

КОНТРАСТ И ЕГО РОЛЬ В ОБОБЩЕННОЙ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ© 2007 г. **Р. П. Филимонов**, доктор физ.-мат. наук

Северо-западная академия государственной службы, Санкт-Петербург

Рассмотрена обобщенная оценка качества черно-белого изображения, основанная на интенсивности восприятия его основных параметров: контраста, средней яркости и аддитивных помех. Методом анализа иерархий выполнен сравнительный анализ теоретических и субъективных оценок качества изображений. Показано, что для изображений высокого качества главным фактором, влияющим на качество его субъективного восприятия, является наличие на изображении помех. Однако по мере ухудшения качества изображения существенно возрастает роль контраста изображения.

Коды OCIS: 3000.30000, 3000.30200, 3000.33000.

*Поступила в редакцию 29.06.2006.***Введение**

В работах [1–3] была предложена и подробно развита концепция количественной оценки качества изображения, исходящая из принципа экстремальности зрительного восприятия информации и следующего из него закона контрастного преобразования входного сигнала, осуществляемого низшими уровнями многоярусной системы анализа изображения. Эта оценка сводится к нахождению числового значения контраста сюжетного изображения, вычисляемого по гистограмме контрастов его отдельных элементов [4], рассматриваемых как выборка независимых одинаково распределенных случайных величин. Дальнейшая смысловая обработка изображения осуществляется зрительными зонами коры головного мозга более высокого порядка, ответственными за решение основной задачи восприятия изображения – его распознавание и выработку обобщенной оценки качества. Такая реальная оценка зависит от многих параметров изображения и интенсивностей их субъективного ощущения. Нетрудно понять, что субъективная оценка качества высококонтрастного, но зашумленного изображения может быть ниже оценки незашумленного изображения меньшего контраста.

Данное исследование предполагает следующие цели: построение объективной обобщенной (интегральной) оценки качества изображения по совокупности его основных параметров, сравнение таких оценок с данными субъективных экспертиз и выяснение на основе такого сравнения закономерностей поведения относительных весовых долей параметров изображения, формирующих его оценку по мере изменения качества изображения. Можно надеяться, что данные такого комплексного эксперимента позволят уточнить наши представления о роли числовых значений контраста в процессе субъективного восприятия изображения.

Поскольку современные системы теле- и видео-воспроизведения изображений обладают высокой разрешающей способностью, то основными параметрами, влияющими на субъективную оценку качества изображения, можно считать, как правило, его среднюю яркость, средний контраст и наличие в изображении шумов, возникающих как следствие цифровых принципов обработки информации. В данной работе рассматриваются только черно-белые полутонные изображения.

Построение обобщенной оценки качества сюжетного изображения.**Исходные теоретические положения**

Обобщенную оценку будем строить, опираясь в основном на принципы, сформулированные в [5]. Пусть I_i – физические стимулы или параметры изображения, являющиеся входными сигналами зрительного анализатора; E_i – отклики зрительного анализатора на предъявляемые стимулы или выходные сигналы, а $i = 1, \dots, n$. Зависимость $E_i = f(I_i)$ есть сенсорная функция зрительного анализатора. Будем рассматривать обобщенную оценку качества изображения, формируемую зрительным анализатором, как непрерывный функционал Q от трех сенсорных функций, соответствующих восприятию яркости E_1 , контраста E_2 и шума E_3 , т. е.

$$Q = \Phi(E_1, E_2, E_3). \quad (1)$$

Используя общие результаты, содержащиеся в [6], можно показать, что функционал (1) допускает следующее представление в виде отрезка ряда Тейлора:

$$Q = \sum_{i=1}^3 C_i E_i, \quad (2)$$

где индексы суммирования относятся к яркости, контрасту и шуму, а соответствующие им весовые

коэффициенты сенсорных функций C_i определяются производными функционала по соответствующим параметрам.

Следует отметить, что (2) отвечает сложившимся представлениям о законе пространственной суммации энергии, попадающему на рецептивные поля сетчатки [7], и вытекающим отсюда механизму суммирования отдельных ощущений зрительным анализатором [8].

Таким образом, задача построения обобщенной оценки качества изображения сводится к нахождению сенсорных функций зрительного анализатора, устанавливающих взаимосвязь между объективными характеристиками параметров изображения (стимулами) и интенсивностями соответствующих им психофизических реакций (откликов). Следуя методам, разработанным в психофизике, оценивать величины субъективных реакций удобно путем определения разностных (дифференциальных) порогов, принимаемых за единицу ощущения. Суммирование этих единиц приводит к так называемой шкале счета единиц, устанавливающей прямо пропорциональную связь между числом единиц ощущения и величинами соответствующих этому числу субъективных реакций. При этом сенсорная функция на шкале счета единиц аппроксимируется логарифмической зависимостью [5].

Предположим, что мы располагаем сенсорной функцией в некотором диапазоне изменений стимулов I_i , где выполняется закон Вебера–Фехнера. В этом диапазоне отношение исходного уровня ощущения E_i к его приращению ΔE_i есть величина постоянная и равная числу единиц ощущения n_i для данного параметра изображения, т. е.

$$n_i = \frac{E_i(I)}{\Delta E_i(I)}. \quad (3)$$

С учетом логарифмической зависимости сенсорной функции на шкале счета единиц будем иметь

$$E_i = \mu_i \ln I_i, \quad (4)$$

где μ_i – константа пропорциональности. Приращение ΔE_i функции E_i есть

$$\begin{aligned} \Delta E_i &= \mu_i (\ln(I_i + \Delta I_i) - \ln I_i) = \\ &= \mu_i \ln \frac{I_i + \Delta I_i}{I_i} = \mu_i \ln \left(1 + \frac{\Delta I_i}{I_i} \right) = \mu_i \ln(1 + \delta_i), \end{aligned} \quad (5)$$

где δ_i – разностный порог, определяющий то наименьшее относительное приращение внешнего стимула $\left(\frac{\Delta I_i}{I_i} \right)$, которое вызывает минимальное изменение интенсивности ощущения. Зрительный анализатор человека обладает различительной чув-

ствительностью не только к контрасту изображения, но и к другим его параметрам. Выражение (5) справедливо, если порог δ_i не зависит от стимула I_i . На практике разностный порог является функцией стимула I_i , т. е. $\delta(I_i)$. В общем случае числитель (3) можно представить в интегральной форме

$$E_i = \int_0^{E_i} dE_i, \quad (6)$$

тогда

$$n_i = \int_0^{E_i} \frac{dE_i}{\mu_i \ln(1 + \delta(I_i))}. \quad (7)$$

Учитывая (6) и переходя под знаком интеграла в (7) от переменной интегрирования E_i к переменной I_i , по формуле

$$dE_i = \mu_i \frac{dI_i}{I_i} \quad (8)$$

получаем выражение

$$n_i = \int_{I_0}^{I_i} \frac{dI_i}{I_i \ln(1 + \delta(I_i))} \quad (9)$$

для подсчета числа градаций (единиц ощущения), различаемых глазом наблюдателя в пределах изменения стимула от I_0 до I_i . При этом предполагается, что при $E_i = 0$ $I_i = I_0$ есть абсолютный порог, равный минимальной интенсивности стимула, вызывающего возникновение субъективного ощущения, а при $E = E_i$ $I = I_i$ есть верхняя граница переменной интегрирования. Полагая в (9) $\delta(I_i) = \delta_i = \text{const}$, получаем формулу для подсчета числа единиц ощущения в зоне, где выполняется закон Вебера–Фехнера,

$$n_i = \frac{\ln \left(\frac{I_i}{I_0} \right)}{\ln(1 + \delta)} = \beta_i \ln \left(\frac{I_i}{I_0} \right). \quad (10)$$

Из формул (9) и (10) следует, что различительная чувствительность зрительного анализатора определяется разностным (или дифференциальным) порогом

$$\delta_i = \frac{\Delta I_i}{I_i} = 1 - \frac{I_2}{I_1}, \quad (11)$$

где $\Delta I_i = |I_1 - I_2|$ – абсолютное минимальное изменение стимула от некоторого исходного значения I_1 до значения I_2 , вызывающее приращение ощущения на величину Δn_i , являющуюся единицей ощущения. Экспериментальное нахождение величины δ_i или функции $\delta(I_i)$ является одним из ключевых положений решения общей задачи получения обобщенной оценки качества изображения. Наличие

экспериментально определенных кривых разностных порогов позволяет построить графики зависимости абсолютного числа единиц ощущения соответствующих параметров от диапазона изменения последних, т. е. функции вида $n_i = \varphi(I_i)$. Следующим пунктом общей программы является экспериментальное определение на шкале отношений сенсорной функции зрительного анализатора $E_i = f(I_i)$ по одной из стандартных методик, используемых в психофизике, например, методом “непосредственной оценки” [9]. Полученные экспериментальные зависимости подвергаются ряду нормировок. Это связано с тем хорошо известным фактом, что у функций вида $n_i = \varphi(I_i)$ существует граничное значение параметра $I_i = I_{i\max}$, дальнейшее увеличение которого уже не приводит к улучшению субъективного восприятия качества изображения, что проявляется, как правило, в наличии слабо выраженного максимума функции $n_i = \varphi(I_i)$, достигаемого при $I_i = I_{i\max}$. Используя в качестве нормирующих множителей значение $I_{i\max}$ и соответствующее ему число $n_{i\max}$, график вида $n_i = \varphi(I_i)$ можно преобразовать в график

$$\tilde{n}_i = \varphi(\tilde{I}_i), \text{ где } \tilde{n}_i = \frac{n_i}{n_{i\max}} \text{ и } \tilde{I}_i = \frac{I_i}{I_{i\max}}. \text{ График сен-}$$

сорной функции также преобразуется в график $\tilde{E}_i =$

$$= f\left(\frac{I_i}{I_{i\max}}\right) = f(\tilde{I}_i) \text{ и подвергается дополнительной}$$

перенормировке, согласно которой значение $E_i = 1$ достигается в точке $f(I_{i\max})$. Зависимости $\tilde{n}_i = \varphi(\tilde{I}_i)$ и $\tilde{E}_i = f(\tilde{I}_i)$ позволяют построить в абсолютной шкале отношений зависимость сенсорной функции от относительных величин числа единиц ощущения в виде $\tilde{E}_i = f(\varphi^{-1}(\tilde{I}_i)) = \psi(\tilde{n}_i)$ по каждому из параметров изображения. Согласно мультипликативному свойству шкалы отношений обобщенная объективная оценка качества изображения по совокупности параметров вычисляется как произведение объективных оценок отдельных параметров, т. е.

$$\tilde{E} = \prod_{i=1}^3 \tilde{E}_i. \quad (12)$$

Для получения обобщенной интегральной оценки качества изображения согласно (2) необходимо конкретизировать вид зависимости $\tilde{E}_i = \psi(\tilde{n}_i)$ с тем, чтобы получать оценку $\tilde{Q}$ в значениях нормированных единиц ощущения. В дальнейшем предполагается использование нормированного варианта соотношения (2)

$$\tilde{Q} = \sum_{i=1}^3 C_i \tilde{E}_i \quad (13)$$

при условии, что $\sum_{i=1}^3 C_i = 1$.

Согласно закону Стивенса [10] $\psi(\bullet)$ есть степенная функция вида

$$E_i = K_i (I_i - I_0)^{\gamma_i}, \quad (14)$$

где K_i – коэффициент пропорциональности, а γ_i – показатель степени. Принимая для I_i логарифмический масштаб (шкала счета единиц) и вводя обозначение $K_i = \mu_i^{\gamma_i}$, получаем

$$E_i = \left(\mu_i \ln \left(\frac{I_i}{I_0} \right) \right)^{\gamma_i} = n_i^{\gamma_i}. \quad (15)$$

Используя условие нормировки значением $I_{i\max}$, будем иметь

$$\tilde{E}_i = \beta_i \ln \left(\frac{I_i}{I_0} \right)^{\gamma_i} = \tilde{n}_i^{\gamma_i}, \quad (16)$$

где нормирующий коэффициент $\beta_i = \frac{1}{\mu_i \ln \frac{I_{i\max}}{I_0}}$. Со-

отношение (16) указывает на наличие сложной нелинейной зависимости сенсорной функции $\tilde{E}_i = \psi(\tilde{n}_i)$ по каждому из своих параметров. Согласно (16), (12) и (13) для одного параметра (13) можно привести к виду

$$\tilde{E}_i = \tilde{Q}^{\gamma_i} = C_i \tilde{n}_i^{\gamma_i},$$

а для слитной совокупности трех параметров

$$\tilde{E} = \tilde{Q}^{\gamma_k} = (C_1 \tilde{n}_1 + C_2 \tilde{n}_2 + C_3 \tilde{n}_3)^{\gamma_k}, \quad (17)$$

где γ_k – новое значение показателя степени, определяемое экспериментально.

Соотношения (12) и (17) дают аналитические формулы для расчета обобщенной интегральной оценки качества изображения по совокупности формирующих его параметров. Для сравнения объективных оценок $\tilde{E}_i$, полученных согласно (12), с данными субъективных экспертиз воспользуемся методами теории иерархий и приоритетов [11].

В рассматриваемой ситуации изображения образуют низший уровень иерархии, а соответствующие им значения параметров – следующий, стоящий над изображениями, более высокий уровень иерархии, что поясняет следующая схема (рис. 1). Пусть мы имеем k изображений, каждое из которых характеризуется значениями трех параметров w_i^n , где $i = 1, 2, 3$, а $n = 1, \dots, k$. Значения параметров заданы в величинах относительных единиц ощущения $\tilde{n}_i$. В соответствии с общей теорией для каждого из k изображений фиксируются значения одного из его параметров и составляется матрица парных сравнений (МПС) параметров данного уровня, например, яркости. Известно, что вектор-столбец собственных значений МПС характеризует приоритет

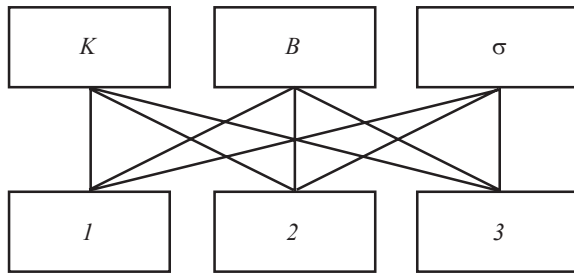


Рис. 1. Схема иерархической модели сравнительной оценки качества изображений. 1, 2, 3 – изображения одинакового качества; K, B, σ – контраст, яркость и среднеквадратическое отклонение шума.

рассматриваемых изображений относительно выбранного параметра, в данном случае – яркости. Аналогичным образом строятся МПС контраста и шума и вычисляются их вектор-столбцы собственных значений, характеризующие приоритет изображений относительно контраста и шума. Полученные вектор-столбцы объединяются в матрицу A, которая носит название матрицы приоритетов. Произведение этой матрицы на искомый вектор-столбец C относительных весовых коэффициентов изображения определяет качество рассматриваемых изображений на нижнем уровне иерархии. Таким образом,

$$A \cdot C = B. \quad (18)$$

Поскольку вектор-столбец B известен и является результатом субъективных экспертиз, то решение поставленной задачи эквивалентно нахождению решения крамеровской системы линейных уравнений (18) и дается выражением

$$C = A^{-1} \cdot B, \quad (19)$$

где A^{-1} – матрица, обратная матрице приоритетов A.

Результаты экспериментов

Эксперименты осуществлялись методом компьютерного моделирования с использованием пакета математических программ Matlab. Все виды тестовых и сюжетных изображений воспроизводились на жидкокристаллическом экране дисплея персонального компьютера (ПК). При этом реальные физические характеристики изображения, такие как его яркость и дисперсия шума, преобразуются в безразмерные двумерные массивы целых чисел, изменяющиеся в диапазоне 0–255 единиц. Средняя яркость изображения рассчитывалась по формуле

$$\bar{B}_0 = \int_0^{B_{\max}} B_i f(B_i) dB_i, \quad (20)$$

где $f(B_i)$ – одномерная гистограмма яркостей изображения. Поскольку средняя яркость есть однород-

ная функция первой степени от своих аргументов [3], то регулирование средней яркости осуществлялось с помощью линейного поэлементного преобразования вида $\chi B_i = \beta_i$, где B_i и β_i – яркости исходного и преобразованного изображений соответственно, χ – коэффициент пропорциональности.

Средний контраст сюжетных изображений согласно [12] рассчитывался по формуле

$$K_0 = \int_0^{B_{\max}} \left| \frac{B_i^2 - \bar{B}_0^2}{B_i^2 + \bar{B}_0^2} \right| f(B_i) dB_i, \quad (21)$$

где $f(B_i)$ – одномерная гистограмма яркостей B_i рассматриваемого изображения, $\bar{B}_0$ – средняя яркость.

Для получения сюжетных изображений различного контраста были использованы некоторые результаты теории нелинейных безынерционных преобразований изображения [12]. В частности, в [12] было показано, что мы можем изменять средний контраст преобразованного изображения, варьируя его функцию распределения $\phi(x)$. Однако значительно удобнее было бы найти одно единственное распределение, зависящее от параметра, изменением которого можно регулировать контраст преобразованного изображения относительно исходного. Замечательным результатом, содержащимся в [12], является то, что такое распределение было найдено! Им оказалось вырожденное бета-распределение с плотностью $f(x) = \delta x^{\delta-1}$. Используя этот результат, нетрудно показать, что формула для вычисления контраста преобразованного изображения имеет вид

$$\bar{K}_0(\beta) = \int_0^1 \left| \frac{x^{\frac{2}{\delta}} - \left(\frac{\delta}{\delta+1} \right)^2}{x^{\frac{2}{\delta}} + \left(\frac{\delta}{\delta+1} \right)^2} \right| dx. \quad (22)$$

Применяя формулы (20)–(22) для получения изображений с заданными средними значениями яркости и контраста, необходимо помнить, что линейные преобразования не изменяют контраст исходного изображения, а нелинейные, меняя контраст, одновременно изменяют и среднюю яркость изображения.

К изображениям с выбранными значениями средней яркости и среднего контраста аддитивно добавлялся одномерный белый гауссовский шум с математическим ожиданием, равным нулю, и заданными значениями дисперсии шума.

На рис. 2 приведены результаты измерения зависимостей дифференциальных порогов зрительного восприятия от диапазона изменения соответствующих параметров. Эксперименты состояли в генери-

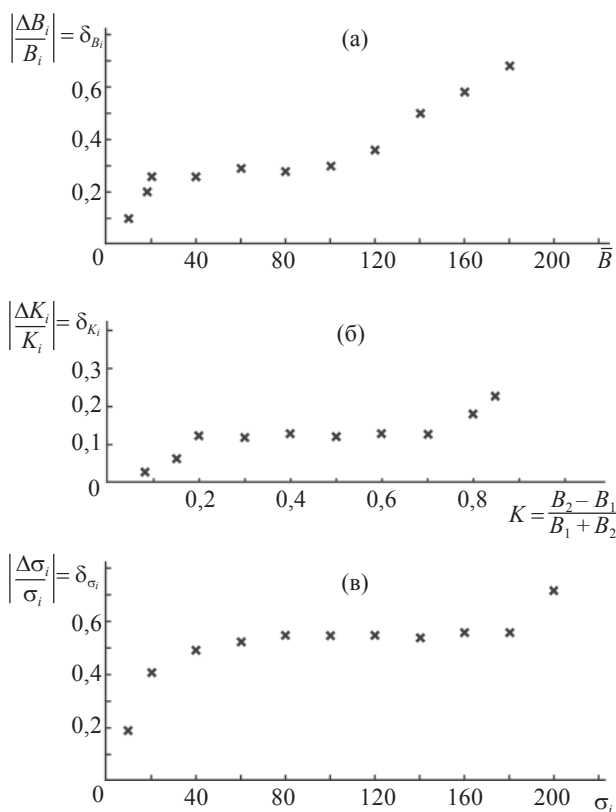


Рис. 2. Зависимости дифференциальных порогов яркости от средней яркости изображения (а), контраста от среднего контраста изображения (б) и нормального белого шума от его среднеквадратического отклонения (в).

ровании на экране монитора ПК тестовых изображений. В случае различения дифференциальных порогов яркости исходным являлось поле равномерной яркости, начальное значение средней яркости которого равнялось абсолютному порогу восприятия, т. е. было равно тому минимальному значению физического стимула, которое соответствует возникновению начального зрительного ощущения стимула. В ходе эксперимента исходное значение средней яркости увеличивалось до получения наблюдателем первичной реакции на изменение субъективной величины ощущения. Полученные результаты обрабатывались с помощью формулы (11). Для получения кривых разностных порогов контраста исходными являлись воспроизводимые на экране монитора в поле зрения наблюдателя два равновеликих по площади поля равномерной яркости. До начала эксперимента средние яркости обоих полей были равны. В ходе эксперимента яркости смежных полей изменялись в противоположных направлениях и фиксировались значения стимулов, соответствующие последовательной субъективной реакции наблюдателя на изменение контраста. В случае шума на экран с постоянной средней яркостью подавался

аддитивно одномерный белый гауссовский шум со средним значением, равным нулю. Наблюдателю предлагалось фиксировать моменты субъективного приращения ощущения шума по мере увеличения его дисперсии. Внешние условия всех экспериментов поддерживались неизменными. Результаты усреднялись по данным десяти независимых испытаний.

На рис. 3 представлены ненормированные кривые функций $n_i = \varphi(I_i)$ соответствующих параметров на шкале счета единиц. Расчет числа единиц ощущения проводился по методике [5] путем аппроксимации кривых дифференциальных порогов в виде двух наклонных прямых вида $y = kx + b$ вне зоны выполнимости закона Вебера–Фехнера и прямой, параллельной оси абсцисс $y = \text{const}$, в зоне выполнения закона Вебера–Фехнера с последующим расчетом значений n_i по формулам (9) и (10).

Приведенные на рис. 2 результаты подтверждают отмеченную ранее характерную особенность зрительного восприятия, заключающуюся в достижении максимального субъективного ощущения качества изображения, которое в дальнейшем не улучшается, а в отдельных случаях даже незначительно ухудшается с увеличением физического стимула.

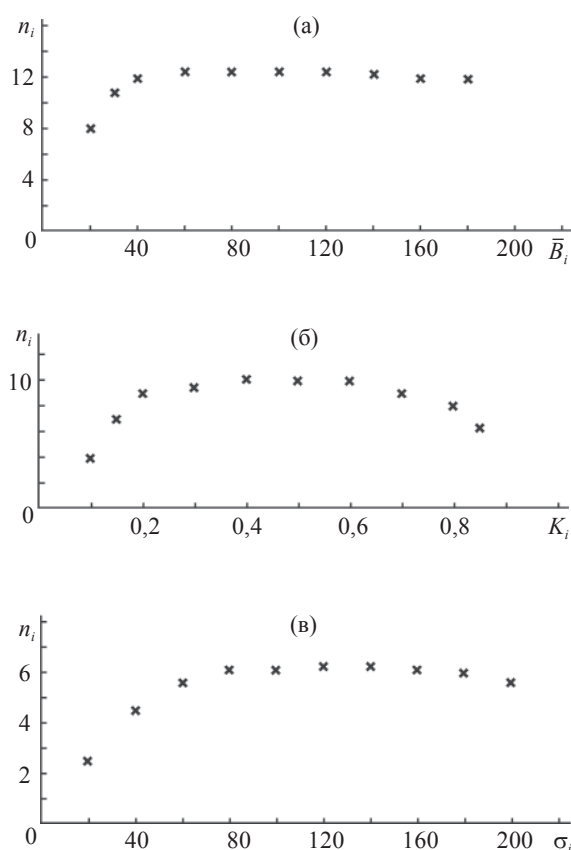


Рис. 3. Сенсорные характеристики яркости (а), контраста (б) и шума (в) на шкале счета единиц.

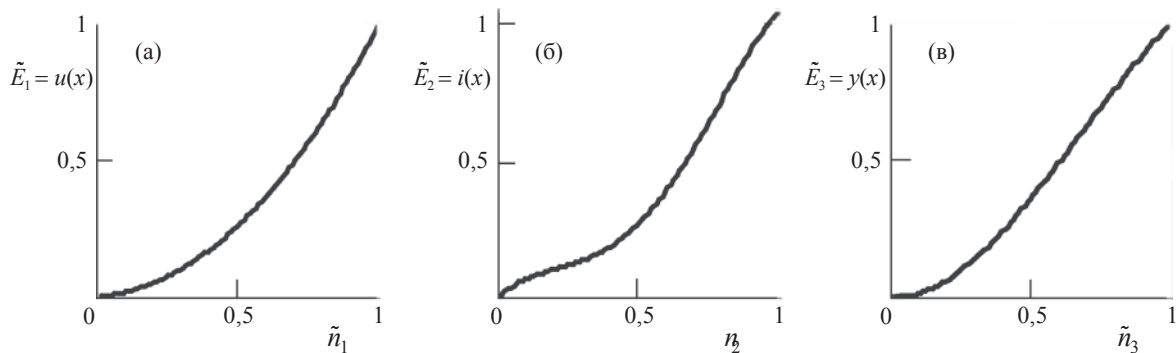


Рис. 4. Сенсорные функции яркости (а), контраста (б) и шума (в) в абсолютной шкале.

Наконец, на рис. 4 приведены нормированные сенсорные характеристики зрительного анализатора по каждому из исследуемых параметров $\tilde{E}_i = \psi(\tilde{n}_i)$, сглаженные в результате полиномиальной экстраполяции экспериментальных кривых. Полученные данные позволяют выразить величины субъективных ощущений числом нормированных относительных единиц ощущения. Следует обратить внимание на то, что сенсорная характеристика, учитывающая влияние шума на качество изображения (рис. 4в), построена для величины $1 - \psi(n_3)$, т. е. дополнительной к $\psi(n_3)$. Это в дальнейшем будет означать, что увеличение коэффициента C_3 в формуле (2) соответствует уменьшению шума на изображении. Из полученных результатов следует, что согласно (12) путем перемножения нормированных сенсорных функций (рис. 4) может быть получена обобщенная оценка качества изображения в абсолютной шкале отношений (рис. 5).

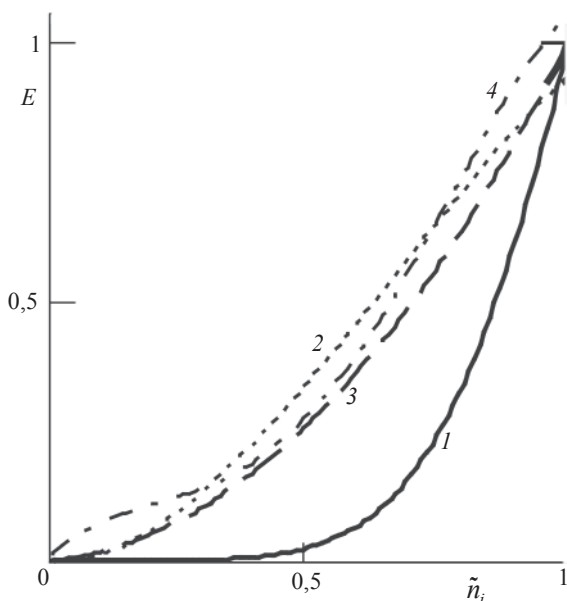


Рис. 5. Частные сенсорные функции и обобщенная сенсорная функция в абсолютной шкале: 1 – $F(x)$, 2 – $y(x)$, 3 – $u(x)$, 4 – $i(x)$.

Для проверки результатов теоретических расчетов были выполнены эксперименты по сравнению данных субъективных экспертиз с результатами объективного оценивания. С этой целью были изготовлены 27 тестовых сюжетных изображений, каждое из которых было получено одной из трех возможных комбинаций параметров при условии, что каждый из параметров может принимать по три заранее выбранных и зафиксированных в ходе эксперимента значения. Десяти экспертам предлагалось ранжировать синтезированные изображения в порядке ухудшения их качества. Наилучшее изображение получало 27 баллов, наихудшее – 1. По окончании всех экспертиз субъективное качество каждого изображения оценивалось значением его среднеарифметического балла. Все полученные результаты сведены в таблицу. В столбцах 2–4 приведены значения сенсорных функций $\tilde{E}_i = \psi(\tilde{n}_i)$, соответствующие выбранным значениям яркости, контраста и шума в тестовых изображениях, подвергнутых экспертизе. В 5-м столбце приведены значения интегральных объективных оценок, полученные согласно (12) перемножением частных оценок в столбцах 2–4. В 6-м столбце содержатся нормированные оценки качества изображений, полученные по результатам субъективных экспертиз.

В отличие от [5] в дальнейшем предполагается, что весовые коэффициенты C_i в формуле (2) различны. Это означает, что влияние параметров изображения на его субъективное восприятие может изменяться с изменением качества изображения. Для проверки этой гипотезы были выбраны тройки изображений высокого качества (№ 2, 7 и 13 в таблице) – объективная оценка $E \approx 0,70$; среднего качества (№ 11, 16, 22) – $E \approx 0,56$ и низкого качества (№ 9, 21, 26) – $E \approx 0,30$. Важным дополнительным условием выбора троек изображений являлось обеспечение условия недоминируемости параметров, характеризующих изображения [13]. Совокупности параметров для выбранной тройки изображений будут недоминируемыми, когда предпочтения по

Результаты расчетов и субъективной оценки качества изображения

1	2	3	4	5	6
№ изображения	E_1	E_2	E_3	$\hat{E}$	E
1	1,0067	0,9927	1,0093	1,008645055	1
2	1,0067	0,9927	0,6833	0,6828566	0,688
3	1,0067	0,9927	0,4453	0,44501104	0,375
4	1,0067	0,8543	1,0093	0,868022031	0,688
5	1,0067	0,8543	0,6833	0,587654269	0,688
6	1,0067	0,8543	0,4453	0,382968603	0,5
7	1,0067	0,6783	1,0093	0,689195065	0,563
8	1,0067	0,6783	0,6833	0,466587722	0,563
9	1,0067	0,6783	0,4453	0,304070705	0,25
10	0,8166	0,9927	1,0093	0,818177761	0,688
11	0,8166	0,9927	0,6833	0,553909506	0,75
12	0,8166	0,9927	0,4453	0,360977467	0,5
13	0,8166	0,8543	1,0093	0,704109259	0,688
14	0,8166	0,8543	0,6833	0,476684689	0,625
15	0,8166	0,8543	0,4453	0,310650801	0,25
16	0,8166	0,6783	1,0093	0,559051048	0,625
17	0,8166	0,6783	0,6833	0,37847972	0,563
18	0,6479	0,6783	0,4453	0,195696245	0,375
19	0,6479	0,9927	1,0093	0,649151814	0,688
20	0,6479	0,9927	0,6833	0,439478286	0,625
21	0,6479	0,9927	0,4453	0,286403748	0,375
22	0,6479	0,8543	1,0093	0,558648529	0,625
23	0,6479	0,8543	0,6833	0,378207213	0,688
24	0,6479	0,8543	0,4453	0,246473982	0,313
25	0,6479	0,6783	1,0093	0,443557646	0,5
26	0,6479	0,6783	0,6833	0,30029024	0,375
27	0,6479	0,6783	0,4453	0,195696245	0,188

каждому из параметров для трех сравниваемых изображений будут различны [14].

Переходя теперь в выбранных тройках изображений от значений ординат сенсорных функций $\hat{E}_i$ к значениям относительных единиц ощущения $\tilde{n}_i$ на оси абсцисс, получим для изображений высокого качества следующие значения относительных единиц яркости:

$$w_1 = 1,00 \quad w_2 = 1,00 \quad w_3 = 0,85;$$

контраста:

$$w_1 = 1,00 \quad w_2 = 0,77 \quad w_3 = 0,89;$$

дисперсии шума:

$$w_1 = 0,87 \quad w_2 = 1,00 \quad w_3 = 1,00.$$

Дальнейший анализ проводится по методике, описанной выше. Проиллюстрируем это подробнее на примере вычисления весовых коэффициентов для изображений высокого качества.

Обратносимметричная согласованная МПС значений яркости равна

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1,76 \\ 1 & 1 & 1,76 \\ 0,85 & 0,85 & 1 \end{pmatrix},$$

вектор-столбец суммируемых элементов строк

$$\begin{pmatrix} 3,76 \\ 3,76 \\ 2,70 \end{pmatrix}, \text{ что дает нормированный вектор-столбец}$$

собственных значений, определяющий приоритет

$$\text{изображений по отношению к яркости} \begin{pmatrix} 0,368 \\ 0,368 \\ 0,264 \end{pmatrix}.$$

Аналогично находятся два других вектор-столбца, определяющих приоритеты изображений по отношению к контрасту и шуму. Объединяя нормированные вектор-столбцы собственных значений, получим нормированную матрицу приоритетов

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0,368 & 0,376 & 0,287 \\ 0,368 & 0,289 & 0,356 \\ 0,264 & 0,335 & 0,356 \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Вектор-столбец относительных субъективных оценок $\mathbf{B}_1$ по данным экспертиз вычисляется путем пересчета этих оценок в относительные единицы ощущения по графику обобщенной сенсорной функции E , полученной перемножением частных сенсорных функций. Для изображений высокого качества получаем

$$\mathbf{B}_1 = \begin{pmatrix} 0,33 \\ 0,34 \\ 0,33 \end{pmatrix}. \quad (24)$$

Таким образом, согласно (19) окончательно получаем

$$A_1^{-1} \cdot \mathbf{B}_1 = \mathbf{C}_1 = \begin{pmatrix} 0,220 \\ 0,281 \\ 0,499 \end{pmatrix}. \quad (25)$$

Действуя подобным образом, находим, что для изображений среднего качества

$$\mathbf{C}_2 = \begin{pmatrix} 0,224 \\ 0,288 \\ 0,498 \end{pmatrix} \quad (26)$$

и для изображений низкого качества

$$\mathbf{C}_3 = \begin{pmatrix} 0,215 \\ 0,359 \\ 0,426 \end{pmatrix}. \quad (27)$$

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать следующие предварительные выводы. Для изображений высокого качества главным фактором, ухудшающим качество его субъективного восприятия, является наличие зашумленности изображений. В соответствии с этим алгоритм зрительного анализа стремится максимально подавить шумы $C_3 = 0,499$ и повысить его контраст $C_2 = 0,281$. Ситуация практически сохраняется для изображений среднего качества. Однако на изображениях худшего качества алгоритм работы зрительного анализатора изменяется. Он стремится улучшить визуальное субъективное восприятие качества в первую очередь за счет увеличения контраста изображения $C_2 = 0,359$, а не компенсации шумов $C_3 = 0,426$. В заключение следует отметить, что коэффициент линейной корреляции объективных данных, приведенных в столбце 5 таблицы, и данных субъективных экспертиз, содержащихся в 6-м столбце, дает значение $r = 0,84 \pm 0,12$, что свидетельствует о достаточно хорошем согласии данных объективных обобщенных оценок качества с данными субъективных экспертиз.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Нестерук В.Ф., Порфирьева Н.Н.* Контрастный закон восприятия света // *Опт. и спектр.* 1970. Т. 29. № 6. С. 1138–1143.
2. *Мирошников М.М., Нестерук В.Ф., Порфирьева Н.Н.* Иконика и обработка изображений // *ОМП.* 1978. № 12. С. 34–36.
3. *Нестерук В.Ф.* Оптимальное нелинейное контрастно-статистическое преобразование изображений и оценка его эффективности // *ОМП.* 1981. № 11. С. 9–11.
4. *Нестерук В.Ф., Соколова В.А.* Вопросы теории восприятия сюжетных изображений и количественная оценка их контраста // *ОМП.* 1980. № 5. С. 11–13.
5. *Антипин М.В.* Интегральная оценка качества телевизионного изображения. Л.: Наука, 1970. 154 с.
6. *Филиппова А.А.* Теорема Мизеса о предельном поведении функционалов от эмпирических функций распределения и ее статистические применения // *Теория вероятностей и ее применения.* 1962. Т. 7. В. 1. С. 26–60.
7. *Трифонов М.И.* Математическая модель наблюдателя в процессе зрительной обработки изображений // *Дисс. на соискание уч. степени доктора техн. наук. Ин-т физиологии РАН им. И.П. Павлова.* СПб., 1998.
8. *Хартлайн Х.* Рецепторы и интеграция информации в сетчатке. Современные проблемы биофизики. М.: ИЛ, 1962. Т. 2.
9. *Stevens S.S.* The measurement of loudness // *J. Acoust. Society of America.* 1955. V. 27. № 5. P. 815–829.
10. *Stevens S.S.* Handbook of experimental psychology. N.-Y., London, 1951.
11. *Шикин Е.В., Чхартишвили А.Г.* Математические методы и модели в управлении. М.: Изд-во “Дело”, 2002. 438 с.
12. *Нестерук В.Ф.* Принцип дуальности при нелинейных безынерционных преобразованиях // *Труды ГОИ.* 1987. Т. 64. В. 198. С. 12–24.
13. *Микони С.В.* Теория и практика рационального выбора. М.: Изд-во “Маршрут”, 2002. 462 с.
14. *Миркин Б.Г.* Проблема группового выбора. М.: Наука, 1974.