

# Малопараметрический алгоритм цветовой коррекции изображений в дифракционно-оптических системах<sup>1</sup>

М.В. Петров<sup>\*,\*\*</sup>, С.А. Бибииков<sup>\*\*</sup>, П.Г. Серафимович<sup>\*</sup>, А.В. Никоноров<sup>\*,\*\*</sup>

*\* Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»  
РАН, Самара, Россия*

*\*\* Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара,  
Россия*

Поступила в редколлегию 17.07.2023

**Аннотация**—ДОЭ (дифракционные оптические элементы) вследствие малых линейных размеров и веса представляют собой привлекательную замену длиннофокусной рефракционной оптики в системах компьютерного зрения, например, в беспилотных летательных аппаратах и наноспутниках. Существенным недостатком такой оптики являются сильные хроматические искажения. Однако, компьютерная постобработка изображений позволяет их компенсировать. Настоящая работа посвящена развитию методов коррекции цветowych искажений в таких оптических системах. Предложен малопараметрический алгоритм цветовой коррекции на основе цветокорректирующей матрицы и тонокорректирующего сплайна.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** дифракционный оптический элемент, ДОЭ, хроматическая аберрация, цветовой коррекция, сплайн.

DOI: 10.53921/18195822\_2023\_23\_3\_343

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Методы вычислительной фотографии позволяют значительно улучшить качество изображений, получаемых с использованием плоской дифракционной оптики или металлинз [1], [2], [3], [4]. Существенным отличием дифракционно-оптических систем от рефракционной оптики является наличие значительных искажений в виде хроматической аберрации и сильных цветowych искажений. Функция размытия точки такой оптической системы зависит от длины волны, а искажения цвета вызваны перераспределением энергии между дифракционными порядками, которое приводит к нелинейной «засветке» отдельно взятого канала двумя другими. Предложенный в работе [3] алгоритм многокомпонентной цветовой коррекции с формированием трехмерной LUT (Lookup table) таблицы осуществляет построение полиномиального преобразования цвета, учитывающего нелинейную связь между цветowymi каналами. Наряду с прогрессом в задачах повышения качества изображений [5], одной из важнейших задач при обработке цвета изображений является задача обеспечения схожести цветов на изображениях, полученных с различных камер [6]. Проблема обеспечения схожести цветов при различных способах регистрации или синтеза изображения важна как при обработке фото и видеоданных с различных источников [3], так и при анализе данных дистанционного зондирования Земли [7], [8].

Задача обеспечения цветовой схожести заключается в построении преобразования, которое цвета исходного изображения сделает похожими на цвета целевого изображения. Современная цифровая камера выполняет сложную последовательность шагов первичной обработки

<sup>1</sup> Разработка методов цветовой коррекции выполнена при поддержке гранта РНФ 22-19-00364, экспериментальная часть поддержана грантом РФФИ МК 19-29-09054.

изображения [9], [10], [11], включая коррекцию точки белого, коррекцию цветового тона, преобразование и кодирование цветового пространства изображения. Базовыми инструментами для коррекции цвета являются процедуры гамма- или логарифмической коррекции [12], [13], тонового преобразования, применение коррекции точки белого и цветокорректирующих матриц [9], [11], [14]. Эти методы позволяют проводить соответственно линейную и нелинейную цветовую коррекцию изображений.

Изменение тона изображения подразумевает построение функции, изменяющей яркости элементов исходного изображения таким образом, чтобы они стали максимально близки яркостям соответствующих элементов целевого изображения согласно заданной меры близости.

Цветокорректирующая матрица осуществляет преобразование цветов одного цветового пространства в другое. Обычно предполагается, что эти пространства достаточно близки друг к другу и незначительно отличаются основными цветами – абсолютными колориметрическими координатами цветов, соответствующих максимальным значениям в каналах (для *RGB* пространств это точки, соответствующие  $(1, 0, 0)$ ,  $(0, 1, 0)$  и  $(0, 0, 1)$ ). Матрица цветового преобразования минимизирует разницу между цветами соответствующих объектов на исходном и целевом изображениях.

В работе [6] рассматривается подход к решению задачи обеспечения цветовой консистентности с подбором параметров неизвестного кодирующего цвет преобразования. В настоящей работе рассматривается задача построения цветовой консистентности между цветами изображения, полученного с камеры системы технического зрения, и цветами референтного изображения, которое выводится на экран монитора. Задача решается в предположении, что форма кодирующего цвет преобразования известна, и это гамма-коррекция, стандартная (настраиваемая) для таких камер. Однако, остальные параметры обработки и, более того, первичные цвета неизвестны.

В работе предложено решение задачи для камеры с неизвестными параметрами на основе идентификации параметров матрицы цветового преобразования и сплайна тоновой коррекции для двух изображений по набору совпадающих суперпикселей. Предложен алгоритм поиска совпадающих суперпикселей для двух изображений.

## 2. АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ НА ОСНОВЕ ЦВЕТКОРРЕКТИРУЮЩЕГО СПЛАЙНА И МАТРИЦЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

### 2.1. МОДЕЛЬ РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В современных устройствах регистрации изображений используется сложный конвейер алгоритмов обработки изображений, включающий демозаику, баланс белого, цветокоррекцию, различные стандарты цветового кодирования.

В работе [10] авторы предложили обобщенную модель конвейера для цифровых устройств регистрации изображений:

$$I = (\mathbf{A} \cdot I_{lin})^{1/\gamma}, \quad (1)$$

где  $I_{lin}$  – координаты цветового пространства, соответствующие цвету точки линейного изображения, считываемого датчиком камеры после демозаики;  $I$  – координаты цветового пространства, соответствующие цвету точки выходного изображения;  $\mathbf{A}$  – матрица  $3 \times 3$ , несущая информацию о цвете и балансе белого для наиболее распространенного случая трехмерных цветовых пространств; значение  $\gamma$  определяет степенную функцию (гамма-коррекцию). Это упрощенное представление конвейера, так как в реальных случаях применяются различные

методы обработки: шумоподавление, усиление контраста, цифровое усиление сигнала и другие нелинейные методы. Тем не менее это приближение достаточно точное для тех пикселей, которые не лежат близко к границе цветового охвата [6].

Запишем уравнение (1) для наших изображений:

$$\begin{aligned} I_R &= (\mathbf{A}_R \cdot I_{Rlin})^{1/\gamma}, \\ I_D &= (\mathbf{A}_D \cdot I_{Dlin})^{1/\gamma}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $I_R$  – цифровые изображения,  $I_D$  – исходные снимки с использованием дифракционного оптического элемента. Матрицы  $\mathbf{A}_R$  и  $\mathbf{A}_D$  содержат различающуюся информацию о переводе в  $RGB$  пространство и балансе белого. Показатель  $\gamma$  будем считать одинаковым. Возведение обоих равенств в степень  $\gamma$  позволяет перейти к рассмотрению линейных изображений. Тогда:

$$\begin{aligned} I_{Rdg} &= \mathbf{A}_R \cdot I_{Rlin}, \\ I_{Ddg} &= \mathbf{A}_D \cdot I_{Dlin}. \end{aligned} \quad (3)$$

Изображения  $I_{Rdg}$  и  $I_{Ddg}$  содержат одну и ту же сцену, однако, вследствие сильной хроматической аберрации и расфокусировки сцены в значительной степени отличаются в деталях. Обозначим  $I_{Rdg}^+$  часть изображения  $I_{Rdg}$ , которая совпадает с  $I_{Ddg}$ , а  $I_{Ddg}^+$  – часть изображения  $I_{Ddg}$ , которая совпадает с  $I_{Rdg}$ . Предположим, что существует функция  $S()$  и матрица  $\mathbf{A}_S$ , которые позволяют получить из  $I_{Dlin}$  изображение  $I_{Rdg}^+$ . Тогда:

$$I_{Rdg}^+ = S(\mathbf{A}_S \cdot I_{Dlin}). \quad (4)$$

Тогда с использованием (3) и (4) можно записать следующее равенство:

$$I_{Ddg} = \mathbf{A}_D \mathbf{A}_S^{-1} S^{-1}(I_{Rdg}^+). \quad (5)$$

Это равенство описывает цветовое преобразование, переводящее цвета части изображения  $I_{Rdg}$  к цветам изображения  $I_{Ddg}$ . Аналогичное равенство можно получить и для преобразования цветов, переводящее цвета  $I_{Ddg}$  к цветам соответствующей части изображения  $I_{Rdg}$  в предположении, что такое преобразование возможно с использованием функции  $S_*$ () и матрицы  $\mathbf{A}_{S_*}$ :

$$I_{Rdg} = \mathbf{A}_R \mathbf{A}_{S_*}^{-1} S_*^{-1}(I_{Ddg}^+). \quad (6)$$

В (5) и (6) функции  $S()$  и  $S_*$ () имеют смысл преобразования яркости (тонокорректирующее преобразование), учитывающего разницу в распределении яркости между двумя соответствующими изображениями  $I_{Ddg}$  и  $I_{Rdg}^+$  и между  $I_{Rdg}$  и  $I_{Ddg}^+$ . Это преобразование должно быть обратимым, то есть требование функциональности должно выполняться и для обратных преобразований.

Матрицы в (5) и (6) имеют тот же смысл, что и в (1) – цветовое преобразование, определяющее баланс белого и основные цвета сенсоров. Запишем (5) в более простой форме:

$$\begin{aligned}
 I_{Ddg} &= \mathbf{H}_D S_D(I_{Rdg}^+), \\
 \mathbf{H}_D &= \mathbf{A}_D \mathbf{A}_S^{-1}, \\
 S_D() &= S^{-1}().
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Предлагаемая в работе процедура цветовой стабилизации состоит из трех последовательных этапов: получение пар координат в цветовом пространстве для соответствующих цветов исходного и целевого изображений, построение и применение тонокорректирующей кривой  $S_D()$ , построение и применение матрицы цветового преобразования  $\mathbf{H}_D$ . Обобщенная схема алгоритма изображена на рисунке 1.

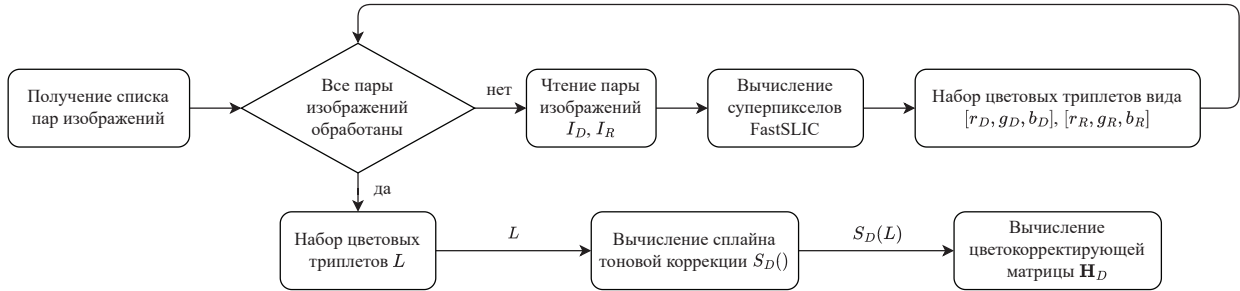


Рис. 1. Схема коррекции.

## 2.2. ПОЛУЧЕНИЕ ЦВЕТОВЫХ ТРИПЛЕТОВ

Для создания набора соответствующих цветов выполняется сопоставление исходного  $I_D$  и целевого  $I_R$  изображений с использованием обратного проективного преобразования [3], [15]. В наборе целевых изображений присутствует специальное изображение такого же разрешения, на котором расположены крестообразные маркеры. Сильная расфокусировка снимаемого ДОЭ изображения оказывает негативное влияние на высокочастотные детали сцены изображения, что не позволяет использовать классические для таких задач алгоритмы сопоставления (*SIFT*, *SURF*) из-за малого количества ключевых точек. Поэтому в наборе присутствует несколько таких служебных изображений с маркерами разного размера.

Шаги алгоритма сопоставления:

- Выбор наиболее четкого канала изображения  $I_D$ . Как правило, зеленый канал является наиболее четким. Во-первых, опорная длина волны (расчетная, на которую приходится пик фокусировки) находится в диапазоне 530-535 нм [16]. Во-вторых, благодаря фильтру Байера на сенсорах камер, «чувствительность» зеленого канала выше, чем в красном и синем каналах изображения.
- Пороговая обработка с автоматическим подбором порога бинаризации.
- Нахождение маркеров на целевом  $I_R$  и снятом с использованием ДОЭ необработанном изображении  $I_D$ . Локализация маркеров осуществляется путем поиска замкнутого контура с последующим уточнением центра маркера.
- Если количество координат  $(x, y)$  – центров маркеров – не равно четырём, то осуществляется увеличение диапазона порога бинаризации. Отобранные на предыдущей итерации алгоритма координаты маркеров накапливаются до тех пор, пока их количество не достигнет четырех.



– Построение матрицы проективного преобразования.

Матрица проективного преобразования применяется ко всему набору исходных изображений, снятых с использованием ДОЭ. Данная процедура в предыдущих работах авторов использовалась для оценки качества коррекции с использованием показателя  $PSNR$  (пиковое отношение сигнал/шум). Обозначим результат сопоставления  $I_D^m$  и  $I_R^m$ .

Построение цветовой сегментации для обоих изображений  $I_D^m$  и  $I_R^m$  выполняется на основе алгоритма FastSLIC [14]. В результате для изображений  $I_D^m$  и  $I_R^m$  получается два соответствующих разбиения на области малого изменения цвета  $J_D$  и  $J_R$ . Эти разбиения накладываются друг на друга, формируется объединенное разбиение  $J$ . Исключив из рассмотрения фрагменты разбиения  $J$  с площадью меньше, чем заданный порог, мы получим области мало изменяющегося цвета, которые принадлежат одинаковым объектам на обоих изображениях. Обозначим количество оставшихся сегментов разбиения как  $N$ .

Как показано в работе [13], существенное влияние на качество цветовой коррекции по фрагментам оказывают границы фрагментов. Для надежного исключения границ объектов обоих изображений мы уменьшаем каждый из сегментов  $J$  за счет удаления из рассмотрения пикселей, близких к границе каждого сегмента. Дополнительно, следуя критерию, предложенному в [13], [17], осуществляется отбор фрагментов согласно требованию наличия одного собственного числа для фрагмента, существенно превосходящего остальные.

После уточнения границ всех  $N$  сегментов разбиения  $J$  значения соответствующих цветов получаются путем поканального усреднения цветов пикселей каждого сегмента  $j_i = \overline{1, N}$  общего разбиения, примененного к первому и второму изображениям по отдельности. В результате формируется  $N$  пар трехмерных координат цветового пространства (триплетов) для соответствующих цветов.

Цветовым пространством, в котором изначально кодируются оба изображения, является пространство  $sRGB$ . Перед последующими этапами проводится линеаризация значений цветов как изображений, так и отобранных соответствующих цветов с помощью обратной гамма-коррекции [9]. После построения и применения тоновой коррекции и цветокорректирующей матрицы цвета снова переводятся в пространство  $sRGB$  прямой гамма-коррекцией. Здесь и далее будем считать, что значения цвета по любому каналу распределены от 0 до 1.

### 2.3. ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ ТОНОВОЙ КОРРЕКЦИИ

Тоновая коррекция нужна для компенсации эффектов, связанных с различиями в экспозиции, и приведении динамического диапазона для двух используемых изображений [18].

Задача построения тонового преобразования  $S_D()$  сводится к задаче построения кривой, аппроксимирующей полученные точки. При этом должны быть учтены дополнительные ограничения: кривая в любой точке не должна быть убывающей (информация об этом требовании подробно рассмотрена в [19]), кривая должна максимально близко проходить возле точек  $(0, 0)$  и  $(1, 1)$ . Для реализации последнего ограничения полученному набору из  $N$  точек добавляются две точки  $(0, 0)$  и  $(1, 1)$  с большими весами.

Для построения кривой тоновой коррекции полученные триплеты преобразуются в градации серого согласно [20]. При этом каждая пара точек цветового пространства соответствующих цветов превращается в координаты на плоскости «яркость исходного – яркость целевого».

Для построения аппроксимирующей кривой используется одномерный  $B$ -сплайн третьего порядка с добавлением явных внутренних узлов [21], [22]. При построении добавляется один внутренний узел, соответствующий середине диапазона изменения яркости 0,5. Это позволяет получать так называемую  $s$ -кривую, которая позволяет вносить разную коррекцию в разные области яркости изображений. Полученный сплайн применяется для коррекции яркостных

значений всех пикселей исходного изображения  $I_{Ddg}$  вместе с соответствующими исходному изображению значениями отобранных пар цветов. Пример полученного сплайна приведен на рисунке 2.

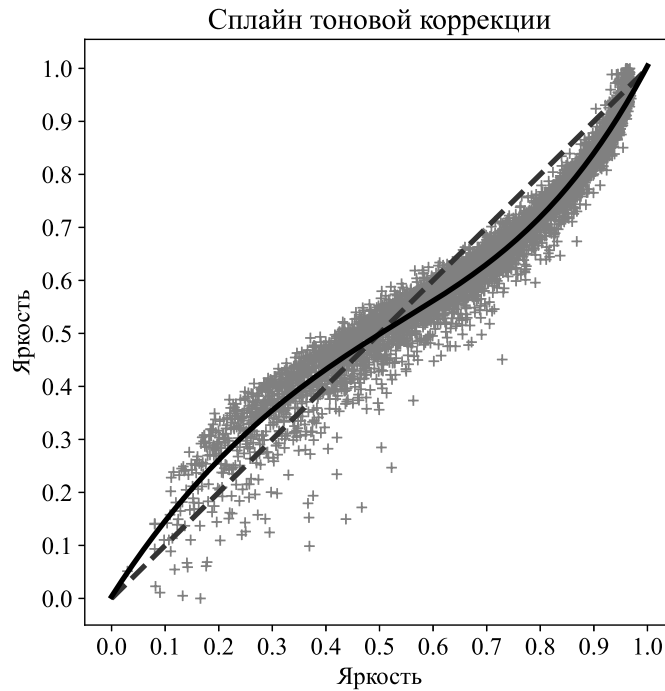


Рис. 2. Кривая тоновой коррекции.

#### 2.4. ПОСТРОЕНИЕ ЦВЕТОКОРРЕКТИРУЮЩЕЙ МАТРИЦЫ

Стандартное преобразование из одного линейного пространства в другое задается как матричное преобразование, соответствующее некоторому аффинному преобразованию:

$$[R', G', B'] = \mathbf{H} \cdot [R, G, B]^T, \quad (8)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}.$$

Матрица в данном случае имеет размер  $3 \times 3$ . Это преобразование предполагает, что точка с координатами  $(0, 0, 0)$  не изменяется. То есть черный на исходном изображении соответствует черному цвету на целевом. В условиях решаемой задачи это предположение может не выполняться, так как сенсоры различных камер могут различаться как в базовых цветах, так и в динамическом диапазоне [6].

Для учета возможной разницы в цветовом диапазоне на изображениях необходима  $4 \times 4$  матрица, соответствующая проективному цветовому преобразованию [23], [24]. Тогда преобразование примет вид:

$$[R', G', B', 1] = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot [R, G, B, 1]^T. \quad (9)$$

Далее осуществляется вычисление матрицы цветового преобразования  $\mathbf{H}_{4 \times 4}$  методом наименьших квадратов.

### 2.5. КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА

Выбор метрики для оценки качества выполнения цветовой коррекции является достаточно сложной задачей [18]. В современных работах используются как классические метрики, такие как пиковое отношение сигнал/шум ( $PSNR$ ) и расстояние в равно-контрастном пространстве  $CIE L^*a^*b^*$  [25], так и более новые, такие как метрика структурной схожести ( $SSIM$ ), или метрики, основанные на анализе локальных распределений цветовых гистограмм [18].

В настоящей работе мы будем использовать стандартную для задач сравнения цветных изображений метрику – цветное расстояние «дельта E 2000» -  $\Delta E_{00}$  [26], значения которой измеряются в единицах «dE», а также  $PSNR$  и  $SSIM$ .

## 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

В качестве экспериментальных данных использовался набор из 1857 цветных изображений разрешением  $1024 \times 1024$  пикселей, разделенных на обучающую (1485 изображений) и тестовую (372 изображения) выборки в соотношении 80:20, также использовались калибровочные изображения. Данный набор изображений получен с использованием лабораторного стенда для получения снимков и оценки качества коррекции, который состоит из устройства вывода (монитор с диагональю экрана 27 дюймов и разрешением  $3840 \times 2160$  пикселей), камеры с установленным дифракционным объективом, подключенной к ноутбуку через интерфейс USB 3.0. Для получения набора данных также использовались мобильные камеры Huawei P30 Pro, P40 Pro и Xiaomi Mi 12S Ultra.

Съемка набора изображений осуществлялась в условиях отсутствия внешних источников освещения («темная комната»). Для установки выдержки (экспозиции) и баланса белого с использованием набора программного обеспечения для разработки ( $SDK$ ) камеры на всю площадь экрана монитора выводилось изображение белого цвета. Далее фиксировались коэффициенты точки белого для каждого из  $RGB$  каналов камеры. Фокусировка объектива, содержащего дифракционную линзу, осуществлялась вручную. Для этого использовалось изображение, содержащее текст различного размера.

Снятые изображения сопоставлялись с целевыми. Обучающая выборка использовалась для формирования набора цветовых триплетов, которые использовались для вычисления сплайна тоновой коррекции  $S_D()$  (рисунок 2) и цветокорректирующей матрицы  $\mathbf{H}_D$ .

В таблице 1 приведено сравнение предложенного малопараметрического алгоритма цветовой коррекции (обозначим для краткости  $fpcc$ ) и алгоритма многокомпонентной цветовой коррекции (обозначим для краткости  $lutcc$ ) из [3]. Заключительным этапом коррекции изображений, полученных с использованием ДОЭ, является устранение хроматической расфокусировки методом на основе обратной свертки с ограничениями на градиенты в цветовых каналах [27] (обозначим как  $dec$ ). В таблице 1  $lutcc(512)$ ,  $fpcc(L)$  – в скобках указано количество цветовых фрагментов ( $512 = 8^3$ ,  $729 = 9^3$ , ...,  $4096 = 16^3$ ;  $L$  – набор цветовых триплетов, полученных на

обучающей выборке, в нашем случае получено 1410543 триплетов),  $dec(71)$  – обратная свертка с ядром размера  $71 \times 71$ .

**Таблица 1.** Результаты работы алгоритмов

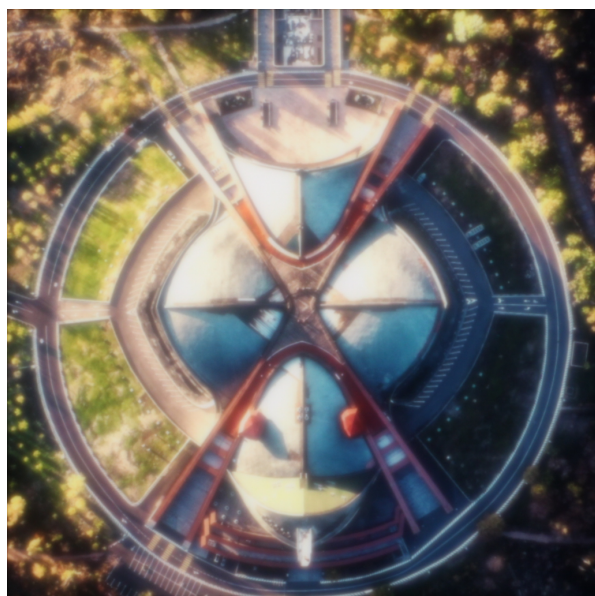
Алгоритм	$PSNR$	$\Delta E_{00}$	$SSIM$
Без обработки	18,940	7,133	0,683
$lutcc(512)$	20,247	7,335	0,688
$lutcc(729)$	20,285	7,159	0,687
$lutcc(1000)$	20,305	6,789	0,688
$lutcc(1331)$	20,390	6,901	0,687
$lutcc(1728)$	20,344	6,825	0,688
$lutcc(2197)$	20,423	6,792	0,687
$lutcc(2744)$	20,445	6,794	0,687
$lutcc(3375)$	20,415	6,728	0,687
$lutcc(4096)$	20,466	6,761	0,687
$lutcc(4096) + dec(71)$	21,229	6,496	0,782
$lutcc(L)$	20,853	6,262	0,683
$lutcc(L) + dec(71)$	21,730	<b>5,941</b>	0,775
$fpcc(L)$	21,435	6,490	0,678
$fpcc(L) + dec(71)$	22,535	6,159	0,766
$fpcc(L) + dec(91)$	<b>22,938</b>	6,139	<b>0,788</b>

Как видно из таблицы 1, результаты неоднозначные. По критерию  $\Delta E_{00}$  результат предложенного алгоритма оказался хуже на тестовой выборке на 0,228 dE, разница с учетом применения обратной свертки достигает 0,198 dE в пользу многокомпонентной цветовой коррекции. По критерию  $PSNR$  результат цветовой коррекции  $fpcc$  превзошел результат  $lutcc$  на 0,582 dB, применение обратной свертки улучшило результат на 0,8 dB для ядра свертки  $71 \times 71$  и на 1,2 dB для ядра свертки  $91 \times 91$  (однако, артефакты обратной свертки стали визуально различимы по сравнению с ядром  $71 \times 71$ ). Максимальное значение критерия  $SSIM$  так же достигается для результата применения малопараметрического алгоритма и обратной свертки с ядром размера  $91 \times 91$  - 0,788.

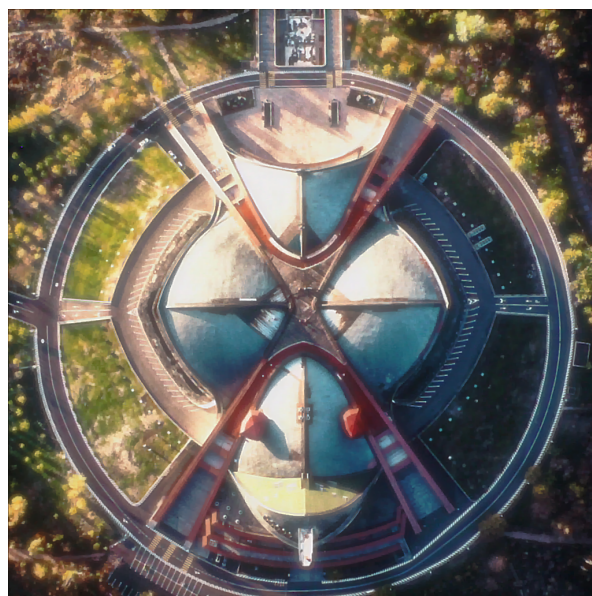
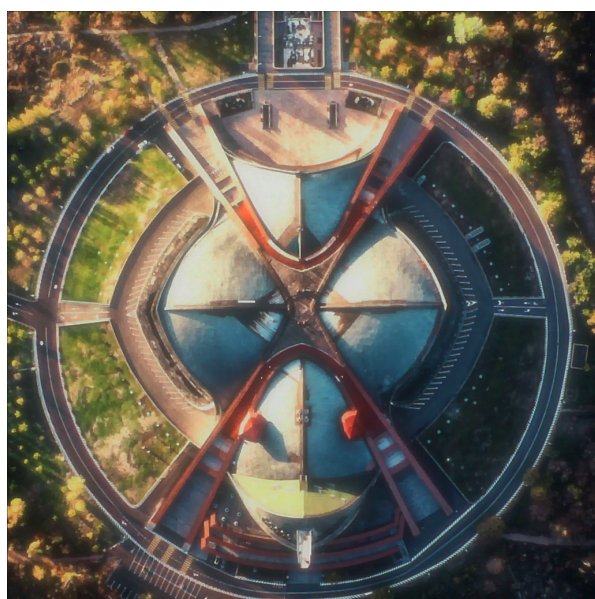
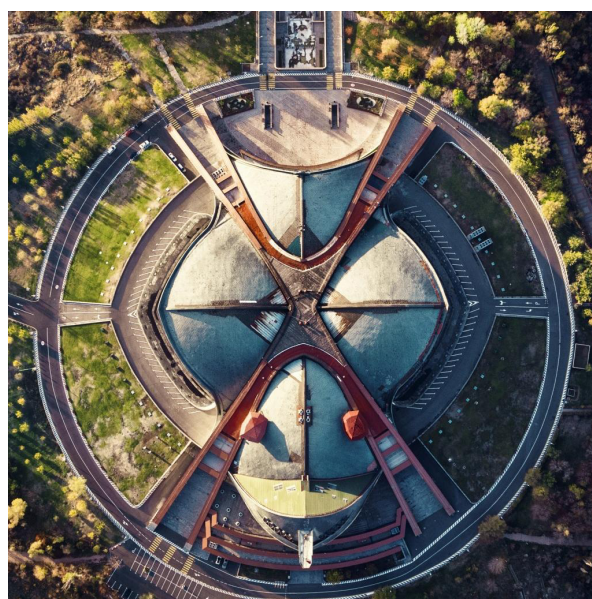
На рисунке 3 приведен пример результата работы алгоритма для изображения из тестового набора данных. Как видно из рисунка 3, результат обработки изображения 3(a) предложенным алгоритмом с последующим применением обратной свертки 3(c) по цветам визуально «ближе» к целевому изображению 3(d), чем применение многокомпонентной цветовой коррекции из [3] и обратной свертки 3(b). На рисунке 4 приведены результаты работы алгоритмов для изображения реальной сцены. Из рисунка 4 видно, что предложенный малопараметрический алгоритм цветовой коррекции лучше справляется с участками, на которых наблюдается «пересвет» (значение яркости близко к максимально возможному), вследствие наличия только линейного преобразования яркости пикселей (сплайн и матрица) и отсутствия нелинейного полиномиального преобразования. Обработанное предложенным алгоритмом изображение 4(c) более контрастно, чем результат обработки многокомпонентной цветовой коррекции 4(b).

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложен новый метод цветовой коррекции и обеспечения цветового постоянства для изображений с неизвестной моделью формирования. Метод основан на последовательном применении сплайна тоновой коррекции и цветокорректирующей матрицы. Предложенный подход позволил уменьшить цветовую разницу на тестовой выборке с 7,133 dE до 6,49 dE по критерию  $\Delta E_{00}$ . Применение обратной свертки к результату цветовой коррекции позволило достичь 22,94 dB по критерию  $PSNR$ , 6,139 dE по критерию  $\Delta E_{00}$  и 0,788 по критерию  $SSIM$  на тестовой выборке.



(a) Исходное, снятое ДОЭ

(b) Обработка  $lutcc(L) + dec(71)$ (c) Обработка  $fpc(L) + dec(71)$ 

(d) Целевое

**Рис. 3.** Результат работы алгоритмов для изображения из тестового набора.





Рис. 4. Результат работы алгоритмов для изображения реальной сцены.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Engelberg J., Levy U. The advantages of metalenses over diffractive lenses. *Nature communications*, 2020, vol. 11, no. 1.
2. Ivliev N., Evdokimova V., Podlipnov V., Petrov M., Ganchevskaya S., Tkachenko I., Abrameshin D., Yuzifovich Yu., Nikonorov A., Skidanov R., Kazanskiy N., Soifer V. First Earth-Imaging CubeSat with Harmonic Diffractive Lens. *Remote Sensing*, 2022, vol. 14, no. 9, 2230.
3. Petrov M., Bibikov S., Yuzifovich Y., Skidanov R., Nikonorov A. Color correction with 3D lookup tables in diffractive optical imaging systems. *Procedia engineering*, 2017, vol. 201, pp. 73–82.
4. Nikonorov A., Evdokimova V., Petrov M., Yakimov P., Bibikov S., Yuzifovich Y., Skidanov R., Kazanskiy N. Deep Learning-Based Imaging using Single-Lens and Multi-Aperture Diffractive Optical Systems. 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshop (ICCVW). New York: IEEE, 2019, pp. 3969–3977.
5. Dudhane A., Zamir S.W., Khan S., Khan F.S., Yang M.-H. Burst Image Restoration and Enhancement. 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). New York: IEEE, 2022, pp. 5759–5768.
6. Rodriguez R.G., Vazquez-Corral J., Bertalmio M. Color Matching Images With Unknown Non-Linear Encodings. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2020, vol. 29, pp. 4435–4444.
7. Dziembowski A., Mieloch D., Rozek S., Domanski M. Color Correction for Immersive Video Applications. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 75626–75640.
8. Xia M., Yao J., Xie R., Zhang M., Xiao J. Color Consistency Correction Based on Remapping Optimization for Image Stitching. 2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW). New York: IEEE, 2017, pp. 2977–2984.
9. Schwartz E., Giryes R., Bronstein A.M. DeepISP: Toward Learning an End-to-End Image Processing Pipeline. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2018, vol. 28, no. 2, pp. 912–923.
10. Bianco S., Bruna A., Naccari F., Schettini R. Color space transformations for digital photography exploiting information about the illuminant estimation process. *J. Opt. Soc. Amer. A*, 2012, vol. 29, no. 3, pp. 374–384.
11. Bianco S., Bruna A.R., Naccari F., Schettini R. Color correction pipeline optimization for digital cameras. *Journal of Electronic Imaging*, 2013, vol. 22, no. 2.
12. Vazquez-Corral J., Bertalmio M. Log-encoding estimation for color stabilization of cinematic footage. 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). New York: IEEE, 2016, pp. 3349–3353.
13. S-log white paper. Technical report. Sony, 2009.

14. Achanta R., Shaji A., Smith K., Lucchi A., Fua P., Susstrunk S. SLIC Superpixels Compared to State-of-the-Art Superpixel Methods. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, vol. 34, no. 11, pp. 2274–2282.
15. Nikonorov A.V., Petrov M.V., Bibikov S.A., Yakimov P.Y., Kutikova V.V., Yuzifovich Y.Y., Morozov A.A., Skidanov R.V., Kazanskiy N.L. Toward Ultralightweight Remote Sensing With Harmonic Lenses and Convolutional Neural Networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, vol. 11, no. 9, pp. 3338–3348.
16. Хонина С.Н., Волоотовский С.Г., Устинов А.В., Харитонов С.И. Анализ фокусировки гармонической дифракционной линзой с учётом дисперсии показателя преломления. *Компьютерная оптика*, 2017, т. 41, № 3, стр. 338–347.
17. Evdokimova V., Petrov M., Klyueva M., Zybin E., Kosianchuk V., Mishchenko I., Novikov V., Selvesiuk N., Ershov E., Ivliev N., Skidanov R., Kazanskiy N., Nikonorov A. Deep learning-based video stream reconstruction in mass-production diffractive optical systems. *Computer Optics*, 2021, vol. 45, no. 1, pp. 130–141.
18. Zhang A. Flexible New Technique for Camera Calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, vol. 22, no. 11, pp. 1330–1334.
19. Nikonorov A.V. Spectrum shape elements model for correction of multichannel images. *Computer Optics*, 2014, vol. 38, no. 2, pp. 304–313.
20. IEC 61966-2-1: Multimedia systems and equipment - Colour measurement and management - Part 2-1: Colour management - Default RGB colour space - sRGB, 1999.
21. Dierckx P. *Curve and Surface Fitting with Splines*. New York: Oxford University Press, 1993.
22. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E. et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature methods*, 2020, vol. 17 no. 3, pp. 261–272.
23. Gong H., Finlayson G., Fisher R. Recoding color transfer as a color homography. *Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC) 2016*. BMVA Press, 2016.
24. Gong H., Finlayson G.D., Fisher R.B., Fang F. 3D color homography model for photo-realistic color transfer re-coding. *The Visual Computer*, 2019, vol. 35, no. 3, pp. 323–333.
25. Ignatov A., Van Gool L., Timofte R. Replacing Mobile Camera ISP with a Single Deep Learning Model. *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*. New York: IEEE, 2020, pp. 2275–2285.
26. Sharma G., Wu W., Dalal E.N. The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color Research and Application*, 2005, vol. 30, no. 1, pp. 21–30.
27. Nikonorov A., Petrov M., Bibikov S., Yuzifovich Y., Yakimov P., Kazanskiy N., Skidanov R., Fursov V. Comparative Evaluation of Deblurring Techniques for Fresnel Lens Computational Imaging. *2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*. New York: IEEE, 2016, pp. 775–780.

## Few-parameter color correction in diffractive optical imaging systems

M.V. Petrov, S.A. Bibikov, P.G. Serafimovich, A.V. Nikonorov

Compact and lightweight diffractive optical elements are a promising replacement for long-focus refractive optics in computer vision systems, such as UAVs and nanosatellites. Significant optical distortions narrow the applications range of the DOE. However, computer post-processing of images makes it possible to compensate for distortions. This work is devoted to the development of methods for correcting color distortions in such optical systems. We propose a few-parameter color correction algorithm based on a color-correcting matrix and a tone-correcting spline.

**KEYWORDS:** Diffractive optical element, DOE, chromatic aberration, color correction, spline.