

Цветовая коррекция в изображающих дифракционно-оптических системах на основе трехмерных LUT таблиц

М.В. Петров^а, А.В. Никоноров^а

^а Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

Аннотация

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) имеют существенное преимущество в весе и линейных размерах по сравнению с рефракционной оптикой. Однако, для ДОЭ характерны сильнейшие оптические искажения. В работах авторов предложена трехэтапная схема реконструкции изображений, получаемых в таких системах. Настоящая работа посвящена развитию методов коррекции хроматического сдвига, оказывающего сильное влияние на качество изображения. Хроматический сдвиг вызван перераспределением энергии между дифракционными порядками линзы Френеля и приводит к нелинейной «засветке» отдельно взятого RGB канала двумя другими. В данной работе предлагается многокомпонентный подход к цветовой коррекции, учитывающий связь между каналами изображения. Оценка качества восстановления изображения, полученного с применением дифракционной линзы Френеля, осуществляется с помощью критерия пикового отношения сигнал шум (PSNR).

Ключевые слова: дифракционный оптический элемент; ДОЭ; линза Френеля; хроматическая аберрация; хроматический сдвиг; цветовая коррекция; многокомпонентная цветовая коррекция; LUT

1. Введение

Современные объективы представляют собой довольно сложную оптическую систему. Как правило, такая система насчитывает двенадцать и более оптических элементов, применяемых для устранения оптических искажений разных видов. В настоящее время активно развивается направление совмещения оптической системы, состоящей из одной или двух линз, и вычислительной постобработки с целью коррекции различных искажений [1,2]. Данный программно-аппаратный подход позволяет существенно уменьшить стоимость и массогабаритные характеристики оптической системы.

Преимущество в весе и линейных размерах дифракционных объективов или линз Френеля над рефракционными линзами особенно существенно на больших фокусных расстояниях. В длиннофокусных объективах такая линза может заменить собой сложный набор рефракционных линз. Например, вес стандартного объектива с фокусным расстоянием 300 мм превышает 1 кг, эквивалентная ему линза Френеля может весить менее 50 грамм. К тому же довольно просто изготовить линзу Френеля с асферическим волновым фронтом.

Линза Френеля – это пошаговая аппроксимация поверхности линзы (рис. 1) [3]. В нашей работе используется 256-уровневая дифракционная линза.

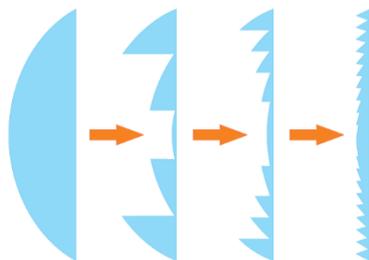


Рис. 1. Схематичный переход от асферической линзы к линзе Френеля.

Однако, у линз Френеля есть и существенный недостаток – сильные хроматические искажения. Функция размытия точки такой оптической системы зависит от длины волны, что приводит к сильнейшим хроматическим аберрациям. Линзы Френеля обладают рядом специфических искажений, таких как хроматический сдвиг, вызванный перераспределением энергии между дифракционными порядками линзы Френеля. Такой сдвиг приводит к нелинейной «засветке» отдельно взятого RGB канала двумя другими [4]. Присутствие столь существенных искажений делало невозможным использование дифракционной оптики для получения изображений вплоть до 2015 года.

Первое применение линз Френеля для получения изображений было предложено в работе 2015 года [5], было получено монохромное изображение 30x40 пикселей. В работе авторов 2015 года [4] была впервые предложена технология постобработки изображений, полученных с использованием дифракционной линзы, такая, что качество полученных изображений сравнимо с изображениями, получаемыми в рефракционных оптических системах, хотя и уступает им. Работы [6] и [7] также посвящены программно-реализуемой реконструкции изображений, полученных комбинациями рефракционных и дифракционных линз. В ряде работ [2,8] рассматриваются подходы к созданию объективов, теоретически позволяющих сформировать цветное изображение, свободное от хроматических искажений для трех длин волн на основе подхода метаповерхностей. Стоит отметить, что указанные работы носят исключительно теоретический характер, в которых не приведены получившиеся изображения. Кроме того, такой подход к формированию изображений затруднителен в условиях широкого спектра естественного освещения.

В работе авторов была предложена [4] и развита [9] поэтапная технология восстановления цветных изображений, полученных с использованием линзы Френеля, состоящая из этапов цветовой коррекции, компенсации расфокусировки зеленого канала на основе обратной свертки, и коррекция остальных двух каналов на основе анализа контуров. Цветовая коррекция вносит существенный вклад в качество восстановления изображения, устраняя хроматический сдвиг и частично хроматическую абберацию. В предыдущей работе коррекция осуществлялась для каждого канала отдельно без учета нелинейного влияния соседних каналов. В настоящей работе предлагается многокомпонентная цветовая коррекция с построением трехмерной LUT (Lookup table) таблицы [10,11].

2. Общая схема реконструкции изображений в дифракционно-оптических системах

2.1. Общая модель искажений

Общая модель искажений дифракционно-оптической системы описывается комбинацией хроматической абберации и хроматического сдвига.

$$p_{RGB}^{D,B}(\mathbf{x}) = \mathbf{B}_{RGB} \otimes p_{RGB}^D(\mathbf{x}) + n, \tag{1}$$

$$p_{RGB}^D(\mathbf{x}) = D_{RGB}(p_{RGB}^0(\mathbf{x})). \tag{2}$$

Здесь $p_{RGB}^{D,B}(\mathbf{x})$ – цветовые каналы изображения, полученного с использованием линзы Френеля, $D_{RGB}(p_{RGB}^0(\mathbf{x}))$ – компонента, вносящая цветовой сдвиг, вызванный перераспределением энергии между порядками дифракции, n – аддитивный шум, $\mathbf{x} \in Z_+^2$ – точка в пространственной области изображения. Оператор размытия \mathbf{B}_{RGB} , характеризующий ФРТ линзы, в рамках модели (1) различается для различных цветовых каналов. Будем называть его хроматической расфокусировкой.

Пример проявления эффекта хроматической абберации и хроматического сдвига для полученного изображения представлены на рис. 2. Схематичная модель искажений линзы Френеля показана на рис. 3.

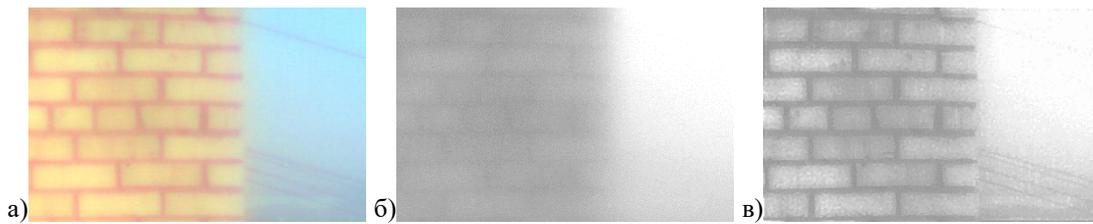


Рис. 2. Пример хроматических искажений: искаженное RGB изображение (а), его синий канал до (б) и после (в) коррекции.

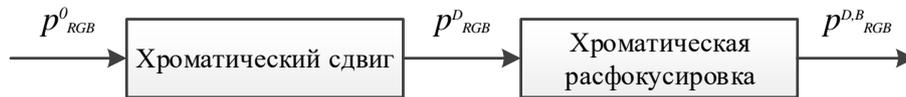


Рис. 3. Искажения на изображениях, полученных с использованием линзы Френеля.

2.2. Схема коррекции

Согласно модели (1) коррекция искажений осуществляется в два этапа: устранение искажений, вызванных хроматической расфокусировкой, и коррекция хроматического сдвига.

На первом шаге выполняется операция цветовой коррекции.

$$p_{RGB}(\mathbf{x}) = F(p_{RB}^D(\mathbf{x}), p_G^D(\mathbf{x})). \tag{3}$$

Функция цветовой коррекции $F(p_{RB}^D(\mathbf{x}), p_G^D(\mathbf{x}))$ осуществляет преобразование цвета в каждой точке изображения.

Далее, для коррекции хроматической расфокусировки используется обратная свертка опорного канала и улучшение четкости остальных двух каналов изображения. Сначала устраняется размытие на самом четком – зеленом – канале:

$$p_G^D(\mathbf{x}) = \mathbf{B}_G^{-1} \otimes (p_G^{D,B}(\mathbf{x})) \tag{4}$$

Здесь операция $\mathbf{B}_k^{-1} \otimes$ означает обратную свертку для устранения хроматической расфокусировки опорного зеленого канала, $p_G^D(\mathbf{x})$ – промежуточное изображение.

Затем улучшается четкость красного и синего каналов на основе анализа контуров в улучшенном зеленом канале:

$$p_{RB}^D(\mathbf{x}) = S(p_{RB}^{D,B}(\mathbf{x}), p_G^D(\mathbf{x})) \quad (5)$$

Более подробно трехэтапная технология коррекции описывается в работе [4]. Работа [9] посвящена вопросам идентификации ФРТ. В настоящей работе рассматриваются вопросы повышения качества реконструкции изображений за счет цветовой коррекции на основе трехмерных LUT таблиц.

3. Многокомпонентная цветовая коррекция

3.1. Одноканальная цветовая коррекция

В работе [4] задача идентификации функции цветовой коррекции имеет следующий вид:

$$\mathbf{a}^* = \arg \min_{\mathbf{a}} \|F(\mathbf{u}_i, \mathbf{a}), \mathbf{u}_i^0\|, \quad (6)$$

где $F()$ – корректирующее преобразование, $\{\mathbf{u}_i\}$ – множество искаженных (СКЭ), $\{\mathbf{u}_i^0\}$ – множество неискаженных СКЭ. СКЭ в работе [12] определены как небольшие участки, ограниченные в цвете и пространстве. Неискаженные СКЭ определяются на цифровом оригинале цветовой шкалы, искаженные СКЭ – на снимке, полученном с использованием линзы Френеля.

С целью улучшения качества коррекции были введены дополнительные граничные условия:

$$\begin{aligned} F(0, \mathbf{a}) &= 0, \\ F(1, \mathbf{a}) &= 1. \end{aligned} \quad (7)$$

В работе [12] в качестве оценки использовался кубический сплайн с граничными условиями (7). Такое корректирующее преобразование применяется к каждому каналу независимо, что согласуется с требованием корректируемости, обоснованным в работе [12] в рамках билюминантной дихроматической модели отражения.

Специфика дифракционно-оптических систем заключается в наличии хроматического сдвига, который приводит к нарушению условий билюминантной дихроматической модели отражения. Таким образом, модель (6) лишь приблизительно описывает процесс коррекции искажений в данном случае. Рис. 4а иллюстрирует зависимость между искаженным и неискаженным цветом для зеленого канала изображения в дифракционно-оптической системе для всего цветового пространства. График иллюстрирует нарушение функциональной зависимости между искаженным и неискаженным цветами по всему цветовому пространству. График аналогичной зависимости на рис. 4б, построенный для небольшой области цветового пространства, в большей мере удовлетворяет требованию корректируемости.

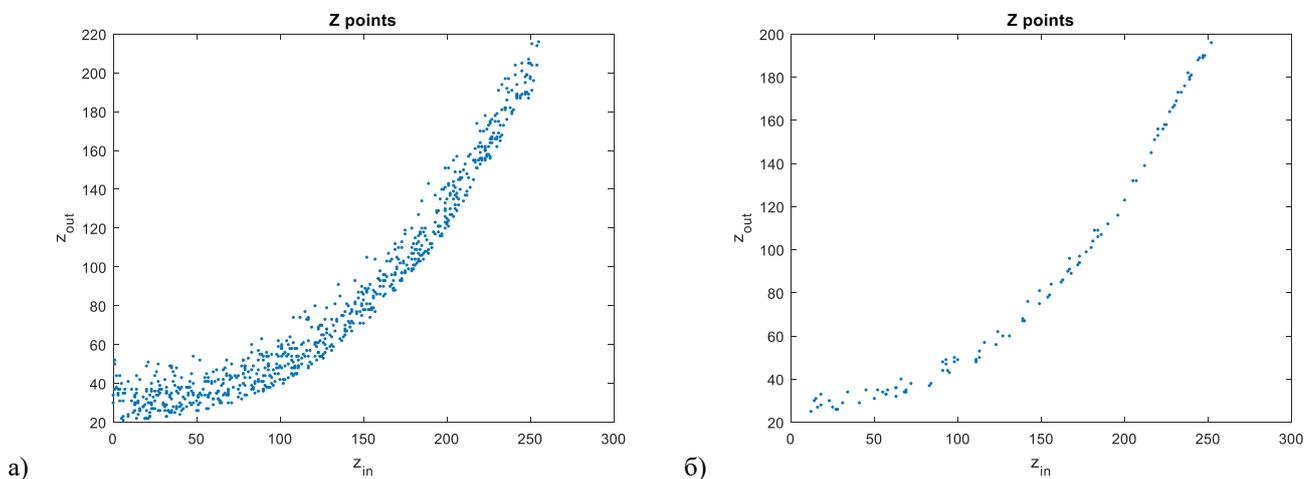


Рис. 4. Зависимость между искаженными и неискаженными цветами в зеленом канале изображения а) на всем цветовом пространстве а) и в небольшой локальной области б).

3.2. Трехкомпонентная цветовая коррекция на основе LUT таблиц

Предыдущий подход авторов к цветовой коррекции обладает значительным недостатком – не учитывается связь между каналами изображения, которая явно носит нелинейный характер. Хроматический сдвиг вносит сильные цветовые искажения, вызванные перераспределением энергии между дифракционными порядками линзы Френеля. При изменении дистанции фокусировки дифракционного объектива изменяется и связь искажений между каналами изображения. «Засветка» фокусируемого канала, равно как и его соседей, при этом меняется. Также при построении корректирующего преобразования авторы исходили из предположения существования обратного преобразования, которое, в общем, может и не существовать вовсе.

В настоящей работе предлагается новое решение задачи восстановления цветового распределения интенсивностей изображения, полученного с использованием дифракционной оптики. Предлагаемый подход основывается на следующих предположениях:

- цветовой сдвиг не только нелинеен в пространственной области отдельного канала, но также оказывает взаимное влияние на другие каналы изображения;
- прямой оператор цветовых искажений существует, значит, его определение возможно в принципе;
- обратный пересчет интенсивностей по смоделированным данным прямого преобразования с использованием меры близости в трехмерном пространстве должен привести к более корректным результатам цветовой коррекции.

Рассмотрим цветное преобразование неискаженных СКЭ в искаженные СКЭ (прямое преобразование) в каждом канале $K \in \{R, G, B\}$:

$$\mathbf{a}_K^* = \arg \min_{\mathbf{a}_K} \|F(\mathbf{u}_i^0, \mathbf{a}_K), \mathbf{u}_{i,K}\|. \quad (8)$$

В качестве $F()$ рассмотрим полиномиальную зависимость следующего вида:

$$F(\mathbf{u}_i^0, \mathbf{a}_K, p) = P_K(\mathbf{u}_i^0, \mathbf{a}_K, p),$$

$$P_K(\mathbf{u}_K, \mathbf{a}_K, p) = \sum_{k_R+k_G+k_B=p} a_{K_n} \cdot u_R^{k_R} u_G^{k_G} u_B^{k_B}, n=1, \overline{\binom{p+3}{3}}, k_R, k_G, k_B = \overline{0, p}, K \in \{R, G, B\}, \quad (9)$$

где P_K – полином степени p , $\mathbf{a}_K = \{a_{K_n}\}$ – коэффициенты полинома.

Полином $P_K(r, g, b)$ из (9) описывает нелинейную связь искажений в отдельно взятом канале $K \in \{R, G, B\}$. Значение полинома $P_K(\mathbf{u}_i^0, \mathbf{a}_K, p)$ в точке \mathbf{u}_i^0 возвращает скорректированное значение яркости пиксела в канале K . Таким образом, каждому каналу изображения соответствует свое полиномиальное правило пересчета значения пиксела именного этого канала, но с учетом интенсивности данного пиксела в остальных каналах.

Тогда (8) с учетом (9) примет следующий вид:

$$\mathbf{a}_R^* = \arg \min_{\mathbf{a}_R, p_R} \|P_R(\mathbf{u}_i^0, \mathbf{a}_R, p_R), \mathbf{u}_{i,R}\|$$

$$\mathbf{a}_G^* = \arg \min_{\mathbf{a}_G, p_G} \|P_G(\mathbf{u}_i^0, \mathbf{a}_G, p_G), \mathbf{u}_{i,G}\|. \quad (10)$$

$$\mathbf{a}_B^* = \arg \min_{\mathbf{a}_B, p_B} \|P_B(\mathbf{u}_i^0, \mathbf{a}_B, p_B), \mathbf{u}_{i,B}\|$$

Для каждого $p_K = \overline{1, p_{\max}}$ необходимо решить системы следующего вида:

$$\mathbf{U}_K^0 \mathbf{a}_K = \mathbf{u}_K, \quad (11)$$

где \mathbf{U}_K^0 – матрица, составленная из \mathbf{u}_K^0 , \mathbf{a}_K – искомый вектор коэффициентов.

Лучшее решение данных систем определяется по минимальному значению критерия СКО. \mathbf{a}_K^*, p_K^* в дальнейшем используются для построения 3D LUT таблицы прямого преобразования.

3.3. Построение 3D LUT таблицы

Решив системы (11), получим коэффициенты $\mathbf{a}_R^*, \mathbf{a}_G^*, \mathbf{a}_B^*$ для каждого из полиномов P_K степени p_K^* . Далее осуществляется построение матрицы $256 \times 256 \times 256 \times 3$ LUT с перебором всех возможных комбинаций входных координат от (0,0,0) до (255,255,255):

$$LUT(\mathbf{u}_k) = (P_R(\mathbf{u}_k, \mathbf{a}_R^*, p_R^*), P_G(\mathbf{u}_k, \mathbf{a}_G^*, p_G^*), P_B(\mathbf{u}_k, \mathbf{a}_B^*, p_B^*)) = \mathbf{u}_k, k = \overline{0, 256^3 - 1}. \quad (12)$$

В [13] описана функция LUT коррекции изображения, которая использует общепринятый формат трехмерной LUT таблицы для цветовой коррекции [10], [11]. Необходимо осуществить «прореживание» и переиндексацию данных. Формат данных модифицированной LUT таблицы $LUT_{\text{round}}(\mathbf{u}_k)$ с примером заполнения представлен в таблице 1.

Заполняется данная таблица следующим образом. Сначала задается шаг дискретизации $step$, равный, например 5. Тогда диапазон отсчетов ограничен $length = \text{ceil}(255 / step) + 1 = 52$ вариантами на каждый канал $K \in \{R, G, B\}$.

Размерность новой LUT таблицы составляет $52^3 \times 7$. Рассмотрим процедуру заполнения строки таблицы. В цикле осуществляется просмотр всех значений таблицы $LUT(\mathbf{u}_k)$. В итерации цикла получаем цветовую координату \mathbf{u}_k . Данную координату необходимо соотнести с интерполирующим узлом в $LUT_{round}(\mathbf{u}_k)$:

$$\mathbf{u}_{k,round} = \mathbf{u}_k / step. \quad (13)$$

Таблица 1. Формат данных LUT таблицы

Индекс	$\mathbf{u}_{i,R}$	$\mathbf{u}_{i,G}$	$\mathbf{u}_{i,B}$	$\mathbf{u}_{k,R}$	$\mathbf{u}_{k,G}$	$\mathbf{u}_{k,B}$	Ошибка ξ
4090	29	193	248	5,0313	129,8156	170,5756	0,6052
4091	39	192	252	5,1252	129,5336	175,0810	0,4896

Индекс строки в таблице $LUT_{round}(\mathbf{u}_k)$ вычисляется следующим образом:

$$strnum = \mathbf{u}_{k,round} \cdot [length^2 \ length \ 1]. \quad (14)$$

Получаем старое значение \mathbf{u}_{strnum} из таблицы $LUT_{round}(\mathbf{u}_k)$. Если $\xi_{new} = \|\mathbf{u}_{strnum} - \mathbf{u}_{k,round} \cdot step\|_2 < \xi_{strnum}$, то вместо \mathbf{u}_{strnum} записываем новое значение \mathbf{u}_k в $LUT_{round}(strnum, 4:6)$, \mathbf{u}_k записываем в $LUT_{round}(strnum, 1:3)$, а ошибку ξ_{new} записываем в $LUT_{round}(strnum, 7)$. Одному значению \mathbf{u}_k может соответствовать множество значений \mathbf{u}_k , поэтому используется евклидова норма в качестве критерия близости текущего рассматриваемого \mathbf{u}_k к интерполирующему узлу – ошибка ξ . Цель заключается в минимизации данной ошибки.

Таким образом осуществляется построение обратного преобразования в виде 3D LUT таблицы.

Построенная LUT таблица $LUT_{round}(\mathbf{u}_k)$ в качестве параметра передается в функцию `imlut` из [13], в которой осуществляется пересчет интенсивностей пиксела на изображении с трехмерной интерполяцией данных.

4. Результаты

Для построения LUT таблицы прямого преобразования использовалось 768 пар СКЭ, определенных на исходном цифровом изображении (рис. 5а) и снимке с экрана IPS монитора (рис. 5б).

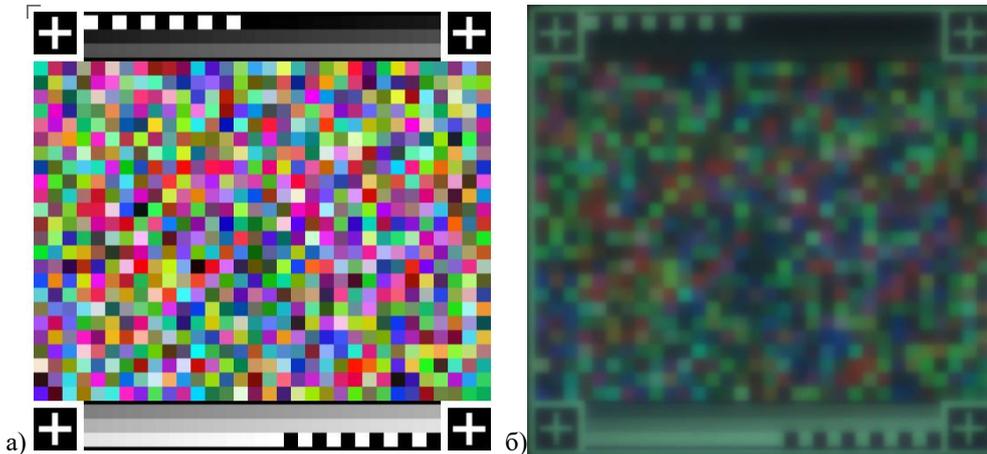


Рис. 5. Цветовые шкалы для определения СКЭ: оригинал а) и снимок с использованием линзы Френеля б).

Далее по сопоставленным наборам СКЭ была определена полиномиальная зависимость между каналами изображения. Для всех каналов изображения степень многочлена оказалось равной 3, при этом СКО составило следующие значения:

- 0,83137 для красного канала;
- 0,93055 для зеленого канала;
- 0,76233 для синего канала.

Шаг интерполяции $step$ был задан равным 5, поэтому размерность «прореженной» LUT таблицы прямого преобразования составила 140608×7 . Минимальное, среднее и максимальное значение ошибки ξ по всей таблице

составило соответственно 0,0098, 0,1156 и 4,2806. Максимальная ошибка по таблице оказалась меньше, чем шаг дискретизации. Это означает, что таблица построена корректно.

Применение многокомпонентного обратного цветового преобразования осуществлялось с помощью функции `imlut` из [13]. Цветовое преобразование из предыдущих работ авторов также было посчитано и применено к одним и тем же изображениям, полученным с использованием линзы Френеля, с целью как визуального сравнения качества коррекции, так и количественного сравнения по критерию пикового отношения сигнал-шум (PSNR).

На рис. 6 представлены результаты цветовой коррекции изображения, полученного с использованием линзы Френеля.



Рис. 6. Цветовая коррекция изображения: исходное изображение а), снимок с экрана IPS монитора с использованием дифракционной линзы б), результат одноканальной цветовой коррекции в), результат многокомпонентной цветовой коррекции г).

В таблице 2 представлено сравнение качества одноканальной и многокомпонентной цветовой коррекции по критерию PSNR.

Таблица 2. Оценка результата цветовой коррекции по критерию PSNR

Значение PSNR	Одноканальная цветровая коррекция	Многокомпонентная цветровая коррекция
Красный канал	17,77	19,38
Зеленый канал	19,13	20,26
Синий канал	18,48	19,45
По всем каналам	18,43	19,68

Как видно из таблицы 2, результат многокомпонентной цветовой коррекции превосходит результат одноканальной цветовой коррекции. PSNR восстановленного изображения по предложенному в данной работе подходу увеличилось на 1,25 дБ.

5. Заключение

Настоящая работа посвящена дальнейшему развитию и совершенствованию технологии коррекции хроматических искажений на изображениях, получаемых с использованием дифракционно-оптических объективов. Предложенная в предыдущих работах трехэтапная схема компенсации искажений на основе одноканальной цветовой коррекции,

коррекции на основе обратной свертки и анализа контуров позволила получить компактное программно-аппаратное решение получения и реконструкции цветных изображений.

В настоящей работе было уделено внимание этапу цветовой коррекции хроматического сдвига на RGB изображениях. Цветовой сдвиг это специфичное для дифракционной оптики искажение, которое существенно изменяет распределение цветов, значительно сужая динамический диапазон. В процессе исследования показано, что одноканальная цветовая коррекция не в полной мере соответствует хроматическому сдвигу. Предложена многокомпонентная модель цветовой коррекции, учитывающая нелинейную связь между каналами изображения. Построение корректирующего преобразования в виде трехмерной LUT таблицы по прямому искажающему оператору полиномиального вида приводит к более точному восстановлению цветов в RGB пространстве. Результаты эксперимента показали, что качество многокомпонентной цветовой коррекции превосходит результат одноканального подхода. Применение коррекции на основе трехмерных LUT обеспечило повышение пикового отношения сигнал-шум (PSNR) в среднем на 1,25 дБ на наборе тестовых изображений.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов Президента РФ МД-2531.2017.9 и РФФИ 16-47-630721 р_а.

Литература

- [1] Hasinoff, S.W. Light-efficient photography / S.W. Hasinoff and K.N. Kutulakos // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2011. – V. 33. – P. 2203–2214.
- [2] Wang, P. Chromatic-aberration-corrected diffractive lenses for ultra-broadband focusing / P. Wang, N. Mohammad, R. Menon // Scientific reports 6. – 2016.
- [3] Soifer, V.A. Computer Design of Diffractive Optics – Woodhead Publishing, 2012. – 896 p.
- [4] Nikonorov, A. Fresnel Lens Imaging with Post-Capture Image Processing / A. Nikonorov, R. Skidanov, V. Fursov, M. Petrov, S. Bibikov, Y. Yuzifovich // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. – 2015. P. 33-41.
- [5] Nayar, S.K. Towards Self-Powered Cameras / S.K. Nayar, D.C. Sims, M. Fridberg // Proceeding of the International Conference on Computational Photography (ICCP). – 2015. – P.1-10.
- [6] Peng, Y. Computational imaging using lightweight diffractive-refractive optics / Y. Peng, Q. Fu, H. Amata, S. Su, F. Heide, W. Heidrich // Optics Express. – 2015. – V. 23(24). –P. 31393-31407.
- [7] Peng, Y. The diffractive achromat full spectrum computational imaging with diffractive optics / Y. Peng, Q. Fu, F. Heide, W. Heidrich // ACM Transactions on Graphics. – 2016. –V. 35(4).
- [8] Aieta, F. Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation / F. Aieta, M. Kats, P. Genevet, F. Capasso // Science Express. – 2015. – V. 347. – P. 1342-1345.
- [9] Nikonorov, A. Comparative Evaluation of Deblurring Techniques for Fresnel Lens Computational Imaging / A. Nikonorov, M. Petrov, S. Bibikov, Y. Yuzifovich, P. Yakimov, N. Kazanskiy, R. Skidanov, V. Fursov // IEEE International Conference on Pattern Recognition. – 2016.
- [10] Pharr, M. Gpu Gems 2: Programming Techniques for High-Performance Graphics and General-Purpose Computation / M. Pharr, R. Fernando – Addison-Wesley Professional, 2005. – 880 p.
- [11] Kang, H. Color Technology for Electronic Imaging Devices - SPIE Publications, 1997. – 384 p.
- [12] Nikonorov, A. Spectrum Shape Elements Model to Correct Color and Hyperspectral Images [text] / A. Nikonorov, S. Bibikov, P. Yakimov, V. Fursov // Workshop 8th IAPR Workshop on Pattern Recognition in Remote Sensing. – 2014. – 4 p.
- [13] Функция построения LUT таблицы `imlut` [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/43004-imlut-img--lut--kind--order--colorscheme-/content/imlut.m> (15.01.2017).