

С.З. Свердлов, канд. техн. наук, проф. кафедры прикладной математики
Вологодского государственного университета

Настройка насыщенности при обработке цифровых изображений

В работе рассматривается колориметрически-корректный метод изменения насыщенности, оставляющий неизменными светлоту и цветовой тон. Автором предложен алгоритм, максимизирующий насыщенность цифрового изображения без выхода за охват RGB-пространства.

***Ключевые слова:** цифровая фотография, цветовая координатная система, обработка цветных цифровых изображений, насыщенность, цветность, программное обеспечение, цветокоррекция.*

Введение

В практике обработки изображений используются стандартизованные RGB-пространства, такие как sRGB, Adobe RGB и другие. Они являются нелинейными (используют гамма-коррекцию). Цветовые вычисления в таких пространствах некорректны с физической (колориметрической) точки зрения. Для настройки насыщенности предлагается использовать линейризованное RGB-пространство.

Способ вычисления насыщенности, принятый при использовании цветовых координатных систем (цветовых моделей) HSL и HSB, основан на простейших геометрических соображениях и не имеет строгого обоснования. В работе предлагается колориметрически-корректный метод изменения насыщенности, оставляющий неизменными светлоту и цветовой тон. Полученные формулы не предполагают ортогональности RGB-пространства. Вводится понятие относительной насыщенности.

Ниже рассматривается алгоритм, максимизирующий насыщенность цифрового изображения. При этом линейная насыщенность пикселей изображения

увеличивается в одинаковое число раз без выхода за цветовой охват RGB-пространства. Алгоритм реализован в программе C3C Color Wizard, предусматривающей автоматическую настройку насыщенности.

Предложен, основанный на подходе П. Косенко, алгоритм ограничения насыщенности с последующим увеличением контрастности, который позволяет в ряде случаев гармонизировать восприятие цифровой фотографии.

Регулирование насыщенности

Насыщенность — один из атрибутов зрительного ощущения (два других — цветовой тон и светлота), который позволяет судить о степени отличия хроматических цветовых стимулов (цветов, излучений) от ахроматических [1, 2].

В практике цветовых расчетов используются две относящиеся к насыщенности величины: собственно насыщенность (saturation) и цветность (chroma). Первая характеризует отличие хроматического и ахроматического стимулов независимо от их яркости (светлоты). Вторая — отличие стимулов одной яркости (светлоты) [1].

Рассмотрим линейное цветное RGB-пространство. В качестве примера будем использовать линейризованное стандартное цветное пространство sRGB [3]. Линейризация sRGB выполняется по формуле (1):

$$C_{\text{лин}} = \begin{cases} \frac{C_{\text{srgb}}}{12.92}, & C_{\text{srgb}} \leq 0.04045 \\ \left(\frac{C_{\text{srgb}}}{1+a} \right)^{2.4}, & C_{\text{srgb}} > 0.04045 \end{cases}, \quad (1)$$

где $a = 0.055$; C_{srgb} — исходные (например, считанные из файла изображения) гамма-корректированные (нелинейные) sRGB-значения R , G или B (формулы для преобразования R , G и B одинаковы); $C_{\text{лин}}$ — линейризованные значения R , G или B . Здесь и далее предполагается, что цветовые координаты выражаются вещественными числами в диапазоне от 0.0 до 1.0.

Рассмотрим прямую в линейном RGB-пространстве, соответствующую ахроматическим цветам (черный, серые, белый) — «серую» ось (Рис. 1). В сба-

лансированном RGB-пространстве ахроматические цвета имеют равные RGB-координаты: $R = G = B$.

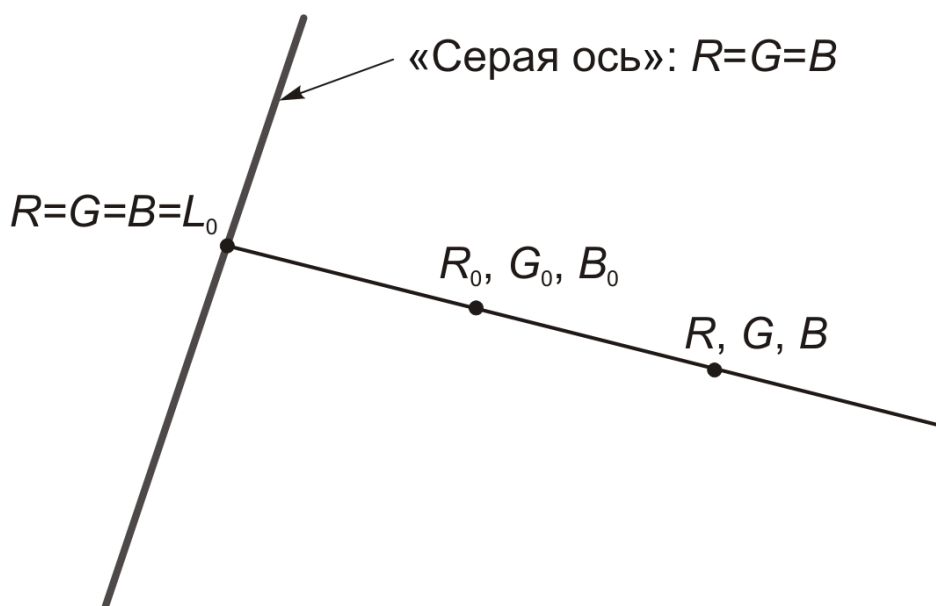


Рис. 1. Прямая изменения насыщенности

Светлота L в линейном RGB-пространстве может быть вычислена как значение Y -координаты цветового пространства CIEXYZ (величина Y в CIEXYZ равна фотометрической яркости [1]). Например, в линейном sRGB L вычисляется с использованием коэффициентов (их сумма равна 1.0) соответствующей строки матрицы преобразования sRGB \rightarrow CIEXYZ:

$$L = Y = 0.2126R + 0.7152G + 0.0722B. \quad (2)$$

Здесь R , G и B – линейные sRGB-координаты, $R, G, B \in [0, 1]$.

В соответствии с (2), для ахроматических цветов ($R = G = B$) значение светлоты совпадает со значением R , G и B : $L = R = G = B$.

Рассмотрим точку RGB-пространства, значения цветовых координат которой равны R_0 , G_0 , B_0 (рис. 1). Эта точка может соответствовать одному или нескольким пикселям цифрового изображения, цвета которых заданы значениями R_0 , G_0 , B_0 . Светлота таких пикселей равна

$$L_0 = 0.2126R_0 + 0.7152G_0 + 0.0722B_0. \quad (3)$$

Отметим на «серой» оси точку с RGB-координатами $R = G = B = L_0$ (рис. 1). Это точка ахроматического цвета, светлота которой равна светлоте, вычисленной в точке (R_0, G_0, B_0) . Рассмотрим прямую, проходящую через точки $(L_0,$

L_0, L_0) и (R_0, G_0, B_0) (рис. 1). На ней расположены точки одинаковой светлоты, и одинакового цветового тона (точки одинакового цветового тона располагаются в одной плоскости, проходящей через «серую» ось). Различные точки на рассматриваемой прямой отличаются только насыщенностью.

При регулировании насыщенности естественно менять ее так, чтобы светлота и цветовой тон точек изображения оставались неизменными. Для этого точка цветового пространства при изменении насыщенности должна двигаться вдоль рассматриваемой прямой.

Запишем уравнение прямой, проходящей через точки (L_0, L_0, L_0) и (R_0, G_0, B_0) в параметрической форме:

$$\begin{aligned} R &= L_0 + (R_0 - L_0)t \\ G &= L_0 + (G_0 - L_0)t \\ B &= L_0 + (B_0 - L_0)t, \end{aligned} \quad (4)$$

где t – скалярный параметр; R_0, G_0, B_0 – цветовые координаты точки до изменения насыщенности; L_0 – светлота до, в процессе и после настройки насыщенности; вычисляется по значениям R_0, G_0, B_0 по формуле (3). R, G, B – цветовые координаты точки при изменении насыщенности.

Имеет смысл рассматривать только неотрицательные значения параметра t . Значению $t = 0$ соответствует ахроматический цвет (нулевая насыщенность). Значения $0 < t < 1$ означают уменьшение насыщенности; $t = 1$ — исходная насыщенность; $t > 1$ — увеличение насыщенности.

Формулы (4) могут использоваться в программном обеспечении (ПО) обработки изображений для настройки насыщенности. Для увеличения насыщенности в k раз они должны быть применены к каждому пикселю изображения при одном и том же значении $t = k$.

Можно заметить, что в линейной ортогональной цветовой координатной системе (ЦКС), имеющей ось светлоты, например, в ЦКС L_{py} [2] прямая, вдоль которой изменяется только насыщенность, будет перпендикулярна оси светлоты. Описанный выше метод изменения насыщенности в k раз будет соответствовать увеличению расстояния точки от оси светлоты в k раз. Это расстояние, в

свою очередь, равно значению цветности (chroma), а значение насыщенности (saturation) пропорционально цветности [2]. Таким образом, в k раз изменяются и цветность и насыщенность.

Максимальная и относительная насыщенность

Цветовой охват RGB-пространства представляет собой параллелепипед (не куб, поскольку оси RGB не ортогональны). Значения RGB-координат ограничены. В практике цифровой фотографии часто используется диапазон 0–255. При выполнении цветовых расчетов разумно представить цветовые координаты вещественными числами из диапазона 0.0–1.0. Упомянутый параллелепипед ограничен шестью плоскостями: $R=0$; $R=1$; $G=0$; $G=1$; $B=0$; $B=1$.

При увеличении параметра t (при $t \geq 1$) в формулах (4) точка цветового пространства, если она исходно не лежит на «серой» оси, выйдет за пределы охвата. Это произойдет, когда одна из координат достигнет значения 0 или 1, что будет соответствовать пересечению траекторией движения точки одной из шести плоскостей, ограничивающих охват.

Обозначим C – одно из значений R , G или B ; C_0 – одно из значений R_0 , G_0 или B_0 ; $C_{\min} = \min(R_0, G_0, B_0)$; $C_{\max} = \max(R_0, G_0, B_0)$. Из (3) и (4) следует, что минимальное t (для $t > 1$), при котором значение $C = L_0 + (C_0 - L_0)t$ будет равно 1, получится при $C_0 = C_{\max}$. Обозначим это значение t_1 :

$$t_1 = \frac{1 - L_0}{C_{\max} - L_0}. \quad (5)$$

Минимальное t , при котором одна из цветовых координат станет равна 0 (обозначим это значение t_0), получается при $C_0 = C_{\min}$:

$$t_0 = \frac{L_0}{L_0 - C_{\min}}. \quad (6)$$

Если $t_1 < t_0$, то выход из охвата происходит вследствие достижения одной из координат максимального значения 1. Если $t_0 < t_1$, то выход за охват происходит из-за достижения одной из координат нулевого значения. Значение

$$t_{01} = \min(t_0, t_1) \quad (7)$$

характеризует максимально возможное увеличение насыщенности для данной точки цветового пространства (для данного пикселя изображения), не приводящее к выходу за охват RGB. Обратную величину

$$s_{отн} = \frac{1}{t_{01}}$$

можно назвать относительной насыщенностью. Для точек на границе охвата (на одной из плоскостей ограничивающего охват параллелепипеда) $s_{отн} = 1$; для точек серой оси $s_{отн} = 0$, $t_{01} = \infty$; для других точек $0 < s_{отн} < 1$.

Автоматическая настройка насыщенности

При обработке цветных цифровых фотографий с помощью специализированного ПО могут быть использованы разные стратегии и цели при регулировании насыщенности. Один из вариантов — получение максимально насыщенного изображения, что позволяет получить красочную и эффектную картинку. При этом, если речь идет о получении реалистичных изображений, желательно, чтобы не происходило выхода цветов пикселей изображения за охват цветового пространства.

Можно предложить представленный далее алгоритм автоматической настройки насыщенности, сохраняющий цветовой тон и светлоту пикселей изображения, выполняющий увеличение насыщенности всех пикселей в одинаковое число раз и максимизирующий насыщенность без выхода за цветовой охват.

Шаг 1. Для всех пикселей изображения по формулам (3), (5) - (7) определить значение t_{01} .

Шаг 2. Из найденных для всех пикселей значений t_{01} определить минимальное t_{min} (максимальная относительная насыщенность) .

Шаг 3. По формулам (4) при $t = t_{min}$ вычислить новые RGB-координаты пикселей.

Модификация этого алгоритма, позволяющая устранить влияние случайных и малозначащих обстоятельств, приводящих к появлению на изображении

небольшого числа точек высокой насыщенности, может предусматривать построение гистограммы относительной насыщенности и выбор такого значения t_{\min} , использование которого в формулах (4) приведет к выходу за охват цвета относительно небольшого числа точек изображения. Например, 0.05% от общего числа пикселей изображения. За счет этого можно получить большее увеличение насыщенности изображения. Цвета малого числа точек, выходящие за охват, могут быть подвергнуты отсечению. Простейший вариант отсечения состоит в том, что цветовая координата, превышающая 1, принимается равной 1, координата, ставшая отрицательной, принимается равной 0. При этом искажаются цветовой тон и светлота пикселей. Однако, поскольку речь идет о небольшой доле точек, такое искажение обычно приемлемо.

Реализация автоматической настройки насыщенности

Описанный выше алгоритм автоматической настройки насыщенности реализован в программе (плагин для Adobe Photoshop) C3C Color Wizard (<http://www.uni-vologda.ac.ru/~c3c/plug-ins/colorwizardbasic.htm>) (рис 2).

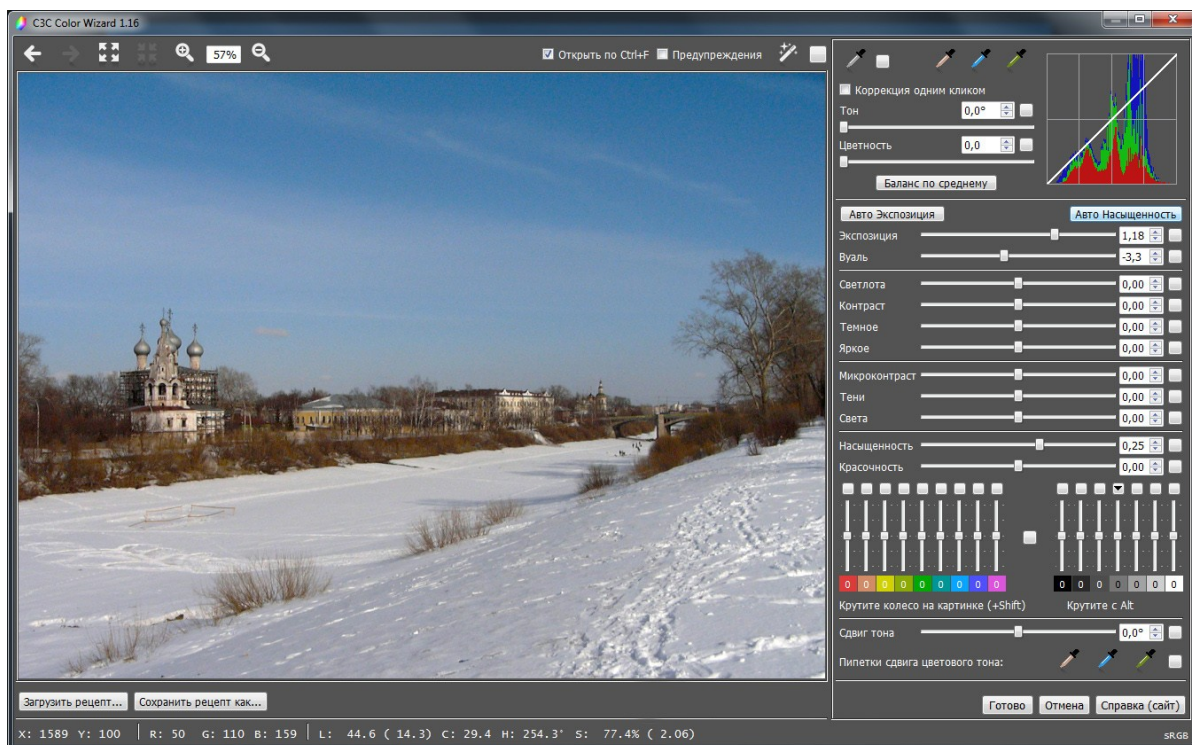


Рис. 2. Программа C3C Color Wizard

На рис. 2 в окне просмотра показан снимок после автоматической настройки экспозиции и автоматической настройки насыщенности. Вначале выполнена настройка экспозиции (уровней белого и черного, параметры «Экспозиция» и «Вуаль»), затем автоматическая настройка насыщенности, которая привела к усилению насыщенности в 1.19 раза (0.25 на логарифмической шкале программы).

На рисунке 3 показаны этапы автоматической обработки этой фотографии в программе СЗС Color Wizard.



а) До обработки



б) После автоматической настройки экспозиции



в) После автоматической настройки насыщенности

Ограничение насыщенности

Другой стратегией настройки насыщенности является ее ограничение. Насыщенность снимка снижается по сравнению с максимально возможной. После этого может быть увеличена контрастность. Такой подход позволяет избежать появления «кричащих» цветов на фотографии, может гармонизировать ее восприятие зрителем [4].

Ограничение насыщенности (в том числе автоматическое) может быть реализовано следующим образом.

1. Определяется, как это описано выше, коэффициент усиления насыщенности t_{\min} , который позволяет получить максимальную насыщенность без выхода за цветовой охват (с выходом за охват небольшого числа точек).

2. Для вычисления новых RGB-координат пикселей по формулам (4) используется коэффициент $t = d \cdot t_{\min}$, где $0 < d < 1$ – коэффициент ограничения насыщенности.

3. Увеличивается контрастность изображения (светлые части делаются светлей, темные — темней). Предел усиления контрастности может выбираться, например, по условию невыхода цветов изображения за охват RGB.

На рисунке 4 показано тестовое изображение — корзина с фруктами, к которому применено ограничение насыщенности. Коэффициент d равен 0.81. Контраст в средних тонах увеличен в 1.09 раза.



а) До обработки



б) После обработки

Рис. 4. Ограничение насыщенности

После обработки фотография выглядит не такой яркой, но при просмотре на мониторе лучше видна фактура поверхностей.

Ограничение насыщенности может уменьшить риск выхода цветов изображения за охват устройства отображения (например, монитора).

Заключение

Корректность, эффективность и практичность предложенных преобразований и алгоритмов настройки насыщенности подтверждены в процессе эксплуатации ряда программных решений, в которых эти алгоритмы реализованы. Примеры применения показывают, что выполняемые настройки соответствуют субъективному восприятию насыщенности человеком-наблюдателем, а также позволяют избавиться от артефактов, возникающих, в частности, при выполнении преобразований в нелинейных цветовых пространствах.

Литература

1. Wyszecki G., Stiles W. S. Color Science. Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae. Second Edition, Wiley-Interscience Publication, 2000.
2. Сverdlov С. З. Ортогональная цветовая координатная система. // Вестник Вологодского государственного педагогического университета. №5/2013. стр. 25–29. (Электронная версия: http://www.univologda.ac.ru/~c3c/articles/Sverdlov_S_Z_Orthogonal_color_coordinate_system.pdf)
3. INTERNATIONAL STANDARD IEC 61966-2-1 ed1.0. Multimedia systems and equipment - Colour measurement and management - Part 2-1: Colour management – Default RGB colour space – sRGB.
4. Косенко П. Живая цифра. ООО «Тримедиа Контент». М., 2013, 283 стр. ISBN 078-5-903788-22-4

Sergey Zalmanovich Sverdlov

About saturation adjustment in the digital photos processing

Abstract. Standardized RGB-spaces such as sRGB, Adobe RGB, et cetera are common for image processing. Those spaces are non-linear (e.g. using gamma correction) thus color calculations in such spaces are incorrect from a physical (colorimetric) point of view. Use of the linearized RGB space is proposed for adjusting the saturation.

A method for calculating the saturation employed in HSL and HSB color spaces (color models) is based solely on geometric considerations and does not provide a strict justification. The paper proposes a method for modifying the saturation leaving the lightness and color hue unchanged, which is correct from colorimetric perspective. Proposed formulas do not require orthogonal RGB spaces. A concept of relative saturation is introduced.

An algorithm for maximizing digital image saturation is proposed. The linear saturation of image pixels is increased by the same factor without moving out of RGB-space gamut. The algorithm is implemented in C3C Color Wizard software that is the only implementation known to the author at the moment.

An algorithm for saturation limitation followed by contrast increase is proposed on the basis of P. Kosenko's approach. The algorithm allows harmonizing visual perception of digital photography in some cases.

Keywords: *digital photography, color coordinate system, processing of digital color images, saturation, chroma, software, color adjustment.*