

Методы коррекции цветовой насыщенности при сжатии динамического диапазона

Бирюков Е.Д., Копылов М.С.,
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
birukov@gin.keldysh.ru, kopylov@gin.keldysh.ru

Аннотация

В данной статье рассматриваются проблемы коррекции цветов при сжатии динамического диапазона изображений. Особое внимание уделяется коррекции цветов на таких изображениях, у которых имеются особо яркие пятна (более чем в 10 раз превышающие среднюю яркость остальной части изображения). Предложен метод снижения насыщенности наиболее ярких частей изображения.

1 Введение

Задача сжатия динамического диапазона изображений является очень популярной в настоящее время. В основном эта задача необходима для преобразования физических величин, таких, как яркость и освещенность, в яркость пикселей устройств отображения изображений, таких, как экран монитора или проектор. Диапазон величин яркости и освещенности, полученных с помощью симуляции распространения света в системах реалистичной компьютерной графики, может на несколько порядков превышать диапазон компьютерных мониторов, и даже многие фотокамеры в настоящее время уже имеют широкий динамический диапазон [Barladian, B.K., Voloboi, A.G., Galaktionov, V.A. and Kopylov, E.A., 2004].

При сжатии динамического диапазона изображения приходится решать одновременно две задачи, которые зачастую противоречат друг другу: сохранение контраста и сохранение яркости. Во-первых, необходимо сохранить контраст в той степени, чтобы любые две области исходного изображения, которые имеют явно различную для глаза яркость в исходном динамическом диапазоне, имели бы в достаточной степени различимую глазом яркость и после сжатия. А во-вторых, все области изображения, которые имеют достаточную для глаза яркость в исходном изображении (т.е. не кажутся черными) должны также иметь достаточную яркость после сжатия динамического диапазона.

В процессе решения этой задачи зачастую возникает проблема коррекции цветов. Например, если сжимать только яркость, оставляя при этом исходные значения цветов, то изображение будет заметно перенасыщенным. Если же сжимать отдельно цветовые каналы (в модели RGB), то чаще всего будет казаться, что насыщенность изображения заметно снижена, все изображение становится ближе к черно-белому. При настройке цветового баланса изображений также целесообразно учитывать особенности человеческого зрения [Reinhard, E., Stark, M., Shirley, P. and Ferwerda, J., 2002]. Например, на более темных участках цветовая насыщенность может несколько снижаться, так как человеческое зрение плохо работает в темноте. Однако, для наиболее ярких бликов цветовая насыщенность также должна снижаться, поскольку когда глаза адаптируются к низкой освещенности, то небольшая яркая часть наблюдаемого пространства будет казаться просто белой, без различения оттенков цвета. Типичный пример такого снижения насыщенности – небольшое маленькое окно в темной комнате

2 Обзор существующих методов коррекции цвета

Базовая формула сжатия динамического диапазона отдельных цветовых каналов выглядит следующим образом:

$$C_{out} = \frac{C_{in}}{L_{in}} L_{out} \quad (1)$$

Здесь C_{in} – один из цветовых каналов исходного изображения (красный, зеленый или синий), C_{out} – один из цветовых каналов трансформированного изображения, L_{in} – яркость пикселя исходного изображения, L_{out} – яркость пикселя трансформированного изображения, полученного с помощью того или иного оператора сжатия.

Эта формула не корректирует цветовую насыщенность, поэтому выходное изображение оказывается перенасыщенным. Существуют различные методы коррекции цвето-

вой насыщенности. Большинство из них позволяют настроить только общий цветовой баланс на всем динамическом диапазоне без учета описанных выше особенностей человеческого зрения.

Тумблин и Турк [Tumblin, J., 2000] предлагают следующую формулу сжатия динамического диапазона для коррекции цветов:

$$C_{out} = \left(\frac{C_{in}}{L_{in}}\right)^s L_{out} \quad (2)$$

Параметр s в данной формуле контролирует насыщенность цвета.

Проблема данной формулы заключается в том, что она может заметно изменять яркость изображения для случаев, когда s не равна единице, а цвета отличаются от оттенков серого. Поэтому Мантиук и другие [Mantiuk, R., Mantiuk, R., Tomaszewska, A. and Heidrich, W., 2009] предложили свою формулу для сжатия отдельных цветовых каналов:

$$C_{out} = \left(\left(\frac{C_{in}}{L_{in}} - 1\right)s + 1\right)L_{out} \quad (3)$$

Эта формула сохраняет яркость и настраивает только линейную интерполяцию между хроматическими и соответствующими ахроматическими цветами. Однако ее побочным эффектом является сдвиг цветовых оттенков, особенно для красного и синего каналов. Поэтому Мантиук и другие также предложили альтернативный вариант: использование одной формулы сжатия динамического диапазона, применяемой ко всем каналам. Это будет эквивалентно формуле (2) в случае, если коэффициент коррекции цвета s равен коэффициенту сжатия диапазона c , а функция сжатия диапазона имеет вид:

$$L_{out} = (L_{in}b)^c \quad (4)$$

где b – коэффициент настройки яркости, который нормализует максимальное значение выходной яркости так, чтобы оно было бы равно единице.

Если функция сжатия диапазона является произвольной функцией, то применение одной и той же кривой ко всем цветовым каналам не эквивалентно выражению (2), но результаты очень близки к нему. В случае локальных операторов сжатия цветовые каналы, как правило, не могут быть изменены одновременно. Если

c меньше s , то это приведет к снижению насыщенности.

3 Использование снижения насыщенности при большой яркости

Описанные выше методы используются для настройки цветового баланса на всем цветовом диапазоне изображения. Такая настройка предназначена для того, чтобы сохранить различимость цветов исходного изображения после сжатия динамического диапазона. Однако в некоторых случаях также возникает необходимость в дополнительном снижении цветовой насыщенности наиболее ярких частей изображения (бликов). Как уже было сказано выше, это связано с особенностями человеческого зрения. Существует большое количество изображений с большим динамическим диапазоном, которые после сжатия выглядят неестественно, поскольку содержат перенасыщенные цвета в наиболее ярких областях, которые должны казаться ярко-белыми. В ИПМ им. М.В. Келдыша РАН нами был предложен следующий оригинальный метод, который помогает добиться реалистичного изображения при использовании сжатия динамического диапазона на изображениях, которые содержат чрезвычайно яркие пятна на фоне остального изображения с небольшой яркостью. В этом случае предлагается снижать насыщенность изображения при повышении яркости. Алгоритм выглядит следующим образом:

1. Найти среднее значение яркости цветовых каналов в данном пикселе.
2. Найти отклонение каждого цветового канала от этого среднего значения.
3. Разделить яркость данного пикселя на максимальное значение яркости изображения. Это будет коэффициент снижения насыщенности для данного конкретного пикселя.
4. Наконец, к значению каждого цветового канала необходимо прибавить его отклонение от средней величины, помноженное на вышеуказанный коэффициент.

Таким образом, формула (1) превращается в следующую формулу:

$$C_{out} = \left(C_{in} - \left((C_{in} - \overline{C_{in}}) * \frac{L_{in}}{L_{in\ max}} \right) \right) * \frac{L_{out}}{L_{in}} \quad (5)$$



Рис. 1. Снижение насыщенности без дополнительных параметров

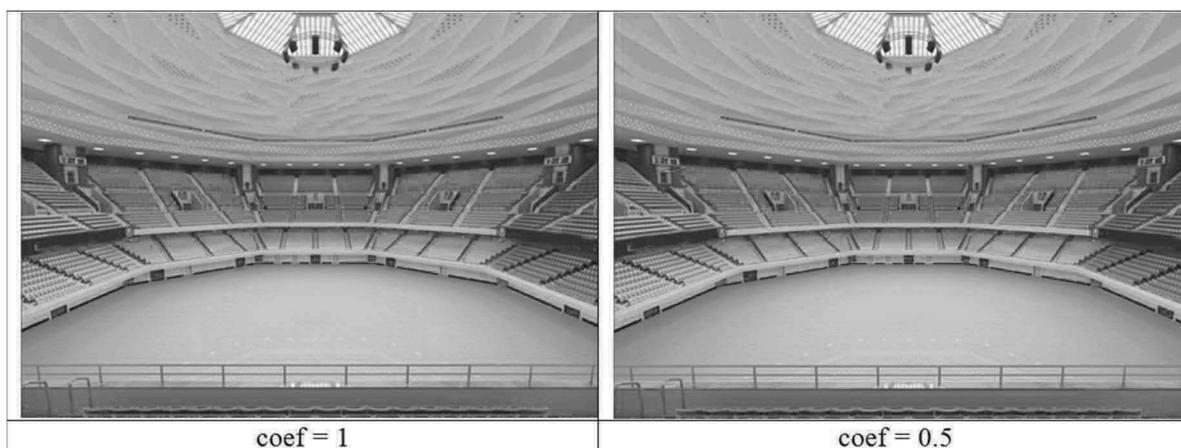


Рис. 2. Снижение насыщенности с использованием дополнительного коэффициента

Здесь $\overline{C_{in}}$ – среднее арифметическое трех цветных каналов данного пикселя, $L_{in\ max}$ – значение яркости наиболее яркого пикселя изображения.

Подобное снижение насыщенности используется для изображений, на которых есть яркие источники света. Визуально такие участки кажутся настолько яркими, что их цвета практически не различаются глазом и кажутся просто ярко-белыми. Пример сравнения работы

ранее существующего алгоритма сжатия динамического диапазона [Barladian, B.K., Voloboi, A.G., Galaktionov, V.A. and Kopylov, E.A., 2004], разработанного в ИПМ им. Келдыша, и того же алгоритма с добавлением снижения насыщенности приведен на Рис. 1.

Однако всегда использовать одинаковую формулу для снижения яркости не представляется возможным. В таком случае на сценах,

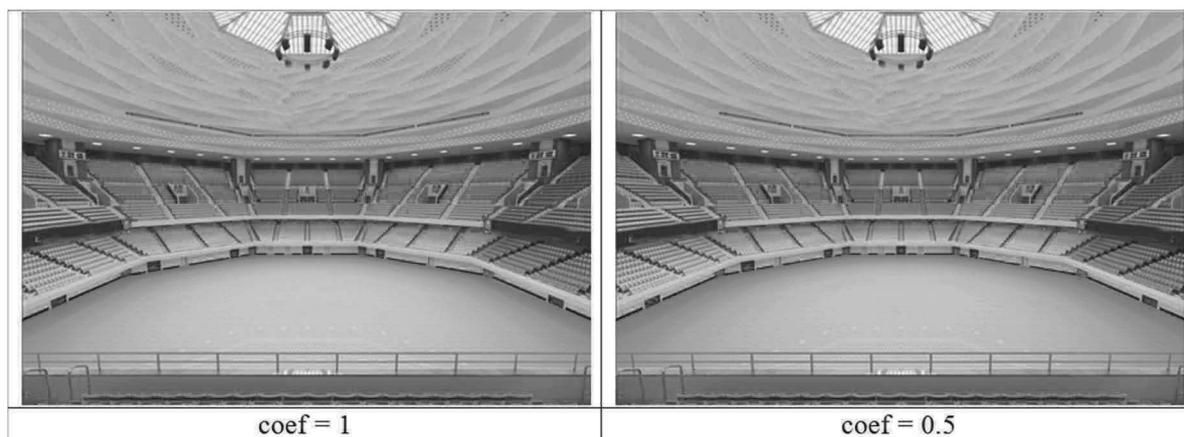


Рис. 3. Использование квадрата коэффициента снижения насыщенности

где имеется большое количество пикселей с высокой яркостью, большая часть изображения будет иметь существенно сниженную цветовую насыщенность. Поэтому необходимы те или иные способы управления снижением насыщенности. Наиболее простым способом является введение коэффициента снижения насыщенности, задаваемого пользователем вручную. Коэффициент может принимать значения от 0 до 1. На этот коэффициент будет умножаться значение яркости каждого пикселя перед делением на максимальное значение яркости. Для изображений с особо яркими пятнами на фоне остальной части изображения со сниженной яркостью значение данного коэффициента следует повысить, для изображений, где большая часть имеет примерно одинаковую достаточно высокую яркость – понизить. Примеры использования такого коэффициента с разными значениями приведены на Рис. 2.

Однако вынуждать пользователя каждый раз вручную настраивать значение коэффициента снижения насыщенности является не самым лучшим решением с точки зрения дружелюбности интерфейса. Необходим какой-либо метод, позволяющий автоматизировать установку значения коэффициента в зависимости от особенностей текущей сцены.

Использование квадрата коэффициента снижения насыщенности для данного конкретного пикселя вместо самого коэффициента (также возможно использование высших степеней) позволяет несколько улучшить цветопередачу изображений с ограниченным динамическим диапазоном. Пример работы измененного алгоритма при этом показан на Рис. 3

Но и такого изменения алгоритма не всегда достаточно для обработки изображений с совсем ограниченным динамическим диапазоном. Поэтому в таких случаях целесообразно использование снижения насыщенности только для самых ярких частей изображения. Коэффициент снижения при этом работает несколько другим образом, нежели в предыдущем варианте. Он всегда равен единице для максимального значения яркости изображения и нулю для некоторого среднего значения. Для величин яркости от средней точки до максимальной значение может интерполироваться линейно или квадратично. В качестве величины, настраиваемой пользователем, выступает пороговое значение яркости, начиная с которого коэффициент снижения насыщенности начинает оказывать влияние. Однако следует заметить, что для многих изображений значение яркости в половину от максимального является оптимальным, что позволяет обойтись без ручного вмешательства пользователя. Пример работы такого алгоритма показан на Рис. 4.

Такое изображение не особо отличается от изображения, полученного с помощью первоначального алгоритма с коэффициентом, равным единице. При этом алгоритм не сильно меняет изображения, на которых отсутствуют яркие блики (Рис. 5).



Рис. 4. Пример работы нового алгоритма с коэффициентом 0.5

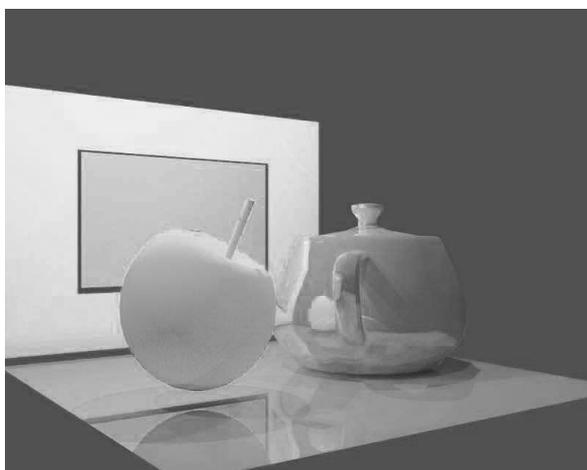
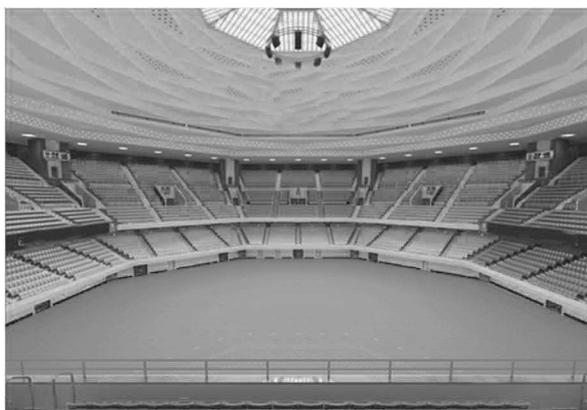


Рис. 5. Работа нового алгоритма на изображениях, где не требуется снижение насыщенности

4 Заключение

Выполненная работа позволяет обрабатывать исходные изображения с большим динамическим диапазоном таким образом, чтобы игнорировать цвет наиболее ярких бликов, как это происходит в реальности с учетом особенностей человеческого зрения. При этом большинство изображений, на которых такие блики отсутствуют, также выглядят достаточно реалистично после обработки данным алгоритмом.

В дальнейшем возможны попытки еще более улучшить алгоритм, чтобы вмешательство пользователя не требовалось для любых изображений естественного происхождения. Исключения могут составлять разве что изображения, не являющиеся реальными фотографиями, а полученные, например, с помощью виртуальных измерительных приборов.

Благодарности

Работа была частично поддержана грантами РФФИ № 17-01-00363 и 19-01-00435.

Список литературы

- Barladian, B.K., Voloboi, A.G., Galaktionov, V.A. and Kopylov, E.A., 2004. An effective tone mapping operator for high dynamic range images. *Programming and Computer Software*, 30(5), pp.266-272.
- Mantiuk, R., Mantiuk, R., Tomaszewska, A. and Heidrich, W., 2009, April. Color correction for tone mapping. In *Computer Graphics Forum* (Vol. 28, No. 2, pp. 193-202). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.
- Reinhard, E., Stark, M., Shirley, P. and Ferwerda, J., 2002, July. Photographic tone reproduction for digital images. In *ACM transactions on graphics* (TOG) (Vol. 21, No. 3, pp. 267-276). ACM.
- Tumblin, J., 2000. *Three methods of detail-preserving contrast reduction for displayed images* (Doctoral dissertation, PhD thesis, Georgia Institute of Technology, 1999. <http://www.cc.gatech.edu/gvu/people/jack.tumblin>).