



Метод синтеза оптимизированных таблиц поиска для цветовых преобразований

А. А. Мотыко^{а,б}, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0003-4241-4298

Н. А. Обухова^{а,б}, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0003-1953-2085, natalia172419@yandex.ru

Ю. В. Якубович^а, канд. физ.-мат. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-9922-0593

^аСанкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7–9, Санкт-Петербург, 199034, РФ

^бСанкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Профессора Попова ул., 5, Санкт-Петербург, 197376, РФ

Введение: цветовые преобразования широко используются при обработке информации в телевизионных системах. Одним из самых популярных и востребованных способов реализации цветовых преобразований являются трехмерные таблицы поиска. При этом существующие методы создания таблиц поиска не лишены недостатков. **Цель:** разработать аналитический метод построения оптимизированных трехмерных таблиц поиска с заданными свойствами (обеспечивающими гладкость преобразования, возможность построения при неполном покрытии отображаемых пространств исходными данными и др.) и с учетом существующих недостатков в подходах к регуляризации. **Результаты:** предложен новый аналитический метод построения оптимизированных таблиц поиска для цветовых преобразований, которые по своим характеристикам соответствуют или превосходят неоптимизированные таблицы с размером, соответствующим следующему шагу n ($N = 2^n + 1$) и при этом обеспечивают лучшую гладкость преобразования. По сравнению с современными аналогами, применяемыми в телевизионных системах для цветовых преобразований, метод демонстрирует в 1,5–2 раза меньшую среднюю ошибку и в 1,5–4 раза меньший 95%-й перцентиль ошибок. Метод обеспечивает высокую точность цветовых преобразований и обладает хорошей технологичностью за счет получения аналитического решения. Обеспечивая лучшую точность по сравнению с аналогичными методами построения оптимизированных таблиц, предложенный метод сохраняет решетку таблицы в прообразе регулярной и равномерной, что делает процесс построения быстрее, а саму таблицу существенно эффективнее и проще в использовании при реализации в реальной аппаратуре. **Практическая значимость:** метод может применяться при разработке телевизионных систем, в которых требуется высокая точность цветопередачи.

Ключевые слова — цветовые преобразования, цветокоррекция, трехмерные таблицы поиска, оптимизированные 3D LUT, равноконтрастные пространства.

Для цитирования: Мотыко А. А., Обухова Н. А., Якубович Ю. В. Метод синтеза оптимизированных таблиц поиска для цветовых преобразований. *Информационно-управляющие системы*, 2025, № 1, с. 9–22. doi:10.31799/1684-8853-2025-1-9-22, EDN: KRAQDO

For citation: Motyko A. A., Obukhova N. A., Yakubovich Y. V. Method for synthesizing optimized lookup tables for color transformations. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2025, no. 1, pp. 9–22 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2025-1-9-22, EDN: KRAQDO

Введение

Цветовые преобразования, реализуемые при формировании изображений телевизионной системы, направлены на осуществление точной цветопередачи наблюдаемой сцены или реализацию некоторой процедуры, субъективно повышающей визуальное качество изображения для пользователя (повышение контраста, изменение цветового тона и пр.).

Задачу корректной передачи цветов решают колориметрические цветовые преобразования, для которых характерно то, что результат изменения цвета для каждого пикселя не зависит от его окружения [1]. Таким образом:

$$I_2(x, y) = f(I_1(x, y)),$$

где I_1 — цветовые координаты пикселя в исходном цветовом пространстве; I_2 — цветовые ко-

ординаты пикселя в целевом цветовом пространстве; (x, y) — координаты пикселя в растре; f — функция, осуществляющая преобразование.

Задача синтеза цветового преобразования состоит в определении вида функции f и идентификации ее параметров. Существует множество моделей для отображения цветовых пространств, подавляющее большинство которых можно разделить на две группы. К первой группе относятся линейные регрессионные модели. Два основных варианта реализации модели первого порядка содержат девять или 12 коэффициентов [2], но также широко используются полиномиальные модели второго и более высоких порядков (линейные по параметрам), например, различные полиномиальные модели и так называемые рут-полиномиальные приведены в работе [3]. Вторая группа основана на нелинейных моделях. Она включает различные варианты: модель на основе сплайнов [4], радиально-ба-

зисных функций [5], трехмерных таблиц поиска [6], — также к данной группе можно отнести нейросетевые модели [7]. Интенсивное развитие методов синтеза цветowych преобразований связано с возрастающими вместе с развитием телевизионной и фототехнической аппаратуры требованиями к цветопередаче. Неточная цветопередача приводит к появлению ложных (отсутствующих в реальной сцене) цветowych градиентов, вносит ошибки в локальный цветовой контраст и в целом искажает восприятие отображаемой сцены, ухудшает качество изображения.

Постановка задачи разработки нового метода синтеза оптимизированных таблиц поиска для цветowych преобразований

Таблица поиска представляет собой ассоциативный массив, который хранит результаты вычисления некоторой функции в заданных точках (узлах). Таблица позволяет заменить вычисление сложного выражения простыми операциями поиска ближайших узлов (предварительно рассчитанных значений, которые окружают интересующее) и соответствующей интерполяции. Трехмерные таблицы поиска используют для цветowych преобразований очень широко, в частности для преобразования цветowych пространств, при этом исходное пространство называют прообразом, а результирующее — образом. Реализация преобразований с помощью таблиц поиска отличается важными свойствами [8]:

— таблицы поиска при должном размере превосходят по точности иные преобразования, но при этом требуют предварительно рассчитанных пар цветов в пространствах образа и прообраза, причем равномерно покрывающих оба пространства. Это условие легко выполнить для ряда колориметрических задач;

— таблицы поиска, в отличие от аналитических преобразований, способны наилучшим образом моделировать нелинейность отображения в любой локальной области цветowego пространства.

Таблица поиска характеризуется своей размерностью — числом индексов (входных переменных), которое задает нужное значение функции, и числом узлов решетки, т. е. точек, в которых предварительно рассчитано значение аппроксимируемой функции. На современном этапе в цветowych преобразованиях в основном используются трехмерные таблицы следующих размеров: $17 \times 17 \times 17$, $33 \times 33 \times 33$ и $65 \times 65 \times 65$ узлов [9].

Обычно таблицу поиска формализуют как набор V узлов \mathbf{a} в пространстве прообраза \mathbb{R}^n и

соответствующих им значений \mathbf{b} в пространстве образа \mathbb{R}^m :

$$V = [\mathbf{a}_i \in \mathbb{R}^n, \mathbf{b}_i \in \mathbb{R}^m].$$

Расположение узлов \mathbf{a}_i разделяет n -мерную область g на небольшие подобласти, а соответствующие значения \mathbf{b}_i являются приблизительными оценками отображения g в точках \mathbf{a}_i . С учетом интерполяции значения вычисляют следующим образом. Определяют веса w_{ij} для отображаемой точки \mathbf{c}_i в пространстве прообраза:

$$\sum_{j=1}^{N_v} w_{ij} \mathbf{a}_j = \mathbf{c}_i; \quad \sum_{j=1}^{N_v} w_{ij} = 1,$$

где N_v — число узлов решетки таблицы. Вообще говоря, такое разложение не единственно, но если веса выбирать таким образом, что ненулевые веса будут только для тех узлов $\mathbf{a}_j, j = [1, N_v]$, которые окружают точку \mathbf{c}_i , формируя вокруг нее ячейку решетки таблицы, то обычно выбор весов становится однозначным.

Эти веса затем используют для получения оценки значения преобразования (т. е. координаты в пространстве образа) \mathbf{d}_i в точке \mathbf{c}_i :

$$\widehat{\mathbf{d}}_i = \sum_{j=1}^{N_v} w_{ij} \mathbf{b}_j.$$

Несмотря на то, что таблицы поиска решают сегодня множество задач в области цветowych преобразований, они не лишены недостатков: проблемы с гладкостью преобразования, отсутствие связи с особенностями конкретного отображения, с распределением существующих данных в пространстве отображаемой функции и пр. [10].

В этой связи развивают так называемые оптимизированные таблицы [11–13], в которых положения узлов в пространстве прообраза и их значений в пространстве образа рассчитаны во взаимосвязи посредством некоторой процедуры, обеспечивающей лучшую точность отображения. По виду решетки узлов в пространстве прообраза различают следующие оптимизированные таблицы (рис. 1):

- регулярные:
 - однородные (осуществляется оптимизация значений в пространстве образа);
 - неоднородные (осуществляется оптимизация положения узлов в пространстве прообраза и значений в пространстве образа);
- нерегулярные (осуществляется оптимизация структуры решетки узлов и значений).

Для построения оптимизированной таблицы поиска требуются «обучающие» данные — набор

N_T точек \mathbf{c}_i в пространстве прообраза, для которых значения в образе \mathbf{d}_i известны. Необходимое для формулировки задачи минимизации выражение для функции потерь E , которая вычисляется по точкам обучающего набора, можно записать следующим образом:

$$E = \sum_{i=1}^{N_T} (\hat{\mathbf{d}}_i - \mathbf{d}_i)^2 = \sum_{i=1}^{N_T} \left(\sum_{j=1}^{N_v} w_{ij} \mathbf{b}_j - \mathbf{d}_i \right)^2.$$

В данном выражении присутствуют веса w_{ij} , которые удобно составить в матрицу весов \mathbf{W}_a размера $N_T \times N_v$. Эта матрица однозначно определяется расположением узлов решетки $\mathbf{a}_j, j = [1, N_v]$, расположением точек обучающего набора $\mathbf{c}_i, i = [1, N_T]$ и свойствами интерполяции. Тогда в матрично-векторной форме оптимизационная задача формулируется как

$$(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \arg \min_{\mathbf{a}, \mathbf{b}} \left(\|\hat{\mathbf{d}} - \mathbf{d}\|^2 \right) = \arg \min_{\mathbf{a}, \mathbf{b}} \left(\|\mathbf{W}_a \mathbf{b} - \mathbf{d}\|^2 \right).$$

Функция не является выпуклой одновременно по \mathbf{a} и \mathbf{b} , однако является отдельно выпуклой по отношению к двум аргументам: минимизация E по \mathbf{b} при фиксированном \mathbf{W}_a выпуклая и наоборот. Оптимизация значений и положений узлов решетки может выполняться по ряду сходных методик [13], как правило, на основе численной минимизации. Для обеспечения гладкости преобразования могут использоваться различные регуляризаторы [14]. Совместная оптимизация положения узлов и значений основана на численных методах, известны реализации на базе алгоритмов минимизации Ллойда – Макса и Линда – Бузо – Грея, кластеризации k-средних и др. [15].

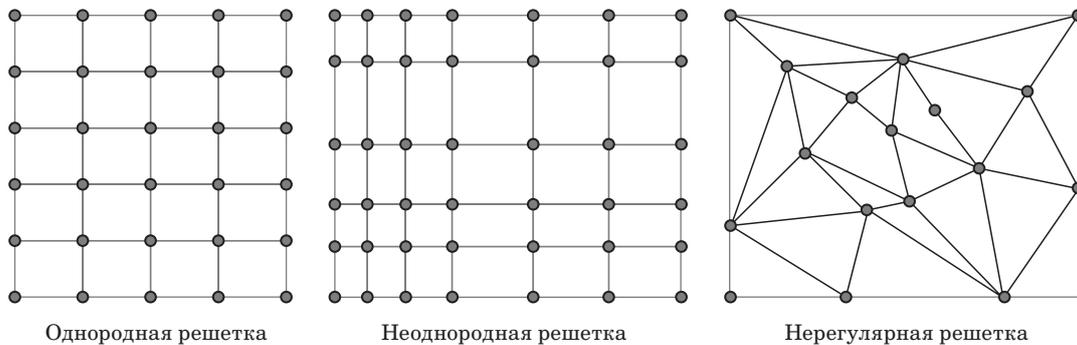
Большинство методов построения оптимизированных таблиц поиска основаны на регулярной решетке узлов в пространстве прообраза. Регулярные решетки значительно проще в ре-

ализации (в том числе аппаратной), обладают вычислительным преимуществом на этапе доступа к ячейкам по сравнению с нерегулярными, но отмечается, что последние лучше способны моделировать нелинейность преобразования при равном числе узлов [10]. Тем не менее именно таблицы поиска с регулярными решетками преобладают сегодня в задачах колориметрии. Из регулярных оптимизированных таблиц наиболее распространенными являются однородные по причине относительной простоты построения.

Необходимой составляющей при синтезе оптимизированных таблиц поиска является использование регуляризаторов [14], позволяющих добиться того, чтобы полученное решение обладало определенными свойствами. Регуляризаторы – это слагаемые в функционале ошибки, которые вносят некий штраф в функцию потерь, если решение отклоняется от желаемого свойства.

Основное качество, которым должна обладать таблица поиска, помимо точной цветопередачи, – гладкость преобразования. Для ряда колориметрических задач (например, отображения цветовых охватов) важно обеспечить отсутствие выхода результирующих значений за пределы допустимых цветов.

Выбор типа регуляризаторов и определение их вклада в расчет минимизируемого функционала является ключевым при синтезе оптимизированной таблицы поиска. Основные типы регуляризаторов подробно рассмотрены в работах [14, 16]. При построении оптимизированных таблиц специальная регуляризация применяется, если точки обучающего набора (т. е. некоторые цвета) расположены неравномерно в пространстве прообраза. Достаточно типичной является ситуация, при которой в некоторых ячейках таблицы цветов не оказывается вовсе. В этом случае задача получается недостаточно определенной. Значения таблицы в пространстве образа могут стягиваться к имеющимся точкам, плохо моделируя существующее преобразование



■ **Рис. 1.** Различные виды решеток двумерных таблиц поиска в пространстве прообраза
 ■ **Fig. 1.** Different types of lookup two-dimensional table lattices in the prototype space

(рис. 2, а). Правильно выбранные параметры регуляризации приводят к тому, что результирующая таблица в пространстве образа окажется достаточно структурированной для адекватной аппроксимации преобразования (рис. 2, б).

Регуляризатор, обеспечивающий гладкость отображения при решении задачи минимизации функционала ошибки, должен препятствовать формированию острых углов между ячейками решетки. Общий подход описан в [14]. Например, для трехмерной таблицы, реализующей отображение из цветового пространства RGB, для каждого внутреннего узла решетки $a_{(j_R j_G j_B)}$ в каждом из трех направлений (вдоль осей R, G, B в пространстве прообраза) выбираются две соседние точки. Например, в случае направления R — это $a_{(j_R+1 j_G j_B)}$ и $a_{(j_R-1 j_G j_B)}$. Идея состоит в том, чтобы оценивать расстояние между соответствующей выпуклой комбинацией образов узлов-соседей $b_{(j_R+1 j_G j_B)}$, $b_{(j_R-1 j_G j_B)}$ и образом рассматриваемого узла $b_{(j_R j_G j_B)}$.

У данного способа регуляризации существует проблема, связанная с тем, что для ячеек большего размера назначается больший штраф за негладкость, чем для ячеек с меньшим размером. Это не оправдано с точки зрения желаемого результата, поскольку относительно большие по размеру ячейки появляются в пространстве образа либо там, где преобразование почти линейно, либо там, где нет или очень мало точек обучающего набора, и данный фактор никак не связан с необходимостью увеличения штрафа за негладкость. Нужно отметить, что этот вопрос не был рассмотрен в известном ряде работ, описывающих регуляризацию [10, 12, 14, 16]. Кроме того, в существующих работах не учитывается, что размеры ячеек в пространстве образа не должны резко меняться. Для обеспечения гладкости и равномерной точности

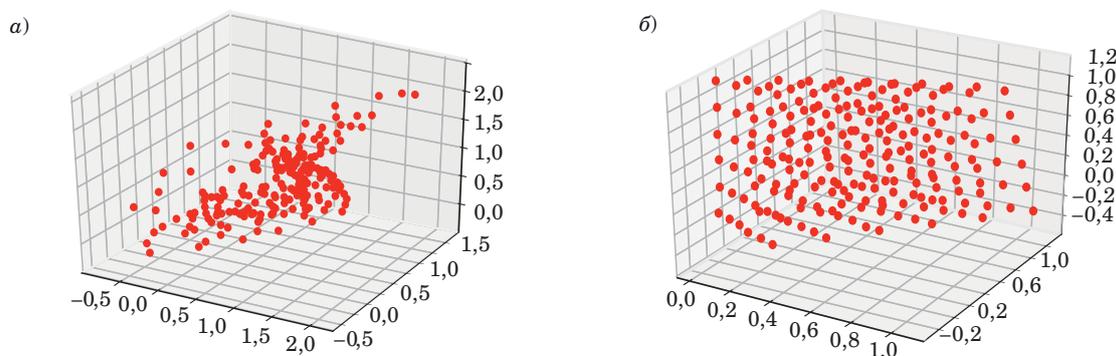
преобразования в таблице соседние ячейки должны иметь сопоставимый размер.

Еще один негативный эффект преобразования, возникающий при построении оптимизированной таблицы, с которым пытаются бороться с помощью регуляризации, состоит в том, что если независимо оценивать образы восьми узлов, формирующих одну ячейку (для трехмерной таблицы), то можно в результате получить существенно нелинейное преобразование даже внутри самой ячейки. Образы кубических ячеек при линейном отображении будут параллелепипедами. Однако в реальных преобразованиях, моделируемых таблицами поиска, образ ячейки может существенно отличаться от параллелепипеда. Регуляризатор должен штрафовать решение за подобное несоответствие. В известной работе [14] соответствующая квадратичная форма убывает, если образ решетки близок к линейному преобразованию равномерной решетки в пространстве прообраза, и, наоборот, растет, если образ сильно отличается от результата линейного преобразования. Однако указанное решение актуально только для равномерных решеток и для определенных схем интерполяции. Поэтому требуется найти альтернативный и более общий подход.

Другим важным свойством цветового преобразования, которого пытаются добиться с помощью введения регуляризационных слагаемых, является контроль выхода результата отображения за установленные границы в пространстве образа. Детали использования данной регуляризации определяются задачей, известное и достаточно общее решение которой приведено в [16].

Таким образом, основные проблемы при создании оптимизированных таблиц следующие.

1. Недостаточная репрезентативность обучающего набора, точки могут неравномерно покры-



■ **Рис. 2.** Расположение узлов таблицы $N = 6$ в пространстве образа: а — таблица строилась без использования регуляризации; б — таблица строилась с использованием регуляризации, направленной на сохранение формы ячеек в виде параллелепипедов

■ **Fig. 2.** Location of nodes of the table $N = 6$ in the image space: а — the table was built without using regularization; б — the table was built using regularization aimed at preserving the shape of cells in the form of parallelepipeds

вать цветное пространство, может наблюдаться отсутствие точек в каких-то частях пространства, что затрудняет вычисление оптимизированных значений и положения узлов для этих областей. Соответственно, требуется введение регуляризации, обеспечивающей определенную «жесткость» таблицы, которая препятствует формированию ячеек нерегулярной формы, обусловленной локальным отсутствием точек в обучающем наборе.

2. Недостаток системности в вопросе регуляризации. В основном с помощью регуляризаторов пытаются решить некоторые частные задачи, например добиться гладкости преобразования, но при этом регуляризация оказывается неявно связана со структурой таблицы, и ее вклад трудно объяснить.

3. Численная оптимизация — процесс, не гарантирующий в общем случае нахождение глобального минимума функции ошибки, кроме того, эта процедура характеризуется значительными вычислительными и, следовательно, временными затратами, что исключает построение таблицы в близком к реальному времени.

Очевидно, что для исключения указанных недостатков необходимо решить задачу разработки нового метода создания многомерной таблицы поиска для цветовых преобразований. Новый метод должен:

- обеспечивать создание таблицы, в том числе в случае, если известный набор пар цветов до и после отображения не покрывает всего пространства преобразования;
- позволять создавать таблицы с заданными свойствами (обеспечивающими гладкость преобразования, а также контроль невыхода результатов отображения цветов за пределы допустимого объема) и с учетом существующих недостатков в подходах к регуляризации;
- обладать аналитическим решением, не требующим численной минимизации и гарантирующим достижение глобального оптимума.

Метод синтеза оптимизированных таблиц поиска для цветовых преобразований

При разработке метода для построения таблицы поиска, обладающей заданными свойствами, в первую очередь следует выдвинуть требование об аналитическом решении, которое в общем случае значительно быстрее и более стабильно, чем численная оптимизация. К тому же аналитическое решение гарантирует глобальный минимум ошибки.

Если потребителем цветокоррекции является блок автоматического анализа, то логично использовать евклидову норму разностного векто-

ра истинных и предсказанных таблицей значений. Однако если коррекция ориентирована на человека и используется формула цветовых различий CIEDE2000, то аналитическое решение получить нельзя ввиду специфики самой формулы. В данном случае возможным вариантом становится использование какого-либо современного равноконтрастного цветового пространства, где евклидова норма разностного вектора между предсказанным и истинным значениями цветов близка к воспринимаемой человеком (и к оценке по CIEDE2000). Среди ряда новейших равноконтрастных пространств можно выделить ProLab [17], SRLAB2 [18] и OkLab [19]. ProLab отличается рядом полезных свойств, из которых важнейшим для рассматриваемой задачи является то, что расстояние между цветами в этом пространстве наилучшим образом среди аналогов коррелирует именно с CIEDE2000 [20, 21], являющейся на сегодня принятым стандартом, активно используемым на практике.

ProLab представлено как цветное пространство, полученное путем проективного преобразования CIE XYZ. Следовательно, координаты в ProLab получают с помощью

$$ProLab(\mathbf{y}) = \begin{bmatrix} z_L \\ z_a \\ z_b \end{bmatrix} = \frac{1}{1 + \mathbf{q}\mathbf{y}} \tilde{\mathbf{Q}}\mathbf{y},$$

$$\tilde{\mathbf{Q}} = \begin{pmatrix} 75,5362 & 486,661 & 167,387 \\ 617,714 & -595,448 & -22,2664 \\ 48,3433 & 194,938 & -243,281 \end{pmatrix}, \mathbf{q} = \begin{pmatrix} 0,7554 \\ 3,8666 \\ 1,6739 \end{pmatrix}.$$

Указанные параметры рассчитаны для источника освещения типа D65.

Для вычислительных задач удобно разделить элементы матрицы ProLab на 100 и обозначить ее строки $\mathbf{Q}_L, \mathbf{Q}_a, \mathbf{Q}_b$, а столбцы $\mathbf{Q}_X, \mathbf{Q}_Y, \mathbf{Q}_Z$. Для оценки цветовой разницы в ProLab нужно воспользоваться выражением

$$d^2(z, z') = d_L^2 + d_a^2 + d_b^2,$$

$$d_L = z_L - z'_L, d_a = z_a - z'_a, d_b = z_b - z'_b,$$

где z и z' — координаты двух точек в пространстве ProLab.

Итак, если имеются две точки в некотором целевом цветовом пространстве, то различие между ними можно оценить как

$$d^2(ProLab(\mathbf{y}_i), ProLab(\hat{\mathbf{y}}_i)) = \left(\frac{\mathbf{Q}_L \mathbf{y}_i}{1 + \mathbf{q}\mathbf{y}_i} - \frac{\mathbf{Q}_L \hat{\mathbf{y}}_i}{1 + \mathbf{q}\hat{\mathbf{y}}_i} \right)^2 + \left(\frac{\mathbf{Q}_a \mathbf{y}_i}{1 + \mathbf{q}\mathbf{y}_i} - \frac{\mathbf{Q}_a \hat{\mathbf{y}}_i}{1 + \mathbf{q}\hat{\mathbf{y}}_i} \right)^2 + \left(\frac{\mathbf{Q}_b \mathbf{y}_i}{1 + \mathbf{q}\mathbf{y}_i} - \frac{\mathbf{Q}_b \hat{\mathbf{y}}_i}{1 + \mathbf{q}\hat{\mathbf{y}}_i} \right)^2 \approx$$

$$\approx \frac{(\mathbf{Q}_L(\mathbf{y}_i - \hat{\mathbf{y}}_i))^2 + (\mathbf{Q}_a(\mathbf{y}_i - \hat{\mathbf{y}}_i))^2 + (\mathbf{Q}_b(\mathbf{y}_i - \hat{\mathbf{y}}_i))^2}{(1 + \mathbf{q}\mathbf{y}_i)^2}.$$

Поскольку логично предположить, что $\hat{\mathbf{y}}_i \approx \mathbf{y}_i$, выражение можно переписать:

$$\rho(\mathbf{y}_i, \hat{\mathbf{y}}_i)^2 = (\mathbf{y}_i - \hat{\mathbf{y}}_i)^T \mathbf{Q}^T \mathbf{V}_i \mathbf{Q} (\mathbf{y}_i - \hat{\mathbf{y}}_i),$$

$$\mathbf{V}_i = \frac{1}{(1 + \mathbf{q}\mathbf{y}_i)^2} \mathbf{I}_{3 \times 3},$$

где \mathbf{I} — единичная матрица размера 3×3 элемента.

Для определения ошибки цветопередачи таблицы поиска введем матрицу

$$\mathbf{B} = (b_{c,j}), c \in \{X, Y, Z\}, j = 0, \dots, m-1$$

размера $3 \times m$, j -й столбец которой равен неизвестному вектору \mathbf{b}_j , и вектор-столбец

$$\mathbf{W}_i = (w_0(x_i), \dots, w_1(x_i))^T$$

весов, который находят с помощью какого-либо интерполяционного алгоритма. Следовательно, таблица поиска реализует следующее преобразование:

$$\hat{\mathbf{y}}_i = LUT(\mathbf{x}_i) = \mathbf{B}\mathbf{W}_i.$$

Тогда ошибку ρ между истинным значением отображения (записанным в обучающем наборе) и результатом таблицы можно записать как

$$\rho(\mathbf{y}_i, \hat{\mathbf{y}}_i)^2 = (\mathbf{y}_i - \mathbf{B}\mathbf{W}_i)^T \mathbf{Q}^T \mathbf{V}_i \mathbf{Q} (\mathbf{y}_i - \mathbf{B}\mathbf{W}_i) =$$

$$= \mathbf{W}_i^T \mathbf{B}^T \mathbf{Q}^T \mathbf{V}_i \mathbf{Q} \mathbf{B} \mathbf{W}_i - 2\mathbf{y}_i^T \mathbf{Q}^T \mathbf{V}_i \mathbf{Q} \mathbf{B} \mathbf{W}_i + \mathbf{y}_i^T \mathbf{Q}^T \mathbf{V}_i \mathbf{Q} \mathbf{y}_i.$$

Это квадратичная форма от переменных $b_{c,j}$. Функционал, который аппроксимирует вычисление ошибки цветопередачи, представляет собой сумму подобных выражений для всех i и является квадратичной формой, которую необходимо оптимизировать в задаче. В явном виде коэффициенты этой квадратичной формы для

$$c, c' \in \{X, Y, Z\}, j, j' = 0, \dots, m-1$$

можно представить следующим образом:

$$\text{coef}(b_{c,j} b_{c',j'}, \rho(\mathbf{y}_i, \hat{\mathbf{y}}_i)^2) = w_j(\mathbf{x}_i) (\mathbf{Q}^T \mathbf{V}_i \mathbf{Q})_{c,c'} w_{j'}(\mathbf{x}_i);$$

$$\text{coef}(b_{c,j}, \rho(\mathbf{y}_i, \hat{\mathbf{y}}_i)^2) = -2(\mathbf{y}_i^T \mathbf{Q}^T \mathbf{V}_i \mathbf{Q})_c w_j(\mathbf{x}_i);$$

$$\text{coef}(1, \rho(\mathbf{y}_i, \hat{\mathbf{y}}_i)^2) = \mathbf{y}_i^T \mathbf{Q}^T \mathbf{V}_i \mathbf{Q} \mathbf{y}_i,$$

где c, c' — это элементы на строке c и в столбце c' соответственно. Следует отметить, что большинство коэффициентов будут нулевыми (поскольку веса не равны нулю только для тех узлов решетки, которые окружают конкретный \mathbf{x}_i). Для удобства полезно ввести обозначения:

$$f_{c,j;c',j'} = \sum_{i=0}^{n-1} w_j(\mathbf{x}_i) (\mathbf{Q}^T \mathbf{V}_i \mathbf{Q})_{c,c'} w_{j'}(\mathbf{x}_i);$$

$$g_{c,j} = \sum_{i=0}^{n-1} (\mathbf{y}_i^T \mathbf{Q}^T \mathbf{V}_i \mathbf{Q})_c w_j(\mathbf{x}_i);$$

$$h = \sum_{i=0}^{n-1} \mathbf{y}_i^T \mathbf{Q}^T \mathbf{V}_i \mathbf{Q} \mathbf{y}_i.$$

Числа $f_{c,j;c',j'}$ формируют матрицу \mathbf{F} размера $3m \times 3m$, числа $g_{c,j}$ — вектор-столбец \mathbf{g} . Важно отметить, что по построению матрица \mathbf{F} симметричная. Матрица \mathbf{B} (размера $3 \times m$) может быть представлена в виде вектора-столбца \mathbf{b} . Тогда можно записать квадратичную форму для аппроксимации ошибки цветопередачи

$$\tilde{E}_{color}(\mathbf{b}) = \mathbf{b}^T \mathbf{F} \mathbf{b} - 2\mathbf{g}^T \mathbf{b} + h.$$

Поскольку матрица \mathbf{F} положительно определенная, минимум может быть найден явно: $\mathbf{b}_{opt} = \mathbf{F}^{-1} \mathbf{g}$.

Данный метод является универсальным: если предполагается, что цветовое преобразование ориентировано на использование в автоматическом анализе, то вместо расстояния в ProLab можно использовать обычную евклидову норму в RGB-координатах, при этом задача существенно упрощается:

$$f_{c,j;c',j'} = \delta_{c,c'} \sum_{i=0}^{n-1} w_j(\mathbf{x}_i) w_{j'}(\mathbf{x}_i);$$

$$q_{c,j} = \sum_{i=0}^{n-1} \mathbf{y}_i^{(c)} w_j(\mathbf{x}_i);$$

$$h = \sum_{i=0}^{n-1} \mathbf{y}_i^T \mathbf{y}_i;$$

$$\delta_{c,c'} = 1, \text{ если } c = c', \text{ иначе } 0.$$

Применение регуляризации в рамках разработанного метода

Для повышения эффективности регуляризации и решения перечисленных выше проблем предложены регуляризаторы S, K и ρ . Первые два способствуют обеспечению гладкости и более равномерной точности преобразования, третий отвечает за сохранение границ преобразования. Важной особенностью предлагаемого метода является то, что он позволяет получить

аналитическое решение. Для этого регуляризаторы также должны являться квадратичными формами.

Предложена квадратичная форма S , которая строится из соображений обеспечения сопоставимого размера соседних ячеек таблицы в пространстве образа. Идея основана на вычислении квадрата расстояния между двумя отмасштабированными векторами

$$\frac{b_{(j_R \cdot j_G \cdot j_B)} - b_{(j_R-1, j_G \cdot j_B)}}{a_{(j_R \cdot j_G \cdot j_B)} - a_{(j_R-1, j_G \cdot j_B)}} = \frac{b_{(j_R+1, j_G \cdot j_B)} - b_{(j_R \cdot j_G \cdot j_B)}}{a_{(j_R+1, j_G \cdot j_B)} - a_{(j_R \cdot j_G \cdot j_B)}}.$$

Если векторы коллинеарны, то расстояние между ними отражает изменение относительного размера между соответствующими ячейками. Если они имеют одинаковую длину, но при этом между ними есть некоторый угол φ , то квадрат расстояния d между ними будет пропорционален:

$$d^2 \sim \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right).$$

В общем случае, если они не коллинеарны и их длины не равны, будет получен некоторый промежуточный результат. Квадратичную форму для данного регуляризатора можно записать следующим образом:

$$S(\mathbf{b}) = \mathbf{b}^T \mathbf{S} \mathbf{b},$$

где \mathbf{S} — квадратная матрица размера $3m \times 3m$, в которой ненулевые только $9m$ значений (по три отмасштабированных вектора для вершин $-j, j, +j$ на каждое из трех направлений и на каждый из m узлов в таблице).

Предложена квадратичная форма K , направленная на то, чтобы ячейки таблицы в пространстве образа имели форму, близкую к параллелепипеду. Простое наблюдение состоит в том, что в параллелепипеде все четыре главные диагонали пересекаются в одной точке, являющейся центром каждой из них. Тогда можно предложить следующую идею: рассчитывать K как сумму квадратов расстояний между шестью парами центров диагоналей (и суммировать по всем ячейкам решетки). Если таблица выполняет линейное преобразование, то $K = 0$. Обратное в строгом смысле неверно: если два противоположных узла, находящихся на одной диагонали, будут сдвинуты одновременно в противоположные стороны, то получится некоторый многогранник, у которого по-прежнему все четыре главные диагонали будут пересекаться в одной точке. Тем не менее разумно предположить, что в реальной практике такие частные случаи бу-

дут очень редки и в целом предложенная регуляризация будет решать поставленную задачу.

Поскольку предложенный регуляризатор отражает геометрию решетки и связан с цветовыми различиями, разумно использовать евклидову метрику применительно к измеряемым расстояниям. Квадратичную форму можно записать в стандартном виде

$$K(\mathbf{b}) = \mathbf{b}^T \mathbf{K} \mathbf{b},$$

где \mathbf{K} — квадратная матрица размера $3m \times 3m$, элементы которой соответствуют квадратам расстояний между шестью парами центров диагоналей параллелепипедов соответствующих ячеек.

Для регуляризатора, обеспечивающего сохранение результата отображения в установленных границах в пространстве образа, за основу имеет смысл взять идею, изложенную в работе [15], при этом переформулировав в квадратичную форму:

$$\rho(\mathbf{b}) = \mathbf{b}^T \mathbf{H} \mathbf{b} + 2\mathbf{s}^T \mathbf{b} + t,$$

где \mathbf{H} — квадратная матрица размера $3m \times 3m$; \mathbf{s} и \mathbf{b} — векторы-столбцы, индексированные по парам (c, j) , c — координаты в пространстве образа, например: $c = \{X, Y, Z\}, j = 0, \dots, m-1$; t — вещественное число. Конкретные коэффициенты \mathbf{H} и \mathbf{s} зависят от сценария применения.

Полный функционал для минимизации

Таким образом, полный функционал, который нужно минимизировать в рамках построения оптимизированной таблицы поиска, осуществляющей цветовое преобразование, состоит из следующих частей:

- ошибки цветопередачи;
- регуляризирующих слагаемых, отвечающих за гладкость преобразования, форму ячеек, близкую к параллелепипедам, соблюдение границы цветового охвата.

Ошибка цветопередачи и регуляризирующие слагаемые с соответствующими весами $\lambda_S, \lambda_K, \lambda_\rho$ добавляются в общий функционал, приводя его к виду

$$E(\mathbf{b}) = \mathbf{b}^T (\mathbf{F} + \lambda_S \mathbf{S} + \lambda_K \mathbf{K} + \lambda_\rho \mathbf{H}) \mathbf{b} - 2(\mathbf{g} - \lambda_\rho \mathbf{s})^T \mathbf{b} + h + \lambda_\rho t.$$

Решение задачи минимизации находится в явном виде:

$$\mathbf{b}_{\text{opt}} = (\mathbf{F} + \lambda_S \mathbf{S} + \lambda_K \mathbf{K} + \lambda_\rho \mathbf{H})^{-1} (\mathbf{g} - \lambda_\rho \mathbf{s}).$$

Значение функционала в точке оптимума выглядит следующим образом:

$$E(\mathbf{b}_{opt}) = h + \lambda_\rho t - (\mathbf{g} - \lambda_\rho \mathbf{s})^T \times \\ \times (\mathbf{F} + \lambda_S \mathbf{S} + \lambda_K \mathbf{K} + \lambda_\rho \mathbf{H})^{-1} (\mathbf{g} - \lambda_\rho \mathbf{s}).$$

Определение значений весов в целом эвристическое при решении задачи конкретного типа для таблицы установленного размера и не представляет практической проблемы. Можно отметить, что при подборе весов следует ориентироваться на отношение суммарного вклада регуляризирующих слагаемых E_{reg} в значение полного функционала ошибки

$$E_{reg}(\mathbf{b}) = \mathbf{b}^T (\lambda_S \mathbf{S} + \lambda_K \mathbf{K} + \lambda_\rho \mathbf{H}) \mathbf{b} + 2\lambda_\rho \mathbf{s} \mathbf{b} + \lambda_\rho t$$

к ошибке цветопередачи E_{color} . Эмпирически установленным рекомендуемым диапазоном для данного отношения является $[0,05...0,4]$. Если какой-то вид регуляризации не нужен, то его легко отключить, установив соответствующий вес равным нулю. Полученное выражение универсально с точки зрения используемой оценки цветового различия. В нем может применяться обычная евклидова норма, если нет задачи учета свойств зрения человека, или расстояние в равноконтрастном пространстве (например, ProLab), если такой учет необходим.

Описание и результаты экспериментального исследования

Для экспериментального исследования характеристик предложенного метода построения оптимизированных таблиц поиска были сформулированы следующие задачи.

1. Определить диапазон размеров оптимизированной таблицы, целесообразный для практического использования в колориметрических задачах.

2. Оценить гладкость полученного с помощью оптимизированной таблицы преобразования по сравнению с аналогами.

3. Провести сравнительное исследование точностных характеристик таблиц поиска, полученных с помощью предложенного метода, и оптимизированных таблиц поиска, полученных с помощью существующих известных методов.

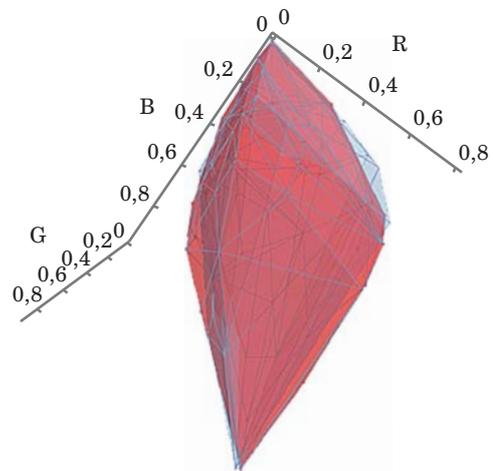
Для построения оптимизированной таблицы поиска и оценки точностных характеристик полученного преобразования необходимо сформировать наборы данных для построения таблицы и ее тестирования. Этой цели могут служить таблицы ColorChecker, содержащие спектральные характеристики цветов. Однако известные таблицы такого рода в первую очередь разработаны для целей цифровой фотографии и мало

подходят для построения таблиц. На рис. 3 показаны цветовые охваты двух наборов: расширенного набора Манселла и SG [22]. Видно, что охватываемая область сосредоточена в центре цветового пространства, содержит мало насыщенных цветов, асимметрична. Все это делает использование ColorChecker для всесторонней задачи оценки цветовых преобразований малопригодным. Альтернативой является построение так называемой спектральной сетки цветов — набора образцов, равномерно покрывающих цветовое пространство.

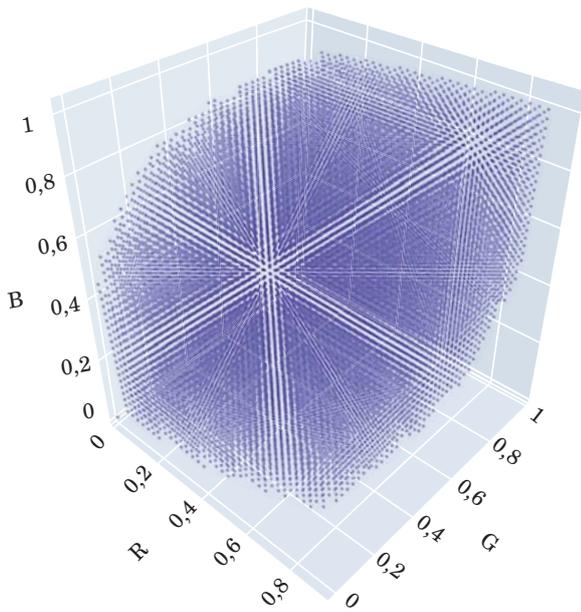
Спектральные сетки строятся с учетом характеристик конкретного сенсора с помощью различных методов [23, 24]. Использованный в данном исследовании метод [24] аппроксимирует спектральную характеристику цвета на основе значений тристимула (любого трехэлементного спецификатора цвета, такого как RGB) и известных характеристик сенсора. На рис. 4 приведен пример спектральной сетки, полученной для сенсора смартфона (тип освещения D65).

Пустые области пространства обусловлены цветовым охватом конкретного сенсора и характеристикой освещения. Исходя из практики, сетки размером $40 \times 40 \times 40$ точек хватает для довольно точной оценки преобразования.

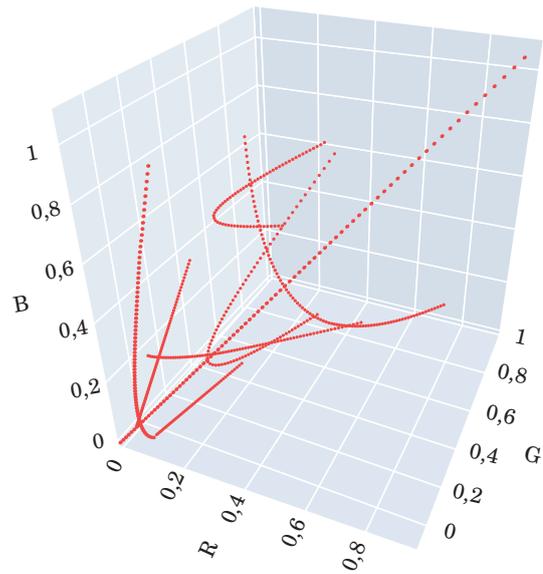
Для тестирования характеристик таблицы также могут быть использованы спектральные сетки с учетом обеспечения очевидного требования — несовпадения координат точек двух сеток. Однако в современной практике для тестирования точности цветокорректирующих преобразований широко используются цветовые градиенты. Последние представляют собой набор, который обычно состоит из 6–8 цветовых по-



■ **Рис. 3.** Выпуклые оболочки наборов цветов расширенного Манселла (красный) и SG (синий)
 ■ **Fig. 3.** Convex shells of the extended Mansell (red) and SG (blue) color sets



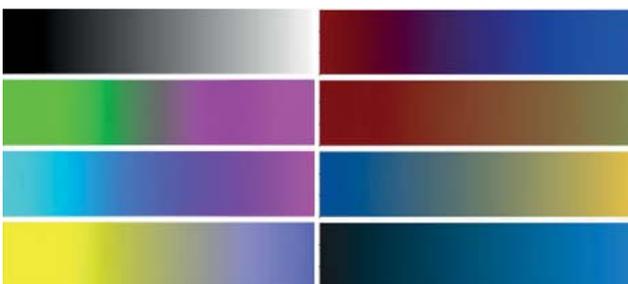
■ **Рис. 4.** Спектральная сетка для сенсора смартфона, тип освещения D65
 ■ **Fig. 4.** Spectral grid for smartphone sensor, D65 illumination type



■ **Рис. 6.** Точки цветовых градиентов в пространстве RGB
 ■ **Fig. 6.** Color gradient points in RGB space

лос. Использование подобного теста удобно для оценки плавности и точности преобразования. Градиенты характеризуются «сложной» формой и расположением в цветовом пространстве. Они могут располагаться вблизи границ и проходить через участки, где преобразование нелинейно. На рис. 5 приведен пример цветовых градиентов, использованных в исследовании, а на рис. 6 показано положение входящих в них цветов в пространстве RGB.

Для решения первой и второй задачи исследования были выбраны аналоги — преобразования, которые на данный момент используются в колориметрических задачах. Один из них — неоптимизированная таблица поиска. Именно неоптимизированные таблицы в основном используют сегодня для цветовых преобразований. В исследовании были задействованы



■ **Рис. 5.** Цветовые градиенты в sRGB
 ■ **Fig. 5.** Color gradients in sRGB

неоптимизированные таблицы трех размеров, наиболее часто используемых в цветовых преобразованиях: $N = 9$, $N = 17$ и $N = 33$. В качестве второго аналога было взято аналитическое рутполиномиальное преобразование, содержащее 18 коэффициентов [3], которое на данный момент является передовым решением и заменяет в устройствах устаревшее линейное преобразование (матричный цветокорректор, содержащий девять элементов).

Исследование характеристик предложенного метода и аналогов проводилось на примере решения задачи преобразования цветовых пространств из зависящего от устройства (сенсора) RGB в XYZ для следующих размеров оптимизированных таблиц: 5, 9, 17. В качестве обучающего набора использовалась спектральная сетка $40 \times 40 \times 40$, в качестве тестового множества — цветовые градиенты. Использовались следующие значения весов: $\lambda_S = 0,001$, $\lambda_K = 0,001$, $\lambda_p = 0,01$. В табл. 1 сведена информация, полученная для всех исследованных преобразований при использовании в качестве типа источника освещения D65. Ошибки соответствуют формуле цветовых различий CIEDE2000.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы. Начиная с размера $N = 9$, оптимизированная таблица обеспечивает удовлетворительные результаты, сопоставимые с неоптимизированной таблицей $N = 33$. В данном размере она превосходит конкурентов: рутполиномиальное преобразование 3×6 и неоптимизированную таблицу размером $N = 17$ — по

■ **Таблица 1.** Точность цветовых преобразований при отображении пространств RGB-XYZ для цветовых градиентов; тип освещения D65

■ **Table 1.** Accuracy of color transformations when displaying RGB-XYZ spaces for color gradients; illumination type D65

Преобразование		Ошибка					
		средняя	мин.	медиан.	90 %	95 %	макс.
Оптимизированная таблица	$N = 5$	1,2	0,04	1	2,35	2,47	8,94
	$N = 9$	0,68	0	0,56	1,43	1,74	3,43
	$N = 17$	0,43	0	0,3	0,94	1,46	2,27
Неоптимизированная таблица	$N = 9$	2,41	0,01	0,9	7,01	9,82	23,42
	$N = 17$	0,95	0	0,48	2,07	2,84	12,62
	$N = 33$	0,46	0	0,27	0,9	1,78	6,4
Рут-полиномиальное 3×6		1,58	0	0,93	4,59	5,61	8,25

всем основным оценкам ошибок. При этом важная для восприятия максимальная ошибка оптимизированной таблицы ниже, чем аналогичная оценка у неоптимизированной таблицы $N = 33$, а 95%-й перцентиль у данных преобразований практически совпадает. Средняя ошибка оптимизированной таблицы $N = 9$ выше, чем у неоптимизированной таблицы $N = 33$, в 1,5 раза, однако при этом она значительно ниже 1 по CIEDE2000, что соответствует практической неразличимости цветов [25].

Для оптимизированной таблицы $N = 9$, неоптимизированной таблицы $N = 17$ и рут-полиномиального преобразования 3×6 были исследованы характеристики при различных источниках освещения. Усредненные результаты сведены в табл. 2.

Для оценки гладкости была использована следующая методика. Для цветовых градиентов оценивалась первая производная ошибки преобразования (выраженная в единицах CIEDE2000). Для каждого преобразования подсчитывалось количество случаев для цветовых градиентов всех освещенностей, когда производная ошибки по отношению к известному

истинному значению превышает значение 2 (порог приемлемости [25]). По числу подобных случаев резкого изменения ошибки выставлялась оценка в баллах. Всего таким образом было рассмотрено 4000 точек (пять типов освещения, восемь цветовых градиентов по 100 цветов каждый). Ожидаемо лучший результат был получен для аналитического преобразования 3×6 (42 балла). Оптимизированная таблица $N = 9$ показала результат 66 баллов, а неоптимизированная получила наихудший результат – 96 баллов. Можно констатировать, что преимущество оптимизированной таблицы над неоптимизированной было достигнуто за счет соответствующей регуляризации.

В целом можно отметить, что точностные характеристики оптимизированной таблицы как минимум сопоставимы или превосходят характеристики неоптимизированной таблицы размером N , соответствующим следующему шагу ($N = 2^n + 1$) (т. е. оптимизированная размером $N = 9$ соответствует неоптимизированной размером $N = 17$, оптимизированная размером $N = 17$ соответствует неоптимизированной размером $N = 33$).

■ **Таблица 2.** Точность цветовых преобразований при отображении пространств RGB-XYZ для цветовых градиентов, усредненная по типам освещения (D65, D50, E, A28, FL.3.11, LED-RGB100)

■ **Table 2.** Accuracy of color transformations when displaying RGB-XYZ spaces for color gradients, averaged by illumination type (D65, D50, E, A28, FL.3.11, LED-RGB100)

Преобразование	Ошибка					
	средняя	мин.	медиан.	90 %	95 %	макс.
Оптимизированная таблица $N = 9$	0,68	0,02	0,54	1,48	1,77	4,43
Неоптимизированная таблица $N = 17$	0,97	0,002	0,44	2,25	3,37	13,89
Рут-полиномиальное 3×6	1,31	0	0,92	3,33	4,07	5,96

Для выполнения третьей задачи был проведен обзор публикаций, посвященных алгоритмам построения оптимизированных таблиц поиска [10–12, 14, 16, 26]. В открытом доступе не удалось найти реализации алгоритмов или достаточно структурированные и подробные их описания, позволяющие в точности провести моделирование. К тому же возникла проблема отсутствия соответствующих исходных данных для построения таблиц. Таким образом выяснилось, что полностью повторить эксперименты, указанные в публикациях, невозможно. Тем не менее в одном из самых цитируемых источников [26] результаты описаны достаточно детально, чтобы выполнить косвенное сравнение алгоритмов.

В [26] представлен ряд алгоритмов построения оптимизированных таблиц поиска. Среди них наиболее высокие точностные характеристики показал алгоритм RESOLVE, в котором осуществляется оптимизация как положения узлов в прообразе, так и значений в образе, т. е. фактически осуществляется самая полная возможная оптимизация. При этом в работе приведены результаты для решения типовой задачи преобразования цветовых пространств, зависящего от устройства (сканера) пространства RGB в CIE Lab. В исследовании не специфицирован конкретный набор данных, но указан его объем, а также точностные характеристики, которые показывают на нем неоптимизированные таблицы поиска определенных размеров. Кроме того, точно не указан тип источника освещения, однако в данном случае можно достаточно уверенно полагать, что при работе используется некоторый близкий к D50–D65 источник, что является стандартным для сканеров [27, 28]. Это дает возможность провести косвенным образом сравнительную оценку предложенного метода и RESOLVE. Очевидно, что неодинаковые КМОП-RGB-сенсоры, применяемые в настоящем ис-

следовании и в [26], имеют некоторые различия в спектральных характеристиках и определяют отличные друг от друга пространства RGB [29]. Однако логично предположить, что сами получаемые отображения из зависимого от устройства RGB в стандартное пространство CIE Lab принципиально похожи и сопоставимы по сложности.

В рамках исследования были выполнены следующие этапы.

1. С опорой на известные данные об объемах использованных в [26] обучающих наборов и на единство принципов построения неоптимизированных таблиц заданного размера были сформированы обучающие наборы, на которых неоптимизированные таблицы обеспечивали сопоставимую точность.

2. Для полученных наборов были рассчитаны результаты оптимизированных таблиц аналогичного размера, построенных по предложенному методу.

В исследовании в качестве типа освещения был использован D65 (стандартный для пространства CIE Lab). Приняты следующие значения весов: $\lambda_S = 0,0001$, $\lambda_K = 0,0001$, $\lambda_p = 0,005$. Реализация первого пункта позволяет говорить о том, что синтезированные наборы данных являются выборками из реализаций сопоставимых по сложности с задействованными в [26] преобразованиями. Данные сведены в табл. 3. В первой и второй строках приведены результаты для неоптимизированных таблиц, построенных в [26] и в данном исследовании соответственно.

Анализ обобщенных результатов исследования показывает, что предложенный метод обеспечивает лучшую точность цветового преобразования по сравнению с аналогом. Кроме того, аналог требует гораздо больше вычислительных ресурсов (поскольку производится оптимизация не только значений, но и узлов) и не имеет аналитического решения.

■ **Таблица 3.** Результаты оценки точности цветовых преобразований для различных наборов цветов и размеров таблиц
 ■ **Table 3.** Results of color transformation accuracy evaluation for different sets of colors and table sizes

Метод	Средняя ошибка (Delta E94)			95%-й перцентиль (Delta E94)		
	350 цветов, N = 6	1200 цветов, N = 8	2000 цветов, N = 12	350 цветов, N = 6	1200 цветов, N = 8	2000 цветов, N = 12
Неоптимизированная таблица [26]	3,14	2,69	6,58	6,90	2,26	6,22
Неоптимизированная таблица	3,04	2,37	8,89	8,42	1,73	4,72
RESOLVE [26]	2,13	1,55	3,46	4,69	1,27	3,36
Оптимизированная таблица	1,15	0,95	2,16	3,06	0,88	2,08

Обсуждение и выводы

Предложенный аналитический метод построения оптимизированной таблицы поиска для цветовых преобразований обладает следующими характеристиками.

1. Метод обеспечивает значительное повышение точности цветопередачи и, как следствие, снижение требований к размеру таблицы по сравнению с неоптимизированными таблицами. Оптимизированные таблицы по своим характеристикам соответствуют или превосходят неоптимизированные с размером, соответствующим следующему шагу n ($N = 2^n + 1$). При этом указанные характеристики обеспечиваются для всех основных типов источников освещения.

2. По сравнению с современными аналогами, применяемыми в телевизионных системах для цветовых преобразований, метод демонстрирует лучшее качество преобразования:

– средняя ошибка цветопередачи оптимизированной таблицы ($N = 9$) на тестовом наборе цветов ниже в 1,5 раза по сравнению с неоптимизированной таблицей поиска ($N = 17$) и в 2 раза по сравнению с рассмотренным рутполиномиальным преобразованием;

– практически в 1,5–4 раза меньший 95%-й перцентиль ошибок на тестовом наборе по сравнению с аналогами;

– благодаря регуляризации предложенный метод на базе таблицы поиска размером $N = 9$ обеспечивает преобразование с показателем

гладкости в 1,5 раза лучше, чем у неоптимизированной таблицы размером $N = 17$.

3. Метод реализует построение оптимизированных таблиц, которые обеспечивают более высокую точность цветовых преобразований по сравнению с оптимизированными таблицами, построенными другими методами, и тем более с неоптимизированными таблицами, при этом предложенный метод отличается большей технологичностью:

– метод обеспечивает аналитическое получение решения, что выгодно отличает его от аналогичных методов, построенных на основе численной минимизации;

– точностные характеристики, превосходящие аналоги, обеспечиваются только за счет оптимизации значений, при этом решетка в образе остается регулярной и равномерной, что делает процесс построения таблицы быстрее, а саму таблицу существенно эффективнее и проще в использовании при реализации в реальной аппаратуре.

Финансовая поддержка

Исследование (а именно часть «Описание и результаты экспериментального исследования») выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации научного проекта по соглашению № 075-15-2024-631.

Литература

1. Carter E. C., Schanda J. D., Hirschler R., Jost S., Luo M. R., Melgosa M., Ohno Y., Pointer M. R., Rich D. C., Viénot F., Whitehead L., Wold J. H. *Colorimetry*. 4th Ed. CIE Central Bureau, Vienna, 2018. doi:10.25039/TR.015.2018
2. Мотько А. А., Обухова Н. А. Метод перцептуальной цветокоррекции. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 3, с. 26–38. doi:10.31799/1684-8853-2023-3-26-38, EDN: ZZTURK
3. Zhao Y., Ferguson S., Zhou H., Elliott C., Rafferty K. Color alignment for relative color constancy via non-standard references. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2022, no. 31, pp. 6591–6604. doi:10.1109/TIP.2022.3214107
4. Suominen J., Egiazarian K. Camera color correction using splines. *Electronic Imaging*, 2024, pp. 165–165-6. doi:10.2352/EI.2024.36.16.COLOR-165
5. Wu P.-Ch., Lin C. A green and practical color photograph printing technology based on color difference model and human perception. *IEEE Access*, 2022, no. 10, pp. 649–666. doi:10.1109/ACCESS.2021.3138270
6. Zeng H., Cai J., Li L., Cao Z., Zhang L. Learning image-adaptive 3D lookup tables for high performance photo enhancement in real-time. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2022, no. 4, pp. 2058–2073. doi:10.1109/TPAMI.2020.3026740
7. Fei W., Wei W., Dan W., Guowang G. Color constancy via multi-scale region-weighted network guided by semantics. *Frontiers in Neurobotics*, 2022, no. 16, pp. 1–15. doi:10.3389/fnbot.2022.841426
8. Меженин А. В., Паук М. А. Снижение проявления визуальных артефактов при использовании трехмерных таблиц преобразования цветов с учетом расширенного динамического диапазона. *Культура и технологии*, 2023, т. 8, № 4, с. 204–211. doi:10.17586/2587-800X-2023-8-4-204-211
9. Kang H. R. *Color Technology for Electronic Imaging Devices*. SPIE Press, 1997. 369 p.
10. Reinhard J., Urban P. Perceptually optimizing color look-up tables. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2023, no. 32, pp. 403–414. doi:10.1109/TIP.2022.3228498
11. Srivastava S., Delp E., Ha T., Allebach J. Color management using optimal three-dimensional look-

- up tables. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2010, vol. 54, iss. 3, pp. 030402-1–030402-14. doi:10.2352/J.ImagingSci.Technol.2010.54.3.030402
12. **Monga V., Bala R.** Algorithms for color look-up-table (LUT) design via joint optimization of node locations and output values. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Dallas, TX, USA, 2010, pp. 998–1001. doi:10.1109/ICASSP.2010.5495312
 13. **Martins J., Ning A.** *Engineering Design Optimization*. Cambridge University Press, 2021. 651 p. doi:10.1017/9781108980647
 14. **Garcia E., Gupta M.** Optimized construction of ICC profiles by lattice regression. *Final Program and Proceedings – IS and T/SID Color Imaging Conference*, 2010, pp. 353–358. doi:10.2352/CIC.2010.18.1.art00062.a
 15. **Ivanova A., Pasechnyuk D., Grishchenko D., Shulgin E., Gasnikov A., Matyukhin V.** Adaptive catalyst for smooth convex optimization. *Proceedings of 12th International Conference “Optimization and Applications” OPTIMA 2021*, Petrovac, Montenegro, September 27–October 1, 2021. Lecture Notes in Computer Science, 2021, vol. 13078, pp. 20–37. doi:10.1007/978-3-030-91059-4_2
 16. **Yang C., Jin M., Jia X., Xu Y., Chen Y.** Adaint: Learning adaptive intervals for 3D lookup tables on real-time image enhancement. *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2022, pp. 17501–17510. doi:10.1109/CVPR52688.2022.01700
 17. **Konovalenko I. A., Smagina A. A., Nikolaev D. P., Nikolaev P. P.** ProLab: perceptually uniform projective colour coordinate system. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 133023–133042. doi:10.1109/ACCESS.2021.3115425
 18. **Behrens J.** *Deficiencies of the CIE-L*a*b* color space and introduction of the SRLAB2 color model*. <https://www.magnetkern.de/srlab2.pdf> (дата обращения: 02.09.2024).
 19. **Ottosson B.** *A perceptual color space for image processing*. <https://bottosson.github.io/posts/oklab> (дата обращения: 02.09.2024).
 20. **Sharma G., Wu W., Dalal N.** The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color Research & Application*, 2005, vol. 30, no. 1, pp. 21–30.
 21. **Mirjalili F., Luo M. R., Cui G., Morovic J.** Color-difference formula for evaluating color pairs with no separation Δ ENS. *Journal of the Optical Society of America A*, 2019, no. 5, pp. 789–799. doi:10.1364/JOSAA.36.000789
 22. **Fernandez P. D. M., Guerrero-Pena F. A., Ren T. I., Leandro J. J. G.** Fast and robust multiple colorchecker detection using deep convolutional neural networks. *Image and Vision Computing*, 2019, no. 81, pp. 15–24. doi:10.1016/j.imavis.2018.11.001
 23. **Wenzel J., Hanika J.** A low-dimensional function space for efficient spectral upsampling. *Computer Graphics Forum (Proceedings of Eurographics)*, 2019, vol. 38, no. 2, pp. 1–9. doi:10.1111/cgf.13626
 24. **Burns S.** *Generating reflectance curves from sRGB triplets*. <https://scottburns.us/reflectance-curves-from-srgb-10/> (дата обращения: 02.09.2024).
 25. **Kim A-Ri, Kim H.-S., Park S.** Measuring of the perceptibility and acceptability in various color quality measures. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2011, vol. 15, no. 3, pp. 310–317. doi:10.3807/JOSK.2011.15.3.310
 26. **Monga V., Bala R., Mo X.** Design and optimization of color lookup tables on a simplex topology. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, vol. 21, no. 4, pp. 1981–1996. doi:10.1109/TIP.2011.2177848
 27. **Shen H. L., Xin J. H.** Spectral characterization of a color scanner based on optimized adaptive estimation. *J. Opt. Soc. Am.*, 2006, vol. 23, pp. 1566–1569. doi:10.1364/josaa.23.001566
 28. **Xinmeng Z., Guihua C., Xiukai R., Di C., Xiaohong G., Qifan C., Yuan Y., Manuel M., Suchitra S.** Spectral reflectance reconstruction based on wideband multi-illuminant imaging and a modified particle swarm optimization algorithm. *Optics Express*, 2024, vol. 32, no. 3, pp. 2942–2958. doi:10.1364/OE.506136
 29. **Nakamura J.** *Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras*. CRC Press, Inc., USA, 2005. 370 p.

UDC 654.1

doi:10.31799/1684-8853-2025-1-9-22

EDN: KRAQDO

Method for synthesizing optimized lookup tables for color transformationsA. A. Motyko^{a,b}, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0003-4241-4298N. A. Obukhova^{a,b}, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0003-1953-2085, natalia172419@yandex.ruY. V. Yakubovich^a, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-9922-0593^aSaint-Petersburg State University, 7-9, Universitetskaya Emb., 199034, Saint-Petersburg, Russian Federation^bSaint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», 5, Prof. Popov St., 197376, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Color transformations are widely used in television systems. One of the most popular and demanded ways to implement color transformations are three-dimensional lookup tables. At the same time, the existing methods of creating lookup tables are characterized with a number of drawbacks. **Purpose:** To develop an analytical method for constructing optimized three-dimensional lookup tables with specified properties (providing smoothness of transformation, possibility of construction at incomplete coverage of mapped spaces by initial data, etc.) and taking into account the existing drawbacks in regularization approaches. **Results:** We propose a

new analytical method for constructing optimized lookup tables for color transformations. The method provides obtaining optimized tables, which by their characteristics correspond or surpass the non-optimized tables with the size corresponding to the next step n ($N = 2^n + 1$) and at the same time provide better smoothness of transformation. Compared to state-of-the-art counterparts used in television systems for color transformations, the method exhibits 1.5 to 2 times lower mean error and 1.5 to 4 times lower 95% error percentile. The method provides high accuracy of color transformations and has good manufacturability due to obtaining an analytical solution. Providing better accuracy compared to similar methods of optimized table construction, the proposed method keeps the table lattice in the prototype regular and uniform, which makes the construction process faster, and the table itself is significantly more efficient and easier to use when implemented in real devices. **Practical relevance:** The method can be applied in the development of television systems where high color reproduction accuracy is required.

Keywords – color transformations, color correction, 3D lookup tables, optimized 3D LUTs, equal-contrast spaces.

For citation: Motyko A. A., Obukhova N. A., Yakubovich Y. V. Method for synthesizing optimized lookup tables for color transformations. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2025, no. 1, pp. 9–22 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2025-1-9-22, EDN: KRAQDO

Financial support

The study (namely the part “Description and results of the experimental study”) was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of a scientific project under agreement No. 075-15-2024-631.

References

- Carter E. C., Schanda J. D., Hirschler R., Jost S., Luo M. R., Melgosa M., Ohno Y., Pointer M. R., Rich D. C., Viénot F., Whitehead L., Wold J. H. *Colorimetry*. 4th Ed. CIE Central Bureau, Vienna, 2018. doi:10.25039/TR.015.2018
- Motyko A. A., Obukhova N. A. The method for perceptual color correction. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 3, pp. 26–38 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-3-26-38, EDN: ZZTURK
- Zhao Y., Ferguson S., Zhou H., Elliott C., Rafferty K. Color alignment for relative color constancy via non-standard references. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2022, no. 31, pp. 6591–6604. doi:10.1109/TIP.2022.3214107
- Suominen J., Egiazarian K. Camera color correction using splines. *Electronic Imaging*, 2024, pp. 165-1-165-6. doi:10.2352/EI.2024.36.16.COLOR-165
- Wu P.-Ch., Lin C. A green and practical color photograph printing technology based on color difference model and human perception. *IEEE Access*, 2022, no. 10, pp. 649–666. doi:10.1109/ACCESS.2021.3138270
- Zeng H., Cai J., Li L., Cao Z., Zhang L. Learning image-adaptive 3D lookup tables for high performance photo enhancement in real-time. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2022, no. 4, pp. 2058–2073. doi:10.1109/TPAMI.2020.3026740
- Fei W., Wei W., Dan W., Guowang G. Color constancy via multi-scale region-weighted network guided by semantics. *Frontiers in Neurobotics*, 2022, no. 16, pp. 1–15. doi:10.3389/fnbot.2022.841426
- Mejenin A. V., Pauk M. A. Reducing visual artifacts when using 3d-lut with usage of high dynamic range technology. *International Culture & Technology Studies*, 2023, vol. 8, no. 4, pp. 204–211 (In Russian). doi:10.17586/2587-800X-2023-8-4-204-211
- Kang H. R. *Color Technology for Electronic Imaging Devices*. SPIE Press, 1997. 369 p.
- Reinhard J., Urban P. Perceptually optimizing color look-up tables. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2023, no. 32, pp. 403–414. doi:10.1109/TIP.2022.3228498
- Srivastava S., Delp E., Ha T., Allebach J. Color management using optimal three-dimensional look-up tables. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2010, vol. 54, iss. 3, pp. 030402-1–030402-14. doi:10.2352/J.ImagingSci.Tech.2010.54.3.030402
- Monga V., Bala R. Algorithms for color look-up-table (LUT) design via joint optimization of node locations and output values. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Dallas, TX, USA, 2010, pp. 998–1001. doi:10.1109/ICASSP.2010.5495312
- Martins J., Ning A. *Engineering Design Optimization*. Cambridge University Press, 2021. 651 p. doi:10.1017/9781108980647
- Garcia E., Gupta M. Optimized construction of ICC profiles by lattice regression. *Final Program and Proceedings – IS and T/SID Color Imaging Conference*, 2010, pp. 353–358. doi:10.2352/CIC.2010.18.1.art00062.a
- Ivanova A., Pasechnyuk D., Grishchenko D., Shulgin E., Gasnikov A., Matyukhin V. Adaptive catalyst for smooth convex optimization. *Proceedings of 12th International Conference “Optimization and Applications” OPTIMA 2021*. Lecture Notes in Computer Science, 2021, vol. 13078, pp. 20–37. doi:10.1007/978-3-030-91059-4_2
- Yang C., Jin M., Jia X., Xu Y., Chen Y. Adaint: Learning adaptive intervals for 3D lookup tables on real-time image enhancement. *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2022, pp. 17501–17510. doi:10.1109/CVPR52688.2022.01700
- Konovaleiko I. A., Smagina A. A., Nikolaev D. P., Nikolaev P. P. ProLab: Perceptually uniform projective colour coordinate system. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 133023–133042. doi:10.1109/ACCESS.2021.3115425
- Behrens J. *Deficiencies of the CIE-L*a*b* color space and introduction of the SRLAB2 color model*. Available at: <https://www.magnetkern.de/srlab2.pdf> (accessed 02 October 2024).
- Ottosson B. *A perceptual color space for image processing*. Available at: <https://bottosson.github.io/posts/oklab> (accessed 02 October 2024).
- Sharma G., Wu W., Dalal N. The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color Research & Application*, 2005, vol. 30, no. 1, pp. 21–30.
- Mirjalili F., Luo M. R., Cui G., Morovic J. Color-difference formula for evaluating color pairs with no separation ΔENS. *Journal of the Optical Society of America A*, 2019, no. 5, pp. 789–799. doi:10.1364/JOSAA.36.000789
- Fernandez P. D. M., Guerrero-Pena F. A., Ren T. I., Leandro J. J. G. Fast and robust multiple colorchecker detection using deep convolutional neural networks. *Image and Vision Computing*, 2019, no. 81, pp. 15–24. doi:10.1016/j.imavis.2018.11.001
- Wenzel J., Hanika J. A low-dimensional function space for efficient spectral upsampling. *Computer Graphics Forum (Proceedings of Eurographics)*, 2019, vol. 38, no. 2, pp. 1–9. doi:10.1111/cgf.13626
- Burns S. *Generating reflectance curves from sRGB triplets*. Available at: <https://scottburns.us/reflectance-curves-from-srgb-10/> (accessed 02 October 2024).
- Kim A.-Ri, Kim H.-S., Park S. Measuring of the perceptibility and acceptability in various color quality measures. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2011, vol. 15, no. 3, pp. 310–317. doi:10.3807/JOSK.2011.15.3.310
- Monga V., Bala R., Mo X. Design and optimization of color lookup tables on a simplex topology. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, vol. 21, no. 4, pp. 1981–1996. doi:10.1109/TIP.2011.2177848
- Shen H. L., Xin J. H. Spectral characterization of a color scanner based on optimized adaptive estimation. *J. Opt. Soc. Am.*, 2006, vol. 23, pp. 1566–1569. doi:10.1364/josaa.23.001566
- Xinmeng Z., Guihua C., Xiukai R., Di C., Xiaohong G., Qifan C., Yuan Y., Manuel M., Suchitra S. Spectral reflectance reconstruction based on wideband multi-illuminant imaging and a modified particle swarm optimization algorithm. *Optics Express*, 2024, vol. 32, no. 3, pp. 2942–2958. doi:10.1364/OE.506136
- Nakamura J. *Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras*. CRC Press, Inc., USA, 2005. 370 p.