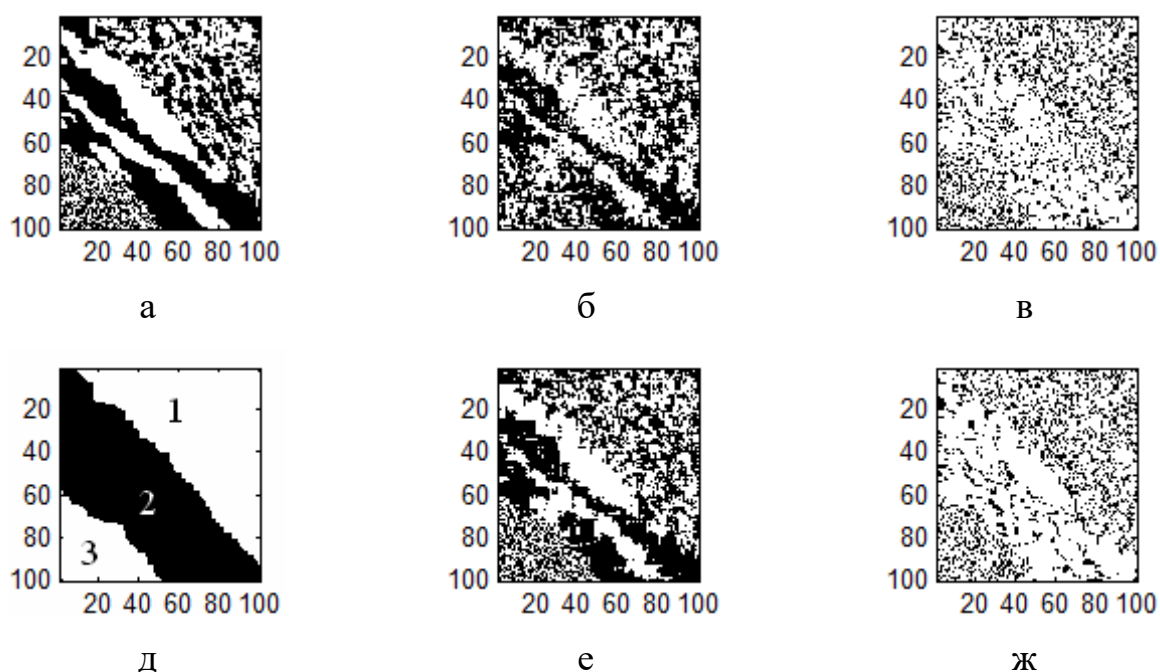


Рис. 5. Результаты двумерной нелинейной фильтрации искусственного неоднородного РДИ размером 100×100

Адаптивная фильтрация с изменяющимися статистическими характеристиками позволяет улучшить качество фильтрации реальных РДИ в некоторых случаях на 3 дБ при ОСШ в диапазоне от - 9 дБ до 0дБ. При этом ПП на границах областей разной яркости остаются, уменьшается лишь вероятность ошибки фильтрации внутри областей.

Таким образом, проведенные в работе исследования показали, что в алгоритме двумерной фильтрации действительно возникают ПП, снижающие качество восстановления. Первый тип ПП приводит к артефактам в верхнем и левом углу изображения. Второй тип ПП приводит к искажению границ между областями разной яркости. ПП процессы в алгоритмах нелинейной фильтрации возникают при восстановлении любых ЦПИ независимо от их структуры. Ослабить влияние ПП на качество фильтрации можно применяя методы: 1) переменный порог при фильтрации (преимущество 0.01-0.03 дБ при ОСШ в диапазоне от -9 до 0 дБ); 2) адаптивная фильтрация с изменяющимися статистическими характеристиками (преимущество до 3 дБ при ОСШ в диапазоне от - 9 дБ до 0дБ); 3) дополнительная обработка с исправлением ошибочных комбинаций (преимущество 0.20 - 0.50 дБ при ОСШ в диапазоне от -9 до 0 дБ).

Список литературы

1. Быков В. В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. М.: Сов. радио, 1971. 383 с.
2. Прикладная теория случайных процессов и полей / под ред. К. К. Васильева, В. А. Омельченко. Ульяновск: УлГТУ, 1995. 255 с.
3. Крашенинников В. Р. Основы теории обработки изображений: учеб. пособие / Ульяновск: УлГТУ, 2003. 150 с.
4. Моделирование многоспектральных аэрокосмических изображений динамических полей яркости / В. Г. Бондур, Н. И. Аржененко, В. Н. Линник, И. Л. Титова // Исследование земли из космоса. 2003. № 2. С. 3–17.
5. Спектор А. А. Многомерные дискретные марковские поля и их фильтрация при наличии некоррелированного шума // Радиотехника и электроника. 1985. № 5. С. 512–523.

6. Новые подходы к решению задач обработки и распознавания изображений / В. Н. Васюков, И. С. Грузман, М. А. Райфельд, А. А. Спектор // Научные технологии. 2002. № 3. С. 44–51.
7. Введение в контурный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов / Я. А. Фурман, А. В. Кревецкий, А. К. Передреев, А. А. Роженцы и др.; под ред. Я. А. Фурмана. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 592 с.
8. Петров Е. П., Трубин И. С., Харина Н. Л. Математическая модель двумерного цифрового полутонового изображения марковского типа // Проблемы обработки информации: Вестник ВНИЦ Верхне-Волжского отделения АТН РФ. 2005. Вып. № 1(6). С. 41–46.
9. Джайн А. К. Успехи в области математических моделей для обработки изображений // ТИИЭР. 1981. Т. 69. № 5. С. 9–39.
10. Abend K., Harley T. J., Kanal L. N. Classification of binary random patterns // IEEE Trans. Inform. Theory. 1965. V. IT-11. P. 538–544.
11. Woods J. W. Two-dimensional discrete Markovian fields // Inform. Theory. 1972. V. IT-22. P. 232–240.
12. Besag J. E. Spatial interaction and the statistical analysis of lattice systems // J. Roy. Stat. Soc. Series B. V. 36. 1974. P. 192–236.
13. Kashyap R. L. Analysis and synthesis of image patterns by spatial interaction models // Progress in Pattern Recognition L. N. Kanal and A. Rosenfeld, Eds. N. Y.: Elsevier. North-Holland, 1981. P. 149–186.
14. Винклер Г. Анализ изображений, случайные поля и динамические методы Монте-Карло. Математические основы. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2002. 343 с.
15. Петров Е. П., Трубин И. С., Тихонов И. Е. Нелинейная цифровая фильтрация полутоновых изображений // Радиотехника. 2003. № 5. С. 7–10.
16. Кононова В. Ю., Петров Е. П. Моделирование и нелинейная фильтрация нестационарных изображений // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2010. № 4. С. 73–78.

КОНОНОВА Виктория Юрьевна – ассистент кафедры радиоэлектронных средств, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: kononovavictoria@mail.ru