

О. А. БАРТЕНЕВА, Н. С. УЛЬЯНОВА, Ю. А. ФЛЕГОНТОВ

(Ленинград)

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ
ТЕСТ-ОБЪЕКТОВ,
ИМИТИРУЮЩИХ ТИПОВЫЕ СЮЖЕТЫ
ЛЮБИТЕЛЬСКОЙ ФОТОГРАФИИ**

В настоящее время для контроля качества фотографического изображения используются штриховые или радиальные миры абсолютного контраста, оценивающие системы по числу линий, разрешаемых на единице длины. Такие тест-объекты (миры) не позволяют контролировать фотоаппаратуру в соответствии с требованиями к современным приборам. Во-первых, одномерные миры дают завышенное значение разрешающей способности, во-вторых, широкие спектральные возможности современных фотоаппаратов приводят к необходимости оценивать их качество с учетом целевого назначения. Для этого недостаточно измерения разрешающей способности или частотно-контрастной характеристики объектива, так как эти параметры не учитывают условия съемки, например спектр тест-объекта. С учетом целевого назначения фотоаппаратуру желательно оценивать по количеству оптической информации, записанной в изображении характерного объекта съемки. Для этого необходимо использовать усредненные спектры типовых сюжетов и изготовить тест-объекты, спектры которых максимально приближены к измеренным. Далее качество фотоаппаратов следует оценивать, измеряя их частотно-контрастные характеристики (ЧКХ) и вычисляя количество информации, записанное в изображении каждого из тестируемых объектов. Такие вычисления проводятся по методу, описанному в [1], и выполняются по формуле

$$I = \pi \int_0^{\infty} N \log_2 \left[1 + 0,186\gamma^2 \frac{S^2(N)}{G_D(N)} T^2(N) \right] dN, \quad (1)$$

где I — информационная емкость системы, бит/мм²; N — пространственная частота, мм⁻¹; $S(N)$ — пространственно-частотный спектр объекта съемки, мкм²; $G_D(N)$ — спектр гранулярности фотоматериала, мкм²; $T(N)$ — ЧКХ оптико-фотографической системы; γ — коэффициент контрастности фотоматериала.

В данной статье поставлена задача разработать тест-объекты, имитирующие реальные типовые сюжеты любительской фотографии, для контроля фотокамер по информационному критерию с учетом специализации фотоаппаратуры. С этой целью рассмотрена возможность построения миры, спектр которой был бы достаточно близок к заданному пространственно-частотному спектру (ПЧС), например, соответствующему спектру типового сюжета любительской фотосъемки [2]. Характерная форма спектров, например портрета 2 или природного ландшафта 1 (рис. 1), делает задачу расчета распределения яркости тест-объекта соответствующей спектру типового сюжета достаточно сложной. Действительно, нужно иметь в виду, во-первых, технологию изготовления миры: для воспроизводимости распределение яркости миры должно подчиняться достаточно простой и легко осуществляемой с точки зрения фотографии зависимости, например в случае изотропного спектра мира может состоять из концентрических колец различной ширины с различной плотностью почернения. Во-вторых, как показывают вычисления, количество записанной в фотоизображении информации, а следовательно, и визуальная оценка достаточно критичны к некоторым характерным свойствам спектра объекта. Исследованию характерных свойств спектров,

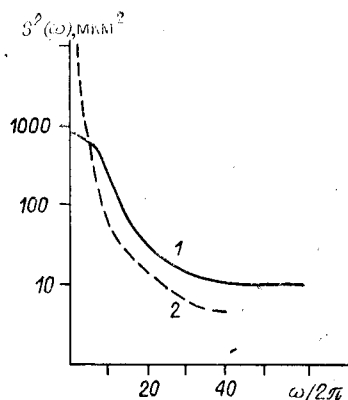


Рис. 1. Пространственно-частотные спектры типовых сюжетов любительской фотографии: 1 — природный ландшафт, 2 — портрет

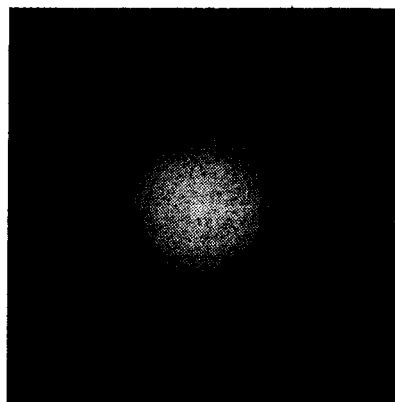


Рис. 2. Тест-объект (мира), имитирующий типовые сюжеты любительской фотографии типа портрет

их влиянию на количество записанной информации, а также построению тест-объектов с близким по передаваемой информации распределением яркости посвящена данная статья. Разработанный в процессе решения поставленной задачи математический аппарат представляет и самостоятельный интерес для решения аналогичных задач аппроксимации функций по их фурье-спектрам.

В статье рассмотрен случай изотропных пространственно-частотных спектров. Если взять обратное преобразование Фурье от спектра типового сюжета и полученную таким образом функцию, имеющую круговую симметрию, аппроксимировать ступенчатой функцией, распределение яркости в плоскости тест-объекта будет следующим:

$$E(r) = e_m \text{ при } r_{m-1} \leq r < r_m, \quad (2)$$

где e_m — константа, выражающая яркость мира в плоскости m -го кольца, $m = 1, 2, \dots, M$; M — число колец мира; r_m — радиус m -го кольца мира, $r_0 = 0$, $r_M = R$.

Такая мира изображена на рис. 2, а ее фурье-спектр имеет вид

$$S_M(\omega) = \sum_{m=1}^M A_m \frac{J_1(r_m \omega)}{\omega}. \quad (3)$$

Здесь ω — пространственная круговая частота; $\omega = 2\pi N$; $J_1(x)$ — бесселева функция первого рода первого порядка; A_m — коэффициенты, связанные с параметрами e_m , r_m следующим образом:

$$A_M = 2\pi R e_M;$$

$$A_m = 2\pi r_m (e_m - e_{m+1}), \quad m < M.$$

Для построения тест-объекта (мира) необходимо максимально приблизить заданный спектр $S(\omega)$, например спектр типового сюжета, суммой функций указанного вида (3).

Сначала рассмотрим случай, когда $S(\omega)$ непрерывна, имеет конечный интервал задания $[0, W]$ и $S(W) = 0$. Пусть для этой функции выполняется условие

$$\int_0^W \omega^2 S(\omega) J_1(\lambda_m \omega) d\omega = \frac{\varphi(W, \lambda_m)}{\lambda_m^{2+\alpha}}, \quad (4)$$

где $\lambda_m = \chi_m/W$; χ_m — m -й корень уравнения $J_1(\chi_m) = 0$, $\alpha > 0$; $\varphi(W, \lambda_m)$ — ограниченная функция по λ_m . (Заметим, что это условие выполнено, на-

пример, когда интеграл $\int_0^W \omega^2 |S''(\omega)| d\omega$ не обращается в бесконечность.)
 Такую функцию, умноженную на ω , можно разложить по бесселевым функциям [3], и будет справедливо равенство $S(\omega) = \sum_{m=1}^{\infty} A_m \frac{J_1(\lambda_m \omega)}{\omega}$ почти всюду на $[0, W]$. Коэффициенты A_m вычисляются по формуле

$$A_m = \frac{2 \int_0^W \omega^2 S(\omega) J_1(\lambda_m \omega) d\omega}{W^2 J_0(\lambda_m W)}. \quad (5)$$

Возьмем в качестве спектра миры M первых слагаемых

$$S_M(\omega) = \sum_{m=1}^M A_m \frac{J_1(\lambda_m \omega)}{\omega}$$

и оценим погрешность спектра миры по отношению к заданному $S(\omega)$ по норме пространства L_2 , т. е.

$$\|S(\omega) - S_M(\omega)\|^2 = 2\pi \int_0^W \omega \left(\sum_{m=M+1}^{\infty} A_m \frac{J_1(\lambda_m \omega)}{\omega} \right)^2 d\omega.$$

Используя условие (4) и обозначив $\max_{\lambda_m} \varphi(W, \lambda_m)$ через C_W , получаем оценку

$$\|S(\omega) - S_M(\omega)\|^2 \leq \frac{2,54\pi^{1-2\alpha} C_W^2}{W\alpha} \frac{1}{M^{2\alpha}}. \quad (6)$$

Из оценки (6) видно, что можно сделать норму ошибки сколь угодно малой, взяв соответствующее число колец миры M . С физической точки зрения оценка (6) соответствует оценке энергии отброшенной части спектра. Впоследствии через такую норму будет приведена информационная оценка, которая является конечной целью исследования. Далее, чтобы построить миру, необходимо вычислить коэффициенты A_m по формуле (5) и, принимая λ_i в качестве i -го радиуса r_i , определить значения e_i по формуле (3).

Рассмотрим теперь случай, когда пространственно-частотный спектр типового сюжета содержит протяженную «фоновую» часть, т. е. практически не ограничивается конечной областью задания. В этих условиях применение уже рассмотренной теории снижает точность аппроксимации. Такой спектр можно попытаться аппроксимировать суммой функций вида $De^{-\beta^2 \omega^2}$ и функций с описанными выше свойствами, затем, используя суперпозицию распределений яркости, построить соответствующую миру.

Рассмотрим построение миры $E(r)$ для функций вида $De^{-\beta^2 \omega^2}$. Так как множество ступенчатых функций плотно в L_2 и для функций, связанных между собой преобразованием Фурье (например, $f(r)$ и $F(\omega)$), справедливо равенство

$$\int_0^{\infty} \omega F^2(\omega) d\omega = \int_0^{\infty} r f^2(r) dr,$$

то спектр $S(\omega) = De^{-\beta^2 \omega^2}$ можно приблизить с любой точностью (по норме L_2) суммой функций вида (3), взяв за r_m величину $\lambda_m = R_m/M$, где R — максимальный радиус миры; M — число колец миры. Рассмот-

рим квадрат нормы разности спектра $S(\omega)$ и спектра мира $S_M(\omega)$

$$\int_0^{\infty} \omega \left(S(\omega) - \sum_{m=1}^M A_m \frac{J_1(\lambda_m \omega)}{\omega} \right)^2 d\omega \quad (7)$$

и минимизируем ее по A_m при фиксированных R и M по методу наименьших квадратов. Полученная при минимизации система уравнений

$$\frac{D}{\lambda_m} \left(1 - e^{\frac{\lambda_m^2}{4\beta^2}} \right) = \frac{1}{2} \left(\sum_{n=1}^m A_n \frac{\lambda_n}{\lambda_m} + \sum_{n=m+1}^M A_n \frac{\lambda_m}{\lambda_n} \right), \quad m = 1, 2, \dots, M,$$

имеет решения

$$A_M = \frac{2DM^2 \left(e^{\frac{R^2(M-1)^2}{M^2 4\beta^2}} - e^{-\frac{R^2}{4\beta^2}} \right)}{R(2M-1)}; \quad (8)$$

$$A_m = \frac{2DMm}{R} \left(\frac{e^{\frac{R^2(m-1)^2}{M^2 4\beta^2}} - e^{-\frac{R^2 m^2}{M^2 4\beta^2}}}{2M-1} - \frac{e^{\frac{R^2 m^2}{M^2 4\beta^2}} - e^{-\frac{R^2(m+1)^2}{M^2 4\beta^2}}}{2M+1} \right), \quad m < M.$$

Подставим эти значения A_m в выражение (7) и посчитаем норму разности:

$$\left\| S(\omega) - \sum_{m=1}^M A_m \frac{J_1(\lambda_m \omega)}{\omega} \right\|^2 = \pi D^2 \left[\frac{1}{2\beta^2} - \frac{4M^2}{R^2} \sum_{m=1}^M \frac{\left(e^{\frac{R^2(m-1)^2}{M^2 4\beta^2}} - e^{-\frac{R^2 m^2}{M^2 4\beta^2}} \right)^2}{2m-1} \right]. \quad (9)$$

Напомним, что R — максимальный радиус мира, M — число колец мира, поэтому, увеличивая число колец при фиксированном R , будем приближать спектр точнее. Обозначим R/M через Δ . Ясно, что, увеличивая M при фиксированном R , Δ стремится к нулю. Преобразуем общий член ряда в правой части (9):

$$\frac{\left(e^{\frac{\Delta^2(m-1)^2}{4\beta^2}} - e^{-\frac{\Delta^2 m^2}{4\beta^2}} \right)^2}{\Delta^2(2m-1)} = \frac{(m-1/2)\Delta^2}{8\beta^4} e^{-\frac{\Delta^2(m-\xi_m)^2}{2\beta^2}}, \quad 0 < \xi_m < 1.$$

Таким образом, ряд представляет собой сумму Дарбу, и при $\Delta \rightarrow 0$ сумма ряда с множителем $4M^2/R^2$ стремится к

$$\frac{1}{2\beta^4} \int_0^R e^{-\frac{x^2}{2\beta^2}} x dx = \frac{1}{2\beta^2} \left(1 - e^{-\frac{R^2}{2\beta^2}} \right),$$

а квадрат нормы соответственно стремится к $\frac{\pi D^2}{2\beta^2} e^{-\frac{R^2}{2\beta^2}}$. Ясно, что при $R \rightarrow \infty$ квадрат нормы стремится к нулю, и, выбрав R , чтобы

$$\frac{\pi D^2}{2\beta^2} e^{-\frac{R^2}{2\beta^2}} < \varepsilon_1,$$

а затем, выбрав такое M , чтобы

$$\left| \frac{4M^2}{R^2} \sum_{m=1}^M \frac{\left(e^{\frac{R^2(m-1)^2}{M^2 4\beta^2}} - e^{-\frac{R^2 m^2}{M^2 4\beta^2}} \right)^2}{2m-1} - \frac{1}{2\beta^2} \left(1 - e^{-\frac{R^2}{2\beta^2}} \right) \right| < \frac{\varepsilon_2}{\pi D^2},$$

будем иметь оценку

$$\left\| S(\omega) - \sum_{m=1}^M A_m \frac{J_1(\lambda_m \omega)}{\omega} \right\| < \sqrt{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}. \quad (10)$$

Таким образом, получено приближение спектра $S(\omega)$ суммой функций $\sum_{m=1}^M A_m \frac{J_1(\lambda_m \omega)}{\omega}$ с точностью (по норме L_2) $\sqrt{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}$. Далее, возьмем λ_m в качестве m -го радиуса r_m , вычислим A_m по формуле (8), определим e_m по (3) и получим функцию распределения яркости миры $E(r)$, соответствующую спектру $De^{-\beta^2 \omega^2}$. Впоследствии на основе оценки (10) будет сделана информационная оценка.

Заметим, что если спектр выражен суммой функций $S_1(\omega) + \dots + S_n(\omega)$, каждая из которых приближена спектром миры $S_{M_1}(\omega), \dots, S_{M_n}(\omega)$ с точностью $\sqrt{\delta_1}, \dots, \sqrt{\delta_n}$, то общая погрешность

$$\|(S_1 + \dots + S_n) - (S_{M_1} + \dots + S_{M_n})\| \leq \sqrt{\delta_1} + \dots + \sqrt{\delta_n}.$$

Как уже было сообщено выше, информационные критерии должны оценивать качество изображения фотоаппаратуры с точки зрения ее целевого назначения, т. е. обеспечивать наилучшее визуальное восприятие снимков, учитывая специфику фотографируемых объектов. В [4] показано, что наблюдается ярко выраженная корреляция между субъективными и информационными оценками при съемке типовых сюжетов. Построение сенсорных характеристик зрительного анализатора по информационным критериям позволило определить количество информации, т. е. число бит/мм², требуемое для повышения качества на одну категорию. Например, при съемке портрета требуется ~ 70 бит/мм², при съемке природного ландшафта ~ 100 бит/мм². Эти величины могут быть приняты в качестве допустимой погрешности количества информации ΔI , при которой качество двух изображений типового сюжета практически не различимо, т. е. относится к одной категории визуального восприятия.

Определим допустимую погрешность спектра (по норме L_2) на основании заданной погрешности количества информации ΔI . Пусть выполняется неравенство

$$|I - I_M| < \Delta I, \quad (11)$$

где I — количество информации от заданного ПЧС $S(\omega)$ типового сюжета; I_M — количество информации от спектра миры $S_M(\omega)$; ΔI — заданная погрешность.

Используя формулу (1), в которой $N = \omega/2\pi$, обозначив $\frac{0,186\gamma^2 T^2(\omega)}{G_D(\omega)}$ через $Q(\omega)$ и оценив при фиксированной ω

$$\left| \ln \left(\frac{1 + Q(\omega) S_M^2(\omega)}{1 + Q(\omega) S^2(\omega)} \right) \right| \leq \sqrt{Q(\omega)} |S(\omega) - S_M(\omega)|,$$

получим следующую оценку:

$$|I_M - I| \leq \frac{\sqrt{\pi/2}}{\ln 2} \left(\int_0^W \omega Q(\omega) d\omega \right)^{1/2} \|S(\omega) - S_M(\omega)\|.$$

Следовательно, если сделать миру с таким спектром, что

$$\|S(\omega) - S_M(\omega)\| \leq \frac{\Delta I \ln 2}{\sqrt{\pi/2} \left(\int_0^W \omega Q(\omega) d\omega \right)^{1/2}}, \quad (12)$$

то неравенство (11) будет выполнено.

3	0,081	1,839	0,040	2,467	13	0,331	0,261	0,166	0,338
4	0,107	1,343	0,053	1,709	14	0,357	0,261	0,178	0,337
5	0,131	0,957	0,065	1,252	15	0,382	0,261	0,191	0,338
6	0,156	0,648	0,078	0,831	16	0,406	0,261	0,204	0,337
7	0,181	0,457	0,091	0,595	17	0,431	0,261	0,215	0,337
8	0,207	0,346	0,103	0,445	18	0,457	0,260	0,228	0,337
9	0,231	0,295	0,116	0,383	19	0,481	0,260	0,240	0,337
10	0,256	0,272	0,127	0,350	20	0,506	0,257	0,253	0,332

Таким образом, при построении миры для конкретного типового сюжета можно добиться такого соответствия спектра миры спектру типового сюжета, чтобы фотоаппараты, близкие, но отличающиеся по количеству информации от заданного сюжета, различались бы и по количеству информации от спектра миры.

Для усредненных экспериментальных спектров [2] типовых сюжетов портрета и природного ландшафта была предложена аппроксимация

$$S(\omega) = \begin{cases} c_1 \left(1 - \left(\frac{\omega}{W}\right)^2\right) + c_2 \left(1 - \left(\frac{\omega}{W}\right)^2\right)^{45}, & 0 \leq \omega \leq W; \\ 0, & \omega > W, \end{cases}$$

причем для портрета коэффициенты равны $c_1 = 2,36$; $c_2 = 84,24$; $W = 2\pi \cdot 20$, для ландшафта — $c_1 = 2,77$; $c_2 = 27,23$; $W = 2\pi \cdot 40$. Количество колец миры равно 20.

В результате расчетов по формулам, указанным выше, получены значения распределения яркости для мир, имитирующих типовые сюжеты портрета и природного ландшафта (см. таблицу, в которой r_i — радиус i -го кольца миры, e_i — освещенность в i -м кольце). Миры с соответствующим распределением яркостей достаточно хорошо удовлетворяют неравенству (10) для исследованных фотоаппаратов, причем для портрета $\Delta I = 35$, для ландшафта $\Delta I = 50$. На рис. 2 представлена мира, аппроксимирующая типовой сюжет любительской фотосъемки типа портрет.

ВЫВОДЫ

Разработан алгоритм построения тест-объектов, имитирующих типовые сюжеты любительской фотографии, обладающие круговой симметрией, для контроля фотокамер по критерию информационной емкости.

Показано, что если погрешность построения спектра миры не превышает заданную величину, то разность количества информации в изображении типового сюжета и миры лежит в пределах одной категории визуального восприятия качества изображения.

Вычислены параметры тест-объектов, имитирующие типовые сюжеты любительской фотографии типа портрет и природный ландшафт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nelson C. N. Photographic system as a communication channel // Appl. Opt.— 1972.— V. 11, N 1.— P. 87.
2. Бартенева О. А., Калугин Д. Е., Лесина Т. М., Решеткина И. В. Пространственно-частотные спектры типовых сюжетов любительской фотографии // ОМП.— 1987.— № 1.
3. Ватсон Г. П. Теория бесселевых функций.— М.: Изд-во иностр. лит., 1949.
4. Бартенева О. А., Решеткина И. В., Калугин Д. Е. и др. Взаимосвязь визуальных и информационных оценок качества изображения // ОМП.— 1988.— № 1.

Поступила в редакцию 16 декабря 1987 г.