



РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Н.Г. ПЕРЕХОД
Н.Н. УШАНОВА
В.Н. ВИНТАЕВ
В.А. ЛИХАЧЕВ

*Белгородский университет
потребительской
кооперации*

e-mail: viktor.vn2010@yandex.ru

Разработка операций обработки изображений, представляющих собой продолженные на континуальный спектр состояний версии популярных операций, позволяет строить более тонкую и оптимизируемую по качественным показателям обработку изображений.

Ключевые слова: изображение, оператор, спектральное представление оператора, операция, пространственный спектр, функция рассеяния точки, линейные элементы, полоса частот, обобщенная бинарная билинейная операция, вариационный метод.

Улучшение характеристик изображений, и в первую очередь повышение четкости, связано, прежде всего, с построением удачных решений по усилению высших гармоник пространственных спектров изображений, восстановлению утраченных полос спектров с высшими модами, фильтрацией высших гармоник спектров на фоне шумов.

Обработка изображения может быть представлена как покомпонентное произведение спектров изображения и оператора, вычислимое представление которого и реализует выполняемый над изображением алгоритм. При этом непосредственное применение дифференциальных (градиентных) операторов порядка не ниже единицы к изображениям [1, 2, 3, 4] для улучшения четкости, в силу линейного (или более высокого порядка) нарастания амплитудных спектров операторов в области высших мод, в условиях часто имеющего место пересечения полос пространственных спектров шумовой составляющей и образов реальных объектов приводит к усилению шумовой составляющей, нередко подавляющей полезную информацию. Необходимо отметить следующие свойства: носители изображений и их пространственных спектров финитны, количество гармоник дискретных двумерных спектральных представлений цифровых изображений не больше удвоенного числа отсчетов, представляющих изображения.

Цели работы.

1. Снизить на нецелую величину (с продолжением на вещественные значения) порядок дифференциального оператора целого порядка так, чтобы нарастание амплитуд его спектра в зоне высших мод было существенно ослаблено для более эффективного использования анизотропии радиусов корреляции выделяемых линейных элементов в зависимости от пространственной ориентации оси исчисления приращений при дифференцировании.

2. Реализовать возможность создания серии малых возмущений или малых вариаций операций алгоритма коррекции четкости изображения с нарастающей неидентичностью поведения огибающей модуля спектрального представления результата работы алгоритма в области высоких мод вдоль параметра, упорядочивающего возмущения и вариации в серии.

В теории обобщенных функций [5] операция нецелого дифференцирования D^α задается разновидностями интегральных выражений:



$$f^{(\alpha)}(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_x^\omega (x-y)^{\alpha-1} f(y) dy, \tag{1}$$

$$f^{(\alpha)}(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x (x-y)^{\alpha-1} f(y) dy,$$

где $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция, $f(y)$ – функция, элемент, по крайней мере, Гильбертова пространства, применение которых к элементам изображений требует громоздких вычислительных конструкций.

Для применения к изображениям, моделируемым допускающими Фурье-представление функциями, предлагается оператор нецелого дифференцирования D_x^α, D_y^β ($0 \leq \alpha, \beta \leq 1$) в виде

$$D_x^\alpha D_y^\beta S(x, y) = \int (J\omega_x)^\alpha (J\omega_y)^\beta F_S(\omega_x, \omega_y) e^{J(x\omega_x + y\omega_y)} d\omega_x d\omega_y, \tag{2}$$

где $F_S(\omega_x, \omega_y)$ – прямое двумерное преобразование Фурье функции $S(x, y)$; ω_x, ω_y – координаты на спектральной плоскости, J – мнимая единица (в общем случае α и β могут быть любыми вещественными числами).

Для целых порядков и в одномерном варианте основная связь между спектрами и их образами описывается известным выражением [6]

$$D^k f(x) = \int_\Omega (J\omega)^k F_f(\omega) e^{J\omega x} d\omega, \tag{3}$$

где D^k – дифференциальный оператор порядка k ; Ω – носитель спектра.

Для построения обсуждаемой версии дифференциального оператора это равенство продолжается в область нецелых значений порядка в виде

$$D^\alpha f(x) = \int_\Omega (J\omega)^\alpha F_f(\omega) e^{J\omega x} d\omega. \tag{4}$$

Для этого необходимо ввести аксиоматически правило дифференцирования тригонометрических функций:

$$\left. \begin{aligned} \cos^{(\alpha)}(x) &= \cos\left(x + \frac{\pi}{2}\alpha\right) \\ \sin^{(\alpha)}(x) &= \sin\left(x + \frac{\pi}{2}\alpha\right) \end{aligned} \right\}, \tag{5}$$

$$\left. \begin{aligned} \cos^{(\alpha)}(\omega x) &= \omega^\alpha \cos\left(\omega x + \frac{\pi}{2}\alpha\right) \\ \sin^{(\alpha)}(\omega x) &= \omega^\alpha \sin\left(\omega x + \frac{\pi}{2}\alpha\right) \end{aligned} \right\}. \tag{6}$$

При целых значениях α эти правила очевидны. С использованием формулы Эйлера для тригонометрической формы комплексных величин соотношения (6) могут быть объединены в соотношение вида

$$\begin{aligned} (e^{J\omega x})^{(\alpha)} &= (\cos(\omega x) + J \sin(\omega x))^{(\alpha)} = \cos^{(\alpha)}(\omega x) + J \sin^{(\alpha)}(\omega x) = \\ &= \omega^{(\alpha)} \left(\cos\left(\omega x + \frac{\pi}{2}\alpha\right) + J \sin\left(\omega x + \frac{\pi}{2}\alpha\right) \right) = \omega^\alpha e^{J\left(\omega x + \frac{\pi}{2}\alpha\right)} = \omega^\alpha e^{J\omega x} e^{J\frac{\pi}{2}\alpha} = \\ &= \omega^\alpha e^{J\omega x} (J)^\alpha = (J\omega)^\alpha e^{J\omega x}, \end{aligned} \tag{7}$$

которое и резюмирует введенное аксиомами (5) и (6) правило дробного дифференцирования осциллирующей экспоненты, положенное в основу выражений (2) и (4).

Двумерные (2) (и выше) версии выражения (4) осуществляются суперпозицией одномерных преобразований (4).

Норма градиентного фильтра может быть выбрана в виде нормы вектора

$$\text{grad}_{\alpha\beta}(S) = ((D_x^\alpha S)^2 + (D_y^\beta S)^2)^{1/2}. \quad (8)$$

Так как в соотношении (8) при $\alpha, \beta < 1$ модули $|(\omega_x)^\alpha|, |(\omega_y)^\beta|$ растут в области высших мод спектров гораздо медленнее, чем при $\alpha, \beta > 1$, то располагающуюся в этой области шумовую составляющую $\text{grad}_{\alpha\beta}(S)$ усиливает слабее, чем градиентный фильтр, построенный на базе операции дифференцирования целого порядка, выявляя градации и контуры образов объектов при порядках α и β , находящихся в пределах $0.5 \leq \alpha, \beta \leq 0.8$, практически адекватно градиентным фильтрам с целыми значениями α и β и равными 1.

На рис. 1 приведены результаты выявления контуров (на изображении участка аэродрома, снятого со спутника КВР-1000) градиентным фильтром порядка 0.6 и 0.9.



Рис. 1. Градиентная фильтрация изображения порядка 0.6 (слева) и 0.9 (справа)

Основным недостатком правого снимка, с рассматриваемой точки зрения, уместно считать то, что фильтрация более высокого порядка выявила даже все неоднородности на существующих протяженных элементах, что, как правило, затрудняет запуск в дальнейшем процедур селекции протяженных элементов.

В работе [7] представлен метод и результаты улучшения четкости изображения путем аддитивной добавки к яркости исходного изображения второй «текущей» ее смешанной производной, вычисляемой на самом исходном изображении. На рис. 2 и 3 представлены вычисленные дискретным преобразованием Фурье амплитудные спектры исходного и улучшенного изображений, которые в модели формирования изображений Бейтса и Мак Доннела [1] можно связать соотношением (9)

$$S_R(x, y) = S_H(x', y') * \Phi PT(x, y, x', y') + n(x, y), \quad (9)$$

где S_R – размытое изображение; S_H – улучшенное (идеальное) изображение; ΦPT – функция рассеяния точки; * – интегральная операция свертки; n – шумовая составляющая. По теореме о Фурье-представлении свертки функций [1, 2] получаем (обозначим Фурье процедуру как $F(*)$):

$$F(S_R) = F(S_H) \cdot F(\Phi PT) + F(n), \quad (10)$$

где $F(\Phi PT)$ – спектральное представление ФРТ для соотношения (9) (и комплексная двумерная пространственно-частотная передаточная характеристика тракта транзита пространственных частот от «идеального» изображения до регистрирующего транспаранта). В рассматриваемой задаче пренебрегаем наличием шума, что, собственно, можно увидеть и на приведенных изображениях, и тогда $F(\Phi PT)$ можно просто найти покомпонентным делением соответствующих спектров из соотношения (10):

$$F_{ij}(\Phi PT) = F_{ij}(S_R) / F_{ij}(S_H), \quad (11)$$

где индексами i и j обозначены соответствующие комплексные значения аппликат двумерных дискретных пространственных спектров. Здесь и всюду ниже речь идет о выполнении дискретных преобразований.



При этом учитывается, что оба изображения могут иметь только и только одни и те же гармоники с нулевой амплитудой, а спектр ФРТ не должен иметь гармоник с нулевой амплитудой. Поэтому появление нуля амплитуды какой-либо гармоники в знаменателе при вычислении спектра ФРТ служит признаком обработки исключительной ситуации с присвоением вычисляемому отсчету заранее обусловленного значения, в том числе и нулевого. Нули в числителе при этом транслируются в нули на отсчетах спектра ФРТ. Нули на спектре ФРТ и случайные всплески удаляются медианной фильтрацией вычисленного спектра [8].



Рис. 2. Амплитудный спектр исходного изображения

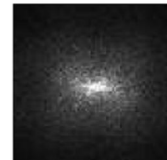


Рис. 3. Амплитудный спектр улучшенного изображения

Легко заметить при этом существенную насыщенность периферии спектра S_H высшими гармониками, что означает увеличение радиуса носителя амплитудного спектра и говорит о восстановлении авторами работы [7] тонкой структуры изображения.

На рис. 4 и 5 приведены в масштабе 1:64 вычисленный и сглаженный медианым фильтром с последующим сглаживанием равномерно заполненной маской 7x7 с нормализацией результата амплитудный спектр ФРТ, связывающей оба изображения.



Рис. 4. Спектр функции рассеяния точки

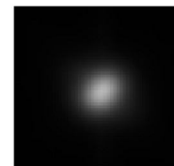


Рис. 5. Сглаженный спектр функции рассеяния точки

На рис. 6 представлена в масштабе 64:1 искомая ФРТ в сглаженном виде.

На рис. 7 и 8 в соответствующих масштабах соответственно показаны версии спектров возмущенной ФРТ_v, полученных покомпонентным суммированием вычисленной ФРТ и ФРТ выполненной смешанной производной над ФРТ порядка 0.25 по оси X и порядка 0.25 по оси Y:

$$\Phi PT_v = \Phi PT + D_x^{0.25} D_y^{0.25} (\Phi PT), \tag{12}$$

при этом

$$F_{ij}(\Phi PT_v) = F_{ij}(\Phi PT) + (J\omega_{xi})^{0.25} (J\omega_{yj})^{0.25} F_{ij}(\Phi PT), \tag{13}$$

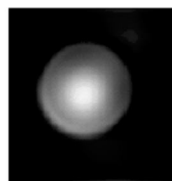


Рис. 6. Синтезированная функция рассеяния точки (сглаженная)

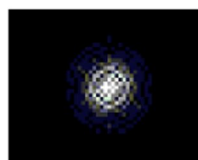


Рис. 7. Возмущенный спектр функции рассеяния точки

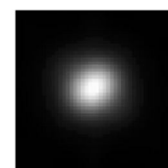


Рис. 8. Возмущенный и сглаженный спектры функции рассеяния точки

Полученные версии спектров обладают заметно увеличенным радиусом за счет небольшого усиления периферийных гармоник примененным оператором дифференцирования.

Операция покомпонентного деления спектра S_R на полученный спектр ФРТ

$$F_{\tilde{y}}(S_H) = F_{\tilde{y}}(S_R) / F_{\tilde{y}}(\Phi PT_T) \quad (14)$$

приводит к спектру с увеличенным радиусом по отношению к спектру, полученному в работе [7], и соответственно к изображению с повышенными характеристиками четкости. Соответствующий амплитудный спектр приведен на рис. 9.

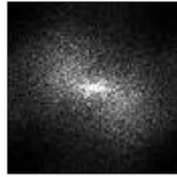


Рис. 9. Амплитудный спектр нового восстановленного изображения

На рис. 10 и 11 представлены изображения и их спектральные представления, соответственно: расфокусировка исходного цифрового изображения с использованием вычисленной ФРТ и восстановление его четкости по описанной методике с использованием операций дифференцирования порядка 0.12 и 0.25.

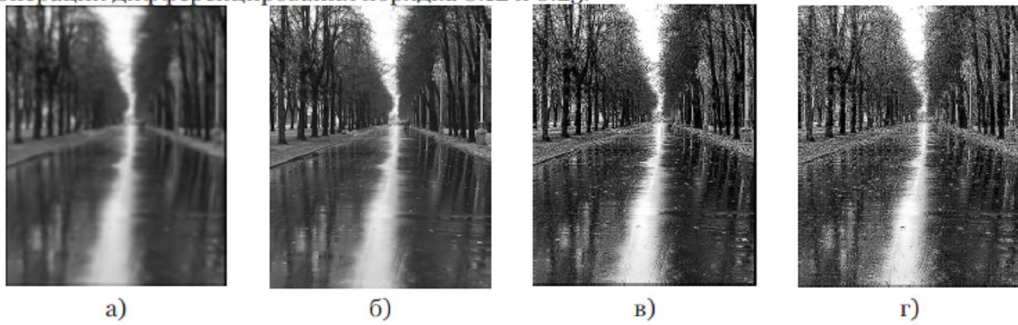


Рис. 10. Цифровые черно-белые изображения

- а) S_R – расфокусированное конволюцией с вычисленной ФРТ исходное изображение S_H ;
 б) исходное изображение S_H ;
 в) S_H – результат деконволюции S_R с ФРТ, возмущенной оператором порядка 0.12;
 г) S_H – результат деконволюции S_R с ФРТ, возмущенной оператором порядка 0.25.

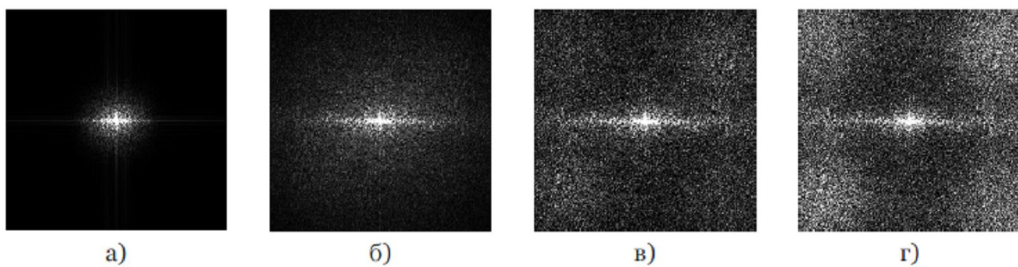


Рис. 11. Амплитудные спектры пространственных частот изображений

- а) S_R – расфокусированного изображения;
 б) S_H – исходного изображения;
 в) S_H – восстановленного с оператором порядка 0.12;
 г) S_H – восстановленного с оператором порядка 0.25.



Относительно малых вариаций и возмущений алгоритмов предлагается реализовать малые возмущения операций бинарного вида (тернарного и т.д.), т.к. возмущения одноместных операций просто приводятся к локальным преобразованиям данных – результатам одноместных операций.

Очевидно, на практике речь идет об операции умножения: возмущения во взаимных сдвигах ее частичных строк или малые возмущения самой таблицы умножения [9] идентифицируются однозначно некоторым (точнее специальным) параметром β . В ряде работ версии подобных операций названы обобщенной бинарной билинейной операцией. Действительно, все частичные строки в операции – это множимое, стробированное соответствующим разрядом множителя. Эти же строки – коэффициенты полинома на степенях γ – основания позиционной системы счисления, представляющего входные операнды. Записав этот же полином по степеням параметра (управляющего) β , равного, допустим $\gamma + 0.000001$ мы осуществим задуманное возмущение и покажем заодно, что можем осуществить взаимный сдвиг двоичных кодов на любую долю двоичного разряда (метод возмущения и обобщения операции и возмущения спектров изображений и представленной версии дифференциального оператора разработан в более высоких и обоснованных технологических версиях, но в рамках данной статьи он не может быть представлен).

На основе разложения в ряд по степеням малого параметра спектрального представления дифференциального оператора, возмущаемого предлагаемой обобщенной операцией умножения, можно заметить эффективное увеличение порядка оператора в области высших мод спектров в соответствии с соотношением [10]:

$$F(D^\alpha S) = (J\omega)^\alpha \cdot \begin{cases} F_s(\omega)(1 + \frac{\|V_i\|}{\omega_c} \omega^{\omega_c}), \|V_i\| \ll 1; \\ F_s(\omega)(1 + \frac{\|V_i\|}{\omega_c} \omega), \|V_i\| < 1, \end{cases} \quad (15)$$

где ω_c – средневзвешенная пространственная частота V_i – матрица возмущения таблицы умножения, $\|*\|$ – функция вычисления нормы. Здесь и в формуле (16) средневзвешенная и мгновенная частоты представлены нормой радиуса-вектора (с проекциями ω_x, ω_y в двумерном спектральном портрете) от начала координат в портрете к пикселу, светящемуся с яркостью, равной амплитуде гармоники.

Для матрицы с нормой 0.3 свойство дистрибутивности возмущенной операции умножения выполняется с примерной погрешностью в 5%. При этом спектр изображения при свертке его с единичной функцией при возмущении операции описывается приблизительно формулой

$$F_s^{J_i}(\omega) \approx F_s(\omega)(1 + \frac{\|V_i\|}{\omega_c} \omega). \quad (16)$$

Представленные операции разработаны, в том числе, и для вариационного метода синтеза алгоритмов и операций с заданной целевой функцией обработки или заданным целевым функционалом с исследованием результатов вдоль приведенного параметра β .

На рис. 12 приведено изображение со спутника Ресурс-ДК, полученное с матрицы оптико-электронного преобразователя (ОЭП) фокальной системы спутника.

На рис. 13 представлен результат нормализации этого изображения – обработки алгоритмом FLAASH 4.1 программы ENVI Version 4.1. (корпорации Research Systems, Inc) корректирующим влияние атмосферы инструментарием спектральной обработки. Легко заметить повышенную четкость изображения на рис. 13 по отношению к четкости на исходном изображении. После вычисления ФРТ, связывающего эти два изображения вы-



полнялась деконволюция ФРТ и исходного изображения (рис. 12) (описанным выше методом отношений спектров: с домножением числителя и знаменателя на комплексно сопряженный знаменателю спектр) с возмущением, соответствующим формуле (16). Результат показан на рис. 14, спектральные представления результатов, полученных после применения программы ENVI и деконволюции с возмущением, приведены на рис. 15 и 16. Спектр, приведенный на рис. 16, свидетельствует о достижении повышенной четкости.



Рис. 12. Изображение со спутника Ресурс-ДК, полученное с матрицы ОЭП



Рис. 13. Изображение, после обработки программой ENVI 4.1



Рис. 14. Изображение после деконволюции с ФРТ с малым возмущением алгоритма деконволюции

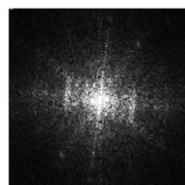


Рис. 15. Пространственный спектр изображения после обработки программой ENVI 4.1

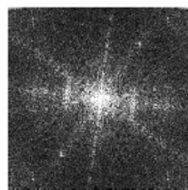


Рис. 16. Пространственный спектр изображения после деконволюции с малым возмущением

Вывод.

Использование для коррекции четкости изображения метода возмущения порождающей изображение ФРТ специальным градиентным оператором с нецелым порядком и параметрически заданное возмущение операции умножения при выполнении свертки изображения с корректирующим ядром порождают в пространстве дискретных спектральных представлений однозначно определяемые дополнительные высшие гармоники, что в свою очередь свидетельствует о дополнительном увеличении четкости изображений.

Литература

1. Бейтс Р. Восстановление и реконструкция изображений / Р. Бейтс, М. Мак-Доннел. – М.: Мир, 1989. – 336 с.
2. Прэтт У. Цифровая обработка изображений / У. Прэтт. – М.: Мир, Кн.4, 1982, 112 с.
3. Казмирчук А.А. Методы восстановления изображений по блокам двумерного спектра / А.А.Казмирчук // Распараллеливание обработки информации: сб. докл. VI Всесоюз. шк. – семинара. – Львов, 1987. – Ч.2. – С. 71-72.
4. Karini H.A. Techniques For Automated Extraction of Roadway Inventory Features From High-Resolution Satellite Imagery / H.A. Karini, X. Dai, S. Khorran, A.J. Khattack, J.E.Hummen // Geocanto Int., 1999. – 14. – №2. – P. 5-16.



5. Брычков Ю.А. Интегральные преобразования обобщенных функций / Ю.А. Брычков. – М.: Наука, 1977. – 286 с.
6. Никольский С.М. Курс математического анализа / С.М. Никольский. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 592 с.
7. Созонова Т.Н., Красильников В.В. Повышение четкости изображений на основе вариационного метода оценки производных // Научные ведомости БГУ. Серия История. Политология. Экономика. Информатика. – 2010. – № 7 (78), вып. 14/1. – С. 176-181.
8. Ataman E. A Fast Method for Real-time Median Filtering / E. Ataman, V.K. Astre, K.M.Worg // IEEE Trans. Acoust. Speech. and Signal Process. – 1980. – 28. – №4. – P.415-421.
9. Ушакова Н.Н. О вариационном методе синтеза линейной модели дистанционного тракта / Н.Н.Ушакова // Современные проблемы технического, естественно-научного и гуманитарного знания: сб. докл. регион. науч.-практ. конф. – Губкин, 2001. – С.163-168.
10. Vintaev V.N., Gadzhiev M.G., Urazbakhtin A.I., Ushakova N.N. Modeling of Verification Operation Modes of Radio-Technical Systems. TELECOMMUNICATIONS AND RADIO ENGINEERING. New York. – Begell House, 2005, Inc. Vol. 64, 393-406 p.

DEVELOPMENT OF SPECIAL OPERATIONS FOR THE PROBLEM OF PROCESSING DIGITAL IMAGES

**N.G. PEREKHOD
N.N. USHAKOVA
V.N. VINTAEV
V.A. LIKHACHEV**

*Belgorod University
of Consumer's Cooperation*

e-mail: viktor.vn2010@yandex.ru

Development of image processing operations, which are extended to the continuum spectrum of the states version of the prevalent operations, enables to construct more subtle and optimized for quality indicators image processing.

Key words: Image, operator, spectral expansion of operator, operation, spatial spectrum, point spread function, lineaments, band, generalized binary bilinear operation, variational method.