

УДК 004.932.2

К ПРОБЛЕМЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ РЕГИСТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

© Ирина Львовна Артюшина¹, Алексей Иосифович Винокур¹,
Виталий Львович Крупенин^{1,2}

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет печати имени Ивана Федорова», Москва, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия
alexvinokour@gmail.com, krupenin@gmail.com

Аннотация. Проводится формализация задачи восстановления характеристической кривой регистрирующего устройства по результатам мультиэкспозиционной съемки сюжетного изображения. Установлено, что для определения общего контраста исходного изображения необходима дополнительная информация об условиях съемки.

Ключевые слова: HDRI, характеристическая кривая, экспозиция, некорректная задача.

TO THE PROBLEM OF RECOVERING THE CHARACTERISTIC CURVE OF THE RECORDING DEVICE

Irina L. Artyushina¹, Aleksey I. Vinokur¹, Vitaly L. Krupenin^{1,2}

¹Moscow State University of Printing Arts

²The federal state budgetary establishment of science the Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Annotation. Held formalization of the problem of recovering the characteristic curve of the recording device on the results multiekspozitsionnoy shooting a subject image. It is established that to determine the total contrast of the original image for additional information about the shooting conditions.

Keywords: HDRI, characteristic curve, exposure, ill-posed problem.

1. Постановка задачи. В работах [1, 2] обоснована перспективность применения технологии HDRI (High Dynamic Range Imaging.) при оцифровке изображений на различных носителях, их последующем архивном хранении и кросс медийном воспроизведении. В общем случае цель заключается в формировании цифрового изображения дубликационно точно повторяющего оригинал [3]. Необходимым инструментом для его формирования является характеристическая кривая регистрирующего устройства [4].

В разработанной и реализованной технологии и информационной системе [2, 5] характеристическая кривая регистрирующей камеры определяется экспериментально. На практике такая возможность имеется не всегда, поэтому в настоящей работе предлагается восстанавливать характеристическую кривую по результатам мультиэкспозиционной регистрации сюжетного изображения.

Предположим, что динамический диапазон исходного изображения превышает динамический диапазон регистрирующей камеры. Вместе с тем, не нарушая общности подхода, для более ясного изложения основных идей, будем считать, что для восстановления

дубликационно точного (по градационной передаче) цифрового изображения двух экспозиций достаточно. Таким образом, исходными данными являются два элементарных цифровых изображения.

Первое изображение (первая экспозиция) позволяет проработать света, тени не содержат градационных различий.

Второе изображение позволяет проработать тени, света также не содержат градационных различий. При этом существенно обстоятельство, проработки полутонов в обоих изображениях. Задача: требуется по возможности полно восстановить характеристическую кривую регистрирующей камеры.

Такая задача, очевидно, некорректно поставлена по Адамару [6] и алгоритм восстановления должен быть регуляризирующим, например, тихоновским.

2. Характеристическая кривая. Под характеристической кривой (ХК) принято понимать [7] зависимость сигнала изображения от логарифма экспозиции $y = f(\lg H)$ (рис. 1). Здесь y – сигнал изображения, экспозиция $H = E \cdot t$. При фиксированном уровне освещенности при съемке величина $\lg H$ однозначно связана с сигналом исходного изображения x , причем естественно потребовать, чтобы переменные y и x измерялись в одних и тех же единицах. Удобнее задавать ХК посредством производной $g(x) = \frac{dy}{dx}$, так как для HDRI технологии существенна только форма ХК, а не абсолютные значения логарифмов экспозиции, определяемые чувствительностью камеры.

Это соотношение перепишем в виде:

$$f(x) = \int_{x_0}^x g(x) dx, \quad (1)$$

где x_0 соответствует минимальному значению логарифма экспозиции, x – текущее значение логарифма экспозиции [8, 9].

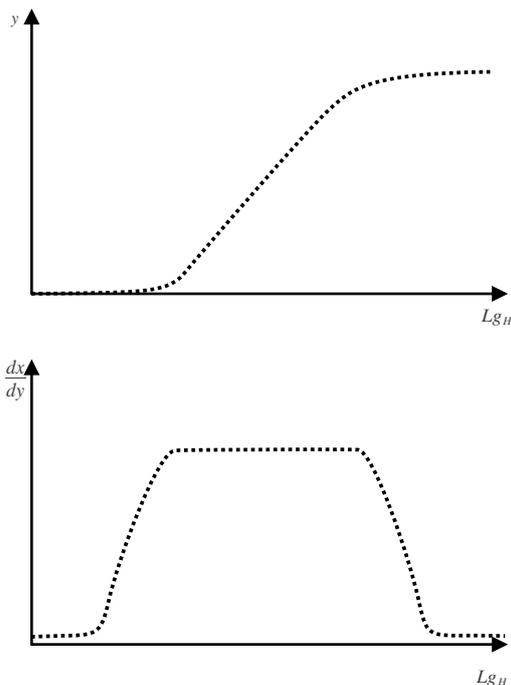


Рис. 1
Характеристическая кривая
и ее производная

Для учета изменения освещенности исходного изображения при получении первого и второго элементарных изображений, вводим экспозиционный параметр Z , который отвечает за положение интервала сигнала исходного изображения относительно ХК:

$$y(z) = f(x, z)$$

Последняя формула побуждает нас в качестве сигнала изображения использовать логарифмические единицы – оптические плотности, так как только для них выполняется равенство $f(x, z) = f(x + z)$. Это существенно облегчает все дальнейшие операции.

Таким образом, в нашем исследовании рассматриваем зависимость оптической плотности изображения от оптической плотности оригинала. Такую зависимость принято называть градационной характеристикой (ГК). Экспозиционный параметр реализует сдвиг ГК относительно горизонтальной оси оптических плотностей оригинала (рис. 2).

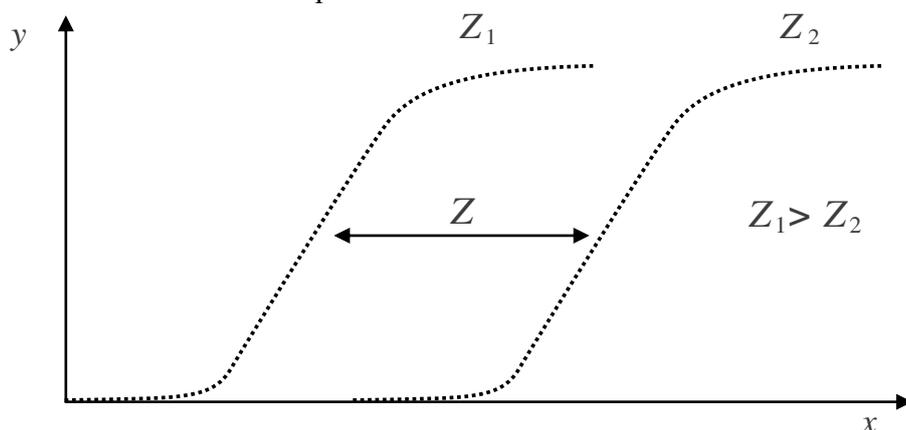


Рис.2. ГК с различными экспозиционными параметрами

Очевидно, что на некотором участке производная градационной характеристики элементарного изображения совпадает с производной характеристической кривой. Поэтому для решения задачи восстановления ХК будем рассматривать ГК элементарных цифровых изображений.

3. О свойствах характеристической кривой. Типичная ХК обладает следующими свойствами.

Значение функции и аргумент (ордината и абсцисса) выражаются логарифмическими единицами. Аргументом является оптическая плотность исходного изображения (оригинала), а значением функции – оптическая плотность элементарного цифрового изображения.

Характеристическая кривая дается ограниченной функцией – имеет минимальное и максимальное значения. Разность максимального и минимального значения определяет динамический диапазон зарегистрированного цифрового изображения. Не уменьшая общности, можно считать, что минимальное значение функции равно нулю. Максимальное – динамическому диапазону зарегистрированного изображения.

Характеристическая кривая дается неубывающая непрерывная гладкая функция и имеет пять выраженных участков.

- (1). Участок «недоержек» - функция имеет постоянное минимальное значение.
- (2). Участок «передержек» - функция имеет постоянное максимальное значение.
- (3). Нижний криволинейный участок - производная возрастает с нулевого значения до максимального.
- (4). Прямолинейный участок – производная имеет максимальное значение.
- (5). Верхний криволинейный участок – производная уменьшается от максимального до нулевого значений.

Имеет смысл ввести понятие интервала оптических плотностей оригинала для выбранного значения экспозиционного параметра.

Определим его как множество значений оптических плотностей оригинала, минимальное значение которого соответствует началу нижнего криволинейного участка, а максимальное – концу верхнего криволинейного участка.

Иными словами интервал оптических плотностей оригинала – это множество его оптических плотностей, которое регистрируется с ненулевым градиентом, т.е. с сохранением контурной информации (перепады оптических плотностей на границах деталей могут измениться, но сами контуры сохраняются).

В рассматриваемом нами случае величина интервала оптических плотностей оригинала для любого значения экспозиционного параметра будет меньше динамического диапазона оригинала.

4. Требования к экспонированию для получения элементарных цифровых изображений. Динамический диапазон исходного изображения (оригинала) полностью перекрывается интервалами оптических плотностей оригинала для первой и второй экспозиции.

Для одного из элементарных цифровых изображений на прямолинейный участок ХК попадают «тени» оригинала. Для другого - «света».

Существует множество «полутонов» оригинала, которые попадают на прямолинейный участок ХК обоих элементарных цифровых изображений (рис.3).

Контроль их выполнения может проводиться по минимальным и максимальным значениям оптических плотностей элементарных цифровых изображений. Обычно эти требования выполняются, и в настоящей работе рассматривается именно этот случай.

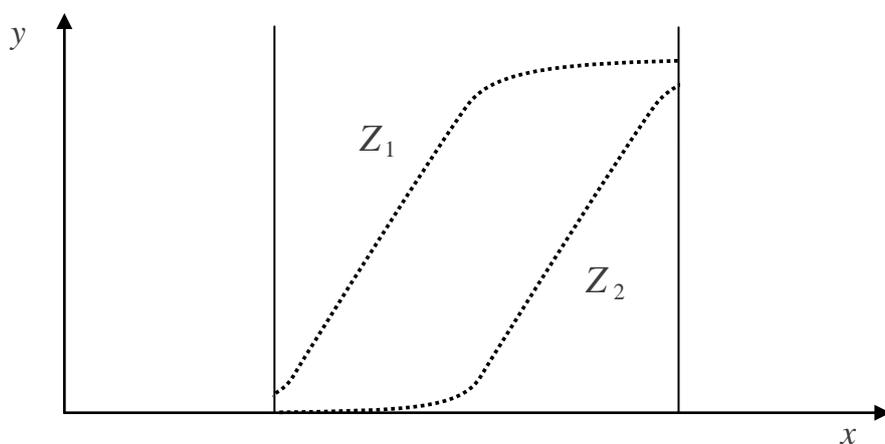


Рис. 3. Z_1 – «света» на прямолинейном участке Z_2 – «тени» на прямолинейном участке

5. Исходные данные для построения алгоритма. Исходными данными для построения алгоритма восстановления ХК регистрирующей камеры являются оптические плотности двух элементарных изображений. Однако не все значения могут быть использованы. Это связано с тем, что первая и вторая экспозиция производятся в разное время и, возможно, с незначительным сдвигом и поворотом. Все это приводит при формировании единого изображения к возможности появления двойных контуров и «фантомов» [10].

Наша задача заключается в выборе из всего множества пикселей изображения таких, чтобы мы были уверены в их пространственном соответствии в обоих элементарных изображениях. А также, чтобы значения оптических плотностей не искажались возможным

сдвигом на полпиксела, то есть пиксели должны лежать в областях с небольшим локальным градиентом оптической плотности, рассматриваемой как функции пространственных координат.

Используя опыт преодоления аналогичных проблем, при создании панорамных изображений, предлагается использовать SUFR-технология [11].

Пространственная привязка пикселей проводится по совмещению SUFR-точек, затем из всего множества точек удаляются контуры и их окрестности. Для оставшегося множества точек проводится ранжирование по сумме оптических плотностей совмещенных пикселей в первом и втором элементарном цифровом изображении.

Введем следующие обозначения: x_i – упорядоченная последовательность оптических плотностей оригинала; $y_i^k = f(x_i + z_k)$ – соответствующие им значения оптических плотностей элементарного цифрового изображения с экспозицией номер k .

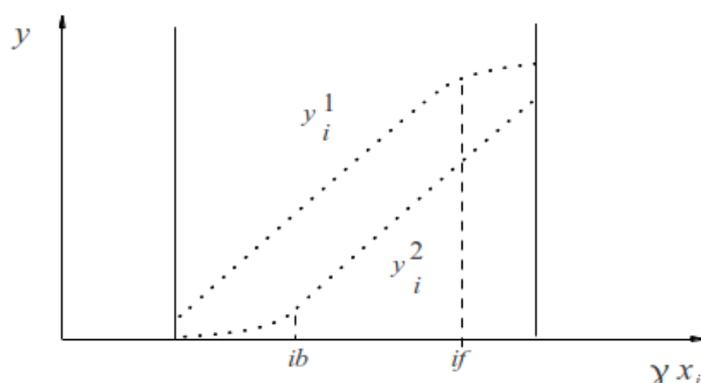


Рис. 4. Иллюстрация алгоритма: вычисления массива γx_i .

Упорядочивание происходит по следующему правилу:

$$\forall i < j \quad y_i^1 + y_i^2 \leq y_j^1 + y_j^2$$

Пусть $z_1 > z_2$, тогда, не уменьшая общности можно полагать, что $z_2 = 0$, а $z_1 = z$.

Для получения характеристической кривой необходимо определить для каждого значения i соответствующее значение x_i , а затем соответствующее ему значение f_i . Завершением является получение производной ХК как решение уравнения Фредгольма первого рода (1), данного в начале статьи.

6. Описание алгоритма. Из рис. 4 видно, что последовательность $y_i^1 - y_i^2$ сначала возрастает, затем достигает практически постоянного значения, близкого к максимальному, а затем - убывает. Участок постоянных значений соответствует полутонам оригинала, которые при получении обеих элементарных экспозиций попали на прямолинейный участок ХК.

Очевидно, что на этом участке значения оптических плотностей оригинала линейно зависят от оптических плотностей элементарных изображений. Коэффициент пропорциональности носит название коэффициента контрастности и обозначается γ .

Обозначим ib и if начальный и конечный номера участка постоянных разностей. Тогда массив x_i определяется по следующим формулам:

$$\text{для } ib < i < if \quad \gamma x_i = \frac{1}{2} \cdot (y_i^1 - y_i^2),$$

$$\begin{aligned} \text{для } i \geq i_f \gamma x_i &= \gamma x_{ib} + y_i^2 - y_{ib}^2, \\ \text{для } i \leq i_b \gamma x_i &= \gamma x_{if} + y_{if}^1 - y_i^1. \end{aligned}$$

В результате вычислений по этим формулам получаем массив γx_i , содержащий числовые значения, пропорциональные массиву оптических плотностей оригинала. Точное значение параметра γ без дополнительных предположений определить невозможно.

Возможна оценка минимального значения из выполнения условий, предъявляемых к соотношению динамических диапазонов оригинала и регистрирующей камеры, а также требований к элементарным цифровым изображениям. Однако такая оценка едва ли является полезной, т.к. дальнейшее использование цифрового изображения проводится на основе концепции кросс медийного воспроизведения, при котором оригинал принципиально не зависит от технологии визуализации.

Это обстоятельство является весьма существенным, так как позволяет строить ХК в координатах $\{\gamma x_i, y_i\}$, не теряя строгости подхода.

В результате вычислений по этим формулам получаем массив γx_i , содержащий числовые значения, пропорциональные массиву оптических плотностей оригинала. Точное значение параметра γ без дополнительных предположений определить невозможно. Возможна оценка минимального значения из выполнения условий, предъявляемых к соотношению динамических диапазонов оригинала и регистрирующей камеры, а также требований к элементарным цифровым изображениям. Однако такая оценка едва ли является полезной, т.к. дальнейшее использование цифрового изображения проводится на основе концепции кросс медийного воспроизведения, когда оригинал принципиально не

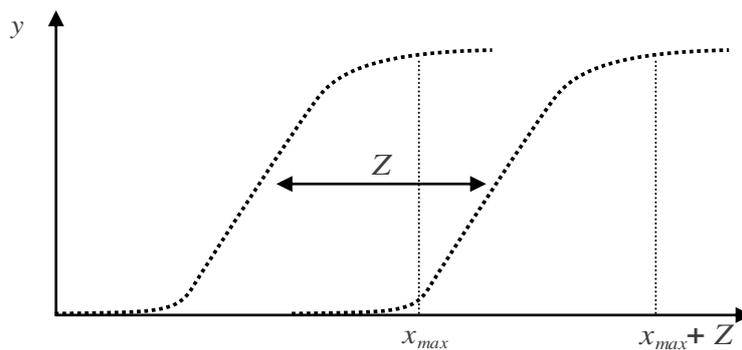


Рис. 5. Построение ХК на интервале $(0; x_{\max} + Z)$

зависит от технологии визуализации. Это обстоятельство является весьма существенным, так как позволяет строить ХК в координатах $\{\gamma x_i, y_i\}$, не теряя достаточной строгости подход.

Чтобы получить значения f_i в полном диапазоне изменения аргумента $x_0 \leq x \leq x_{\max} + Z$, рассмотрим обе зависимости y^1 и y^2 как непрерывные функции аргумента x , например, с помощью линейной интерполяции. Затем можно провести дискретизацию интервала $(0, x_{\max} + Z)$ и для полученной последовательности аргументов вычислить соответствующую последовательность значений функции.

Дальнейшая обработка данных ведется по обычной схеме метода регуляризации.

Список литературы

1. Артюшина И.Л., Винокур А.И. Информационные системы: проблемы регистрации и воспроизведения изображений // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела, 2011, № 4, с. 75-82
2. Артюшина И.Л., Ахтариев Р.Ж., Винокур А.И. Методы регистрации и воспроизведения высококонтрастных оригиналов в системах с ограниченным динамическим диапазоном // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела, 2009, № 4, с. 9-15
3. Артюшина И.Л., Винокур А.И. О точности передачи градационной и структурной информации в репродукционных процессах // Сборник научных трудов Научно-исследовательского кинофотоинститута «Методы совершенствования технологии кинематографии с использованием вычислительной техники», Москва 1996г, стр. 43-47.
4. Debevec Paul, Malic Jitendra Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs, Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH'97), ACM, 1997
5. AkhtariievR., VinokourA. Quality evaluation algorithms for HDR image generation // Printing future days 2011. Chemnitz. Germany 171-175pp
6. Арсенин В.Я., Тихонов А.Н. Некорректные задачи /Математическая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1982. – Т.3. – С.930–935.
7. Hunt R.W.G. The Reproduction of Colour Sixth Edition // John Wiley & Sons 2004, 732 p
8. Сизиков В.С. Устойчивые методы обработки результатов измерений // СПб, «Спецлит», 1999, 240 с.
9. Бакушинский А.Б., Гончарский А.В. Некорректные задачи. Численные методы и задачи. // Издательство Московского университета 1989, 200 стр.
10. Fredo Durand, Julie Dorsey. Fast Bilateral Filtering for the Display of High-Dynamic-Range Images // Laboratory for Computer Science. Massachusetts Institute of Technology. – 2002
11. Speeded-Up Robust Features (SURF) Herbert Bay, Andreas Ess, Tinne Tuytelaars, and Luc Van Gool; М.: ETH Zurich, BIWI, 2008. – 14 p.
12. Babitsky V.I., Krupenin V.L. Vibration of Strongly Nonlinear Discontinuous Systems.- Berlin. Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2001. –404 p.p.