

УДК 520.33.77

Шумы фотоэмульсий А-600 РП, КН-4С и их фильтрация

Т. П. Лисовская, С. В. Марченко

Исследованы свойства пространственных шумов фотоэмульсий типов А-600 РП и КН-4С. Показано, что плотности функций распределения шумовых флуктуаций оптической плотности фотоэмульсий с некоторыми ограничениями можно считать гауссовыми, а также, что спектры мощности шумов не зависят от пространственной частоты (ограниченный белый шум). Исследовано действие нескольких видов цифровых фильтров на зашумленные сигналы двух типов, представляющих интерес для обработки фотографических спектров звезд.

THE NOISE OF THE PHOTOEMULSIONS A-600 PP, KH-4C AND THEIR FILTRATION, by Lisovskaya T. P., Marchenko S. V. — The characteristics of spatial noise of the photoemulsions A-600 РП and КН-4С are investigated. It is shown that density functions of the noise fluctuations of optical density are normal with some limitations. Power spectra of the noise do not depend on spatial frequency (limited white noise). Some digital filters are investigated for their effect on the noise of the signals of two types.

Продолжая ранее начатые исследования свойств фотопленок [7], рассмотрим более подробно шумы фотоэмульсий. Знание характеристик шумов облегчает задачу выделения полезного сигнала из наблюдаемого материала. Так, при обработке данных с помощью фильтра Винера [12, 13] необходима информация о частотном спектре шумов.

Для исследований отобраны фотопленки: 1) КН-4С, выпуска ноября 1982 г. (хранилась в металлической упаковке при температуре $t = +4^\circ\text{C}$); 2) А-600 РП, поступившая в ГАО АН УССР в январе 1983 г. (хранилась в бумажной упаковке при температуре $t = -14^\circ\text{C}$).

Построение зависимости: среднее квадратичное отклонение шумов — оптическая плотность. Для построения зависимости на образцы фотопленок в ноябре 1983 г. впечатывался непрерывный клин, освещаемый стабилизированной накальной лампой. Время экспонирования — 5 мин. Фотопленка А-600 РП проявлялась в МWP-2 на протяжении 12 мин; КН-4С — в А-12 за 15 мин. Для записи шумовых дорожек использовался микрофотометр МФ-4 с 85-кратным увеличением. Размеры рабочей щели — 0.1×2 мм ($\sim 1.2 \times 23.5$ мкм на фотослое). Отсчеты снимались через 5.6 мкм. Данное значение интервала дискретизации связано с тем, что при записи отдельных участков спектра звезд обычно используется шаг $1 \div 10$ мкм. На каждом образце фотопленки с впечатанным непрерывным клином проводилось 8 — 10 фотометрических разрезов по $N = 256$ отсчетов, для разных оптических плотностей.

Среднее квадратичное отклонение шумов оценивалось по стандартной формуле: $\sigma_D = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{D} - D_i)^2 \right]^{1/2}$. Все оценки, согласно рекомендациям [11], нормированы, в предположении соблюдения закона Сельвина, на площадь щели микрофотометра $S = 1000$ мкм².

Полученные зависимости σ_D от среднего для данного фотометрического разреза значения оптической плотности \bar{D} можно аппроксимировать (рис. 1):

$$\sigma_D = 0.008 + 0.013(\bar{D} - D_0)^{0.5} \text{ для А-600 РП, } D_0 = 0.19; \quad (1)$$

$$\sigma_D = 0.005 + 0.019(\bar{D} - D_0)^{0.6} \text{ для КН-4С, } D_0 = 0.05. \quad (2)$$

D_0 — оптическая плотность вуали. Как будет показано ниже, шумы фотоэмульсий, за редкими исключениями, распределены по нормальному закону. Дополнительным указанием на это служит форма зависимости $\sigma_D \sim \bar{D}^{0.5}$ [3], которая близка к ходу кривых, полученных для других фотоматериалов [1]. Отметим также достаточно хорошее (с учетом возможных вариаций в зависимости от полива фотопленки и других причин) совпадение в интервале $\bar{D}=0.2 \div 1.8$ наших оценок (1)

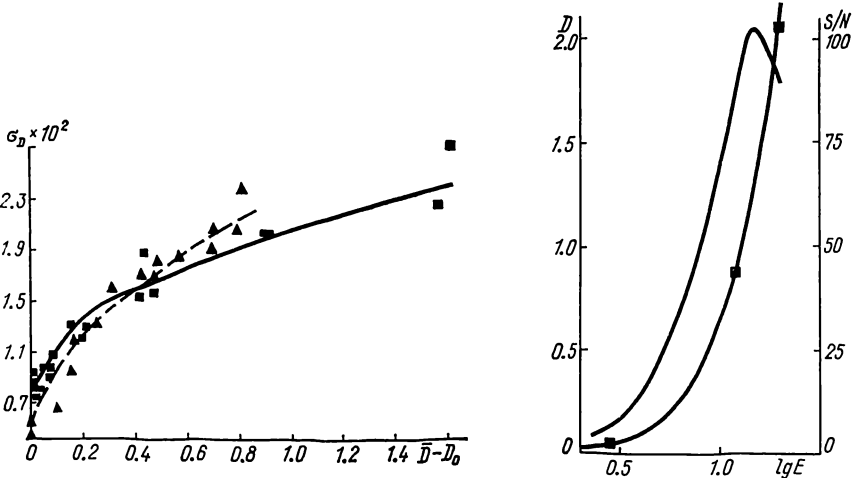


Рис. 1. Зависимость дисперсии $\sigma(\bar{D})$ шумов фотоэмульсий от оптической плотности \bar{D} . \blacktriangle — КН-4С; — — — аппроксимация (2) для КН-4С; \blacksquare — А-600 РП; — — — аппроксимация (1) для А-600 РП

Рис. 2. Усредненная характеристическая кривая \blacksquare для А-600 РП и отношение сигнал — шум \blacktriangle

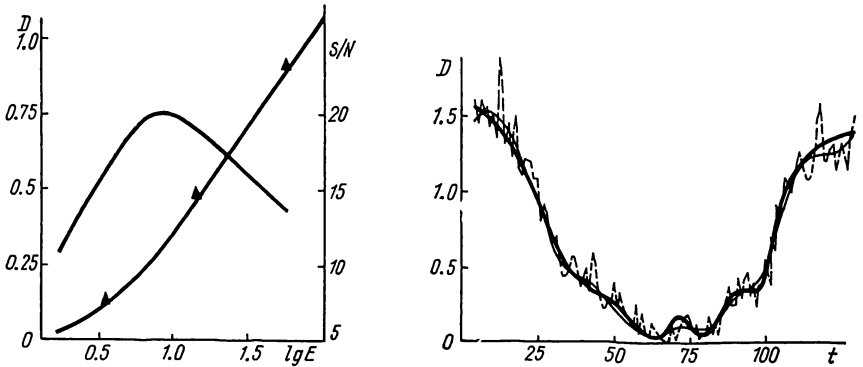


Рис. 3. Усредненная характеристическая кривая \blacktriangle для КН-4С и отношение сигнал — шум \blacktriangle

Рис. 4. — — — искусственный спектр 1-го типа; - - - - шумы; — — — результат действия фильтра Винера $\alpha^2=0.25f_H$, $C=0.01$; t — текущие отсчеты

с результатами, полученными по значительно более обширному материалу [10]. При сравнении оценки [10] необходимо привести к площади щели $S=1000 \text{ мкм}^2$.

Отношение сигнал—шум, в зависимости от экспозиции, определялось по формуле [11]: $S/N = \frac{0,4343 \cdot \gamma}{\sigma_D}$, где γ — коэффициент контрастности в точке, для которой ищется значение S/N . Для σ_D взяты аппроксимации (1), (2). В качестве характеристических кривых на рис. 2, 3 приведены усредненные по трем образцам зависимости.

Плотности функций распределения и частотные свойства шумов. Для каждого фотометрического разреза были построены гистограммы

типа: плотность функции распределения шумов $f(T)$ в зависимости от пропуска T , либо $f(D)$ в зависимости от оптической плотности D . Число классов гистограмм — 10 или 20. Гистограммы типа $f(D)$ проверялись на нормальность распределения на уровне 0.95 по критерию χ^2 [9]. У КН-4С из 7 гистограмм 5 подтверждают гипотезу о нормальности. Два распределения принадлежат вуали и показывают наличие избыточного числа больших отклонений по сравнению с гауссовым распределением. У фотопленки А-600 РП проверено 14 гистограмм. Восемь результатов подтверждают гипотезу о нормальности. Отклонения

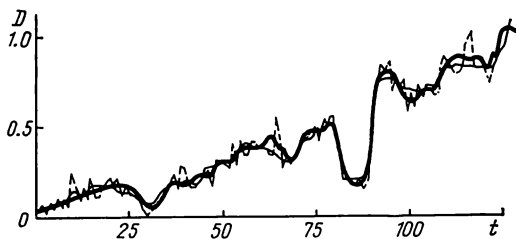


Рис. 5. ——— искусственный спектр 2-го типа; - - - - - шумы; — · — · — результат действия одномерного медианного 5-точечного фильтра; t — текущие отсчеты

от гауссового распределения у остальных шести носят случайный характер, без каких-либо систематических искажений формы распределения. Вероятная причина таких флуктуаций — недостаточно большой объем выборки ($N=256$ отсчетов).

Таким образом, у фотоэмульсии КН-4С (исключая вуаль) факт нормальности закона распределения флуктуаций D можно считать установленным. Фотопленка А-600 РП требует дополнительной проверки с привлечением выборок большего объема. Ранее указывалось [3] на отличие плотностей функций распределения $f(T)$ от нормального закона. Отдельно задача проверки этого факта не ставилась. Однако в одном случае для фотоэмульсии КН-4С удалось подобрать для $f(T)$ по критерию χ^2 распределение Пуассона.

Для шумовых дорожек с различными значениями \bar{D} построены спектры мощности [4]:

$$P_{\text{ш}}(f) = \frac{2 \cdot \Delta}{N} \left| \sum_{i=0}^{N-1} Z(t_i) e^{-2\pi j f i \Delta} \right|^2,$$

где: $f=0, \dots$; $f_{\text{Н}}$ — пространственная частота; $f_{\text{Н}} = \frac{1}{2 \cdot \Delta}$ — предельная частота Найквиста; Δ — интервал дискретизации шумовой дорожки $Z(t_i)$; N — размерность массива $Z(t_i)$. В нашем случае $\Delta=5.6$ мкм. У всех построенных спектров мощности отсутствует зависимость $P_{\text{ш}}(f)$ от пространственной частоты f . Появления пика в высокочастотной области, связанного с размерами отдельных зерен фотоэмульсии (по приблизительным оценкам ~ 1.5 мкм), можно ожидать лишь при уменьшении Δ в 6—8 раз, чего не позволяет сделать применявшаяся методика обработки. Таким образом, шум фотоэмульсий КН-4С и А-600 РП в пределах $f=0 \div (11.2 \text{ мкм})^{-1}$ можно считать не зависящим от пространственной частоты (ограниченный белый шум).

Фильтрация шумов. В идеальном случае эффективность цифрового фильтра можно оценить, зная характеристики незашумленного сигнала $X(t)$. При этом в качестве показателя эффективности выберем величину:

$$\sigma_{\text{ост}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} (X(t_i) - Z^*(t_i))^2}{N-1}}, \quad (3)$$

где $Z^*(t_i)$ — результат фильтрации зашумленной последовательности $Z(t_i)$. Очевидно, что величина $\sigma_{\text{ост}}$ дает представление как об эффективности подавления шумов, так и о смещении оценок $\Delta X(t_i) = |Z^*(t_i) - X(t_i)|$. В качестве $X(t_i)$ использовались 2 типа искусственных спектров звезд по $N=128$ отсчетов: 1) с малым числом деталей (высокая дисперсия, рис. 4); 2) с большим числом (низкая дисперсия, рис. 5).

В дальнейшем, говоря о характеристиках фильтров, будем выражать пространственные частоты в процентах от частоты Найквиста, так как в случае искусственного спектра Δ — произвольная величина. Полезный сигнал $X(t_i)$ зашумлялся ограниченным белым шумом, распределенным по нормальному закону (реальная шумовая дорожка с фиксированным \bar{D}), после чего зашумленный искусственный спектр $Z(t_i)$ подвергался фильтрации. Дисперсия шума зависела от оптической плотности согласно (1). Исходное соотношение сигнал—шум опре-

деляли по формуле: $(S/N)_0 = \frac{\int_0^{f_H} |\hat{X}(f)|^2 df}{\int_0^{f_H} |\hat{Z}(f)|^2 df}$, где $\hat{X}(f)$ — преобразование

Фурье незашумленного сигнала $X(t_i)$, $\hat{Z}(f)$ — то же для лишённой полезного сигнала чисто шумовой последовательности.

Для спектра 1-го типа $(S/N)_0 \sim 28$, для спектра 2-го типа $(S/N)_0 \sim 41$. Исходная дисперсия шумов (3), где в качестве $Z^*(t_i)$ взят зашумленный, но еще не подвергшийся действию фильтра сигнал, составляла $(\sigma_{\text{ост}})_0 = 0.0976$ для спектра 1-го типа, и $(\sigma_{\text{ост}})_0 = 0.0451$ — для 2-го типа.

Исследовались различные типы цифровых фильтров: a — биномиальный [8]; b — одномерный медианный с нечетным числом точек [2]; v — гауссовый [5]; z — фильтр Кайзера [6]; d — фильтр Винера [12, 13]. Расчеты показали, что для искусственного спектра 1-го типа предпочтительнее использование фильтров Винера и Кайзера, понижающих $(\sigma_{\text{ост}})_0$ в 2—2.3 раза. Для спектра 2-го типа использование фильтров v — d не дает удовлетворительных результатов, так как, эффективно подавляя шум, фильтры такого типа сильно увеличивают смещение $\Delta X(t_i) = |Z^*(t_i) - X(t_i)|$. Применение фильтров a и b для спектра 2-го типа снижает $(\sigma_{\text{ост}})_0$ в 1.3—2 раза, однако медианный фильтр в среднем на 15 % менее эффективен, чем биномиальный с соответствующим числом точек n . Эффективность фильтров a и b быстро падает по мере роста n , вследствие чего нецелесообразно использовать $n > 13$ —15 для фильтра a и $n > 9$ —11 для фильтра b .

Более подробно остановимся на фильтре Винера, признанным по критерию $\min(\sigma_{\text{ост}})$ лучшим для спектра 1-го типа. Амплитудно-частотная характеристика фильтра была выбрана в форме:

$$F(f) = \frac{e^{-f^2/2\alpha^2}}{e^{-f^2/2\alpha^2} + C} = \frac{P_c(f)}{P_c(f) + P_{\text{ш}}(f)}, \quad (4)$$

где $P_c(f)$ — спектр мощности незашумленного сигнала, $P_{\text{ш}}(f)$ — спектр мощности шума в отсутствии сигнала, $f=0, \dots, f_H$ — частота. В нашем идеальном случае известны как $P_{\text{ш}}(f)$, так и $P_c(f)$. Результаты фильтрации зависят от выбора параметров α и C . Построение спектров мощности незашумленных сигналов $X(t_i)$ 1-го и 2-го типов показывает их крутой спад для $f > 0.25 \div 0.3 f_H$, вследствие чего естественно определить $\alpha^2 = 0.25 \div 0.3 f_H$. Действительно, расчеты приводят при фиксированном $C=0.01$ к $\min(\sigma_{\text{ост}}) = 0.0422$ для $\alpha^2 = 0.28 f_H$ (спектр 1 типа). Вариация C в пределах $0.03 \div 0.005$ при $\alpha^2 = \text{const} = 0.28$ показывает слабую

зависимость $\sigma_{\text{ост}}$ от C в области $C=0.01 \div 0.005$. Учитывая, что максимальное соотношение сигнал—шум для А-600 РП $(S/N)_{\text{max}} \approx 100$, можно выбирать $C=0.5 \div 1 (S/N)_{\text{max}}^{-1}$ для фильтра Винера в форме (4). Однако вывод о таком принципе выбора C нельзя считать окончательным.

В заключение остановимся на приемах, повышающих эффективность фильтров. Исследовано действие на $\sigma_{\text{ост}}$ операции, ликвидирующей зависимость дисперсии фотографических шумов $\sigma(\bar{D})$ от D . Для А-600 РП с этой целью применялось следующее преобразование: $D' = 0.013 \cdot D^{0.7}$, вследствие которого $\sigma(\bar{D}) \approx \text{const}$. Сравнение результатов фильтрации с использованием подобного преобразования и без него показывает дополнительное снижение $\sigma_{\text{ост}}$ на 1.6 % \div 5.5 % в зависимости от типа фильтра. В случае существования одиночных шумовых выбросов большой амплитуды (дефекты фотоэмульсии) эффективность фильтрации повышает предварительное сглаживание зашумленного сигнала медианным фильтром. Для спектра 1-го типа сочетания 7-точечного медианного фильтра и 11-точечного биномиального дополнительно уменьшило $\sigma_{\text{ост}}$ на 2 %.

Выводы. Исследование пространственных шумов фотоэмульсий типов А-600 РП и КН-4С показывает, что флуктуации оптической плотности можно считать распределенными по нормальному закону. Отсутствует зависимость спектра мощности шумов от пространственной частоты в интервале $f=0 \div (11.2 \text{ мкм})^{-1}$ (ограниченный белый шум). Сравнение эффективности подавления шумов различными фильтрами на примере искусственных спектров звезд показывает, что в случае спектра с малым числом деталей наилучшие результаты дает применение фильтра Винера в форме (4). Для спектров с большим числом деталей предпочтительнее использовать медианный или биномиальный фильтры.

1. Брейдо И. И. Фотографические шумы, отношение сигнал/шум и число градаций, передаваемых фотографическими материалами. — Изв. Глав. астрон. обсерватории в Пулковке, 1964, № 177, с. 171—179.
2. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений / Под ред. Т. С. Хуанга. — М.: Радио и связь, 1984. — 221 с.
3. Гуревич С. Б., Брейдо И. И., Гаврилов Г. А. Функция распределения числа проявленных зерен и зависимость фотографических шумов от оптической плотности. — Успехи науч. фотографии, 1964, 10, с. 171—174.
4. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения: В 2-х т. — М.: Мир, 1971.
5. Жильев Б. Е., Ощепков В. А., Тоточава А. Г., Шульман Л. М. Техника обнаружения и анализа микроперемежности звезд. II. Короткопериодические вариации спектра поглощения XX Sat. — Астрометрия и астрофизика, 1980, вып. 43, с. 30—40.
6. Кайзер Ф. Д., Рид У. А. Сглаживание данных при помощи цифровых фильтров низких частот. — Приборы для науч. исслед., 1977, № 11, с. 82—93.
7. Лисовская Т. П., Марченко С. В. Исследование характеристик фотопленок для астрономических наблюдений с ЭОП. — Астрометрия и астрофизика, 1984, вып. 53, с. 84—90.
8. Маршалл Р., Марме Л. Биномиальный сглаживающий фильтр (способ избежать некоторых ошибок полиномиального сглаживания по методу наименьших квадратов). — Приборы для науч. исслед., 1983, № 8, с. 125—133.
9. Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики. — М.: Финансы и статистика, 1982. — 344 с.
10. Шабанов М. Ф. Результаты измерения микрошумов астрофотоэмульсий Kodak, ORWO и КазНИИТехфотопроекта. — Сообщ. Спец. астрофиз. обсерватории АН СССР, 1984, 40, с. 73—79.
11. Furenlid I. Signal-to-noise of photographic emulsions. — In: Modern techniques in astronomical photography: Proc. ESO Workshop, Geneva, May 16—18, 1978. Geneva: Europe Southern Observ., 1978, p. 153—164.
12. Lindgren H. Filtering of spectrograms with Fourier techniques. — Repts Observ. Lund, 1975, N 6, p. 15—33.
13. Pasian F., Sedmak G., Rusconi L. Tecniche di filtraggio ottimale di fotogrammi. — Mem. Soc. Astron. Ital., 1978, 49, p. 745—751.