

АНАЛИТИЧЕСКАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ ПРОЯВЛЕННОЙ ФОТОГРАФИЧЕСКОЙ ЭМУЛЬСИИ

© 1997, Ю.С.Музалевский

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 20.11.96

В работе рассмотрен новый метод аналитической аппроксимации характеристической кривой (ХК) проявленной фотографической эмульсии. Этот метод является модификацией известного метода Зайделя. Предложено теоретическое обоснование и рассмотрены ограничения применимости линеаризации ХК прямым методом Зайделя. Новый метод позволяет повысить точность фотографической фотометрии, производительность компьютерной обработки фотографических изображений и расширить в область малых экспозиций динамический диапазон проявленной фотографической эмульсии.

Введение

Достоинства фотографии как квантового фотоприемника и одновременно долговременной оптической памяти общеизвестны. Возможность регистрации предельно слабых сигналов и увеличение объема регистрируемой оптической информации определяется динамическим диапазоном фотографического изображения в области недодержек, который в свою очередь зависит от реально достижимой точности фотографической фотометрии.

Характерная для фотографической эмульсии нелинейная зависимость величины фотографического эффекта (оптической плотности почернения либо коэффициента пропускания негатива) от величины экспозиции не только снижает точность фотометрии, но и требует трудоемкой индивидуальной калибровки каждого фотографического изображения. Дополнительное снижение точности фотометрии возникают из-за неизвестного уровня вуали фотоматериала и отсутствия объективных критериев для его определения.

Использование современной измерительной и вычислительной техники может обеспечить высокий уровень автоматизации и производительности обработки информации, но не может повысить точность фотометрии, поскольку основы методики калибровки фотографической эмульсии

(ФЭ) и определения уровня вуали остаются прежними. Настоящая работа является попыткой решения этой проблемы путем аналитического представления характеристической кривой (ХК) проявленной ФЭ в виде функции, требующей для своего построения небольшого числа измерений, учитывающей реальную вуаль и позволяющей расширить динамический диапазон ФЭ в области недодержек.

1. Основные методы аналитического представления характеристической кривой

Теоретическое описание процессов формирования ХК является одним из основных направлений развития научной фотографии буквально с первых лет ее становления. Однако многофакторность и нелинейность физико-химических процессов, формирующих ХК, не позволили до настоящего времени довести теорию фотографической фотометрии до уровня, удовлетворяющего потребности практики. Такое положение дел нашло свое отражение в обширной литературе по научной фотографии, например в обзорах [1, 2].

Второе направление аналитического представления ХК заключается в подборе эмпирических формул с ограниченным числом измеряемых параметров. Характерным примером

результатов этого направления является эмпирическая формула ХК [2, с.66]:

$$D = k_1 k_2 \cdot \lg(10^{\frac{e}{k_2}} + 1) \quad (1)$$

где: D — оптическая плотность ФЭ,
 k_1 — контраст ХК;
 $k_2 = w/0,6$ (причем w — “мягкость” ФЭ);
 $e = \lg(E/E_0)$, причем:
 E — экспозиция, формирующая плотность D ;
 E_0 — экспозиция в “точке инерции” ХК.

Для построения ХК по этой формуле нужно знать специфические характеристики проявленной ФЭ (контраст ХК, “мягкость” ФЭ, экспозицию в “точке инерции” ХК), требующие для своего измерения сложных методик. Понятно, почему использование уравнения (1) и аналогичных ему в фотографической фотометрии оказалось малоперспективным.

Альтернативой предыдущим подходам является модификация ХК в координатах, удобных для ее аппроксимации простыми аналитическими функциями. При этом задача теоретического обоснования выбора новых координат для модификации ХК как правило игнорируется. Важным является лишь использование измеримых параметров ФЭ. Такой подход оказался плодотворным. Наиболее удачной аналитической аппроксимацией ХК является функция Зайделя:

$$S = \lg(10^D - 1) = \lg(T^{-1} - 1), \quad (2)$$

где D — оптическая плотность, а T — коэффициент пропускания ФЭ. При этом в координатах {функция Зайделя S — логарифм экспозиции $\lg E$ }, ХК достаточно хорошо аппроксимируется прямой, которая определяется двумя константами a и b :

$$S = a \lg E + b. \quad (3)$$

На основании большого экспериментального материала доказано, что прямая (2) охватывает наиболее интересный для научной фотографии диапазон экспозиций от вуали до конца линейного участка ХК.

Благодаря публикациям Р.Сэмпсона [3,4] и Е.Бейкера [5] аппроксимация Зайделя нашла широкое применение в научных исследованиях. Поскольку публикация самого В.Зайделя неизвестна, этот метод часто называют методом Сэмпсона-Бейкера. По этой же причине неизвестна и изначальная логика формирования соотношений (2). В [3-5] функция S представлена как эвристическая. Х.Кайзер [6] развил метод

применительно к практической спектроскопии и способствовал его внедрению в заводских лабораториях. На русском языке метод Зайделя был впервые подробно описан, проанализирован и рекомендован к применению в фотографической спектрофотометрии В.К.Прокофьевым [7, с.65-78]. Популярности функции Зайделя способствовал также наиболее распространенный в научных и заводских лабораториях микрофотометр МФ-2 и его зарубежные прототипы, снабженные дополнительной визуальной измерительной шкалой в единицах S . Национальное Бюро стандартов США разработало “Method E-116-51T”, основанный на функции Зайделя, и рекомендовало применять его в спектроскопии [8]. В то же время метод Зайделя неоднократно подвергался серьезной критике, поскольку по неизвестным причинам зависимость S от $\lg E$ иногда оказывалась нелинейной, особенно в области малых экспозиций.

Замена микрофотометров типа МФ-2 с визуальным отсчетом на аналогичные приборы с автоматической регистрацией привела к тому, что к началу 60-х годов линеаризация ХК с помощью функции Зайделя оказалась забытой. Позднее, в связи с использованием в фотографической фотометрии цифровой измерительной и вычислительной техники, необходимость в производительных методиках автоматического перевода плотностей (или пропусканий) проявленной ФЭ в относительные интенсивности заставила исследователей заново осваивать проблему упрощения формы ХК. В конце 60-х годов стали появляться разнообразные варианты аналитического представления ХК, по сути являющиеся модификациями метода Зайделя, которые рекомендовались для спектрофотометрии [9], астрономии [10, 11], масс-спектрометрии [12] и т.д. Достаточно полные обзоры этого вопроса приведены в работах П.Кенникота [12] и К.Миза [1, с.80-82]. Реально все эти методы дают примерно одинаковую точность аппроксимации ХК, и их практическое использование, особенно в масс-спектрометрии, где точность калибровки ФЭ относительно невысока, обусловлено скорее вкусами исследователя, нежели свойствами метода. Необходимо также отметить, что ни одна модификация не дала ответ на вопрос, почему у одних исследователей метод Зайделя дает хорошие результаты, а у других — плохие.

К настоящему времени не существует ни теории метода Зайделя, ни общепринятой методики линеаризации ХК проявленной ФЭ. Данная работа посвящена восполнению этого пробела.

2. Теоретическое обоснование метода Зайделя

Чтобы понять, отражает ли функция Зайделя физические свойства проявленной ФЭ и не является ли она формальной комбинацией математических операций, рассмотрим простую модель ФЭ:

- единица площади негатива освещается равномерным пучком света с общей интенсивностью I_0 ;

- на этом же участке негатива имеются проявленные зерна, возникшие вследствие экспозиции (их количество — $n_э$) и из-за вуали (их количество — $n_в$);

- величина экспозиции относительно невелика; поэтому общее количество проявленных зерен на единице площади негатива также невелико, и они не экранируют друг друга;

- каждое зерно, возникшее вследствие экспозиции, поглощает $i_э$, а зерно вуали — $i_в$, падающего света.

При микрофотометрировании проявленного негатива зерна вуали и изображения поглотят часть падающего на единицу площади ФЭ осветительного пучка света I_0 . Интенсивность прошедшего пучка $I_п$ можно записать в виде:

$$I_п = I_0 - (i_э n_э + i_в n_в), \tag{4}$$

а коэффициент пропускания $T = I_п / I_0$ окажется равным:

$$T = 1 - (i_э n_э + i_в n_в) / I_0. \tag{5}$$

Коэффициент пропускания только одной вуали $T_в$ можно получить из (5), если принять $n_э = 0$, т.е.:

$$T_в = 1 - i_в n_в / I_0. \tag{6}$$

Поскольку часть I_0 поглощается зернами вуали, для зерен изображения исходного света остается меньше, чем I_0 . Коэффициент пропускания, образуемый только экспонированными зернами, можно поэтому записать следующим образом:

$$T_э = 1 - i_э n_э / (I_0 - i_в n_в) \tag{7}$$

или

$$T_э = T / T_в. \tag{8}$$

Соотношение (8) согласуется с общепринятым методом учета вуали. Это свидетельствует о правомерности модели.

Рассмотрим относительное число проявленных зерен эмульсии, $d = n_э / N_0$, где N_0 — максимально возможное число проявленных зерен негатива. Составим отношение доли проявленных зерен к

непроявленным. С учетом (7) имеем (9):

$$d / (1 - d) = n_э / (N_0 - n_э) = (1 - T_э) / (T_э - T_в).$$

Здесь $T_в$ — минимально возможный коэффициент пропускания негатива, который определяется из соотношения (7) для случая, когда все зерна эмульсии N_0 проявлены. Поскольку практически в любой эмульсии N_0 очень велико и $D_э$ больше 3, величина $T_э$ всегда меньше 10^{-3} . В то же время для малых экспозиций $T_э$ близко к единице. Поэтому в (9) величина $T_э$ с достаточной точностью может быть исключена из рассмотрения (10):

$$d / (1 - d) = (1 - T_э) / T_э = 1 / T_э - 1 = 10^{D_э} - 1$$

и соответственно:

$$\lg(d / (1 - d)) = \lg(10^{D_э} - 1).$$

Правая часть этого выражения полностью совпадает с функцией Зайделя (2), которая в пределах исходной модели приобретает конкретный физический смысл:

$$S = \lg(10^{D_э} - 1) = \lg(d / (1 - d)). \tag{11}$$

Итак, можно утверждать, что в (2) оптическая плотность и коэффициент пропускания в действительности являются величинами над вуалью, а в (11) величина d является числом проявленных зерен только изображения, без учета зерен вуали.

Во многих теоретических и экспериментальных исследованиях физических процессов формирования ХК соотношение $d / (1 - d)$ часто используется как важный информативный параметр. В обзоре [13] сформулированы основные полученные результаты, среди которых для рассматриваемого вопроса важны следующие два:

а) теоретические исследования образования центров проявления при поглощении нескольких фотонов показали, что относительное число возникших центров проявления d зависит от экспозиции E следующим образом:

$$d / (1 - d) = (kE)^{n_ф}, \tag{12}$$

где k — коэффициент, отражающий эффективность поглощения фотонов, а $n_ф$ — число поглощенных микрокристаллом ФЭ фотонов;

б) экспериментальные исследования на специально изготовленных тестовых эмульсиях, не имеющих вуали, доказали, что для областей, далеких от насыщения, всегда сохраняется линейная зависимость $\lg(d / (1 - d))$ от логарифма экспозиции.

Таким образом, в рамках сформулированных выше ограничений функцию и метод Зайделя можно считать достаточно обоснованными, а уравнения аппроксимации ХК следует писать в следующем виде:

$$\lg(10^{D_0} - 1) = a \lg E + b, \quad (13)$$

или

$$\lg(1/T_0 - 1) = a \lg E + b, \quad (14)$$

где a и b — константы линейной аппроксимации.

3. Основные свойства метода Зайделя

Как отмечено выше, линейная связь между функцией Зайделя S и $\lg E$, согласно (13) и (14), возможна лишь при точном знании величин D_0 или T_0 , что реально только при корректном проведении уровня вуали. Понятно, что при низком уровне вуали влияние ошибки ее определения будет невелика, высокий же уровень вуали требует более тщательного подхода. По-видимому, именно высокий и неправильно учтенный уровень вуали послужили истинной причиной отдельных неудач применения метода аппроксимации ХК с помощью функции Зайделя. Справедливость этого утверждения можно показать на примере.

Рассмотрим, как малые вариации ХК, обусловленные ее параллельным сдвигом вдоль оси ординат, влияют на вид зависимости функции Зайделя от экспозиции. Такие вариации ХК эквивалентны разным уровням вуали, принятым исследователем за истинные. Для наглядности примем в (13) $a = 1$ и $b = 0$. При этом точная аппроксимация ХК будет иметь вид:

$$S = \lg(10^D - 1) = \lg E, \quad (15)$$

а точное уравнение самой ХК будет соответствовать выражению:

$$D = \lg(1 + 10^{\lg E}) \quad (16)$$

Примем, что имеют место два случая неверного проведения вуали: выше точного значения по (16) на dD и ниже его же на такую же величину. При этом значения функции Зайделя также будут изменяться в разные стороны от точного значения на величину dS . Зависимость dS от dD несложно получить из (15):

$$dS = (1 + 10^{-\lg E})dD. \quad (17)$$

Из (17) ясно, что при увеличении экспозиции величины dS и dD оказываются сравнимыми, но для малых экспозиций, вблизи вуали, dS может

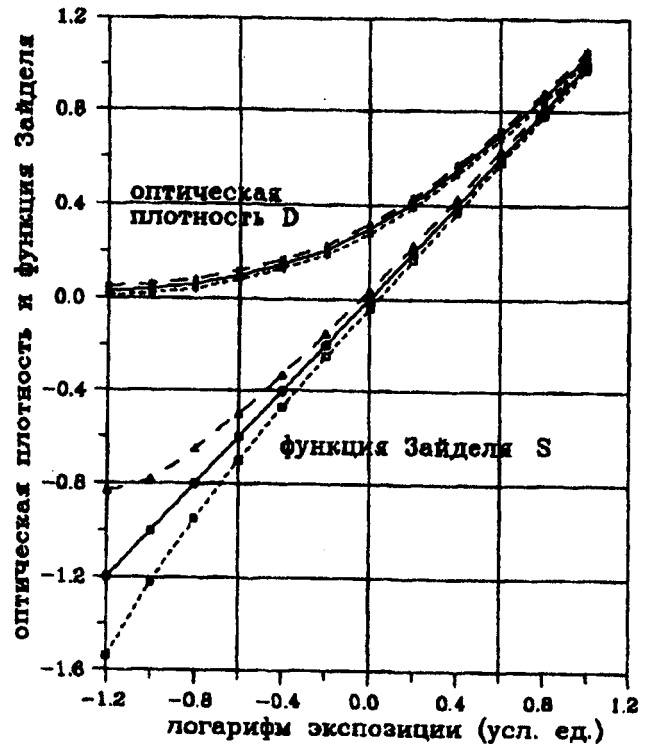


Рис.1. Влияние вариаций уровня вуали на форму характеристической кривой и зависимости функции Зайделя от логарифма экспозиции (пояснения в тексте).

оказаться существенно больше dD . Это хорошо видно из рис.1, где по оси абсцисс отложен $\lg E$ в условных единицах, а по оси ординат — D и S . При $dD = 0$ (сплошные линии, обозначенные кружками) зависимость D от $\lg E$ представляет собой типичную кривую для ХК в области недодержек, а зависимость S от $\lg E$ — прямую. Параллельный сдвиг ХК вверх на $dD = 0,02$ приводит к тому, что правая часть зависимости S от $\lg E$ также сдвигается вверх примерно на такую же величину, а левая часть этой зависимости поднимается значительно сильнее (штриховые кривые, обозначенные треугольниками). То же, но с обратным знаком, происходит при сдвиге ХК вниз на такую же величину dD (штриховые кривые, обозначенные квадратами). Очевидно, что неверно принятый уровень вуали не может дать линейную зависимость S от $\lg E$. Можно утверждать, что справедливо и обратное — линейная зависимость S от $\lg E$ свидетельствует о правильно учтенном уровне вуали.

Кривые рис.1 позволяют также понять физический смысл констант аппроксимации a и b . При больших экспозициях S и D становятся очень близки, и ХК переходит в область линейности. Прямая $S(\lg E)$ практически является

касательной к кривой $D(\lg E)$. Поэтому величина a , определяющая угол наклона прямой $S(\lg E)$, фактически является контрастом ФЭ, а величина b связана с ее чувствительностью. Действительно, из (13) легко видеть, что при $10^{D_0} \gg 1$ контраст ФЭ, определяемый как производная $dD_0/d(\lg E)$, равен именно константе a .

4. Модифицированный метод Зайделя линеаризации ХК

Введем в (13) и (14) вместо D_0 и T_0 измеряемые величины D и T и одновременно вместо неизвестных или неточно определенных параметров вуали D_b и T_b параметры коррекции D_k и T_k согласно следующим соотношениям:

$$D_0 = D - D_k = \lg(T_k/T) = -\lg T_0, \quad (18)$$

где

$$D_k = -\lg T_k. \quad (19)$$

В результате получим [14]:

$$\lg(10^{D - D_k} - 1) = a \lg E + b, \quad (20)$$

и

$$\lg(T_k/T - 1) = a \lg E + b. \quad (21)$$

В области вуали при E близком к 0 правые части (20) и (21) стремятся к минус бесконечности. При точном совпадении параметров коррекции D_k и T_k соответствующим параметрам вуали D_b и T_b левые части этих уравнений также будут стремиться к минус бесконечности, поскольку в этой области $D_0 = 0$, а $T_0 = 1$. Если D_k будет равно нулю или меньше D_b , то левая часть (20) в области истинной вуали окажется конечным числом. Если D_k взять больше D_b , то левая часть (20) будет стремиться к минус бесконечности не в области $E = 0$, а при $E > 0$. Именно так ведут себя соответствующие кривые на рис.1. Подбирая D_k или T_k так, чтобы зависимость S от $\lg E$ спрямлялась, можно получить как удобную аналитическую аппроксимацию ХК, так и информацию об истинном уровне вуали.

Таким образом, в результате модификации метода Зайделя появляются критерий для оценки уровня вуали и действительно линейный характер любой ХК в области малых экспозиций. Линейность представления позволяет дополнительно повышать точность ее проведения разными методами, начиная от простого усреднения до использования метода наименьших квадратов. Кроме того, повышает точность фотометрии и возможность использования (20)

и (21) не редуцированных за вуаль, а реальных измеримых параметров негатива — плотности и коэффициента пропускания.

5. Свойства модифицированного метода Зайделя.

Согласно (20) и (21) ХК может быть представлена в виде аналитической функции с тремя параметрами аппроксимации: a , b и D_k (либо T_k). Справедливо утверждение, косвенно подтверждаемое соотношением (17), что в пределах стационарности ХК эти параметры варьируют в небольших пределах. Область стационарности ХК и пределы допустимых вариаций параметров аппроксимации определяются в первую очередь требованиями к точности фотометрии. В научной фотографии обычно считается, что для правильно проявленного негатива одна ХК может быть использована лишь при обработке одного изображения, т.е. в пределах только одной фотопластинки или одного кадра на фотопленке.

Для вычисления трех параметров аппроксимации достаточно трех независимых уравнений, полученных из (20) или (21), для трех разных экспозиций проявленной ФЭ. Если известен массив измерений участков негатива с разными экспозициями, обычно используемый при традиционном методе построения ХК, то избыточность такого массива и соответствующие невязки могут позволить повысить точность определения констант аппроксимации.

Если из дополнительных источников известен уровень вуали, то для вычисления оставшихся констант достаточно двух реперных экспозиций. Подобная ситуация возможна и при наличии информации об уровне контраста ХК, до которого проявлена ФЭ. Эта информация, пусть даже не очень точная, в сочетании с двумя разными экспозициями одного и того же объекта, полученными, например, при разных выдержках, позволяют получить экспресс-оценку относительной интенсивности какой-либо важной детали объекта. Возможны и иные варианты определения констант аппроксимации. Это не только упрощает процедуры практического применения фотографической фотометрии и повышает ее точность, но и существенно расширяет ее реальные методические возможности.

Выводы

1. На основании только рутинных измерений плотности или коэффициента пропускания

проявленной ФЭ, без привлечения дополнительной информации о ее свойствах, возможна простая аналитическая аппроксимация ХК в диапазоне от области малых экспозиций до экспозиций, соответствующих линейной части ХК.

2. Анализ простой модели проявленного фотографического слоя показал, что функция Зайделя может хорошо спрямлять ХК в области малых экспозиций только в том случае, если для разных экспозиций значения S вычисляются по величинам плотности или коэффициента пропускания проявленной ФЭ, исправленным за уровень истинной фотографической вуали.

3. Линейность зависимости функции Зайделя от логарифма экспозиции в области недодержек может служить объективным критерием правильности определения уровня истинной фотографической вуали проявленной ФЭ.

4. Сформулированный выше критерий правильности определения уровня истинной фотографической вуали проявленной ФЭ дает возможность отличить фотографическую вуаль от уровня равномерной фоновой засветки при экспозиции.

5. Варьирование методов определения констант аппроксимации модифицированного метода Зайделя расширяет практические возможности фотографической фотометрии.

Дополнение

Автор благодарит И.И.Брейдо, Э.В.Кандрашова, Л.Н.Галль и И.Б.Птицыну за активное внимание к данной работе и помощь при ее выполнении.

Литература

1. Миз К., Джеймс Т. Теория фотографического процесса. Л.: Химия, 1973. 572 сс.

2. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации. М.: МИР, 1978. 670 сс.

3. Sampson R.A. On the Estimation of the Continuous Spectrum of Stars. Mon Not Roy Astr Soc 1923; 83 (3): 174-204.

4. Sampson R.A. Effective Temperatures of Sixty Four Stars. // Mon Not Roy Astr Soc 1925; 85 (3): 212-45.

5. Baker E.A. The Law of Blackening of the Photographic Plates at Low Densities. Proc Roy Soc Edinburgh, Session 1924-25; 45 pt 2 (15): 166-86.

6. Kaiser H. Uber die verschiedenen Verfahren fur Auswertung der Spectrum bei quantitativen spectrochemischen Analysen. Spectrochim Acta 1941; 2 (1): 1-17.

7. Прокофьев В.К. Фотографические методы количественного спектрального анализа металлов и сплавов. Часть 2. Методика. М.-Л.: ГИТТЛ, 1951. 327 сс.

8. US NBS Method E-116-51T. Methods for Emission Spectrochemical Analysis. Philadelphia, Pennsylvania: Committee E-2 of the American Society for Testing Materials 1957.

9. Margoshes M. Remarks on Linearization of Characteristic Curves in Photographic Photometry. Appl Opt 1969; 8 (4): 818.

10. Vaucouleurs G. Linearization of Characteristic Curves in Photographic Photometry. Appl Opt 1968; 7 (4): 1513-8.

11. Vaucouleurs G. Comments on Several Published and Unpublished Reactions to the Paper on Photographic Characteristic Curves. Appl Opt 1969; 8 (4): 818-9.

12. Кенникот П. Расшифровка масс-спектров на фотопластинках. Масс-спектрометрический метод определения следов. М.: МИР, 1975: 187-215.

13. Candler C. Photographic Characteristic of a Monolayer. J Opt Soc Amer 1962; 52 (3): 300-12.

14. Музалевский Ю.С. Метод аналитической аппроксимации характеристической кривой фотоматериала. Проблемы космической физики. Киев: Вища школа, 1981; (16): 122-7.

AN ANALYTICAL APPROXIMATION OF THE DEVELOPED PHOTOGRAPHIC EMULSION CHARACTERISTIC CURVE

Yu.S. Muzalievsky

Institute for Analytical Instrumentation RAS, St. Petersburg

A method of developed photographic emulsion characteristic curve (CC) analytical approximation is considered in this article. This method is a modification of the well known Seidel method. A theoretic base and usage limitations of direct method of CC linearization by SF are proposed. The new method allows to the raise the precision of photographic photometry and rise the speed output of photographic image processing by computers, to expand developed photographic emulsion dynamic range towards the area of low exposures.