

УДК 004.932

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЕФОКУСИРОВКИ И ШУМА НА КАЧЕСТВО ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

В.В. Беззубик, Н.Р. Белашенков, В.О. Никифоров

Предложен комбинированный подход к количественной оценке контраста и резкости цифрового изображения. Проведен анализ влияния дефокусировки и пространственного шума на качество изображения. Получены зависимости контраста и резкости от дефокусировки при различных уровнях гауссова шума. Показана необходимость совместного учета контраста и резкости для оценки качества цифровых изображений.

**Ключевые слова:** цифровая обработка изображений, контраст, резкость, дефокусировка, шум.

### Введение

Решение проблемы корректного выбора количественных критериев оценки качества цифровых изображений имеет большое значение при разработке и построении наблюдательных систем с фотоэлектронными каналами регистрации. Наиболее важными параметрами изображения, определяющими его качество при чувственном восприятии, принято считать контраст и резкость. Аберрации оптических систем, точность выбора положения наилучшей фокусировки, условия освещенности наблюдаемых объектов – вот далеко не полный перечень факторов, влияющих на качество изображения, формируемого на приемной площадке матричного фотоприемника. Дополнительное негативное влияние на качество цифрового изображения оказывают неустранимые шумы каналов регистрации. Именно их наличие во многом сводит на нет усилия разработчиков по оптимизации алгоритмов улучшения качества изображений путем адаптивного управления характеристиками тракта регистрации.

В ранее опубликованных работах, посвященных исследованиям проблемы выбора количественных критериев контраста и резкости цифровых изображений [1–15], обоснован ряд методов, позволяющих с той или иной достоверностью вычислять количественные меры контраста и резкости. Однако само количество этих работ и разнообразие описанных в них подходов дают основание полагать, что эти исследования преждевременно считать завершенными.

Исторически первым критерием качества цифрового изображения был выбран контраст как величина, наиболее удобная для количественной оценки. Первоначально величину контраста вычисляли применительно к изображению в целом, руководствуясь известной формулой Майкельсона [16]. Однако достаточно скоро стало ясно, что данный критерий, сформулированный для периодических структур типа интерференционных картин, не подходит для произвольных изображений. В результате был предложен принцип вычисления локального контраста для каждой точки изображения по значениям интенсивностей в некоторой ее окрестности с последующим определением глобального контраста путем суммирования значений локальных контрастов. Для произвольных цифровых изображений было сформулировано и стало общепринятым определение контраста как отношения среднеквадратичного отклонения значений интенсивностей, регистрируемых матричными элементами (пикселями) фотоприемника, к среднему в пределах изображения значению интенсивности [1]. Данное определение широко применяется в настоящее время для вычисления контраста изображения как непосредственно, так и путем суммирования локальных контрастов в отдельных его точках. В более поздних работах авторами были предложены иные подходы к расчету контраста цифровых изображений, основанные, например, на анализе гистограмм яркости. Однако в большинстве публикаций ответственные авторы оставляли замечания о существенном снижении эффективности предлагаемых ими алгоритмов при наличии на изображении мелкомасштабных пространственных шумов.

Другой важнейшей характеристикой цифрового изображения является резкость, т.е. степень размытости границ между соседними участками изображения с разной оптической плотностью (яркостью). Для количественной оценки резкости, как правило, применяют методы анализа, основанные на выделении контуров, присутствующих на изображении объектов. Обычно используют свертки различных операторов (Робертса, Собеля, Превитта, Лапласа и других) для интенсивностей изображения в отдельных его точках с последующим суммированием. Эти методы весьма неплохо работают для контрастных изображений с четкими границами объектов и существенно снижают свою эффективность при уменьшении контраста и наличии пространственных шумов. Рекомендации некоторых авторов по выполнению предварительной частотной либо медианной фильтрации изображений с целью уменьшения вклада шумовой компоненты в результат вычисления резкости со всей очевидностью демонстрируют ограниченность предлагаемых приемов.

Проблема количественного определения контраста и резкости изображений не стояла бы столь остро, если бы вопрос касался лишь оценки качества изображения с точки зрения чувственного восприятия человека. Однако в наблюдательных системах, включающих оптико-цифровой канал регистрации изображения с функцией пассивной автофокусировки (т.е. автофокусировки, осуществляемой в результате анализа получаемых цифровых изображений с последующим выбором положения наилучшей фокусировки), количественная оценка контраста и резкости становится принципиально важной. Особую значимость при этом приобретают достоверность указанной оценки, а также избирательность и производительность осуществляющих ее алгоритмов. Под достоверностью контраста и резкости будем понимать устойчивость алгоритма их вычисления к наличию пространственных шумов на изображении, а под избирательностью – возможность различать малые изменения этих величин, связанные, например, с погрешностями определения положения наилучшей фокусировки. Проблема заключается в поиске компромисса между указанными характеристиками, который в различных системах достигается по-разному.

В работе [15] были представлены результаты исследования нового метода определения контраста цифровых изображений, с помощью которого можно существенно уменьшить влияние пространственных шумов без выполнения предшествующих операций преобразования изображений, неизбежно снижающих их информативность. В настоящей работе предложен комбинированный подход к вычислению количественных мер контраста и резкости цифровых изображений с учетом влияния имеющихся на них пространственных шумов и дефокусировки, показана необходимость их совместного учета для оценки качества цифровых изображений.

### Описание метода и эксперимент

Проанализируем возможность использования критериев контраста и резкости для оценки качества цифровых изображений с учетом влияния дефокусировки и имеющихся на них пространственных шумов. Для этого рассмотрим монохромное цифровое изображение размером  $M \times N$  и для каждого его пикселя с координатами  $(i, j)$  и яркостью  $I^{i,j}$  определим симметричную окрестность  $m \times n$ , где величины  $m$  и  $n$  являются нечетными и принимают значения больше 1. Далее определим контраст  $C$  и резкость  $S$  изображения в соответствии с выражениями

$$C = \sum_{i=(m+1)/2}^{M-(m-1)/2} \sum_{j=(n+1)/2}^{N-(n-1)/2} \sqrt{(X_c^{i,j})^2 + (Y_c^{i,j})^2} \quad (1)$$

и

$$S = \sum_{i=(m+1)/2}^{M-(m-1)/2} \sum_{j=(n+1)/2}^{N-(n-1)/2} \sqrt{(X_s^{i,j})^2 + (Y_s^{i,j})^2}, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} X_c^{i,j} &= \frac{1}{\bar{I}^{i,j}} \sum_{p=(1-m)/2}^{p=(m-1)/2} \sum_{q=(1-n)/2}^{q=(n-1)/2} p \times (I^{i+p,j+q} - \bar{I}^{i,j}), \\ Y_c^{i,j} &= \frac{1}{\bar{I}^{i,j}} \sum_{p=(1-m)/2}^{p=(m-1)/2} \sum_{q=(1-n)/2}^{q=(n-1)/2} q \times (I^{i+p,j+q} - \bar{I}^{i,j}), \\ X_s^{i,j} &= \frac{1}{\bar{I}^{i,j}} \sum_{p=(1-m)/2}^{p=(m-1)/2} \sum_{q=(1-n)/2}^{q=(n-1)/2} p \times |I^{i+p,j+q} - \bar{I}^{i,j}|, \\ Y_s^{i,j} &= \frac{1}{\bar{I}^{i,j}} \sum_{p=(1-m)/2}^{p=(m-1)/2} \sum_{q=(1-n)/2}^{q=(n-1)/2} q \times |I^{i+p,j+q} - \bar{I}^{i,j}|, \\ \bar{I}^{i,j} &= \frac{1}{m \times n} \sum_{p=(1-m)/2}^{p=(m-1)/2} \sum_{q=(1-n)/2}^{q=(n-1)/2} I^{i+p,j+q}. \end{aligned}$$

Формула (1) для расчета контраста цифрового изображения на основе представления «центров масс» была предложена и обоснована в работе [15], формула (2) предлагается авторами впервые и, как будет показано ниже, обеспечивает адекватную количественную оценку резкости изображения.

Иллюстрация расчетной модели представлена на рис. 1.

Для цели последующего анализа будем полагать, что цифровое изображение описывается функцией  $g$ , имеющей вид

$$g(i, j) = f(i, j) \otimes h(i, j) + n(i, j), \quad (3)$$

где  $f$  – «идеальное» модельное изображение;  $h$  – функция рассеяния точки;  $n$  – аддитивная составляющая шума, а символ  $\otimes$  обозначает операцию свертки.

Таким образом, с помощью выражения (3) можно описывать цифровые изображения с различной степенью размытия границ объектов (дефокусировки) и добавления пространственных шумов. На практике функцию рассеяния точки обычно аппроксимируют гауссовой функцией с параметром размытия границ  $\beta$ .

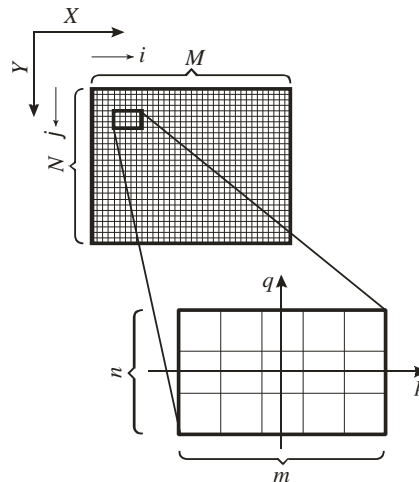


Рис. 1. Расчетная модель метода вычисления локального контраста и резкости цифрового изображения

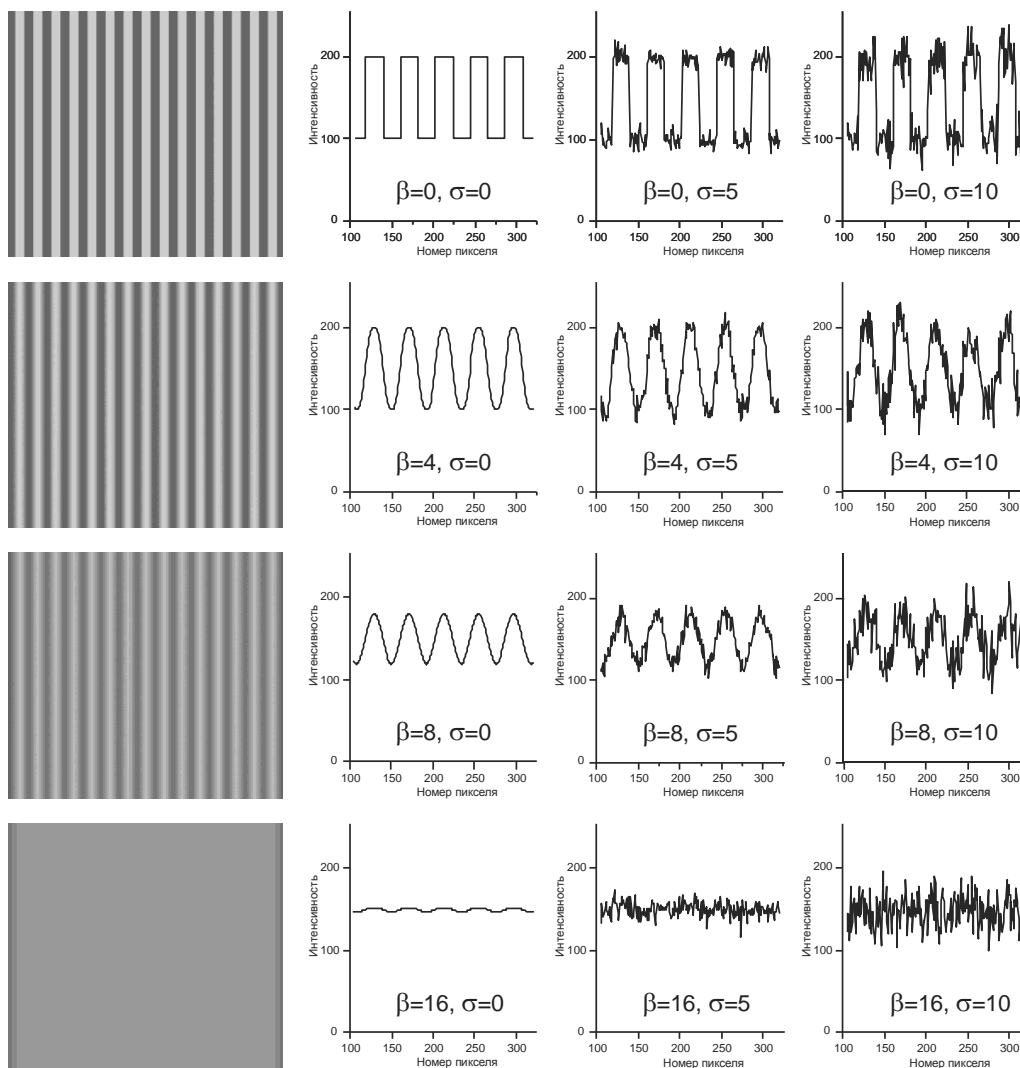


Рис. 2. Тестовые изображения с различной степенью дефокусировки  $\beta$  и шума  $\sigma$

В качестве добавленного шума в данной работе будем использовать гауссов шум с нулевым средним значением и параметром дисперсии  $\sigma$ .

Будем полагать, что наивысшим качеством обладает цифровое изображение с максимальным контрастом и резкостью. В качестве модельного изображения  $f$  выберем синтетическую монохромную миру, представляющую собой чередующиеся светлые и темные вертикальные полосы шириной 21 пиксель. При 256 градациях серого яркость светлых полос этой миры составляет 200 единиц, а темных – 100.

На рис. 2 представлены тестовые цифровые изображения  $g$  и их горизонтальные профили интенсивности с различными параметрами  $\beta$  и  $\sigma$ . Последовательно сверху вниз расположены профили изображений с увеличением значений параметра размытия границ, а слева направо – с увеличением дисперсии шума.

**Результаты и обсуждение**

Расчет контраста и резкости по формулам (1), (2) был выполнен при  $m=n=5$ . Результаты расчетов приведены на рис. 3, 4.

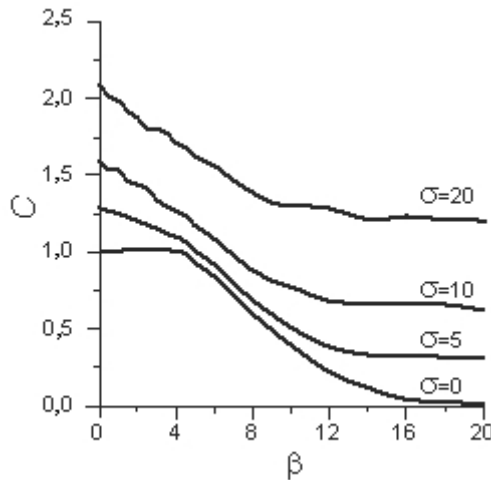


Рис. 3. Зависимости нормированного контраста изображения от дефокусировки при различных уровнях добавленного шума

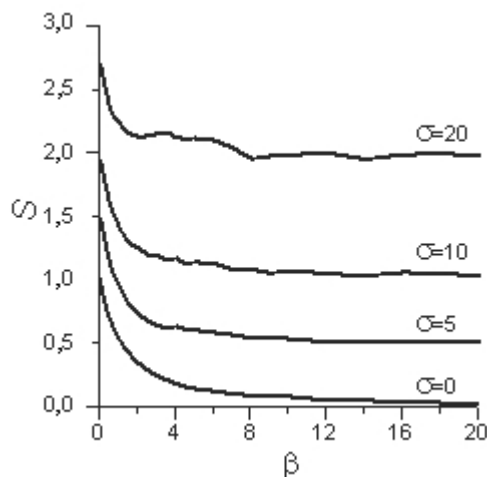


Рис. 4. Зависимости нормированной резкости изображения от дефокусировки при различных уровнях добавленного шума

Зависимости, представленные на рис. 3, 4, нормированы на значения контраста и резкости модельного изображения без дефокусировки ( $\beta=0$ ) и при отсутствии шума ( $\sigma=0$ ) соответственно.

Из рис. 3 видно, что при  $\sigma=0$ , при малых величинах дефокусировки, контраст изображения остается практически постоянным и начинает уменьшаться с ростом  $\beta$  только после того, как радиус размытия достигает значения, характеризующего перекрытие границ изображений соседних объектов (в наших расчетах это характеристическое значение  $\beta$  равно 4). Качественно данная зависимость полностью сов-

падает с кривой контраста, рассчитанного классическим методом и вычисляемого как сумма локальных контрастов, каждый из которых равен отношению среднеквадратичного отклонения значений интенсивностей к среднему в пределах области изображения заданного размера. При наложении шума контраст изображения увеличивается, однако разница между контрастами модельного изображения и изображений с размытыми из-за дефокусировки границами уменьшается. При этом слабо зашумленные изображения в области малых значений дефокусировки отличаются по контрасту незначительно.

Аналогичные зависимости резкости изображения от дефокусировки, представленные на рис. 4, имеют несколько отличный от кривых контраста вид. Прежде всего, кривая резкости при  $\sigma=0$  имеет четкий максимум в точке  $\beta=0$  с максимальным значением производной. При наложении шума резкость изображения увеличивается, причем падение отношения сигнал/шум для резкости дефокусированных изображений нарастает с увеличением  $\beta$ . Так, например, при  $\sigma=0$  резкость дефокусированного изображения с параметром  $\beta=4$  примерно в пять раз меньше, чем резкость модельного изображения, а при  $\sigma=10$  это отношение уменьшается до 1,6. С увеличением шумовой составляющей область дефокусировок изображения, в которой резкость остается практически постоянной, непрерывно увеличивается (при  $\sigma=10$  изменение резкости изображения в диапазоне значений  $\beta$  от 4 до 20 составляет несколько процентов, что лежит в пределах погрешности вычислений).

Анализ представленных на рис. 3, 4 зависимостей показывает, что контраст свободного от шумов изображения не изменяется при малых дефокусировках, а при наличии на изображении слабых шумов изменяется недостаточно, чтобы служить индикатором степени дефокусировки. Напротив, резкость идеальным образом характеризует качество незашумленного изображения, однако на практике цифровые изображения всегда содержат шумовую составляющую, а в этих случаях избирательная способность резкости в отношении дефокусировки падает. При регистрации цифровых изображений заранее неизвестны параметры дефокусировки и уровень пространственных шумов. Тем не менее, даже для сильно зашумленных изображений совместный расчет контраста и резкости при различных значениях дефокусировки может быть положен в основу эффективного алгоритма нахождения изображений с наилучшим качеством.

#### **Заключение**

Проведенные исследования дают основание сделать вывод о том, что по отдельности контраст и резкость цифрового изображения не в полной мере характеризуют его качество. Присутствие пространственных шумов на изображениях, содержащих малое количество слабоконтрастных объектов с размытыми границами, превращает количественную оценку качества изображения известными методами в трудноразрешимую проблему. Предложенный в настоящей работе комбинированный подход к количественной оценке контраста и резкости может быть положен в основу эффективной технологии автоматической фокусировки в цифровой микроскопии и системах технического зрения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

#### **Литература**

1. Вудс Р., Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
2. Canny J. A computational approach to edge detection // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 1986. – V. 8. – № 6. – P. 679–698.
3. Beghdadi A., Le Negrate A. Contrast enhancement technique based on local detection of edges // *Computer Vision, Graphics and Image Processing*. – 1989. – V. 46. – P. 162–174.
4. Peli E. Contrast in complex images // *Journal of the Optical Society of America A*. – 1990. – V. 7. – № 1. – P. 2032–2039.
5. Eskicioglu A.M., Fisher P.S. Image quality measures and their performance // *IEEE Transactions on Communications*. – 1995. – V. 43. – № 12. – P. 2959–2965.
6. Beghdadi A., Khellaf A. A noise-filtering method using a local information measure // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 1997. – V. 6. – № 6. – P. 879–882.
7. Subbarao M., Tyan J.K. Selecting the optimal focus measure for autofocusing and depth-from-focus // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 1998. – V. 20. – P. 864–870.
8. Zhang Y., Zhang Y., Wen C. A new focus measure method using moments // *Image and Vision Computing*. – 2000. – V. 18. – P. 959–965.
9. Журавель И.М. Краткий курс теории обработки изображений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book2/index.php>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 28.09.2011).
10. Kautsky J., Flusser J., Zitova B., Simberova S. A new wavelet-based measure of image focus // *Pattern Recognition Letters*. – 2002. – V. 23. – P. 1785–1794.
11. Roushdy M. Comparative study of edge detection algorithms applying on the grayscale noisy image using morphological filter // *Graphics, Vision and Image Processing Journal*. – 2006. – V. 6. – № 4. – P. 17–23.

12. Duncan D.D., Kirkpatrick S.J., Wang R.K. Statistics of local speckle contrast // Journal of the Optical Society of America A. – 2008. – V. 25. – № 1. – P. 9–15.
13. Монич Ю.И., Старовойтов В.В. Оценки качества для анализа цифровых изображений // Искусственный интеллект. – 2008. – № 4. – С. 376–386.
14. Хрящев Д.А. Об одном методе анализа цифрового изображения с применением гистограмм // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2010. – № 1. – P. 109–113.
15. Беззубик В.В., Белашенков Н.Р., Никифоров В.О. Метод количественной оценки контраста цифрового изображения // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 6 (70). – С. 86–88.
16. Michelson A.A. Studies in Optics. – Chicago, IL: Univ. of Chicago Press, 1927.

- Беззубик Виталий Вениаминович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, научный сотрудник, bezzubik@mail.ru
- Белашенков Николай Романович** – ОАО «ЛОМО», кандидат физ.-мат. наук, помощник технического директора, belashenkov@gmail.com
- Никифоров Владимир Олегович** – ОАО «ЛОМО», доктор технических наук, профессор, технический директор, nikiforov@mail.ifmo.ru