

Научная статья

УДК 621.397.131

DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-2-16-23



Алгоритм безэталонной оценки качества изображений

Иван Юрьевич Грицкевич ✉, i@robotace.ru

Александр Александрович Гоголь, agogol@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация: В статье рассматривается разработка алгоритма локальной оценки качества изображений, сфокусированного на анализе контраста и общего качества визуальных данных. Предлагаемый алгоритм направлен на повышение эффективности оценки качества изображений, особенно в условиях низкого контраста и воздействия различных шумов. Методика создания алгоритма дает возможность учитывать спектральные диапазоны и обеспечивает локальную оценку контраста, что делает его применимым в широком спектре задач, связанных с анализом и улучшением качества изображений. Разработанный подход позволяет улучшить качество визуальных данных, поддерживая важные аспекты восприятия контраста и общего качества изображений. Разработана методика безэталонной оценки качества изображений для настройки параметров работы систем обработки изображений. Приведен принцип локальной автоматизированной оценки качества изображений на основе оценки искажений и среднего нормированного контраста. Приводятся результаты натурных испытаний.

Ключевые слова: контраст, искажения, оценка качества изображений, обработка изображений, нейронные сети, безэталонная оценка качества изображений

Ссылка для цитирования: Грицкевич И.Ю., Гоголь А.А. Алгоритм безэталонной оценки качества изображений // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 2. С. 16–23. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-2-16-23. EDN:ТТРАВW

No-Reference Image Quality Assessment Algorithm

Ivan Gritskevich ✉, i@robotace.ru

Aleksandr Gogol, agogol@sut.ru

The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Abstract: The presented article focuses on the development of a local image quality assessment algorithm, specifically designed for analyzing contrast and overall visual data quality. The proposed algorithm aims to enhance the efficiency of image assessment, particularly in conditions of low contrast and the presence of various types of noise. The algorithm's methodology takes into account spectral ranges and provides precise local contrast assessment, making it applicable to a broad spectrum of tasks related to image analysis and enhancement. The developed approach has the potential to improve the quality of visual data by supporting crucial aspects of contrast perception and overall image quality.

Keywords: contrast, distortions, image quality assessment, image processing, neural networks, local image assessment

For citation: Gritskevich I., Gogol A. No-Reference Image Quality Assessment Algorithm. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2024;10(2):16–23. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-2-16-23. EDN:ТТРАВW

Введение

Обработка изображений с целью повышения визуального качества (дешифрируемости объектов) связана с желаемым повышением четкости и контраста. С точки зрения методов обработки эти два направления реставрации изображений опираются на линейные и нелинейные методы фильтрации [1–3].

Примыкает к этому направлению обработки изображений их сжатие для передачи по цифровому каналу связи. Учет нестационарности изображений приводит к концепции локально-адаптивной обработки изображений [4], т. е. к целесообразности их обработки независимо в каждом выбранном фрагменте. Размеры таких фрагментов определяются типовыми интервалами корреляции сигналов (размерами типовых объектов). На начальном этапе кодирования изображений в стандартах JPEG, MPEG использовалось раздельная обработка для фрагментов (блоков) размера 8×8 пикселей, позже, по мере увеличения четкости изображений (и, как следствие, интервалов корреляции сигналов) и удешевления аппаратных средств цифровой обработки, размеры типового фрагмента стали выбирать в виде блока 16×16 пикселей [6–7]. Краевые области изображений также отделяют, исходя из размеров интересующих объектов [18–19].

Во многих приложениях линейная фильтрация для повышения четкости (апертурная коррекция, методы которой восходят к фильтрации Колмогорова – Винера по критерию минимума среднеквадратической ошибки) и нелинейная фильтрация для контрастирования изображений производятся независимо. При этом методы контрастирования традиционно опираются на выравнивание гистограмм сигналов, что рассмотрено в [1–2, 4].

«Эталонное сравнение» – сравнение изображения с идеальным образцом. Методы оценки эталонности могут варьироваться в зависимости от конкретной задачи или области применения, но обычно они включают в себя сравнение структуры, цветовых характеристик, резкости и других параметров изображения. «Безэталонное сравнение» – оценка качества изображения без явного стандарта для сравнения, основывается на статистических характеристиках изображения, восприятию человека или других методах анализа, не требующих эталона.

Алгоритм безэталонной оценки качества изображений

Разработанный алгоритм заключается в разбивке изображения на локальные области с последующим анализом распределения пикселей в локальных областях. Анализ работ в этой области и анализ распределения пикселей в фрагментах поз-

воляет принять размеры области анализа, состоящей из 16×16 пикселей, исходя из изменения размеров деталей изображений [12–13]. Краевые области изображений также отделяют согласно размерам интересующих объектов [14–15]. Таким образом характер разбивки изображений имеет вид, представленный на рисунке 1.

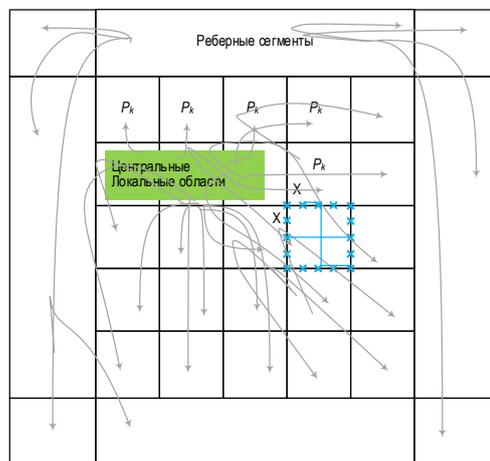


Рис. 1. Разбивание изображения на локальные области и их обработка

Fig. 1. Splitting an Image into Local Areas and Processing Them

Обработка изображений производится в соответствии с алгоритмом (рисунок 2).

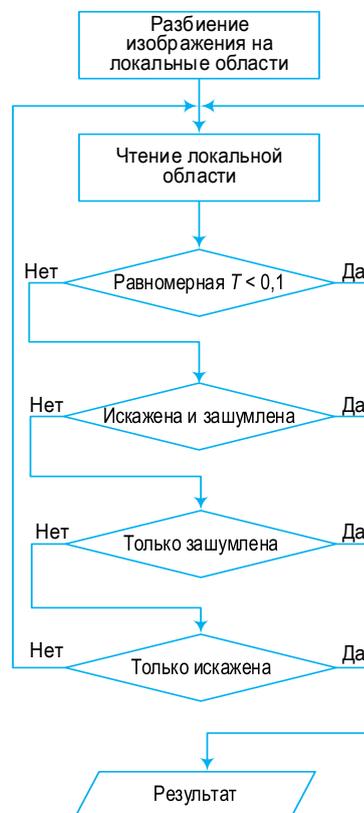


Рис. 2. Алгоритм определения искажений локального блока

Fig. 2. An Algorithm for Determining Local Block Distortions and Their Processing

Отличительной отличительной особенностью предложенного алгоритма повышения визуального качества изображения является отказ от широко используемого выравнивания гистограмм с переходом к применению методов линейной фильтрации (известной в телевидении как апертурная коррекция) в сочетании с предварительной операцией приведения гистограммы (функции распределения амплитуд) к гауссовскому виду.

Важным элементом синтеза алгоритма повышения визуального качества является расширение определения понятия контраста относительно широко употребляемых путем учета флуктуаций сигнала объекта. Учитывая особенности восприятия изображений человеком (обращающего внимание на некоторые выделяющиеся в нем точки), суммируем локальные оценки качества выделенных точек, не рассматривая локальные области изображения с равномерно распределенной яркостью [20].

Предложенный алгоритм основан на учете внимания наблюдателя к особым точкам и его различным подходом к оценке качества изображения на разных локальных областях изображения. Для оценки качества изображений введем величину искажения локальной области. Искажением является вид информации в различных частях изображения, появившейся в результате его обработки или обработки сигнала, которая может исказить исходную информацию. Для уменьшения влияния тепловых случайных шумов используется средний нормированный контраст. Осуществляется нормализация яркости пикселей (приведение к нормальному распределению).

Вычислением локальной средней яркости пикселей из исходной величины яркости изображения с последующим делением на среднеквадратическое значение ее дисперсии получим средний нормированный контраст:

$$\hat{I}(i, j) = \frac{I(i, j) - \mu(i, j)}{\sigma(i, j) + 1}, \quad (1)$$

где $\hat{I}(i, j)$ – средний нормированный контраст; $i \in \{1, 2, \dots, M\}$; $j \in \{1, 2, \dots, H\}$ – пространственные индексы; $M \times H$ – размеры изображения (высота и ширина, соответственно); $I(i, j)$ – изменение средней яркости; $\mu(i, j)$ – математическое ожидание, усредненная в пределах выбранного фрагмента интенсивность пикселей вокруг пикселя (i, j) , вычисляется с использованием весовой функции $W(i, j)$ вокруг центрального пикселя:

$$\mu(i, j) = \sum_{i=1}^M M_{k=M} \sum_{j=1}^H H_{k=H} W(i, j) * I(i, j),$$

где $W(i, j)$ – круговое нормальное распределение яркости пикселей с центром в начале координат:

$$W(i, j) = \frac{1}{2 * a} \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{2} * S^2\right),$$

где S – стандартное отклонение, равное 2; $\sigma(i, j)$ – дисперсия (изменение яркости изображения вокруг (i, j) пикселя):

$$\sigma(i, j) = \sqrt{W(i, j) * (I(i, j) - \mu(i, j))^2}.$$

Локальные области изображения P_k (см. рисунок 1), появившиеся в результате разбиения изображения, относим либо к однородным, либо к активным областям. Критерий определения однородности или неоднородности имеет вид:

$$P_k = \begin{cases} \text{однородные,} & \sigma(i, j) < T \\ \text{активные,} & \sigma(i, j) \geq T \end{cases} \quad (2)$$

где T – эмпирический коэффициент ($0 < T < 1$), равный величине дисперсии в локальных областях, в которых появлялись объекты или цели, исходя из практических экспериментов.

Введен параметр γ (в литературе есть схожие способы отделения деталей изображений от случайных искажений и фона) для характеристики соотношения дисперсий центральных и окружающих областей [17–18]:

$$\gamma = \frac{\left| \frac{\sigma_1}{\sigma_2} - \sigma_3 \right|}{\max\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}, \sigma_3\right)}, \quad (3)$$

где γ – коэффициент искажения; σ_1 – стандартное отклонение распределения дисперсии (СОПД) центрального сегмента (локальной области изображения, выделенной на рисунке 1 синими полосами по краям одной из центральных локальных областей); σ_2 – СОПД яркости сегмента (локальной области изображения), рассчитывается также, как $\sigma_1(i, j)$ для зон слева и справа от центрального сегмента, выбирая большее; σ_3 – СОПД всего блока (из нескольких локальных областей изображения) рассчитывается также, как $\sigma_2(i, j)$ только для всех пикселей в активной области, в которой ведется расчет, т. е. для пикселей как центральной, так и боковых областей. Дисперсия и дисперсия центрального сегмента вычисляются по аналогичным выражениям.

Коэффициент искажения γ определяет, насколько отклонение в центральной части в активном блоке выше, чем по всему блоку. Чем выше шум по всему блоку, тем ближе γ к нулю. Наиболее распространенные искажения, влияющие на качество изображений, обусловлены его сжатием и передачей. Воспринимаемые артефакты из-за этих искажений разделяем на склейки, размытости и шумы. Параметр γ и значения σ_1 , σ_2 и σ_3 определяют тип искажения, который осуществляется по критериям заметного искажения и аддитивного белого шума.

Порядок оценки искажений можно описать пошагово (см. рисунок 2).

Шаг 1. Вычисляем значение среднего нормированного контраста.

Шаг 2. Проверяем его значение для сортировки локальных областей изображения на активные и однородные.

Шаг 3. Если локальная область изображения оказалась активной, проверяем ее на соответствие искажениям через дисперсию.

Шаг 4. Если локальная область изображения не соответствует критериям искажений по общей дисперсии, проверяем ее на соответствие критерию наличия шума.

Шаг 5. Проверяем заметность искажения на соответствие критерию γ , вычисляемому согласно (3).

Шаг 6. Суммируя значения коэффициентов искажений (из шагов 3–5), получаем значение общей оценки качества изображений.

Шаг 7. Если локальная область изображения не имеет искажений, переходим к следующей.

Искаженной локальной области изображения присваиваем оценку, основанную на типе искажения. Критерий заметного искажения рассчитываем следующим образом: локальные области изображения P_k разбиваем на локальные области изображения размера $X \times X$, при этом краевые блоки делим на 8 реберных сегментов (см. рисунок 1), которые не оцениваем, если стандартное отклонение сегмента меньше порога T .

Определение порога для ребер становится сложной задачей. Вычисляем коэффициенты среднего нормированного контраста (1), которые помогают оценить локальное качество изображения. После проведения экспериментов как в лаборатории с коллиматором и мирами, так и с изображениями природы (1800 сюжетов натуральных испытаний), был выбран порог. Этот эмпирический порог для границ предметов при оценке изображений был выбран равным $0,1 T$. Выбранное значение соответствует величине отличий искажений соседних локальных областей изображения. Локальная область изображения считается искаженной, если хотя бы один из ее сегментов удовлетворяет условию $\sigma_1 < T$.

Количественная оценка искажений с использованием параметра дисперсии локальной области изображения оказывается невелика для сильно искаженных изображений по сравнению с исходными необработанными. Это указывает на то, что дисперсия обратно пропорциональна степени искажения. Однако при шумовых искажениях дисперсия не обязательно обратно пропорциональна их величине искажения. Разброс значений пикселей на изображениях не может быть низким из-за шума,

что усложняет задачи анализа и обработки таких изображений [23].

При определении коэффициента искажений ($K_{иск}$), в пределах локальной области изображения $P_k - 16 \times 16$ пикселей (см. рисунок 1), производим вычисления:

$$K_{иск} = \begin{cases} 1 & \text{если } \sigma_3 > 2 * \gamma \text{ и } \sigma_1 < T \\ \sigma_3 & \text{если } \sigma_3 > 2 * \gamma \\ (1 - \sigma_3) & \text{если } \sigma_1 < T \end{cases}, \quad (4)$$

где T – порог, выбранный для локальной области изображения внутри блока; σ_3 – дисперсия всего блока; γ – эмпирический коэффициент (3).

Итоговую оценку качества изображений получаем равной:

$$E = \frac{(\sum_{k=1}^H K_{иск}) + C_1}{(N + C_1)}, \quad (5)$$

где E – результат оценки качества изображений; N – число активных локальных областей в изображении, на которые было произведено разбиение; C_1 – положительная константа (в рассматриваемом случае: $C_1 = 1$), которая введена для предотвращения неопределенности при знаменателе переходящем в 0; $K_{иск}$ ни в одном из вышеперечисленных случаев не превышает значения 1. Итоговый результат оценки качества изображений определяется значениями: $0,1T < K_{иск} < T$.

Качественные результаты обработки изображений приведены на рисунках 3 и 4. В результате поиска людей в лесу количество верно обнаруженных объектов увеличивается. В интересах получения количественных значений результатов обработки изображений предложенным алгоритмом воспользуемся проведением натуральных испытаний согласно рекомендации МСЭ-R ВТ.500-11(06/02) [24].

В ходе эксперимента использовались следующие условия наблюдения:

- 15 наблюдателей (радиоинженеры и исследователи радиотехнических систем, из них 6 – лица женского пола);
- по возрастным группам проведено следующее распределение: 6 человек от 21 до 26 лет, 5 – от 30 до 36 лет, 4 – от 50 до 65 лет;
- у 4-х человек близорукость, у 2-х – дальновидность;
- все 15 наблюдателей имеют опыт работы с изображениями и ТВ-сигналами.

Для экспертной оценки качества изображений создан стенд (рисунок 5).

Наблюдатели дали следующие вводные критерии оценки изображений:

1) отсутствие искажений и артефактов на изображении по 100-бальной шкале, где 100 означает полное отсутствие;

2) контраст границ предметов (машин, деревьев, знаков, столбов и т. п.) относительно необработанного изображения по 100-бальной шкале;



Рис. 3. Результат обработки зашумленного ИК изображения: исходная локальная часть (а) и обработанное изображение (b)
 Fig. 3. The Result of Processing a Noisy IR Image: the Original Local Part (a) and the Processed Image (b)

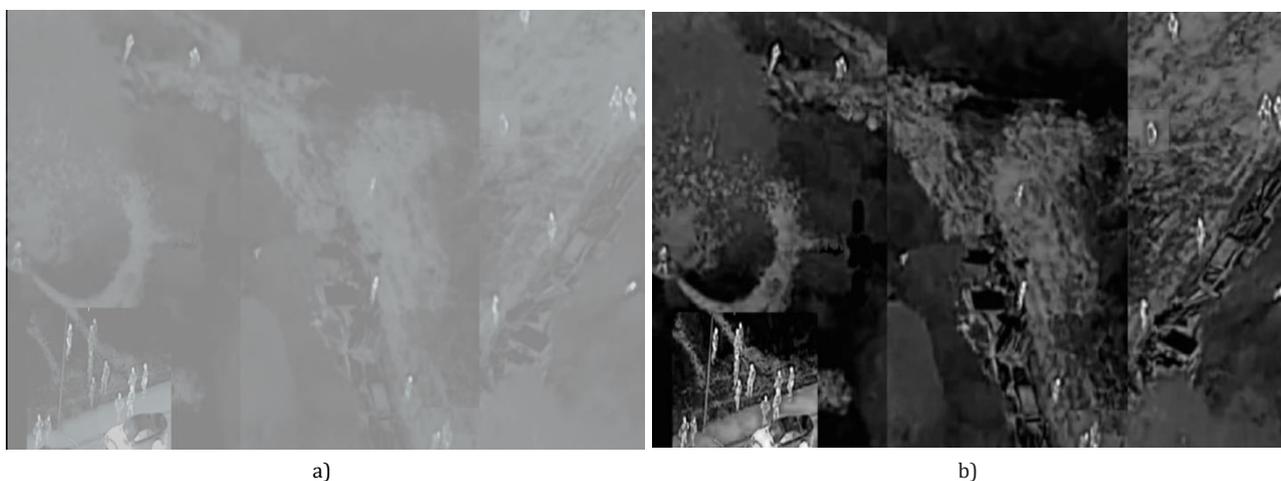


Рис. 4. Результат обработки: малоконтрастное ИК (а) и обработанное изображение (b)
 Fig. 4. Processing Result: Low-Contrast IR (a) and Processed Image (b)

3) яркость по всему изображению по 100-бальной шкале;

4) цветность по 100-балльной шкале, где 100 соответствует сохранению цветности как в исходном изображении с увеличением насыщенности;

5) четкость изображения по шкале от 1 до 10, где 1 – полное размытие, а 10 – максимальная четкость;

6) разрешение изображения искажения соотношения сторон, где 10 – соотношение сторон не изменилось, а 0 – изменилось отношение ширины и высоты всего изображения;

7) резкость изображения по шкале от 0 до 5, где 5 – максимальное значение резкости;

8) зернистость по шкале от 0 до 3, где 3 – минимальное значение;

9) уровень шума на изображении по шкале от 0 до 4, где 4 – минимальное значение;

10) наличие структурной блочности в изображении (в виде структурной маскировки деталей изображения) от 0 до 5, где 5 – отсутствие артефактов

структурной блочности по двум направлениям (осям X и Y);

11) наличие яркостной блочности в изображении (в виде структурной маскировки деталей изображения) от 0 до 5, где 5 – отсутствие яркостной блочности (в виде яркостной маскировки деталей изображения), а 0 – наличие артефактов структурной блочности по двум направлениям (осям X и Y);

12) наличие муара в изображении, где 5 – отсутствие периодических смещений в изображении, а 0 – наличие смещений, которые изменяют грани объектов.

Предварительно экспертам были продемонстрированы варианты искажений, указанные в критериях 1, 2, 10–12. Для этого использовались тренировочные последовательности, демонстрирующие диапазон и тип искажений, которые должны быть оценены, при этом демонстрационные изображения в этих последовательностях отличались от тех, что будут предложены в испытаниях.

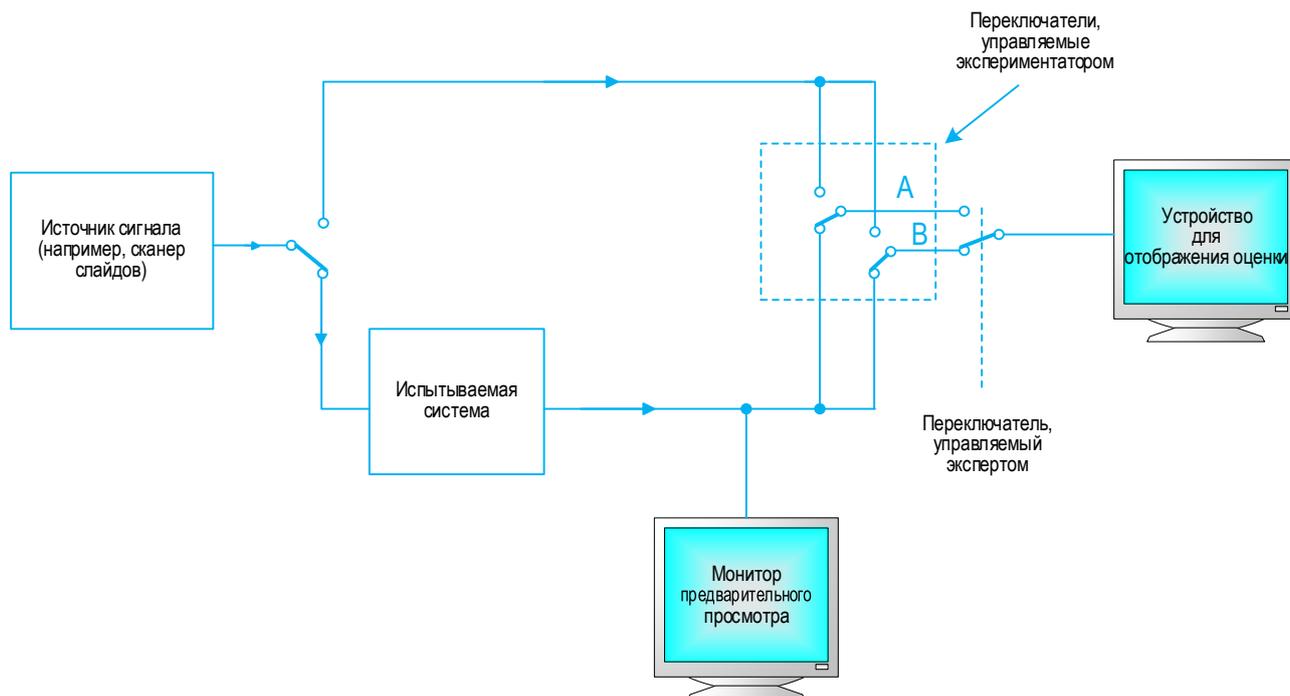


Рис. 5. Стенд оценки качества изображений экспертами
 Fig. 5. The Stand for Evaluating the Quality of Images by Experts

ТАБЛИЦА 1 Сравнение результатов расчета и значений натурального эксперимента
 TABLE 1. Comparison of Calculation Results and Values of the Field Experiment

Изображение	№ критерия												Результаты	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	эксперимента	расчета E
Оригинал (рисунок 3а)	34,4	8,7	86,8	100	4	10	5	1	1	4	2	5	0,21	0,18
Обработанное (рисунок 3б)	86,4	85,9	65,1	100	7	10	5	3	4	5	5	5	0,8	0,77
Оригинал (рисунок 4а)	56,8	20	24,4	100	2	10	2	2	2	4	2	5	0,4	0,35
Обработанное (рисунок 4б)	85,1	85,5	86,4	100	6	10	5	3	3	5	4	5	0,9	0,86

После подготовки – производилось вычисление средней оценки $\bar{u}_{i,j}$ для каждой демонстрации:

$$\bar{u}_{i,j} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{ij}, \quad (6)$$

где $\bar{u}_{i,j}$ – оценка эксперта i для условия j ; N – число экспертов.

Оценки доверия каждому наблюдателю и среднего отклонения при его оценке не проводились из-за ограничения по времени испытания. Итоги натурального эксперимента приведены в таблице 1.

Расчитанные значения оценки по выражению (5) и усредненные для 15 наблюдателей, нормированные критерии сравниваются в последних столбцах.

Разброс результатов расчета (E) и итогов натурального эксперимента оказался допустимым. Сравне-

ние первого со вторым определяет конкретное значение величины улучшения качества изображения при безэталонной оценке предлагаемым алгоритмом.

Заключение

В ходе исследования был разработан и внедрен алгоритм безэталонной оценки качества изображений (локальные параметры) в совокупности с двумя операциями независимой обработки в рамках каждого фрагмента – нелинейной для приведения функции распределения к гауссовской и линейной для коррекции апертурных искажений. Эксперименты по оценке качества изображений с применением локального контрастирования показали значительное увеличение качества изображений (при поиске заблудившихся в лесу людей – в 4 раза).

Вывод об эффективности безэталонной оценки изображений на основе предложенного метода подкреплен результатами натуральных испытаний (с привлечением экспертов; получен разброс около 10 % относительно их мнений, что дополнительно подтвердило достоверность нового алгоритма оценки качества изображений). Проведенное исследование углубляет понимание влияния локальных параметров на качество изображений и демонстрирует потенциал метода локально-адаптивных методов обработки изображений.

Следует отметить, что разработанный алгоритм безэталонной оценки качества изображений основан на глубоком понимании восприятия визуальной информации человеком. Он учитывает то предположение, что человеческое внимание сосредото-

чивается на отдельных локальных деталях изображения, играющих ключевую роль в его восприятии. Новый метод оценки качества изображений сегментирует изображение на локальные области, выделяя активные, заметные части и отделяя их от менее важных областей. Этот подход позволяет сосредоточиться на оценке только тех частей изображения, которые действительно влияют на его качество и восприятие. Таким образом, разработанный алгоритм представляет собой важный шаг в направлении создания более точных и эффективных методов оценки качества изображений.

В контексте научной значимости исследование углубляет понимание влияния локальных параметров на качество изображений и демонстрирует потенциал метода, отражая новаторский подход к анализу в области обработки визуальных данных.

Список источников

1. Грицкевич И.Ю., Ерганжиев Н.А. Алгоритм адаптивного контрастирования с учетом локальных сюжетных особенностей изображения // V Международная научно-техническая конференция, посвященная 140-летию со дня рождения выдающегося физика и создателя первой русской усилительной радиолампы Н.Д. Папалекси «Актуальные проблемы радио- и кинотехнологий» (Санкт-Петербург, Россия, 24–25 ноября 2020). СПб.: Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения, 2021. С. 36–40. EDN:DNBFGB
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006. 1072 с.
3. Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 608 с.
4. Сифоров В.И., Ярославский Л.П. Адаптивные методы обработки изображений. М.: Наука, 1988. 248 с.
5. Начаров Д.В. Метод контрастирования изображений средствами модифицированного S-образного преобразования яркости // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19. № 2. С. 94–102. DOI:10.36622/VSTU.2023.19.2.014. EDN:XEUQGW
6. Умбиталиев А.А., Цыцулин А.К., Левко Г.В., Пятков В.В., Кузичкин А.В., Дворников С.В. и др. Теория и практика космического телевидения. СПб: АО «НИИ телевидения», 2017.
7. Suckling J., Parker J., Dance D., Astley S., Hutt I., Boggis C., et al. The mammographic Image Analysis Society Digital Mammogram Database // *Excerpta Medica. International Congress Series*. 1994. Vol. 1069. PP. 375–378.
8. Van Ginneken B., Romeny B.M.T.H. Computer-aided diagnosis in chest radiography: a survey // *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 1998. Vol. 20. Iss. 12. PP. 1228–1241. DOI:10.1109/42.974918
9. Karssemeijer N., Otten J.D.M., Rijken H., Holland R. Computer aided detection of masses in mammograms as decision support // *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 1993. Vol. 12. Iss. 4. PP. 608–615.
10. Wang Z., Wu G., Bovik A.C. Reduced and No-Reference Image Quality Assessment // *IEEE Signal Processing Magazine*. 2021. Vol. 28. Iss. 6. PP. 29–40. DOI:10.1109/MSP.2011.942471
11. Seshadrinathan K., Bovik A.C. Video Quality Assessment // In: *Essential Guide to Video Processing*. New York: Academic, 2009.
12. Bovik A.C., Wang Z. *Modern Image Quality Assessment*. New York: Morgan and Claypool, 2006.
13. Sheikh H.R., Bovik A.C., De Veciana G. An information fidelity criterion for image quality assessment using natural scene statistics // *IEEE Transactions on Image Processing*. 2005. Vol. 14. Iss. 12. PP. 2117–2128. DOI:10.1109/TIP.2005.859389
14. Rec. ITU-R BT.500-11 (2002) Methodology for subjective assessment of the quality of television pictures.

References

1. Gritskevich I.Y., Erganzhiev N.A. The Adaptive Contrast Enhancement Algorithm Based on Local Characteristic of the Scene Image. *Proceedings of the Vth International Scientific and Technical Conference on Actual Problems of Radio and Film Technologies, 24–25 November 2020, St. Petersburg, Russia*. St. Petersburg: St. Petersburg State Institute of Cinema and Television; 2021. p.36–40. (in Russ.) EDN:DNBFGB
2. Gonzalez R., Woods R. *Digital Image Processing*. Moscow: Tekhnosfera Publ.; 2006. 1072 p. (in Russ.)
3. Krasilnikov N.N. *Digital Processing of 2D and 3D Images*. St. Petersburg: BHV-Petersburg Publ.; 2011. 608 p. (in Russ.)
4. Siforov V.I., Yaroslavsky L.P. *Adaptive Methods of Image Processing*. Moscow: Nauka Publ.; 1988. 248 p. (in Russ.)
5. Nacharov D.V. Image Contrast Enhancement by Means of Modified S-Shaped Intensity Transrofm. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2023;19(2):94–102. (in Russ.) DOI:10.36622/VSTU.2023.19.2.014. EDN:XEUQGW
6. Umbitaliev A.A., Tsitsulin A.K., Levko G.V., Pyatkov V.V., Kuzichkin A.V., Dvornikov S.V., et al. *Theory and Practice of Space Television*. St. Petersburg: JSC "Research Institute of Television", 2017. 368 p. (in Russ.)

7. Suckling J., Parker J., Dance D., Astley S., Hutt I., Boggis C., et al. The mammographic Image Analysis Society Digital Mammogram Database. *Excerpta Medica. International Congress Series*. 1994;1069:375–378.
8. Van Ginneken B., Romeny B.M.T.H. Computer-aided diagnosis in chest radiography: a survey. *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 1998;20(12):1228–1241. DOI:10.1109/42.974918
9. Karssemeijer N., Otten J.D.M., Rijken H., Holland R. Computer aided detection of masses in mammograms as decision support. *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 1993;12(4):608–615.
10. Wang Z., Wu G., Bovik A.C. Reduced and No-Reference Image Quality Assessment. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2011; 28(6):29–40. DOI:10.1109/MSP.2011.942471
11. Seshadrinathan K., Bovik A.C. Video Quality Assessment. In: *Essential Guide to Video Processing*. New York: Academic; 2009.
12. Bovik A.C., Wang Z. *Modern Image Quality Assessment*. New York: Morgan and Claypool; 2006.
13. Sheikh H.R., Bovik A.C., De Veciana G. An information fidelity criterion for image quality assessment using natural scene statistics. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2005;14(12):2117–2128. DOI:10.1109/TIP.2005.859389
14. Rec. ITU-R BT.500-11 *Methodology for subjective assessment of the quality of television pictures*. 2002.

Статья поступила в редакцию 27.02.2024; одобрена после рецензирования 09.04.2024; принята к публикации 15.04.2024.

The article was submitted 27.02.2024; approved after reviewing 09.04.2024; accepted for publication 15.04.2024.

Информация об авторах:

ГРИЦКЕВИЧ
Иван Юрьевич

аспирант кафедры телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0007-4916-1816>

ГОГОЛЬ
Александр Александрович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры телевидения и метрологии Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0003-1972-4124>