

АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АПОСТЕРИОРНОГО УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ФОТОИЗОБРАЖЕНИЯ

А. Н. Королев

Рассмотрено влияние шумовых характеристик регистрирующей среды на потенциальные возможности улучшения (восстановления) качества фотоизображения. Показано, что эффективность апостериорной обработки и предельные возможности повышения качества фотоизображения зависят от соотношения между пороговыми контрастными характеристиками регистрирующей среды и зрительного анализатора.

Постановка задачи улучшения качества фотографического изображения предусматривает направленное изменение свойств реального фотоснимка, приближающее его к «идеальному» изображению. Процедура улучшения качества фотоизображения как в аналоговой (оптической), так и в цифровой технике состоит в устранении искажений, вносимых в изображение фотографической системой и зависящих от реальных параметров фотографической системы, условий съемки, характеристик фотоматериала. Понятие «идеальное» изображение является условным — и его содержание определяется постановкой задачи улучшения качества фотоизображения. В частности, под «идеальным» изображением можно понимать изображение, полученное в условиях, исключающих какие-либо искажения фотоизображения сверх допустимых техническими характеристиками фотографической системы. В других случаях, например, понятие «идеального» изображения может быть связано с условиями наилучшего распознавания определенных объектов.

Для практического использования методов улучшения качества фотоизображения необходимо выяснить, от чего зависит эффективность апостериорной обработки, каковы ее предельные возможности и чем определяется информационная избыточность фотоизображения, обеспечивающая возможность улучшения его качества.

Для ответа на эти вопросы необходимо проанализировать объем информации в исходном фотоизображении, а также количество информации, выделяемой из изображения наблюдателем до и после апостериорной обработки.

Объем информации в фотоизображении определяется, с одной стороны, информационной пропускной способностью объектива как канала связи, и, с другой стороны, плотностью записи информации на единице площади регистрирующей среды. Поэтому объем информации в фотоизображении связан с основными характеристиками фотографической системы: оптической передаточной функцией объектива, функцией передачи модуляции (ФПМ) фотоматериала, а также спектром гранулярности и характеристической кривой фотоматериала.

Из общих положений теории информации информационная емкость единицы площади фотографического слоя

$$I = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \log_2 [1 + W(u, v)] du dv, \quad (1)$$

где $W(u, v)$ — отношение сигнал/шум, u, v — пространственные частоты.

Отношение сигнал/шум в функции частоты для фотографического слоя может быть выражено зависимостью [1, 2]

$$W(\nu) = 0.43^2 g^2 \frac{\Phi(\nu)}{N(\nu)} T^2(\nu), \quad (2)$$

где $\Phi(\nu)$ — спектр сигнала, $N(\nu)$ — спектр гранулярности фотослоя, $T(\nu)$ — ФПМ фотослоя, g — градиент характеристической кривой в точке определения $N(\nu)$, $\nu = \sqrt{u^2 + v^2}$ — пространственная частота.

Отношение сигнал/шум определяет число градаций, зарегистрированное на фотослое. Информация, зафиксированная в фотоизображении, воспринимается зрительной системой наблюдателя, обладающей собственными шумами, ограничивающими объем воспринимаемой информации.

Шумы зрительного анализатора определяются пороговой контрастной характеристикой $k_3(\nu)$. Пороговая контрастная характеристика фотоматериала $k(\nu)$ по своему определению соответствует минимальному контрасту, воспринимаемому зрительным анализатором при наблюдении фотоизображения, и отражает, таким образом, шумовые свойства как регистрирующей среды, так и зрительного анализатора. Поэтому

$$k(\nu) = k_3(\nu) + k_\phi(\nu), \quad (3)$$

где $k_\phi(\nu)$ — пороговая контрастная характеристика регистрирующей среды — связана со спектром гранулярности фотоэмульсии и светорассеянием. Шумовые характеристики фотоэмульсии определяются, как известно [3], среднеквадратическим отклонением оптической плотности σ при заданной площади сканирующей диафрагмы F или показателем гранулярности

$$G = \sigma \sqrt{F}, \quad (4)$$

причем $\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} N(\nu) d\nu$, где $N(\nu)$ — спектр гранулярности.

Если принять размер сканирующей диафрагмы $F = (1/2\nu)^2$, то наименьшее значение регистрируемой оптической плотности будет равно

$$\Delta D_{\min} = \sigma = G 2\nu. \quad (5)$$

При коэффициенте модуляции наложенной экспозиции $P(\nu)$ величина ΔD определяется выражением [3]

$$\Delta D = 2 \cdot 0.43 g P(\nu) T(\nu), \quad (6)$$

где g — градиент характеристической кривой.

При условии (5) наложенный контраст $P(\nu)$ соответствует пороговому контрасту фотоэмульсии

$$k_\phi(\nu) = P_{\min}(\nu) = \frac{G\nu}{0.43gT(\nu)}. \quad (7)$$

Возможность выбора наилучшей частотной области для визуального наблюдения путем использования увеличения позволяет считать $k_3 = \text{const} = 0.02 \div 0.04$.

Очевидно, что имеет место разница между количеством информации, зарегистрированным физически в эмульсии, и количеством информации, воспринимаемым зрительным анализатором в фотоизображении. Так как $k_\phi(\nu) < k(\nu)$, то имеет место избыточность информации в фотоизображении, преобразование которой в форму, доступную для наблюдателя, и следует считать основной задачей апостериорного улучшения качества фотоизображения.

Проанализируем возможность использования этой избыточности при обработке фотоизображения.

Число градаций в изображении, зарегистрированном на фотоэмульсии, в зависимости от частоты имеет вид

$$m(\nu) = \frac{Q(\nu)}{k_\phi(\nu)} \approx W(\nu), \quad (8)$$

где $Q(\nu) = \Phi(\nu)T(\nu)$.

При восприятии этого изображения наблюдателем число градаций определяется выражением

$$m_1(\nu) = \frac{Q(\nu)}{k_3(\nu) + k_\phi(\nu)}. \quad (9)$$

Пусть при апостериорной обработке фотоизображения в когерентно-оптической системе используется пространственный фильтр с амплитудным пропусканием $S(\nu)$. Относительный коэффициент усиления для такого фильтра составит

$$n(\nu) = \frac{S(\nu)}{S_0(\nu)}, \quad (10)$$

где $S_0(\nu)$ — пропускание амплитудного фильтра на нулевой частоте.

При восприятии изображения на выходе когерентно-оптической системы число градаций в зависимости от частоты будет составлять

$$m_2 = \frac{Q(\nu)n(\nu)}{k_3(\nu) + k_\phi(\nu)n(\nu)}. \quad (11)$$

Эффективность апостериорной обработки фотоизображения, связанную с повышением количества информации в изображении с точки зрения наблюдателя, можно оценить выражением

$$\eta(\nu) = \frac{m_2(\nu)}{m_1(\nu)} = \frac{n(\nu) \left[1 + \frac{k_\phi(\nu)}{k_3(\nu)} \right]}{1 + \frac{k_\phi(\nu)}{k_3(\nu)} n(\nu)}. \quad (12)$$

Пусть для некоторой пространственной частоты $\nu = \nu_1$ имеем $\frac{k_\phi(\nu_1)}{k_3(\nu_1)} = \varepsilon$ и $n(\nu_1) = n$. Тогда

$$\eta = \frac{n(1 + \varepsilon)}{1 + n\varepsilon}. \quad (13)$$

На рисунке приведены графики зависимости η от n при изменении ε от 0 до 2. Из рисунка следует, что высокая эффективность апостериорной обработки соответствует малым значениям ε , т. е. использованию сверхмелкозернистых, малошумящих регистрирующих сред.

Очевидно, что $\eta_{\max} = (\varepsilon + 1)/\varepsilon$ при $n \rightarrow \infty$. Асимптотический характер хода кривых на рисунке показывает предельные возможности апостериорной обработки.

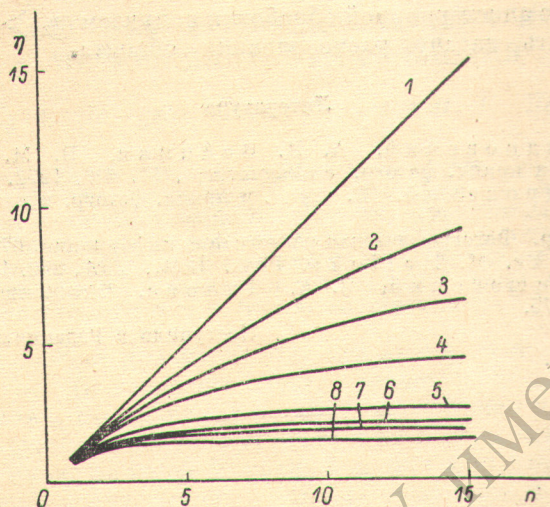
Предельные значения η_{\max} тем выше, чем меньше ε . При больших ε эффективность достигает предельного значения уже при малых коэффициентах усиления; в то же время для $\varepsilon \ll 1$ рост эффективности в зависимости от коэффициента усиления приближается к линейному закону.

Строук в работе [4] показал, что для изготовления амплитудного фильтра, используемого при апостериорной обработке изображения, необходимо применять транспарант с диапазоном изменения оптической плотности до $4D$. Это означает, что относительный коэффициент усиления такого фильтра будет составлять 10^4 . Несложный расчет показывает, что такой фильтр может эффективно использоваться для восстановления исходного изображения, полученного на фотоэмульсии с $k_\phi = 0.001 \div 0.0001$. Действительно, работы Строука выполнены на сверхмелкозернистых голографических эмульсиях, шумы которых пренебрежимо малы. Очевидно, что использование пространственных фильтров со столь большим динамическим

диапазоном для восстановления фотоизображений, полученных на более грубых материалах, нецелесообразно.

Таким образом, можно утверждать, что эффективность апостериорной обработки и предельные возможности повышения качества фотоизображения зависят от соотношений между пороговыми контрастными характеристиками регистрирующей среды и зрительного анализатора. Эффективность апостериорной обработки тем выше, чем меньше отношение этих величин.

В соответствии с вышеприведенными рассуждениями принципиально возможно также повышение разрешающей способности при апостериорной обработке фотоизображения.



Зависимость параметра эффективности η от коэффициента усиления n при различных значениях ϵ .

1 — $\epsilon=0$, 2 — 0.05, 3 — 0.1, 4 — 0.2, 5 — 0.5, 6 — 0.8, 7 — 1.0, 8 — 2.0.

Разрешающая способность фотографической системы определяется предельной пространственной частотой ν_n , для которой

$$m_n = \frac{Q(\nu_n)}{k(\nu_n)} = 1, \quad (14)$$

т. е. на этой частоте наблюдатель воспринимает только одну градацию оптической плотности.

Используя апостериорную обработку фотоизображения, можно получить в диапазоне пространственных частот от ν_n до $\nu_n + \Delta\nu$ число воспринимаемых наблюдателем градаций оптической плотности $m > 1$, что приведет, с точки зрения наблюдателя, к повышению разрешающей способности на величину $\Delta\nu$ мм⁻¹.

Следует отметить, что типичные фототехнические материалы имеют в рабочей области пространственных частот значения пороговой контрастной характеристики $k=0.04 \div 0.07$ (мелкозернистые эмульсии), $k=0.07 \div 0.25$ (крупнозернистые эмульсии) [5]. Таким образом, лишь мелкозернистые фотоэмульсии обладают достаточной информационной избыточностью, позволяющей эффективно использовать апостериорную обработку фотоизображений.

В заключение рассмотрим пример, иллюстрирующий приведенные выше рассуждения.

Допустим, что на фотоизображении зарегистрирован объект с характерной пространственной частотой ν_0 . Пусть условием распознавания объекта с некоторой заданной вероятностью является наличие пяти градаций контраста на этой частоте ν_0 .

Пусть $Q(\nu_0)=0.1$, а $k_\phi(\nu_0)=0.01$, т. е. на фотоэмульсии с пороговым контрастом 0.01 регистрируется сигнал с контрастом 0.1.

При $k_3=0.04$ число наблюдаемых градаций в соответствии с (6),

$$m_1 = \frac{0.1}{0.04 + 0.01} = 2,$$

что не соответствует условиям распознавания. В то же время на фотоэмульсии зарегистрировано $m=10$ градаций контраста.

Допустим, что при апостериорной обработке коэффициент усиления на данной частоте $n(\nu_0)=6$. Тогда в соответствии с (8)

$$m_2 = \frac{0.1 \cdot 6}{0.04 + 0.01 \cdot 6} = 6.$$

В результате апостериорной обработки получаем $m_2 > 5$, что позволяет успешно решить задачу распознавания объекта.

Литература

- [1] К. В. Вендровский, А. И. Вейцман, В. М. Пташенчук. Ж. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 15, 426, 1972.
- [2] К. В. Вендровский. Ж. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 18, 331, 1973.
- [3] Х. Фризер. Фотографическая регистрация информации, 670. «Мир», М., 1978.
- [4] G. W. Stroke, M. Halioka. Phys. Lett., 39A, 269, 1972.
- [5] В. И. Артишевский, В. А. Чалова. Оптико-механич. промышл., № 6, 3, 1975.

Поступило в Редакцию 9 апреля 1979 г.