

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Г. А. ИСТОМИН

**РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ФОТОГРАФИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ
ПРИ МАЛЫХ ЗНАЧЕНИЯХ КОНТРАСТНОСТИ**

(Представлено академиком А. Н. Терениным 18 VI 1952)

Разрешающая способность фотографирующей системы определяется видом функции контрастности объектива K_i при заданной контрастности штрихов тест-объекта K_t и функциональной зависимостью разрешающей способности светочувствительного слоя от контрастности проектируемого оптического изображения $K_i(R)$. Эта последняя зависимость обычно рассматривается как линейная^(1, 2), что в действительности является первым приближением для $K_t \geq 0,75$ ⁽³⁾.

Если контрастность проектируемых объективом штрихов тест-объекта мала, то указанное приближение занижает ожидаемое значение результирующей разрешающей способности системы R_p . Это имеет место и в том случае, когда разрешающая способность светочувствительного слоя R_0 при $K_t = 1,0$ превосходит в 2—3 раза разрешающую способность объектива. В обоих случаях R_p определяется при таких значениях $K_i < 1$, когда использование простейшей линейной связи уже не дает правильного суждения о результирующей разрешающей способности. Для аберрационного объектива, функция контрастности которого существенно отличается от объектива без аберраций, где распределение энергии в оптическом изображении светящейся точки или штрихов тест-объекта определяется только дифракционной картиной^(1, 2), изложенные соображения имеют еще большее значение.

Сказанное иллюстрируется графическим определением R_p согласно известной схеме⁽¹⁾, в отличие от которой на рис. 1 представлена также нелинейная связь $K_i(R)$ в свете последних данных⁽³⁾. Как следует из рисунка, проекция точки пересечения $K_i(R)$ с кривой $K_t(R)$ отсекает на оси абсцисс во всех случаях большее значение результирующей разрешающей способности, чем это получается для линейной зависимости $K_i(R)$, использовавшейся до сих пор для оценки свойств фотографирующей системы. Это различие возрастает с уменьшением K_t тест-объекта и с увеличением R_0 светочувствительного слоя.

В случае безаберрационного объектива величина R_p может быть рассчитана путем использования предложенной ранее эмпирической зависимости⁽¹⁾, но с учетом нелинейности связи $K_i(R)$. Результирующая разрешающая способность системы при любых значениях K_t и заданной разрешающей способности объектива $R_{\text{виз}}$, определяемой визуально при соответствующем увеличении и $K_t = 1,0$, будет:

$$R_p = R_0 \left(\frac{K_t}{2 - K_t} \right)^{0,5} \left(1 - e^{-\frac{R_{\text{виз}}}{R_0} - \left(\frac{2 - K_t}{K_t} \right)^{0,5}} \right). \quad (1)$$

Здесь R_0 при $K_t = 1$ — разрешающая способность светочувствительного слоя, когда $K_t \sim 1,0$, что может быть практически достигнуто, если $R_{\text{виз}}$ в 3–4 раза больше R_0 .

Так как разрешающая способность объективов, применяемых для резольвометрических испытаний, составляет обычно $250\text{--}300\text{ мм}^{-1}$, то фактическая разрешающая способность светочувствительного слоя в ряде случаев может оказаться заниженной. Как следует из (1), если $R_p/R_{\text{виз}} \leq 0,30$, то $R_p \sim R_0$. При $R_{\text{виз}} = 250\text{ мм}^{-1}$, это имеет место для $R_p \leq 70\text{ мм}^{-1}$. При других значениях R_p получаются такие величины: $R_p = 72, 102, 131, 158, 200\text{ мм}^{-1}$; $R_0 = 75, 115, 170, 250, 500\text{ мм}^{-1}$.

Для определения истинного значения R_0 следует либо вводить соответствующую поправку, либо, что также следует из (1), применять

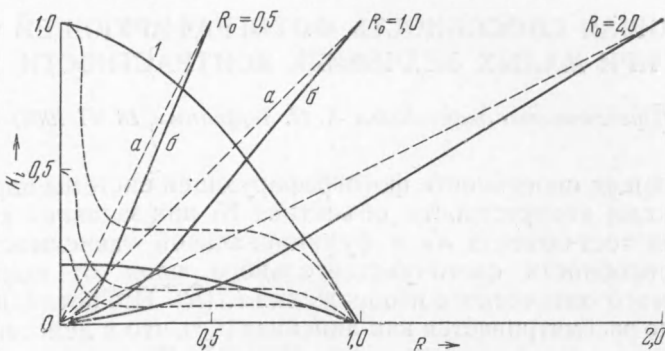


Рис. 1. Графическое определение результирующей разрешающей способности фотографирующей системы. Функции контрастности безабберационного объектива: 1 — для $K_t = 1,0$; 2 — для $K_t = 0,20$. Функции контрастности для абберационного объектива по Л. П. Морозу (1) (объектив Тессар): 3 — для $K_t = 1,0$; 4 — для $K_t = 0,5$; 5 — для $K_t = 0,25$. Во всех случаях $R = 1$ при $K_t = 0$. Линейная (а) и нелинейная (б) зависимость $K_t(R)$ для светочувствительного слоя с $R_0 = 0,5, 1,0$ и $2,0$ (в относительных единицах)

для определения R_0 тест-объект с малым значением K_t , например с $K_t = 0,20$ (это соответствует $\Delta D \sim 0,10$), что равноценно увеличению $R_{\text{виз}}$ в 3 раза (но не в 5 раз, согласно обычным представлениям (1)).

Ранее отмечалось (3), что разрешающая способность фотографирующей системы, как это следует из анализа экспериментальных данных различных авторов (4, 5), в основном определяется изменением разрешающей способности светочувствительного слоя от K_t тест-объекта и что эта зависимость не может рассматриваться как линейная. На рис. 2 показано изменение R_p в зависимости от K_t для 5 различных объективов и двух фотографических материалов. Абсолютное значение $R_{\text{оп}}$ при $K_t \sim 1,0$ в этих опытах получалось в пределах от 125 до 24 мм^{-1} (5). Однако, если принять для всех случаев $R_{\text{оп}} = 1,0$, то тогда, как следует из рис. 2, наблюдается одинаковая взаимосвязь $R_p(K_t)$, которая удовлетворительно описывается эмпирической формулой:

$$R_p = R_{\text{оп}} \left(\frac{K_t}{2 - K_t} \right)^{0,36} \quad (2)$$

При значениях $K_t \leq 0,06$ лучшее соответствие наблюдается, если в (2) принять показатель $0,50$ вместо $0,36$, т. е. здесь, как и следовало ожидать, свойства фотографирующей системы определяются только свойствами светочувствительного слоя.

В настоящее время фотографирующая система обычно характеризуется только величиной R_{op} при $K_t = 1$, и для определения результирующей разрешающей способности при $K_t < 1$ рекомендуется (1) использование графического метода, что требует в каждом случае измерения функции контрастности. Если учесть, что вид функции контрастности зависит от ряда факторов, то такой метод анализа оказывается весьма громоздким. Как следует из изложенного, о разрешающей способности фотографирующей системы при $K_t < 1$ можно судить по величине R_{op} на основании равенства (2), или же, что дает значительно лучшее соответствие, использовать для определения R_p тест-объект с K_t , близким к контрастности обычно фотографируемых деталей.

Понятие фотографирующей системы, применяемое для совокупности объектив — светочувствительный слой, может быть распространено и на совокупность негативный и позитивный слой, в частности для случая контактной печати. Очевидно, свойства такой системы будут весьма близки к фотографирующей системе для безабберационного объектива, так как рассеяние света в светочувствительном слое симметрично и функция контрастности в первом приближении соответствует функции контрастности для безабберационного объектива. Более точно величина результирующей разрешающей способности для системы из двух светочувствительных слоев может быть получена графическим методом согласно схеме рис. 1, где функция контрастности определяется из соотношения $K_i(R) = 1 - K_t(R)$. Здесь $K_t(R)$ является обратной функцией от $R(K_t)$ для светочувствительного слоя. В случае аналитического решения задачи для оценки результирующей разрешающей способности в негативно-позитивном процессе может быть использовано равенство, аналогичное (1):

$$R_p = R_{01} \left(\frac{K_t}{2 - K_t} \right)^{0,5} \left(1 - e^{-\frac{R_{02}}{R_{01}} \left(\frac{2 - K_t}{K_t} \right)^{0,5}} \right), \quad (3)$$

где R_p — разрешающая способность фотографического отпечатка, а R_{01} и R_{02} — разрешающая способность, соответственно, позитивного и негативного материала при $K_t = 1,0$. Результирующая разрешающая способность системы из двух светочувствительных слоев в случае контактной печати определяется отношением R_{01}/R_{02} и значением K_t деталей, зафиксированных на негативе. При прочих равных условиях разрешающая способность негативного изображения будет использована тем в большей степени, чем больше разрешающая способность позитивного фотоматериала.

В фотографических процессах, где необходимо воспроизвести с наибольшей полнотой малоконтрастные микродетали, как, например, при

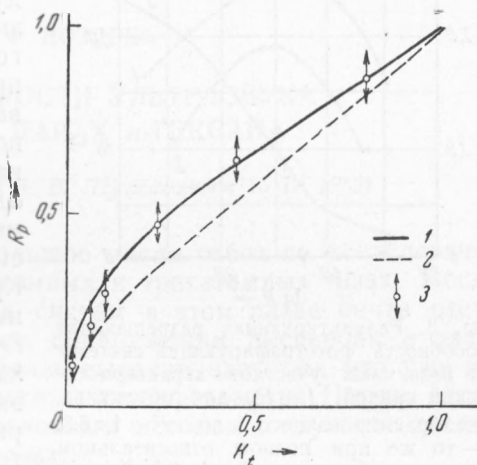


Рис. 2. Изменение результирующей разрешающей способности R_p фотографирующей системы в зависимости от контрастности тест-объекта. 1 — $R_p = R_{op} \left(\frac{K_t}{2 - K_t} \right)^{0,36}$; 2 — $R_p = R_{op} \left(\frac{K_t}{2 - K_t} \right)^{0,50}$; 3 — средние данные и пределы отдельных измерений R_p для 5 фотообъективов и 2 светочувствительных материалов (5)

изготовлении дубльпозитива и дубльнегатива, указанное обстоятельство имеет решающее значение. Этим объясняется, в частности, стремление к непрерывному усовершенствованию разрешающей способности не только негативных, но и позитивных светочувствительных материалов, используемых в кинематографии (6).

Воспроизведение микро- и макродеталей в некотором интервале яркостей определяется контрастностью фиксируемых деталей и в значительной степени зависит от оптических свойств светочувствительного слоя (7). Для совокупности объектив — светочувствительный слой, по-

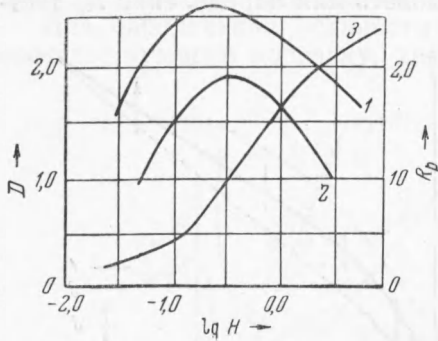


Рис. 3. Результирующая разрешающая способность фотографирующей системы для различных участков характеристической кривой. 1 — R_p для объектива, задиафрагмированного до $F=1:6,3$; 2 — то же при полном относительном отверстии объектива $F=1:2,0$; 3 — характеристическая кривая $D(\lg H)$, относительно которой построены кривые 1 и 2 для различных условий экспонирования тест-объекта с $K_t=0,30$

мимо указанных факторов, как следует из изложенного, будет иметь значение контрастность оптического изображения, определяемая, при прочих равных условиях, свойствами оптической системы. На рис. 3 показаны результаты фотографирования тест-объекта с $K_t=0,30$ на одном и том же фотографическом материале, но при различных относительных отверстиях объектива. Кривые $R_p(\lg H)$ даны в сопоставлении с характеристической кривой $D(\lg H)$ фотографического материала, получаемой при тех же условиях экспонирования и проявления. Из рис. 3 следует, что улучшение оптических свойств объектива, достигаемое в данном случае диафрагмированием, не только увеличивает максимальное значение результирующей разрешающей способности, но и одновременно расширяет интервал яркостей ($\Delta \lg H$), в пределах которого фотографирующая система воспроизводит некоторое значение R_p при данном K_t .

Таким образом, величина результирующей разрешающей способности фотографирующей системы связана с воспроизведением микро- и макродеталей и, в частности, с фотографической широтой. При прочих равных условиях, как это следует из рис. 3, диапазон возможных отклонений в экспозиции будет больше в том случае, когда достигается большее значение результирующей разрешающей способности.

Автор выражает глубокую признательность проф. Е. С. Кузнецову за некоторые указания при выполнении данной работы и чл.-корр. АН СССР К. В. Чибисову за проявленный интерес и ряд ценных замечаний.

Поступило
14 V 1952

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Л. П. Мороз, Усп. научн. фотографии, 1, 135 (1951). ² Н. Perrin, J. Altman, JOSA, 41, 1038 (1951). ³ Г. А. Истомин, ДАН, 84, № 2 (1952). ⁴ M. Marquet, Sci. et Ind. Phot., [2°], 8, 129 (1947). ⁵ W. Romer, ibid., [2°], 8, 193 (1947). ⁶ С. М. Антонов и др., Кинопленка и ее обработка, 1950. ⁷ Г. А. Истомин, ДАН, 82, № 6 (1952).