

Анализ эффективности фильтрации последовательностей спутниковых изображений

К.К. Васильев¹, В.Е. Дементьев¹, Н.А. Андриянов¹

¹Ульяновский государственный технический университет, ул. Северный Венец, д. 32, Ульяновск, Россия, 432027

Аннотация. В статье рассмотрена задача фильтрации многозональных изображений. Особое внимание уделяется анализу эффективности фильтрации последовательностей изображений. Получены зависимости дисперсий ошибок от количества кадров в последовательности, а также от коэффициента межкадровой корреляции. Для статистического моделирования изображений были использованы дважды стохастические случайные поля.

1. Введение

Одной из ключевых особенностей реальных спутниковых изображений является их выраженная пространственная неоднородность [1-3]. Она связана с многообразием форм и текстур разных объектов, наблюдаемых из космоса. Действительно, любой спутниковый снимок поверхности Земли содержит изображения разных объектов, например, реки, леса, городских построек, сельскохозяйственных угодий и т.д. Визуальные характеристики этих объектов существенно отличаются. Попытка описать весь снимок с помощью известных однородных моделей (например, авторегрессионных, волновых и т.д.) приводит к ошибкам, вызванным некорректным усреднением информации. В связи с этим, для описания спутниковых изображений необходимо применять более сложные математические модели, способные имитировать неоднородные случайные поля (СП). В работах [4-7] в качестве таких моделей предложено использовать дважды стохастические авторегрессионные модели СП. Эти модели с одной стороны позволяют формировать изображения с изменяющимися вероятностными свойствами, с другой, являются достаточно простыми для анализа и позволяют формировать на своей основе различные алгоритмы обработки. Примером таких алгоритмов являются процедуры нелинейной рекуррентной фильтрации, описанные в работе [6]. Было показано, что данные процедуры позволяют выполнять фильтрацию двумерных пространственно неоднородных изображений с существенно более высокой эффективностью по сравнению с известными линейными алгоритмами и их модификациями. Однако последняя работа не касается вопросов обработки последовательностей многозональных изображений, и в ней получены результаты для единичного кадра. Вместе с тем исследования эффективности обработки именно последовательностей изображений встречается в литературе очень редко. В настоящей работе рассматриваются пути обобщения ранее найденных процедур для обработки многозональных спутниковых изображений. Приводятся результаты по исследованию эффективности фильтрации таких изображений.

2. Фильтрация многозональных изображений

Сперва выполним краткий анализ известных алгоритмов фильтрации многозональных изображений. В обзорной работе [11] среди самых известных существующих фильтров автор выделяет фильтры четырех типов:

- Классические регрессионные фильтры, которые в основном сводятся к стандартным гауссовым фильтрам [12], как правило, приводящим к размытию изображений. У таких фильтров отсутствует адаптивность, что является их главным недостатком;

- Двусторонние фильтры (ДФ) или билатеральные фильтры [13], обладающие свойством местной адаптивности и весьма удобные в использовании в силу простоты записи ядра регрессии. Однако ДФ не обеспечивает эффективную работу при низких отношениях сигнал/шум. В связи с этим данный фильтр не может быть использован в ряде задач, когда присутствуют достаточно сильные помехи;

- Фильтры с реализацией алгоритма NLM (Non Local Means) [14], вызвавшие большой интерес в последние годы. В работе [11] NLM фильтр рассматривается как обобщение ДФ с некоторыми отличиями. Основное отличие заключается в том, что геометрическое расстояние между пикселями игнорируется, откуда и вытекает название «нелокальный». Основным недостатком такого фильтра – физическая невозможность равенства одного из параметров бесконечности, поэтому, в сущности, NLM фильтр тоже является более или менее локальным. Кроме того, несмотря на популярность данного фильтра, его производительность также зачастую недостаточна.

- Фильтры с ядрами локально-адаптивной регрессии (LARK, Steering Kernels), ключевой идеей меры сходства которых является получение надёжной локальной структуры [15]. LARK чрезвычайно устойчивы к шуму и возмущениям данных.

Пусть необходимо выполнить фильтрацию многозонального изображения, состоящего из набора двумерных кадров. Каждый из этих кадров описывает состояние земной поверхности в определенном спектральном диапазоне. Определим исследуемые кадры как изменяющееся в дискретном времени СП, заданное на многомерной сетке [2,3] $J_t = \{\bar{j} = (j_1, j_2, j_3); j_l = 1, M_l, l = 1, 2, 3\}$, где j_1, j_2 можно считать пространственными координатами, а j_3 номером спектральной зоны. При этом элементами СП являются скалярные величины (яркости изображения в данной точке). Тогда первый кадр многозонального изображения определяется двумерным СП $\{x_{ij}^1\}$, заданным на сетке $\{(i, j); i = 1, M_1; j = 1, M_2\}$. Предположим, что $\{x_{ij}^1\}$ определяется пространственной авторегрессионной дважды стохастической моделью [8,9]:

$$x_{ij}^1 = \sum_{k,l \in D_{ij}} \rho_{kl} x_{kl}^1 + \xi_{ij}^1, \{(i, j); i = 1, M_1; j = 1, M_2\}, \quad (1)$$

где D_{ij} - область локальных состояний, содержащая элементы $\{x_{kl}\}$, определяющие x_{ij} , ξ_{ij}^1 - случайная добавка, а коэффициенты ρ_{kl} являются не постоянными, а случайными величинами.

Пусть коэффициенты ρ_{kl} также определяются схожим образом, а именно

$$\rho_{kl} = \sum_{m,n \in D_{kl}} r_{mn} \rho_{mn} + \zeta_{kl}^1, \{(k, l); i = 1, M_1; j = 1, M_2\}. \quad (2)$$

В последнем выражении r_{ij} являются постоянными коэффициентами, характеризующими корреляционные характеристики вспомогательного СП $\{\rho_{ij}\}$. Определенная таким образом математическая модель является нелинейной, и ее непосредственный анализ связан с некоторыми математическими сложностями. Поэтому для сокращения изложенного далее материала и упрощения его понимания воспользуемся более простым вариантом дважды стохастической модели:

$$x_{ij}^1 = \rho_{x_{ij-1}} x_{i-1,j}^1 + \rho_{y_{i-1}j} x_{i,j-1}^1 - \rho_{x_{i-1}j} \rho_{y_{ij-1}} x_{i-1,j-1}^1 + \xi_{ij}^1, \quad (3)$$

где x_{ij} - моделируемое СП с нормальным распределением $M\{x_{ij}\} = 0$, $M\{x_{ij}^2\} = \sigma_x^2$; ξ_{ij}^1 - СП независимых стандартных гауссовских СВ $M\{\xi_{ij}\} = 0$, $M\{\xi_{ij}^2\} = \sigma_{\xi_{ij}}^2 = \sqrt{\sigma_x^2(1-\rho_{xij}^2)(1-\rho_{yij}^2)}$; ρ_{xij} и ρ_{yij} - коэффициенты корреляции по строке и по столбцу соответственно в точке (i,j).

Случайные величины ρ_{xij} и ρ_{yij} с гауссовской плотностью распределения вероятности могут быть описаны следующими авторегрессионными уравнениями:

$$\tilde{\rho}_{xij} = r_{1x}\tilde{\rho}_{x(i-1)j} + r_{2x}\tilde{\rho}_{xi(j-1)} - r_{1x}r_{2x}\tilde{\rho}_{x(i-1)(j-1)} + \sigma_{\rho_x}\sqrt{(1-r_{1x}^2)(1-r_{2x}^2)}\zeta_{\rho_x,ij}^1, \tag{4}$$

$$\tilde{\rho}_{yij} = r_{1y}\tilde{\rho}_{y(i-1)j} + r_{2y}\tilde{\rho}_{yi(j-1)} - r_{1y}r_{2y}\tilde{\rho}_{y(i-1)(j-1)} + \sigma_{\rho_y}\sqrt{(1-r_{1y}^2)(1-r_{2y}^2)}\zeta_{\rho_y,ij}^1,$$

$$\rho_{xij} = \tilde{\rho}_{xij} + m_{\rho_x},$$

$$\rho_{yij} = \tilde{\rho}_{yij} + m_{\rho_y}, \tag{5}$$

где $r_{1x} = M\{\tilde{\rho}_{xij}\tilde{\rho}_{x(i-1)j}\}$, $r_{2x} = M\{\tilde{\rho}_{xij}\tilde{\rho}_{xi(j-1)}\}$ - коэффициенты корреляции случайного параметра $\tilde{\rho}_{xij}$; $r_{1y} = M\{\tilde{\rho}_{yij}\tilde{\rho}_{y(i-1)j}\}$, $r_{2y} = M\{\tilde{\rho}_{yij}\tilde{\rho}_{yi(j-1)}\}$ - коэффициенты корреляции случайного параметра $\tilde{\rho}_{yij}$; $\zeta_{\rho_x,ij}$ и $\zeta_{\rho_y,ij}$ - нормально распределенные СВ с $M\{\zeta_{\rho_x,ij}\} = M\{\zeta_{\rho_y,ij}\} = 0$, $M\{\zeta_{\rho_x,ij}^2\} = M\{\zeta_{\rho_y,ij}^2\} = \sigma_{\zeta}^2 = 1$.

Последующие кадры задаются СП $\{x_{ij}^k\}$, $k = 2..N$, размещенным на той же сетке, что и первый кадр. Пусть в результате продолжительных наблюдений определена матрица R межкадровых корреляций между отдельными кадрами многозонального изображения R_k . Будем также считать, что особенности регистрации объектов на этих кадрах обеспечивает близость внутрикадровых корреляционных характеристик на всех кадрах. Тогда для имитации второго и последующих кадров можно воспользоваться следующим соотношением:

$$x_{ij}^k = \sum_{l=1}^k R(l,k)x_{ij}^l + \sum_{i1=1}^{M_1} \sum_{j1=1}^{M_2} v_{i1j1} \xi_{i1j1}^k, \tag{6}$$

где v_{i1j1} - элементы треугольной матрицы V , такой что $VV^T = B$, где B - ковариационная матрица отдельного, например, первого кадра, ξ_{i1j1}^k - отсчеты белого шума с дисперсией $\sigma_{\xi}^2 = \prod_{p=1}^k \sqrt{1-R(p,k)^2}$. Матрицу V можно получить с помощью известного преобразования Холецкого [10].

К сожалению, ковариационная функция (КФ) случайных полей и процессов, порожденных дважды стохастической моделью, в общем случае описывается весьма сложными выражениями, обусловленными наличием двойных корреляционных связей самого процесса и его базовых параметров. Тем не менее, КФ может быть найдена достаточно просто для важного частного случая медленного (по сравнению с интервалом корреляции формируемого СП) изменения базового СП. Тогда для КФ одномерной дважды стохастической модели первого порядка может быть получена следующая формула:

$$B(k) = M\{\sigma_x^2 \rho_i^{|k|}\} = \sigma_x^2 \int_{-\infty}^{\infty} \rho_i^{|k|} w(\rho_i) d\rho_i = \sigma_x^2 \sum_{j=0}^Q C_k^{2j} \sigma_{\rho}^{2j} m_{\rho}^{k-2j} (2j-1)!! \tag{7}$$

где $Q = k/2$, если k принимает четные значения, и $Q = (k-1)/2$ в противоположном случае;

$C_k^j = \frac{k!}{j!(k-j)!}$; $(2j-1)!!$ определяется как произведение всех натуральных нечетных чисел на

отрезке $[1, (2j-1)]$.

Для двумерного СП приближенная (при медленном изменении базовых СП) КФ может быть найдена следующим образом:

$$B(k1, k2) = M \left\{ \sigma_x^2 \rho_{xij}^{[k1]} \rho_{yij}^{[k2]} \right\}. \tag{8}$$

С учетом независимости ρ_{xij} и ρ_{yij} получаем:

$$B(k1, k2) = \sigma_x^2 \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{xij}^{[k1]} w(\rho_{xij}) d\rho_{xij} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{yij}^{[k2]} w(\rho_{yij}) d\rho_{yij} = B(k1)B(k2) / \sigma_x^2, \tag{9}$$

где $\rho_{xij}^{(k1)}$ и $\rho_{yij}^{(k2)}$, $k1, k2 = 1, 2, \dots$ - коэффициенты корреляции между соседними отсчетами по осям x и y . Таким образом, для приближенного расчета КФ двумерного дважды стохастического СП можно воспользоваться перемножением двух одномерных КФ $B(k1), B(k2)$.

Рассмотрим теперь вектор оценки $\bar{x}_{ij} = (\bar{x}_{ij}^1 \ \bar{\rho}^1_{xij} \ \bar{\rho}^1_{yij} \ x_{ij-1}^2 \ \dots \ x_{ij-1}^N)^T$ длиной $3(M_1 + 1) + N - 1$, где $\bar{x}_{ij} = (x_{ij} \ x_{ij-1} \ \dots \ x_{i1} \ x_{i-1M_1} \ \dots \ x_{i-1j})^T$, $\bar{\rho}_{xij} = (\rho_{xij} \ \rho_{xij-1} \ \dots \ \rho_{xi1} \ \rho_{xi-1M_1} \ \dots \ \rho_{xi-1j})^T$, $\bar{\rho}_{yij} = (\rho_{yij} \ \rho_{yij-1} \ \dots \ \rho_{yi1} \ \rho_{yi-1M_1} \ \dots \ \rho_{yi-1j})^T$. Используя этот вектор можно переписать модель многозонального изображения в виде $\bar{x}_{ij} = \varphi_{ij} \bar{x}_{ij-1} + \bar{\xi}_{ij}$, где

$$\bar{\xi}_{ij} = (\xi^1_{ij} 0 \dots 0 \ \xi_{\rho x ij} 0 \dots 0 \ \xi_{\rho y ij} 0 \dots 0 \ \sum_{i1=1}^{M_1} \sum_{j1=1}^{M_2} b_{i1j1} \xi^1_{i1j1} \dots \sum_{i1=1}^{M_1} \sum_{j1=1}^{M_2} b_{i1j1} \xi^N_{i1j1})^T;$$

$$\varphi_{ij} = \begin{pmatrix} \varphi_{ijx} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varphi_{ij\rho x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varphi_{ij\rho y} & 0 \\ R_N & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad \varphi_{ijx} = \begin{pmatrix} \rho_{xij-1} & \dots & \rho_{xi-1j} & -\rho_{xi-1j}\rho_{yij-1} \\ 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix}; \quad \varphi_{ij\rho x} = \begin{pmatrix} r_{x1} & \dots & r_{x2} & -r_{x1}r_{x2} \\ 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\varphi_{ij\rho y} = \begin{pmatrix} r_{y1} & \dots & r_{y2} & -r_{y1}r_{y2} \\ 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix}; \quad R_N = \frac{1}{\sigma_x^2} \begin{pmatrix} B(1,1) & 0 & \dots & 0 \\ B(1,2) & B(2,2) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ B(1,N) & B(1,N) & \dots & B(N,N) \end{pmatrix}.$$

На рис. 1 схематично представлен процесс формирования двух двумерных коррелированных между собой кадров условного многозонального изображения. Особенностью этого процесса является использование только одного первого кадра в качестве опорного для оценивания внутрикадровых пространственных корреляционных характеристик. Соответственно большую часть вектора \bar{x}_{ij} составляют элементы первого кадра и параметры, определяющие внутрикадровую корреляцию. И только последний элемент вектора \bar{x}_{ij} соответствует элементу x_{ij-1}^2 , расположенному на втором кадре в точке с координатами $(i, j - 1)$.

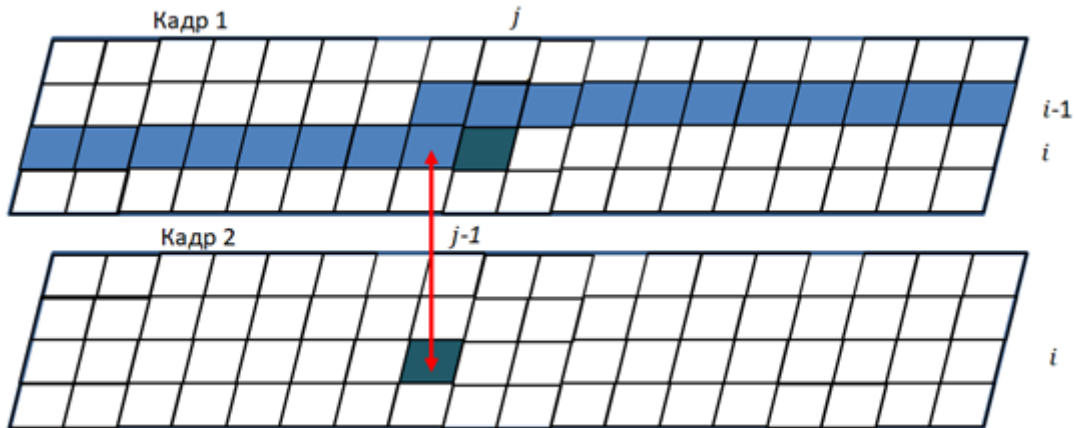


Рисунок 1. Формирование многозонального изображения.

Используя эти соотношения и метод рекуррентной нелинейной фильтрации, можно получить следующий двумерный нелинейный фильтр:

$$\hat{\bar{x}}_{ij} = \hat{\bar{x}}_{zij} + B_{ij}(z_{ij} - \hat{x}_{zij}), \quad (10)$$

где $\hat{\bar{x}}_{zij}$ – подмножество элементов вектора экстраполяции $\hat{\bar{x}}_{zij}$, соответствующих вектору наблюдений $\bar{z}_{ij}, (i, j)$; $B_{ij} = P_{zij} C^T D_{ij}^{-1}$; $C = (1, 0, 0, \dots, 0, 1, \dots, 1)$; $D_{ij} = C P_{zij} C^T + \sigma_n^2 P_{zij} = M\{(\bar{x}_{zij} - \bar{x}_{ij})(\bar{x}_{zij} - \bar{x}_{ij})^T\} = \varphi'(\hat{\bar{x}}_{zij-1}) P_{zij-1} \varphi'(\hat{\bar{x}}_{zij-1})^T + V_{zij}$. Дисперсия ошибки фильтрации на каждом шаге $P_{zij} = (E - B_{ij} C) P_{zij}$. Отметим, что особенностью данного фильтра является тот факт, что на каждой его итерации происходит повторный пересчет элементов, составляющих вектор \bar{x}_{ij} . Также необходимо учитывать, что в каждой точке с координатами (i, j) имеется не одно скалярное наблюдение z_{ij} , а вектор таких наблюдений, значения которого соответствуют значениям многозонального изображения в точке (i, j) на соответствующем кадре.

На графиках рис. 2 представлены зависимости эффективности фильтрации от количества кадров многозонального изображения и коэффициента межкадровой корреляции. При этом на рис. 2 а) показаны ошибки фильтрации, возникающие при обработке отдельного кадра («прерывистая линия») и при использовании нескольких кадров (до 10) – сплошная линия. На рис 2 б) представлена зависимость ошибки фильтрации от коэффициента межкадровой корреляции $R(k, l)$. В последнем случае считалось, что $R(k, l)$ одинаково для любой пары различных двумерных кадров k и l , входящих в многозональное изображение. При этом кривая (1) соответствует случаю одновременной обработки двух кадров, кривая (2) – четырех кадров, кривая (3) – 10 кадров.

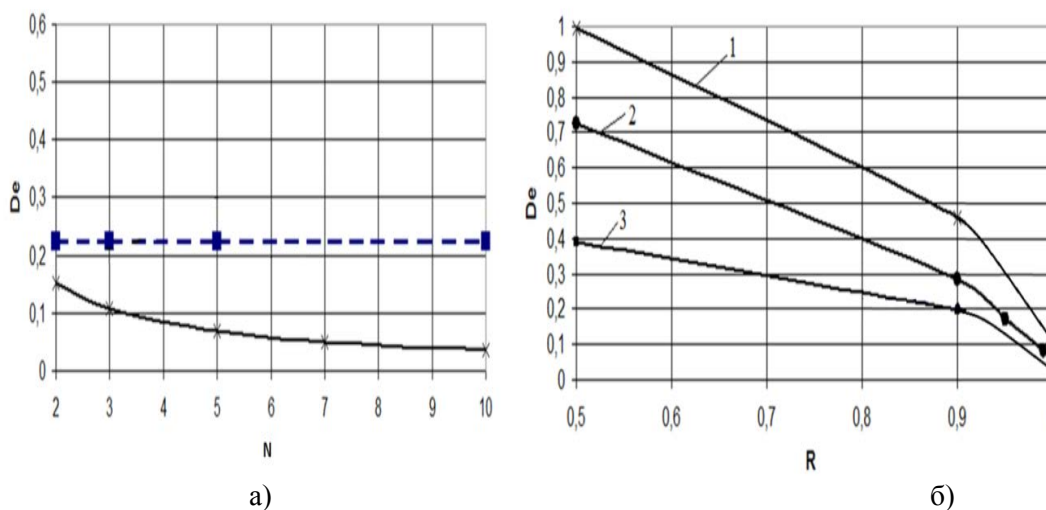


Рисунок 2. Эффективность фильтрации многозонального изображения: а) - зависимость дисперсии ошибки фильтрации первого кадра от числа обрабатываемых кадров при одинаковой межкадровой корреляции $R(k, l) = 0.95$; б) - зависимость дисперсии ошибки фильтрации первого кадра от значения коэффициента межкадровой корреляции при разной длине последовательности.

Анализ приведенных на графиках кривых показывает, что увеличение числа кадров в многозональном изображении и коэффициента межкадровой корреляции ведет к росту эффективности фильтрации. На рис. 3 представлены результаты проведенных испытаний на реальном спутниковом материале. Обработывалась последовательность кадров различных изображений, включающая 1 и 3 кадра соответственно. При этом также выполнялись оценки параметров корреляции внутри этих изображений.

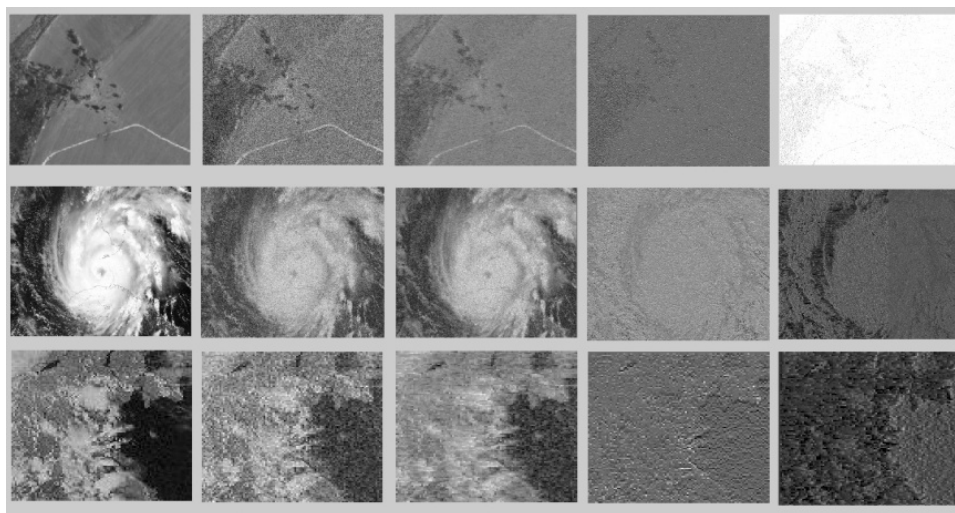


Рисунок 3. Результаты обработки спутниковых изображений: слева направо - исходное изображение, фильтрация по 1-му кадру, фильтрация по 3-м кадрам, оценка корреляционных параметров по строке, оценка корреляционных параметров по столбцу.

Анализ фактически полученных результатов подтверждает указанные выше зависимости. Так для реальных спутниковых многозональных изображений был получен средний выигрыш 10% по дисперсии ошибки фильтрации при одновременной обработке двух кадров вместо одного. При совместной обработке трех кадров многозонального изображения был получен средний выигрыш 14%. Следует отметить, что исследование алгоритма проводилось на порядка 200 изображениях различного типа: леса, поля, реки и т.п.

3. Заключение

Таким образом, в настоящей работе выполнен синтез нелинейного трехмерного рекуррентного фильтра, позволяющего выполнять обработку реальных многозональных изображений. Получены численные характеристики эффективности данного фильтра, позволяющие рекомендовать его к использованию на реальном спутниковом материале. Представлены выражения для расчета ковариационных функций многозональных изображений на базе дважды стохастической модели.

4. Благодарности

Результаты получены при поддержке гранта РФФИ и Правительства Ульяновской области №16-41-732027.

5. Литература

- [1] Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2006. – 812 с.
- [2] Васильев, К.К. Статистический анализ изображений / К.К. Васильев, В.Р. Крашенинников. – Ульяновск: УлГТУ, 2014. – 214 с.
- [3] Васильев, К.К. Оптимальная обработка сигналов в дискретном времени / К.К. Васильев. - М.: Радиотехника, 2016. – 288 с.
- [4] Васильев, К.К. Анализ эффективности оценивания изменяющихся параметров дважды стохастической модели / К.К. Васильев, В.Е. Дементьев, Н.А. Андриянов // Радиотехника. – 2015. – Т. 6. – С. 12-15.
- [5] Vasil'ev, K.K. Application of mixed models for solving the problem on restoring and estimating image parameters / K.K. Vasil'ev, V.E. Dement'ev, N.A. Andriyanov // Pattern Recognition and

- Image Analysis (Advances in Mathematical Theory and Applications). – 2016. – Vol. 26(1). – P. 240-247. DOI: 10.1134/S1054661816010284.
- [6] Дементьев, В.Е. Применение дважды стохастических авторегрессионных моделей для обработки спутниковых изображений / В.Е. Дементьев // Радиотехника. – 2017. – Т. 6. – С. 18-22.
- [7] Vasiliev, K.K. Filtration and restoration of satellite images using doubly stochastic random fields / K.K. Vasiliev, V.E. Dementiev, N.A. Andriyanov // CEUR Workshop Proceedings 1. Sem. "REIT 2017 - Proceedings of the 1st International Workshop on Radio Electronics and Information Technologies". – 2017. – P. 10-20.
- [8] Andriyanov, N.A. Anomalies detection on spatially inhomogeneous polyzonal images / N.A. Andriyanov, K.K. Vasiliev, V.E. Dementiev // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – Vol. 1901. – P. 10-15. DOI: 10.18287/1613-0073-2017-1901-10-15.
- [9] Дементьев, В.Е. Использование дважды стохастических моделей случайных процессов и полей для описания сложных неоднородных сигналов / В.Е. Дементьев, Н.А. Андриянов // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники. Материалы 19-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара. – УлГТУ, 2016. – С. 98-99.
- [10] Вержбицкий, В.М. Основы численных методов / В.М. Вержбицкий. – М.: Высшая школа, 2009. – 840 с.
- [11] Milanfar, P. A tour of modern image filtering / P. Milanfar // IEEE Signal Processing Journal. – 2013. – P. 106-128.
- [12] Takeda, H. Kernel regression for image processing and reconstruction / H. Takeda, S. Farsiu, P. Milanfar // IEEE Trans. Image Process. – 2007. – Vol. 16(2). – P. 349-366.
- [13] Tomasi, C. Bilateral filtering for gray and color images / C. Tomasi, R. Manduchi // Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Vision, Bombay, India, Jan., 1998. - P. 836-846.
- [14] Bajorski, P. Non-Gaussian Linear Mixing Models for Hyperspectral Images / P. Bajorski // Hindawi Publishing Corporation Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2012. – 818175. – 8 p.
- [15] Scherzer, O. Relations between regularization and diffusion filtering / O. Scherzer, J. Weickert // J. Math. Imaging Vision. – 2000. – Vol. 12(1). – P. 43-63.

Analysis of the efficiency of satellite image sequences filtering

K.K. Vasiliev¹, V.E. Dementiev¹, N.A. Andriyanov¹

¹Ulyanovsk State Technical University, Severny Venets 32, Ulyanovsk, Russia, 432027

Abstract. The problem of filtering polyzonal images is considered in the article. Particular attention is paid to the analysis of the efficiency of filtering image sequences. Dependences of the variance of errors on the number of frames in the sequence are obtained, as well as on the coefficient of interframe correlation. Doubly stochastic random fields were used for statistical modeling of images.

Keywords: image processing, nonlinear filtering, filtering efficiency, image sequences, doubly stochastic model.