

О ПОВЫШЕНИИ РЕЗКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СУБПОЛОСНОГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ

Е.Г. ЖИЛЯКОВ
А.А. ЧЕРНОМОРЕЦ
Е.В. БОЛГОВА

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

e-mail:
zhilyakov@bsu.edu.ru
chernomorets@bsu.edu.ru

В статье разработан метод повышения резкости изображений на основе субполосного дифференцирования, позволяющий учитывать частотные свойства изображений.

Ключевые слова: изображение, контур, дифференцирование, субполосный анализ, резкость изображений

При решении многих задач анализа изображений, возникающих в процессе производственной деятельности или в научных исследованиях, зарегистрированные изображения, зачастую, не имеют необходимой резкости, четкости отображения различных объектов, вследствие этого проблеме улучшения резкости изображений и разработке соответствующих методов постоянно уделяется существенное внимание. Под резкостью изображений обычно понимают степень полноты воспроизведения мелких деталей, а также контуров объектов на изображениях. Основная цель повышения резкости изображений состоит в выявлении и выделении мелких деталей изображения или улучшении фрагментов и деталей изображений, которые не являются достаточно четкими для проведения анализа по причине технических характеристик регистрирующей аппаратуры и условий съемки. Как показывают исследования, во многих случаях наиболее информативными при выделении объектов на изображении являются параметры границ однородных областей – контуров данных объектов. Так, в биологических системах зрительного восприятия при выделении отдельных объектов используются, в основном, очертания контуров, а не значения яркости данных объектов [1]. Учитывая данный факт, в настоящей работе для повышения резкости изображений осуществляется поиск контуров объектов.

Контурам объектов (границы) изображения, как правило, соответствует существенный перепад яркости между двумя относительно однородными областями значений яркости. Поскольку математической операцией, позволяющей определить области изменения функции, является дифференцирование, то контуры изображения могут быть определены на основе вычисления производных.

В работе предложено операцию дифференцирования выполнять на основе субполосного анализа-синтеза, который в отличие от большинства известных методов дифференцирования изображений позволяет учитывать их частотные свойства.

Рассмотрим наиболее известные пространственные методы, использующие линейные фильтры, которые применяют для вычисления производных на изображении при подчеркивании перепадов яркости и контуров. Представим изображение в виде значений $f(x_i, y_k)$ двумерной функции яркости $f(x, y)$ в отдельных равноудаленных точках (x_i, y_k) , $i = 1, 2, \dots, N_1$, $k = 1, 2, \dots, N_2$ (при условии, что регистрация значений яркости изображения осуществлена в эквидистантных отсчетах). Выделение контуров (границ однородных областей) может быть достигнуто на основе операции дифференцирования в пространственной области изображения.

При выделении на изображении вертикальных перепадов осуществляется дифференцирование по строкам, горизонтальных перепадов – по столбцам. В пространственной области изображения шаг между отсчетами обычно принимают равным 1, следовательно, для дифференцирования строк и столбцов изображения $(f_{i,k})$, $i = 1, 2, \dots, N_1$, $k = 1, 2, \dots, N_2$ можно применять следующие выражения:

$$G_x^k = \frac{\partial f}{\partial x} = f_{i+1,k} - f_{ik}, \quad G_{xx}^k = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f_{i-1,k} - 2f_{ik} + f_{i+1,k}, \quad i = 2, \dots, N_1 - 1,$$



$$G_y^i = \frac{\partial f}{\partial y} = f_{i,k+1} - f_{ik}, \quad G_{yy}^i = \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = f_{i,k-1} - 2f_{ik} + f_{i,k+1}, \quad k = 2, \dots, N_2 - 1. \tag{1}$$

При выделении на изображении контуров произвольной ориентации используют значение модуля градиента, вычисленного для двумерной функции, значение которой соответствуют значениям яркости пикселей изображения. Максимальное изменение двумерной функции происходит в направлении ее градиента. При вычислении первой производной изображения применяют различные приближения двумерного градиента и его модуля.

Известно, что для функции $f(x, y)$ градиент в точке (x, y) определяется как двумерный вектор-столбец

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{df}{dx} \\ \frac{df}{dy} \end{bmatrix}. \tag{2}$$

Соотношение для вычисления оценки модуля двумерного градиента изображения имеет следующий вид:

$$\nabla f(x, y) = \sqrt{[f(x, y) - f(x - 1, y)]^2 + [f(x, y) - f(x, y - 1)]^2}. \tag{3}$$

При практической реализации процесса вычисления оценки модуля градиента применяют упрощенное выражение:

$$|\nabla f_{ik}| = |G_x^k| + |G_y^i|, \tag{4}$$

которое сохраняет относительные изменения в уровнях яркости.

С физической точки зрения рассмотренные выражения соответствуют применению фильтров высоких частот. На основе указанных выражений выделяют высокочастотные составляющие анализируемого изображения, определяющие перепады яркости и контуры, и подавляют «постоянную составляющую». Однако, их использование повышает уровень шума на изображении. Во многих случаях для повышения помехоустойчивости при выполнении операции выделения контуров применяют нелинейную обработку изображений. Особенность нелинейных методов обработки заключается в том, что они предполагают использование нелинейных операторов численного дифференцирования.

Методы численного дифференцирования, наиболее часто применяемые при проведении реальных расчетов по выделению контуров, используют дифференциальные операторы Робертса, Собела и Превитта.

В операторе Робертса для выделения границ используют диагонально смежные (перекрестные) пиксели

$$f_{ik}^{XY} = |f_{i,k} - f_{i+1,k+1}| + |f_{i,k+1} - f_{i+1,k}|, \tag{5}$$

$$i = 1, 2, \dots, N_1 - 1, \quad k = 1, 2, \dots, N_2 - 1.$$

Превитт предложил для аппроксимации производных двумерной функции использовать следующие выражения, являющиеся некоторым обобщением соотношений (1):

$$G_x^k = (f_{i+1,k-1} + f_{i+1,k} + f_{i+1,k+1}) - (f_{i-1,k-1} + f_{i-1,k} + f_{i-1,k+1}),$$

$$G_y^i = (f_{i-1,k+1} + f_{i,k+1} + f_{i+1,k+1}) - (f_{i-1,k-1} + f_{i,k-1} + f_{i+1,k-1}), \tag{6}$$

$$i = 2, \dots, N_1 - 1, \quad k = 2, \dots, N_2 - 1.$$

Для увеличения значимости элементов, используемых в соотношении (1), которое определяет значение производной, Собел ввел весовые коэффициенты в соотношениях (6) и предложил для вычисления производных вдоль координатных осей применять следующие соотношения:

$$G_x^k = (f_{i+1,k-1} + 2f_{i+1,k} + f_{i+1,k+1}) - (f_{i-1,k-1} + 2f_{i-1,k} + f_{i-1,k+1}),$$

$$G_y^i = (f_{i-1,k+1} + 2f_{i,k+1} + f_{i+1,k+1}) - (f_{i-1,k-1} + 2f_{i,k-1} + f_{i+1,k-1}), \tag{7}$$

$$i = 2, \dots, N_1 - 1, \quad k = 2, \dots, N_2 - 1.$$

Весовые коэффициенты позволяют при применении метода (7) уменьшить эффект сглаживания за счет придания большего веса средним точкам окрестности.

Рассмотренные выше методы имеют существенный недостаток – при их реализации преобразование осуществляется на уровне отдельных пикселей в пространственной области, вследствие чего построенные контуры, зачастую, не являются гладкими линиями.

Предлагаемый в данной работе метод субполосного дифференцирования изображений разработан на основе результатов исследований, полученных при разработке метода субполосной интерполяции изображений [2]. Интерполяция в указанном методе осуществлена на основе реализации формулы Ньютона-Лейбница:

$$\hat{u}(t) = u_0 + \int_0^t f(x) dx,$$

примененной к двумерной функции. В [2] показано, что для интерполяции изображений на основе субполосного анализа-синтеза можно использовать приведенные ниже соотношения.

Исходное изображение представим в виде прямоугольной матрицы вещественных чисел $U = (u_{m_1, m_2})$, $m_1 = 1, 2, \dots, M_1$, $m_2 = 1, 2, \dots, M_2$, соответствующих яркости отдельных пикселей интерполируемого изображения. Значения интерполирующего изображения $\hat{U} = (\hat{u}_{n_1, n_2})$, $n_1 = 1, 2, \dots, N_1$, $n_2 = 1, 2, \dots, N_2$ должны быть вычислены в D_1 и D_2 точках между пикселями исходного изображения при условии выполнения интерполирующих равенств в узлах интерполяции:

$$\begin{aligned} \hat{u}_{D_1(m_1-1)+1, D_2(m_2-1)+1} &= u_{m_1, m_2}, \\ m_1 &= 1, 2, \dots, M_1, \quad m_2 = 1, 2, \dots, M_2. \end{aligned} \quad (8)$$

Размерности исходного и интерполирующего изображений связаны следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} N_1 &= D_1(M_1 - 1) + 1, \\ N_2 &= D_2(M_2 - 1) + 1. \end{aligned} \quad (9)$$

Для решения указанной задачи в [2] предложен метод субполосной интерполяции изображений, который позволяет избирательно задавать свойства результатов интерполяции в области пространственных частот (свойство гладкости). Достигается данная характеристика метода за счет применения собственных векторов субполосных матриц [3], соответствующих различным подобластям пространственных частот, а именно – для получения более гладких результатов интерполяции следует применять субполосные матрицы, соответствующие подобластям более низких пространственных частот. Так, в рамках теории субполосного анализа-синтеза [3] требование наибольшей гладкости результатов интерполяции изображения может быть сформулировано как требование размещения основной доли энергии результирующего изображения в области низких частот (в первой подобласти пространственных частот Ω_{11} [4]):

$$\Omega_{11} = \{(\alpha, \beta) \mid -\bar{\Omega}_1 \leq \alpha < \bar{\Omega}_1, \quad -\bar{\Omega}_2 \leq \beta < \bar{\Omega}_2\}, \quad (10)$$

где $\bar{\Omega}_1$ и $\bar{\Omega}_2$ – параметры, значение которых влияет на гладкость результата интерполяции:

$$\bar{\Omega}_1 = \frac{\pi}{K_1 D_1} \quad \text{и} \quad \bar{\Omega}_2 = \frac{\pi}{K_2 D_2},$$

K_1 и K_2 – коэффициенты, значения которых выбираются интерактивно.

Обозначим

$$U_u = \{u_{ik}\}, \quad i = 2, \dots, M_1, \quad k = 2, \dots, M_2,$$

$$\hat{U}_u = \{\hat{u}_{ik}\}, \quad i = 2, \dots, N_1, \quad k = 2, \dots, N_2,$$

Q_1 и Q_2 – матрицы, состоящие из $M_1 - 1$ и $M_2 - 1$ собственных векторов субполосных матриц $A_{\bar{\Omega}_2}$ и $A_{\bar{\Omega}_1}$ [3], соответствующих подобластям пространственных частот Ω_{11} (10);

B_1 и B_2 – квадратные нижние треугольные матрицы, состоящие из единиц и нулей, размерностей $(N_1 - 1) \times (N_1 - 1)$ и $(N_2 - 1) \times (N_2 - 1)$ соответственно;

\vec{e}_1, \vec{e}_2 – состоящие из единиц векторы, размерностей $(N_1 - 1)$ и $(N_2 - 1)$ соответственно;

$\vec{\gamma}_1, \vec{\gamma}_2$ – векторы, размерностей $M_1 - 1$ и $M_2 - 1$, состоящие из единиц;

\hat{B}_1, \hat{B}_2 – матрицы размерностей $(M_1 - 1) \times (N_1 - 1)$ и $(M_2 - 1) \times (N_2 - 1)$ соответственно, состоящие из строк матриц B_1 и B_2 с номерами $D_1 + 1, 2D_1 + 1, \dots, (M_1 - 1)D_1 + 1$ и $D_2 + 1, 2D_2 + 1, \dots, (M_2 - 1)D_2 + 1$ соответственно.

Тогда соотношение для вычисления интерполирующего изображения \hat{U}_u имеет вид [2]:

$$\hat{U}_u = u_{11} \vec{e}_1 \vec{e}_2^T + B_1 Q_1 (\hat{B}_1 Q_1)^{-1} (U_u - u_{11} \vec{\gamma}_1 \vec{\gamma}_2^T) (Q_2^T \hat{B}_2^T)^{-1} Q_2^T B_2^T. \quad (11)$$

В выражении (11) обратные матрицы для матриц $\hat{B}_1 Q_1$ и $(\hat{B}_2 Q_2)^T$ существуют, поскольку они являются произведением неособенных матриц соответственно.

Учитывая формулу Ньютона-Лейбница и тот факт, что умножение на матрицы B_1 и B_2^T слева и справа соответствует операции интегрирования по строкам и столбцам, можно показать, следующий фрагмент выражения (11):

$$Q_1 (\hat{B}_1 Q_1)^{-1} (U_u - u_{11} \vec{\gamma}_1 \vec{\gamma}_2^T) (Q_2^T \hat{B}_2^T)^{-1} Q_2^T,$$

которое определяет результат субполосного дифференцирования интерполирующего изображения.

Очевидно, что при выборе количества промежуточных точек

$$D_1 = D_2 = 1, \quad (12)$$

результат интерполяции (11) совпадает с исходным изображением. Следовательно, при выполнении соотношений (12) матрица Y

$$Y = Q_1 (\hat{B}_1 Q_1)^{-1} (U_u - u_{11} \vec{\gamma}_1 \vec{\gamma}_2^T) (Q_2^T \hat{B}_2^T)^{-1} Q_2^T \quad (13)$$

определяет результат субполосного дифференцирования исходного изображения.

Для получения более резкого изображения \tilde{U} , чем исходное изображение U , можно использовать следующее выражение:

$$\tilde{U} = U + \tilde{Y}, \quad (14)$$

где \tilde{Y} – результат градационной коррекции изображения Y , при которой диапазон значений элементов матрицы \tilde{Y} не выходит за пределы диапазона значений элементов матрицы U .

Выражения (13), (14) определяют новый метод увеличения резкости изображений на основе субполосного дифференцирования.

Для проверки работоспособности данного метода были проведены вычислительные эксперименты по улучшению резкости изображения на основе предложенного метода и операторов Робертса, Собела и Превитта. Так, при вычислительных экспериментах было использовано исходное изображение, приведенное на рис. 1.



Рис. 1. Исходное изображение

Результаты дифференцирования и улучшения резкости на основе анализируемых методов приведены на рис. 2 и рис. 3.

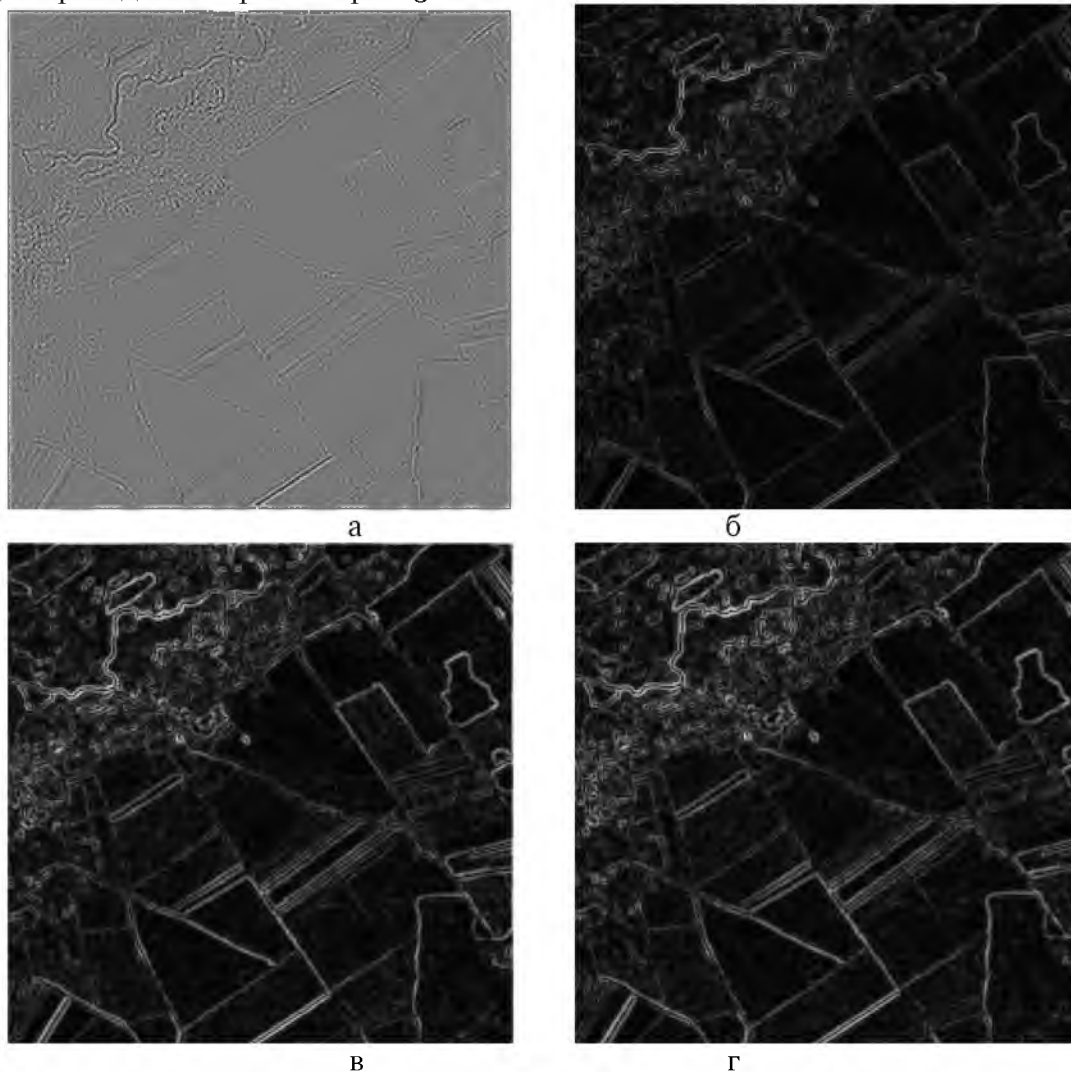
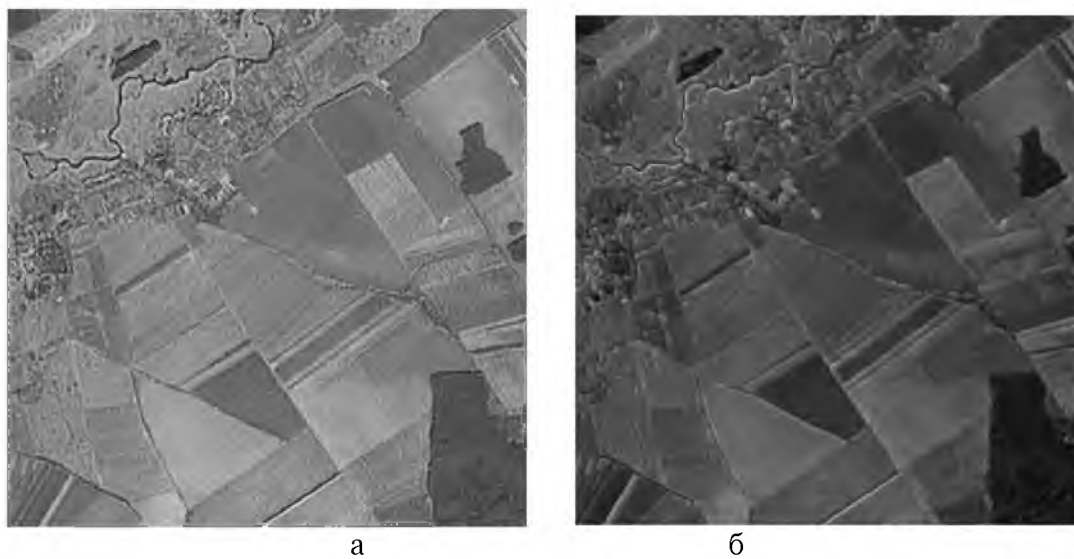
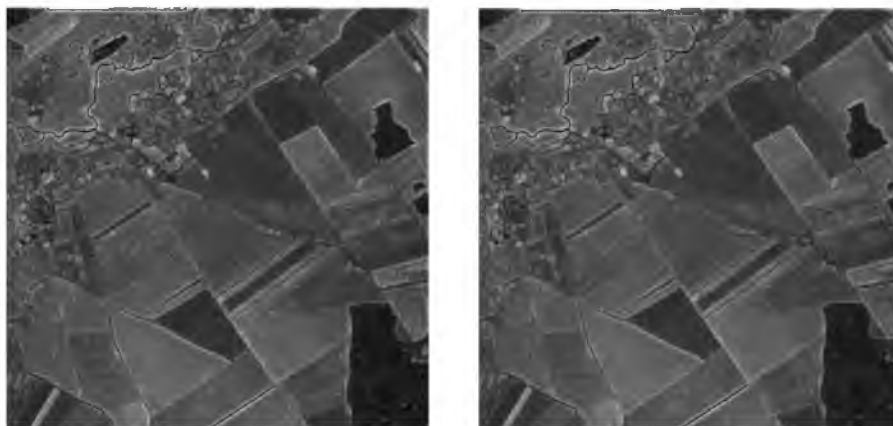


Рис. 2. Результаты дифференцирования исходного изображения:
а – субполосное дифференцирование, б – оператор Робертса,
в – оператор Собела, г – оператор Превитта





в

г

Рис. 3. Результаты улучшения резкости:
а – субполосное дифференцирование, б – оператор Робертса,
в – оператор Собела, г – оператор Превитта

Изображения, приведенные на рис. 3, демонстрируют, что изображение на рис. 3а (получено при субполосном дифференцировании) является более резким по сравнению с изображениями на рис. 3б, рис. 3в и рис. 3г. Также показано, что при улучшении резкости на основе субполосного дифференцирования выделяется больше мелких объектов без существенного искажения изображения, в отличие от результатов применения других рассматриваемых методов.

Проведенный эксперимент, а также другие многочисленные вычислительные эксперименты продемонстрировали работоспособность предложенного в работе метода улучшения резкости и его преимущество по сравнению с методами, основанными на применении операторов Робертса, Собела и Превитта.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-07-00257-а.

Список литературы

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
2. Жилияков, Е.Г. Алгоритм масштабирования изображений [Текст] / Е.Г. Жилияков, А.А. Черноморец // Вопросы радиоэлектроники, Сер. ЭВТ. – 2013. – Вып. 1. – С. 155-163.
3. Жилияков, Е.Г. Вариационные методы анализа сигналов на основе частотных представлений [Текст] / Е.Г. Жилияков, С.П. Белов, А.А. Черноморец // Вопросы радиоэлектроники, Сер. ЭВТ. – 2010. – Вып. 1. – С. 10-25.
4. Черноморец, А.А. О формировании квазициклических компонент изображений с заданными частотными свойствами [Текст] / В.В. Красильников, А.А. Черноморец // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. – 2010. – № 13 (84). – Вып. 15/1. – С. 168-174.

ABOUT IMAGE SHARPNESS INCREASING ALGORITHM BASED ON SUBBAND DIFFERENTIATION

E.G. ZHILYAKOV
A.A. CHERNOMORETS
E.V. BOLGOVA

*Belgorod National
Research
University*

*e-mail:
zhilyakov@bsu.edu.ru
chernomorets@bsu.edu.ru*

The image sharpness increasing algorithm based on subband differentiation is given in the article. Given algorithm allows to take into account the frequency properties of images.

Keywords: image, edge, differentiation, subband analysis, image sharpness