

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЛУКТУАЦИОННЫХ
ФОТОГРАФИЧЕСКИХ ШУМОВ,
ПРЕОБРАЗОВАННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АПЕРТУРОЙ

Л. М. АНАНЬЕВ, А. С. МОСКАЛЕВА

Фотографические шумы, как и любые другие флуктуационные шумы, оказывают отрицательное воздействие при распознавании мелких деталей изображения. В настоящее время изучение такого вида шумов и уменьшение их влияния является актуальной задачей. Характеристики фотографических шумов в виде среднеквадратичного значения σ_0 и спектральной плотности $G_0(\nu)$, полученные нами ранее в результате теоретического исследования модели неоднородности почернения, являются идеализированными, поскольку они выведены в предположении, что изображение анализируется точечной апертурой [1]. В действительности величина почернения, измеряемого в каждый данный момент, будет усредняться по площади анализирующей апертуры и величины σ_0 и $G_0(\nu)$ окажутся преобразованными в соответствии с ее характеристикой.

В общем виде двумерный энергетический спектр, преобразованный измерительной апертурой, определяется выражением:

$$G(\nu_x, \nu_y) = G_0(\nu) \cdot |U(\nu_x, \nu_y)|^2, \quad (1)$$

где

$G_0(\nu)$ — спектр шумов при точечной апертуре [1];

$|U(\nu_x, \nu_y)|^2$ — квадрат модуля передаточной характеристики измерительной апертуры;

ν_x, ν_y — пространственные частоты по координатам x и y , диапазон которых определяется размерами апертуры.

Для измерительного устройства с анализирующей апертурой в виде прямоугольной щели, в пределах которой можно считать чувствительность приемника постоянной, частотная характеристика выражается произведением:

$$U(\nu_x, \nu_y) = \text{sinc } \pi \nu_x h \cdot \text{sinc } \pi \nu_y l, \quad (2)$$

где

h и l — толщина и длина щели соответственно в направлениях x и y .

Поскольку фотографическое почернение является изотропной средой и спектр шумов будет определяться лишь размером апертуры в направлении сканирования x образца, то длинная узкая щель, вытянутая вдоль оси Y , даст нам исчерпывающую характеристику спектра

изотропной среды. Рассмотрим процесс при воздействии на идеализированный спектр шумов апертуры в виде длинной и узкой щели. Тогда согласно выражениям для идеализированного спектра (1) и частотной характеристики апертуры можно записать:

$$G(\nu_x, \nu_y) = \frac{2A_0^2 \nu_0 (\sin c \pi x h)^2}{\frac{\nu_x^2}{\nu_0^2} + \frac{1}{T^2(1-\bar{T})^2}} \cdot \frac{2A_0^{*2} \nu_0 (\sin c \pi y l)^2}{\frac{\nu_y^2}{\nu_0^2} + \frac{1}{T^2(1-\bar{T})^2}}, \quad (3)$$

где

A_0, A_0^* — постоянные величины,

ν_0 — собственный параметр фотографической пленки,

ν_x, ν_y — текущая пространственная частота,

T — среднее почернение по площади апертуры.

На рис. 1 представлены расчетные кривые спектра фотографических шумов, преобразованных измерительной апертурой.

Кроме спектральных характеристик существуют другие виды оценок фотографических шумов. Наиболее распространенной оценкой и удобной с практической точки зрения является среднеквадратичная величина σ . Полная мощность σ выразится как интеграл от выражения (3) по пространственной частоте.

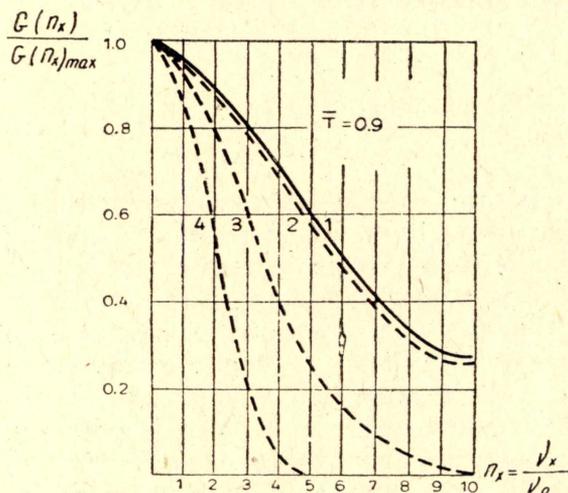


Рис. 1. Зависимость спектра шумов от размеров анализирующей апертуры

$$\sigma_T^2 = \frac{1}{\pi^2} \iint_S \sigma(\nu_x, \nu_y) d\nu_x \cdot d\nu_y. \quad (4)$$

Проведя интегрирование в предположении, что линейные размеры апертуры изменяются вдоль координаты x и y в пределах от 0 до ∞ , получим выражение для σ_T^2 xy в виде

$$\sigma_{Txy}^2 = \frac{2A_0^2 \bar{T}^2 (1-\bar{T})^2}{2\pi\nu_0 h} \cdot \left[1 - \frac{\bar{T}(1-\bar{T})}{2\pi\nu_0 h} (1 - e^{-\frac{2\pi\nu_0 h}{\bar{T}(1-\bar{T})}}) \right], \quad (5)$$

$$\frac{2A_0^{*2} \bar{T} (1-\bar{T})^2}{2\pi\nu_0 l} \cdot \left[1 - \frac{\bar{T}(1-\bar{T})}{2\pi\nu_0 l} (1 - e^{-\frac{2\pi\nu_0 l}{\bar{T}(1-\bar{T})}}) \right].$$

Далее произведя некоторые упрощения и преобразования в выражении (5), получим формулу для среднеквадратичного значения шумов в зависимости от размеров апертуры:

$$\sigma_{Txy} = \sigma_0 x \sqrt{\frac{2\bar{T}(1-\bar{T})}{\alpha h} \left[1 - \frac{\bar{T}(1-\bar{T})}{\alpha h} (1 - e^{-\frac{\alpha h}{\bar{T}(1-\bar{T})}}) \right]}, \quad (6)$$

$$\sigma_0 y \sqrt{\frac{2\bar{T}(1-\bar{T})}{\alpha l} \left[1 - \frac{\bar{T}(1-\bar{T})}{\alpha l} (1 - e^{-\frac{\alpha l}{\bar{T}(1-\bar{T})}}) \right]},$$

где приняты обозначения:

$$\begin{aligned}\sigma_{0x} &= A_0 \sqrt{\overline{T}(1-\overline{T})}, \\ \sigma_{0y} &= A_0^* \sqrt{\overline{T}(1-\overline{T})}, \\ \alpha &= 2\pi\nu_0.\end{aligned}$$

Из выражения (6) видно, что при h и l , стремящихся к бесконечности, σ_{0x} и σ_{0y} стремятся к нулю, а значит, и σ_{Txy} будет стремиться к нулю, т. е. при увеличении площади апертуры до бесконечно больших размеров как бы снижается порог чувствительности приемного устройства и никаких флуктуаций почернения обнаружено не будет. При h и l , стремящихся к нулю, выражение (6) обращается в неопределенность типа $\frac{0}{0}$. Раскрывая неопределенность путем разложения l^{-2} в ряд и

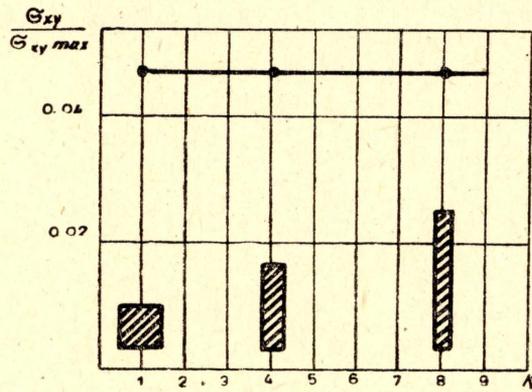


Рис. 2. Зависимость фотографических шумов от формы анализирующей апертуры

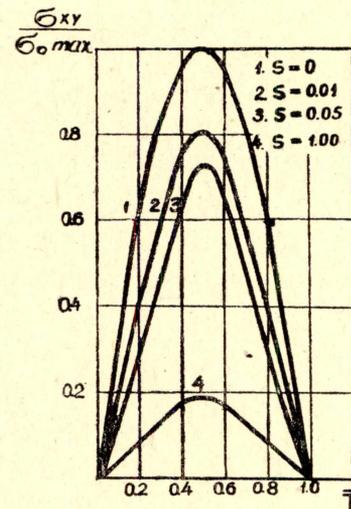


Рис. 3. Зависимость фотографических шумов от среднего почернения при различных площадях апертур

ограничиваясь 3 членом ряда, выражение для σ_{Txy} при h и $l \rightarrow 0$ можно записать в виде:

$$\sigma_{Txy} = \sigma_{0x} \sqrt{1 - \frac{\alpha \sqrt{S}}{3\overline{T}(1-\overline{T})\sqrt{K}}} \cdot \sigma_{0y} \sqrt{1 - \frac{\alpha \sqrt{S \cdot K}}{3\overline{T}(1-\overline{T})}}, \quad (7)$$

где

$S = h \cdot l$ — площадь анализирующей апертуры,

$K = \frac{l}{h}$ — коэффициент пропорциональности.

Теперь легко показать, что при $h \rightarrow 0$ и $l \rightarrow 0$ значение $\sigma_{Txy} \rightarrow \sigma_{0x}$ и $\sigma_{Txy} \rightarrow \sigma_{0y}$, т. е. мы приходим к идеализированному значению шума, полученному при анализе образца точечной апертурой.

На рис. 2 приведена зависимость уровня шума от формы анализирующей апертуры, рассчитанная на основе выражения (6). Из рисунка видно, что при изменении соотношения сторон апертуры — K уровень шума не меняется. Это хорошо согласуется с экспериментальными данными, приведенными в литературе [2].

На рис. 3 приведена зависимость среднеквадратичного уровня шумов от среднего почернения T при различных апертурах. Кривая 1 представляет собой зависимость шумов от уровня почернения без воздействия апертуры. Кривые 2, 3, 4 показывают, что анализирующая апертура уменьшает шумы по всему диапазону почернения по одному и тому же закону.

Таким образом, анализирующая апертура воздействует на шумы, изменяя их спектральный состав и уменьшая мощность, т. е. чем больше апертура, тем меньше уровень шума. Последнее ведет как бы к увеличению порога срабатывания фотографической системы и не всегда позволяет выявить информацию о наличии полезного сигнала в шумах. С этой целью необходима дополнительная обработка изображения, реализующая, например, такую особенность фотографических шумов, как зависимость их уровня от величины полезного сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Ананьев, А. С. Москалева. Известия ТПИ, т. 213, Томск, 1972.
2. Г. А. Гаврилов, С. Б. Гуревич, И. И. Брейдо. Успехи научной фотографии, т. 10, 1964.