МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ 🛛 💳 🕬

О точности цветопередачи при поканальном моделировании подводных изображений ¹

Д.А. Шепелев*,**

*Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, Россия **Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия Поступила в редколлегию 18.09.2020

Аннотация—В данной работе исследуются вопросы точности при поканальном моделировании цветных подводных изображений по наземным изображениям для демонстрации человеку с помощью дисплея. В работе предлагается алгоритм имитации таких подводных изображений, основанный на поканальной аппроксимации закона Бугера-Ламберта-Бера в калибровочных координатах цветов. В работе исследуется, как выбор калибровочных координат влияет на точность этого алгоритма. Рассматривается два типа калибровочных координат: первые, называемые тривиальными, совпадают с цветовыми координатами неоткалиброванного сенсора; вторые, называемые спектрозональными, находятся с помощью спектрозональной модели. На наборе данных, состоящих из 3 сенсоров, 350 окрасок Кринова и 10 типов вод по Ерлову, были проведены численные эксперименты по имитации подводных изображений, которые показали, что средняя ошибка цветопередачи предложенного алгоритма со спектрозональной калибровкой оказывается на 29% меньше чем с тривиальной. В работе вводится понятие сенсоров, связанных условием Максвелла-Лютера-Айвза. Показано, что для таких сенсоров результаты поканального моделирования в соответствующих спектрозональных координатах совпадают.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подводная фотография, имитационное моделирование подводных изображений, цветовые искажения, улучшение подводных изображений, аугментация цветных изображений, синтез тестовых данных, спектральные модели.

1. ВВЕДЕНИЕ

Алгоритмы анализа и улучшения подводных изображений (ПИ) в настоящее время используются при автоматическом обследовании подводных объектов [1], разработке систем предотвращения утопления [2], исследовании и визуализации подводных археологических артефактов [3-5] и в других специальных приложениях. Кроме того, распространение работоспособных под водой смартфонов делает эти алгоритмы востребованными и в вычислительной фотографии.

При разработке алгоритмов обработки изображений, в том числе подводных, требуются формальные критерии, оценивающие качество их результата. Это нужно и для ранжирования алгоритмов, и для оптимизации алгоритмов по их параметрам, и для определения того, была ли задача решена с должным качеством. Формальной оценкой качества работы алгоритма служит та или иная статистика (например, среднее значение) некоторой метрики качества, определенной для одного выходного изображения. Как правило эта оценка вычисляется на множестве изображений, в котором для каждого входного изображения задано идеальное целевое изображение, с которым и сравнивается результат работы алгоритма [7]. В настоящий момент для получения такого набора изображений обычно используются методы имитационного моделирования ПИ на основе надводных изображений [8-20]. Эти методы при моделировании ослабления света под водой используют поканальную аппроксимацию закона Бугера-Ламберта-Бера.

 $^{^1}$ Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №20-61-47089

О ТОЧНОСТИ ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ ПРИ ПОКАНАЛЬНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПИ 255

В работе [7], по-видимому, впервые обсуждается вопрос о том, что точность моделирования на основе поканальной аппроксимации зависит от выбора системы координат различаемых сенсором цветов, в которой она производится. В частности, если при поканальном моделировании ПИ в некоторой системе координат цветов (СКЦ) результаты моделирования совпадают с идеальными, то при моделировании в другой СКЦ соответствующие результат моделирования и идеал в общем случае не совпадут [7]. Почти во всех работах [9-20], авторы явно не указывают СКЦ моделирования, что не позволяет верифицировать их результаты.

В работе [7] предложен способ оптимизировать точность расчета ПИ, выбирая СКЦ из некоторого семейства. Конкретно в [7] для этого предлагалось перебирать спектрозональные модели с различными параметрами [21-23]. В той же работе с помощью численного моделирования показано, что среднее значение угловой ошибки репродукции [24] метода на основе спектрозональной модели меньше, чем у метода на основе поканальной аппроксимации в СКЦ неоткалиброванного сенсора.

В работе [7] угловая ошибка репродукции измерялась в СКЦ неоткалиброванного сенсора, но в работе явно не описывались требования к результатам расчетов ПИ и, как следствие, не приведено обоснование выбора конкретной функции ошибки. В данной работе на примере задачи расчета имитации ПИ, которая затем будет предъявлена человеку с помощью дисплея, показано, как для такой задачи может быть построена и обоснована функция ошибки. Предлагается алгоритм имитации таких ПИ на основе поканального моделирования в некоторой калибровочной СКЦ. Вводится ошибка цветопередачи алгоритма моделирования, и исследуется вопрос, как выбор калибровочной СКЦ может влиять на результаты поканального моделирования и на итоговую ошибку цветопередачи предложенного алгоритма. С помощью численных экспериментов, проведенных на наборе открытых спектральных данных, состоящих из 3 сенсоров, 350 окрасок Кринова и 10 типов вод по Ерлову, показывается, что ошибка цветопередачи алгоритма на основе поканального моделирования в калибровочной СКЦ, найденной с помощью спектрозональной модели, оказывается меньше, чем в тривиальной калибровочной СКЦ, совпадающей с СКЦ неоткалиброванного сенсора.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Вернемся к задаче улучшения ПИ. Существуют такие постановки задач улучшения ПИ, когда ПИ улучшаются для демонстрации человеку, как, например, при визуализации подводных археологических артефактов [4,5] или в вычислительной фотографии [25]. В таких случаях, качество улучшения ПИ должно оцениваться с помощью метрик, связанных с восприятием человеком цветовых различий. Так, например, в работе [26] для оценки качества улучшения используется метрика CIEDE2000 [27,28].

Во ведении уже было упомянуто, что тестирование и настройка параметров алгоритма улучшения ПИ может производится на имитационном наборе изображений. Поэтому возникает вопрос, как в таком случае должны быть выбраны метрики, оценивающие точность имитации ПИ: эти метрики также должны быть связаны с цветовым восприятием человека и должны вычисляться в соответствующем цветовом пространстве, или же эти метрики могут быть выбраны произвольно и, например, вычисляться в цветовом пространстве сенсора, как в работе [7]? Ответа на этот вопрос в литературе нет, и, чтобы понять какой из рассмотренных вариантов лучше, нужно каждый исследовать на практике.

В работе [7] исследовался вопрос моделирования ПИ в СКЦ неоткалиброванного сенсора. В данной работе рассматривается задача моделирования ПИ с целью *показать изображение человеку с помощью дисплея* (см. рис. 1). В этом случае целевое цветовое пространство может не совпадать с исходным цветовым пространством сенсора, поэтому перед визуализацией цвета изображения из исходного цветового пространства должны быть отображены в целевое. В

качестве целевых цветовых пространств в таких случаях обычно выбирают или цветовое пространство стандартного наблюдателя CIE, или цветовое пространство, из которого дисплей будет визуализировать цвета изображения. Последние цветовые пространства, например, широко используемое sRGB [29], обычно некоторым известным образом связаны с пространством стандартного наблюдателя CIE.



Рис. 1. Схема процесса съемки и обработки ПИ для его показа человеку с помощью дисплея.

В данной работе, следуя [30], мы будем различать понятия цветового пространства и координат цветов в этом пространстве. Множество спектров неразличимых для сенсора называются метамерными. Метамерные спектры вызывают у сенсора одинаковое цветовое ощущение, называемое просто цветом. Под цветовым пространством мы будем понимать совокупность множеств метамерных спектров с соответствующими им цветами. Для картирования цветов используются различные координатные системы. В любой из них координаты цвета c связаны с соответствующей спектральной яркостью излучения $C(\lambda)$, падающего на сенсор, некоторым функционалом. Как и в [7], в данной работе для моделирования координат цветов в СКЦ неоткалиброванного сенсора используется линейная модель сенсора

$$\boldsymbol{c} = \int C(\lambda) \, \boldsymbol{\chi}(\lambda) \, d\lambda, \tag{1}$$

где $C(\lambda)$ – спектральная яркость излучения, падающего на сенсор; $\chi(\lambda)$ – вектор-функция чувствительности сенсора; c – отклик неоткалиброванного сенсора, который представляет собой координаты цвета излучения $C(\lambda)$ в СКЦ неоткалиброванного сенсора. Далее СКЦ неоткалиброванного сенсора будет называться естественной СКЦ сенсора.

Определение 1. Сенсор называется *колориметрическим*, если компоненты вектор-функции чувствительности сенсора $\chi(\lambda)$ совпадают с компонентами вектор-функции цветового соответствия стандартного наблюдателя СІЕ $\chi^{\circ}(\lambda)$ или являются их линейно независимыми линейными комбинациями.

Из определения колориметрического сенсора следует, что существует обратимая матрица X, называемая колориметрической матрицей сенсора $\chi(\lambda)$, такая что

$$\boldsymbol{\chi}^{\circ}(\lambda) = X \, \boldsymbol{\chi}(\lambda). \tag{2}$$

Кроме того, в случае колориметрического сенсора, цвета в его СКЦ линейно связаны с цветами в СКЦ стандартного наблюдателя СІЕ, что может быть выражено как

$$\boldsymbol{c}^{\circ} = X \, \boldsymbol{c}. \tag{3}$$

где c – цвет в СКЦ колориметрического сенсора $\chi(\lambda)$; c° – цвет в СКЦ стандартного наблюдателя $\chi^{\circ}(\lambda)$.

В общем случае, сенсор камеры $\chi(\lambda)$ не является колориметрическим, т.е. не для любого сенсора существует матрица X, удовлетворяющая условию (2), известному из литературы как условие Айвза или критерий Максвелла-Лютера [31-33]. Несмотря на это, в случае бытовых

камер, снимающих в видимом диапазоне, для приближенного перехода в СКЦ стандартного наблюдателя обычно используют линейное преобразование цветов

$$\boldsymbol{c}' = M \, \boldsymbol{c},\tag{4}$$

где M – обратимая матрица, которая называется матрицей цветовой коррекции или цветокорректирующей матрицей. Цветокорректирующие матрицы поставляются производителем камеры и хранятся в соответствующем контейнере с необработанным изображением, например, как в случае DNG контейнера [34]. В зависимости от условий съемки для обеспечения хорошей цветопередачи могут использоваться разные цветокорректирующие матрицы.

3. МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ЦВЕТНЫХ ПИ

Освещенность сенсора под водой $W(\lambda)$ можно представить в виде суммы двух компонент, формирующихся независимо, а именно [7]:

$$W(\lambda) = D(\lambda) + B(\lambda), \tag{5}$$

где λ – длина волны; $D(\lambda)$ – прямая компонента, обусловленная ослабленным водой излучением объекта; $B(\lambda)$ – компонента обратного рассеяния.

Модель формирования прямой компоненты описывается законом Бугера-Ламберта-Бера:

$$D(\lambda) = C(\lambda) T(\lambda),$$

$$T(\lambda) = e^{-\beta(\lambda)\rho},$$
(6)

где $C(\lambda)$ – спектральная яркость излучения объекта; $T(\lambda)$ – спектральное пропускание среды; ρ – расстояние между оптическим центром камеры и точкой объекта, спроецированной в точку на изображении; $\beta(\lambda)$ – показатель ослабления.

Для моделирования изображения w в естественной СКЦ сенсора выражение (5) необходимо проинтегрировать, что дает:

$$\boldsymbol{w}(C(\lambda), T(\lambda), B(\lambda)) = \boldsymbol{d}(C(\lambda), T(\lambda)) + \boldsymbol{b}(B(\lambda)),$$
$$\boldsymbol{d}(C(\lambda), T(\lambda)) = \int C(\lambda) T(\lambda) \boldsymbol{\chi}(\lambda) d\lambda,$$
$$\boldsymbol{b}(B(\lambda)) = \int B(\lambda) \boldsymbol{\chi}(\lambda) d\lambda,$$
(7)

где $\chi(\lambda)$ – вектор-функция чувствительностей сенсора; d – изображение прямой компоненты; b – изображение компоненты обратного рассеяния.

Как уже было сказано в предыдущей секции, согласно (4) цвет *w* для визуализации линейным образом преобразуется в скорректированную СКЦ:

$$\boldsymbol{w}' = M \, \boldsymbol{w} = M \, \boldsymbol{d} + M \, \boldsymbol{b}. \tag{8}$$

Из (7) следует, что d' = M d и b' = M b могут быть смоделированы независимо, и поэтому вопросы их моделирования можно рассматривать отдельно друг от друга. В этой работе исследуется точность методов моделирования изображения только прямой компоненты d' в скорректированной СКЦ:

$$\boldsymbol{d}'\big(C(\lambda),T(\lambda)\big) = M\,\boldsymbol{d}\big(C(\lambda),T(\lambda)\big) = M\,\int C(\lambda)\,\boldsymbol{\chi}(\lambda)\,\boldsymbol{\chi}(\lambda)\,d\lambda. \tag{9}$$

Для заданных $C(\lambda)$ и $T(\lambda)$ будем называть изображение прямой компоненты $d'(C(\lambda), T(\lambda))$ референсным.

Согласно выражению (9) для моделирования прямой компоненты, помимо спектрального пропускания $T(\lambda)$ и вектор-функций чувствительности сенсора $\chi(\lambda)$ с калибровочной матрицей M, необходимо знать $C(\lambda)$. В существующих работах [7-20] вместо $C(\lambda)$ используют координаты цветов наземных изображений, что не позволяет прямо воспользоваться выражением (9). Поэтому в этих работах для моделирования прямой компоненты используют алгоритмы на основе поканального моделирования, которое будет подробно рассмотрено далее. Однако прежде покажем, как может быть введена функция ошибки моделирования для таких алгоритмов, вычисляющих ПИ для демонстрации человеку на дисплее на основе наземного изображения.

4. ОШИБКА ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ АЛГОРИТМОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПИ

Пусть $\chi(\lambda)$ – вектор-функция чувствительности сенсора; $C(\lambda)$ – спектральная яркость излучения объекта под водой; $c(C(\lambda))$ – соответствующее $C(\lambda)$ изображение в естественной СКЦ сенсора $\chi(\lambda)$, вычисленное по формуле (1); $T(\lambda)$ – спектральное пропускание; $d'(C(\lambda), T(\lambda))$ – референсное изображение прямой компоненты, вычисленное по формуле (9); $f'(c(C(\lambda)), T(\lambda))$ – результат некоторого алгоритма моделирования ПИ на основе изображения $c(C(\lambda))$ и спектрального пропускания $T(\lambda)$.

Определение 2. Ошибкой цветопередачи алгоритма моделирования прямой компоненты f' на $C(\lambda)$ и $T(\lambda)$ будем называть следующую функцию

$$\varepsilon_{\boldsymbol{f}'}\big(C(\lambda), T(\lambda)\big) = E\Big(\boldsymbol{d}'\big(C(\lambda), T(\lambda)\big), \boldsymbol{f}'\big(\boldsymbol{c}(C(\lambda)), T(\lambda)\big)\Big).$$
(10)

где $E: \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}^+$ – некоторая функция цветового различия.



Рис. 2. Результаты расчетов согласно модели (9) наблюдаемых стандартным наблюдателем СІЕ цветности (изображение слева) и яркости (изображение справа) изображения прямой компоненты белой поверхности для 10 типов вод по Ерлову [35] и глубин погружения (от 1 до 10 метров).

В работах [7,25] в качестве функции цветового различия используются угловые метрики ошибок, которые учитывают ошибки в цветности, но не учитывают ошибки в яркости. Такие ошибки широко используются при решении задач определения цветности освещения в сцене. Однако, выбор угловых метрик для оценки точности методов моделирования ПИ не всегда

О ТОЧНОСТИ ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ ПРИ ПОКАНАЛЬНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПИ 259

оправдан, так как под водой вместе с увеличением глубины погружения и расстояния до камеры заметно деградирует не только цветность объектов, но и их яркость (см. рис. 2). Поэтому в данной работе в качестве функции цветового различия вместо угловых ошибок предлагается использовать функцию CIEDE2000 [27, 28], которая не только учитывает ошибку в яркости, но и наилучшим образом соответствует ощущаемой человеком разнице между цветами.

5. ПОКАНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПИ НА ОСНОВЕ НАЗЕМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Вернемся к проблеме моделирования ПИ на основе наземных изображений. В работах [8-20] вместо $C(\lambda)$ используются наземные изображения, и изображение прямой компоненты моделируется поканально следующим образом:

$$\widetilde{d} = c \otimes t,$$
 (11)

где \otimes – почленное умножение; c – отклик в некоторой СКЦ; t – вектор параметров в той же СКЦ. Однако в этих работах исследователи не указывают, в какой СКЦ моделируется прямая компонента.

В работе [7] предполагается, что наземные изображения заданы в естественной СКЦ сенсора, и вектор параметров пропускания вычисляется как:

$$\boldsymbol{t} = \int T(\lambda) \, \boldsymbol{\chi}(\lambda) d\lambda. \tag{12}$$

Там же было показано, что результаты поканального моделирования зависят от выбора СКЦ, в которых оно производится.

5.1. Поканальное моделирование в калибровочных координатах

Пусть c – изображение в СКЦ сенсора; t – вектор пропускания, вычисленный по формуле (12). Рассмотрим случай, когда моделирование производится не в исходной СКЦ сенсора, а в некоторой калибровочной СКЦ:

$$\boldsymbol{p}_d = \boldsymbol{L}^{-1} \, \boldsymbol{c} \otimes \boldsymbol{L}^{-1} \, \boldsymbol{t}, \tag{13}$$

где L – некоторая обратимая матрица преобразования координат цветов, называемая далее калибровочной матрицей; p_d – результат поканального моделирования прямой компоненты в калибровочной СКЦ. Будем называть расчеты по формуле (13) поканальным моделированием в калибровочных координатах. Калибровочная матрица L преобразует координаты цветов из калибровочной СКЦ в СКЦ сенсора. Для того чтобы представить результат поканального моделирования прямой компоненты в координатах исходного сенсора, необходимо преобразовать результат поканального моделирования в калибровочных координатах следующим образом:

$$\hat{\boldsymbol{d}} = L \boldsymbol{p}_d = L \left(L^{-1} \boldsymbol{c} \otimes L^{-1} \boldsymbol{t} \right).$$
(14)

В случае тривиальной калибровки, когда матрица L является единичной E, результаты расчетов по формуле (13) совпадут с расчетами по формуле (11). В работе [7] был предложен способ калибровки на основе спектрозональной модели и показано, что результаты поканального моделирования со спектрозональной калибровкой оказываются точнее по сравнению с тривиальной калибровкой.

5.2. Спектрозональная калибровочная матрица

Основным ограничением спектрозональной модели является допущение, что любая спектральная функция $C(\lambda)$ может быть представлена следующим образом:

$$C(\lambda) = \boldsymbol{p}^T \, \boldsymbol{\delta}(\lambda), \tag{15}$$

где p – вектор параметров, а $\delta(\lambda)$ спектральная вектор-функция следующего вида:

$$\delta_i(\lambda) = \begin{cases} 1, & \text{если } \lambda \subset \Delta_i \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$
(16)

где { Δ_i } такие, что $i \neq j$: $\Delta_i \cap \Delta_j = \emptyset$. Далее будем считать, что { Δ_i } лежат внутри видимого диапазона сенсора. Функции $\delta_i(\lambda)$ образуют базис в пространстве спектральных функций, а вектор **p** представляет собой координаты спектральной функции $C(\lambda)$ в этом базисе. Легко показать [7], что цвета из СКЦ сенсора линейно связаны с параметрами спектрозональной модели:

$$\boldsymbol{c} = L \, \boldsymbol{p},\tag{17}$$

где L – матрица преобразования параметров в отклики в СКЦ сенсора. Каждый элемент матрицы L_{ij} вычисляется по формуле:

$$L_{ij} = \int_{\Delta_j} \chi_i(\lambda) \, d\lambda. \tag{18}$$

Далее такую матрицу будем называть спектрозональной матрицей сенсора. В [7] спектрозональная матрица используется в качестве калибровочной матрицы. Заметим, что при фиксированных параметрах спектрозональной модели спектрозональные калибровочные матрицы для любого сенсора определяются однозначным образом.

5.3. Алгоритм на основе поканального моделирования в калибровочных координатах

В данной работе на основе поканального моделирования в калибровочных координатах предлагается следующий алгоритм имитации прямой компоненты ПИ, которое затем будет демонстрироваться человеку с помощью дисплея. Пусть на входе алгоритма даны наземное изображение в естественной СКЦ сенсора c и спектральное пропускание $T(\lambda)$. Тогда алгоритм вычисляет изображение прямой компоненты следующим образом:

- 1. По $T(\lambda)$ вычисляется вектор пропускания t согласно (12).
- 2. Координаты цветов *с* и *t* преобразовываются в калибровочные координаты цветов:

$$p_c = L^{-1} c, \ p_t = L^{-1} t.$$

3. Изображение прямой компоненты p_d в калибровочной СКЦ вычисляется через почленное перемножение векторов p_c и p_t :

$$\boldsymbol{p}_d = \boldsymbol{p}_c \otimes \boldsymbol{p}_t.$$

4. Результат переводится в СКЦ сенсора:

$$\boldsymbol{d} = L \boldsymbol{p}_d.$$

5. Затем производится цветовая коррекция:

$$\hat{d}' = M d.$$

Далее этот алгоритм будем называть алгоритмом поканального моделирования (АПМ) в калибровочных координатах. Результаты работы этого алгоритма будем обозначать как $d'_L(c, T(\lambda))$.

Далее будем рассматривать два вида калибровочных матриц: тривиальные (когда калибровочная матрица равна единичной) и спектрозональные. Как видно из формулы (18) спектрозональные матрицы определяются не только вектор-функциями чувствительностей сенсоров, но и выбранными интервалами базисных функций $\{\Delta_i\}$, которые нужно предварительно подобрать. В работе [7] был предложен оригинальный метод поиска параметров спектрозональной модели, обеспечивающих наименьшую среднюю угловую ошибку репродукции [24] на некотором наборе спектральных данных. В данной работе мы адаптируем предложенный ранее алгоритм поиска параметров модели, которые обеспечат наименьшую среднюю ошибку цветопередачи (10) АПМ в калибровочных координатах на некотором наборе спектральных данных.

5.4. Алгоритм подбора параметров спектрозональной модели

Пусть $\{\Delta_i\} = \{[\lambda_l^*, \lambda_l], [\lambda_l, \lambda_r], [\lambda_r, \lambda_r^*]\}$, где λ_l^* и λ_r^* – некоторые типичные значения границ видимого диапазона камеры. Варьируя значения λ_l и λ_r , получается множество различных матриц $L(\lambda_l, \lambda_r)$. Таким образом, для заданных вектор-функций чувствительностей сенсоров можно найти такие значения λ_l и λ_r и соответствующую им матрицу $L(\lambda_l, \lambda_r)$, которые дают наименьшую среднюю ошибку моделирования. Для поиска наилучших параметров будем решать следующую оптимизационную задачу: для заданного набора $\{C_n(\lambda)\}_{n=1}^N$ и $\{T_m(\lambda)\}_{m=1}^M$, нужно найти такие λ'_l и λ'_r , для которых

$$\lambda_{l}^{\prime}, \lambda_{r}^{\prime} = \arg\min_{\lambda_{l}, \lambda_{r}} \sum_{n, m=1}^{N, M} \varepsilon_{\hat{\boldsymbol{d}}_{L(\lambda_{l}, \lambda_{r})}} \big(C_{n}(\lambda), T_{m}(\lambda) \big), \tag{19}$$

где $\varepsilon_{\hat{d}_{L(\lambda_l,\lambda_r)}}(C_n(\lambda), T_m(\lambda))$ – ошибка цветопередачи (10) АПМ со спектрозональной калибровочной матрицей $L(\lambda_l, \lambda_r)$, определяемой параметрами спектральной зональной модели $\{\Delta_i\} = \{[\lambda_l^*, \lambda_l], [\lambda_l, \lambda_r], [\lambda_r, \lambda_r^*]\}.$

Оптимизационную задачу (19) как и в [7] предлагается решать с помощью полного перебора пар $(\lambda_l, \lambda_r) : \lambda_l < \lambda_r$ на некоторой дискретной сетке, определенной на видимом диапазоне $[\lambda_l^*, \lambda_r^*].$

6. ЧИСЛЕННОЕ СРАВНЕНИЕ ТОЧНОСТИ КАЛИБРОВОК

Для сравнения точности предложенного АПМ с тривиальной и спектрозональной калибровками были проведены следующие численные эксперименты. В качестве коэффициентов ослабления $\{\beta_m(\lambda)\}_{m=1}^{10}$ использовались коэффициенты вертикального ослабления 10 типов вод Ерлова [35], которые проиллюстрированы на рис. 3. Для каждого типа воды были смоделированы изображения прямых компонент окрасок Кринова $\{\Phi_n(\lambda)\}_{n=1}^{350}$, взятых из [36], при расстояниях от камеры до объектов, варьирующихся от 1 до 10 метров $\{\rho_k(\boldsymbol{x}) = k\}_{k=1}^{10}$. Набор функций спектральных пропусканий вычислялся как

$$\{T_{mk}(\lambda) = \exp(-\beta_m(\lambda) \rho_k)\}_{m,k=1}^{10,10}.$$

Множество спектральных яркостей моделировалось как

$$\{C_n(\lambda) = S(\lambda) \Phi_n(\lambda)\}_{n=1}^{350},$$

где $S(\lambda)$ – спектр стандартного источника СІЕ D65¹. Наземные изображения каждого образца окраски были рассчитаны как

$$\left\{ \boldsymbol{c}_{n} = \int C_{n}(\lambda) \, \boldsymbol{\chi}(\lambda) \, d\lambda \right\}_{n=1}^{350}$$

где $\chi(\lambda)$ – вектор-функция чувствительности исследуемого сенсора.



Рис. 3. Графики показателей вертикального диффузного ослабления $K_d(\lambda)$ 10 типов воды по Ерлову [35]

Численные эксперименты были проведены для следующих сенсоров: Canon 500D и Nikon D90, вектор-функции чувствительности которых были взяты из [31], кроме того, в качестве вектор-функции чувствительности сенсора была использована вектор-функция цветового соответствия стандартного наблюдателя СІЕ. Для каждого сенсора вектор-функция чувствительности $\chi_0(\lambda)$ была преобразована так, чтобы соответствующий отклик сенсора на эквиэнергетический спектр $E(\lambda) = 1$ был равен $e = (1 \ 1 \ 1)^T$:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\chi}(\lambda) &= A^{-1} \, \boldsymbol{\chi}_0(\lambda), \\ A &= \operatorname{diag} \left[\int \boldsymbol{\chi}_0(\lambda) \, d\lambda \right]. \end{aligned} \tag{20}$$

Цветокорректирующие матрицы M_0 камер Canon 500D и Nikon D90 для источника CIE D65 были взяты из исходного кода свободной библиотеки LibRaw², цветокорректирующая матрица M_0 для стандартного наблюдателя CIE полагалась единичной. Для каждого сенсора конечная цветокорректирующая матрица M была вычислена как:

$$M = M_0 A. (21)$$

Для каждого сенсора с помощью АПМ с тривиальной и спектрозональной калибровками моделировались соответствующие изображения $\tilde{d}'_{nmk} = \hat{d}'_E(\boldsymbol{c}_n, T_{mk}(\lambda))$ и $\hat{d}'_{nmk} = \hat{d}'_L(\boldsymbol{c}_n, T_{mk}(\lambda))$.

¹ https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/003/cie.15.2004.tables.xls

² https://github.com/LibRaw/LibRaw/blob/master/src/tables/colordata.cpp

Референсные изображения прямых компонент $d'_{nmk} = d'(C_n(\lambda), T_{mk}(\lambda))$ были рассчитаны с помощью выражения (9). Координаты белой точки, необходимые для преобразования координат из СКЦ стандартного наблюдателя в СІЕ LAB [27], в которой будет вычисляться функция цветового различия СІЕDE2000, для каждого сенсора вычислялись как:

$$\boldsymbol{w}' = M \int S(\lambda) \, \boldsymbol{\chi}(\lambda) d\lambda. \tag{22}$$

Для каждого сенсора $\chi(\lambda)$ с цветокорректирующей матрицей M параметры спектрозональной модели были предварительно подобраны так, чтобы они минимизировали среднее значение ошибки цветопередачи АПМ со спектрозональной калибровочной матрицей по всем спектральным яркостям и пропусканиям. Границы видимого диапазона λ_l^* и λ_r^* , внутри которого выполнялся поиск параметров, были выбраны равными 350 и 800 соответственно, так чтобы полностью включать в себя диапазоны видимости исследуемых сенсоров. Стоит заметить, что ещё большее расширение выбранных границ не повлияет на результат работы предложенного алгоритма. В результате оптимизации для каждого сенсора были получены следующие параметры спектрозональной модели: Canon 500D – $\{\Delta_b = [350, 494), \Delta_g = [494, 568), \Delta_r = [568, 800]\}$; Nikon D90 – $\{\Delta_b = [350, 498), \Delta_g = [498, 571), \Delta_r = [571, 800]\}$; стандартный наблюдатель CIE – $\{\Delta_x = [350, 488), \Delta_y = [488, 560), \Delta_z = [560, 800]\}$.

Для каждого сенсора по всем $C_n(\lambda)$ и $T_{mk}(\lambda)$ были подсчитаны соответствующие значения ошибки цветопередачи (10) АПМ с тривиальной калибровкой $\tilde{\varepsilon}_{nmk}$ и АПМ со спектрозональной калибровкой $\hat{\varepsilon}_{nmk}$. Используя полученные значения ошибок цветопередачи, для каждой калибровки были подсчитаны средние значения их ошибок по всем окраскам, типам воды и расстояниям, кроме того, для каждого типа воды отдельно были посчитаны средние значения ошибки по всем окраскам и расстояниям (см. таблицу 1).

Таблица 1. Средние значения ошибок цветопередачи (10) АПМ с тривиальной калибровкой (строки «TK») и АПМ со спектрозональной калибровкой (строки «3K») для камер Canon 500D, Nikon D90 и стандартного наблюдателя СІЕ ХҮΖ. В столбце «Все» содержатся средние ошибки цветопередачи по всем типам вод Ерлова, для всех 350 окрасок Кринова и для всех расстояний от 1 до 10 метров. В остальных столбцах – средние значения ошибки цветопередачи для каждого типа воды в отдельности. Для каждого сенсора жирным выделены наименьшие средние ошибки в столбце.

		Bce	Ι	IA	IB	II	III	1C	3C	5C	7C	9C
Canon 500D	3K	1.18	1.15	1.14	1.13	1.10	1.07	1.44	1.48	1.20	1.06	1.05
	TK	1.47	1.64	1.64	1.63	1.59	1.48	1.60	1.49	1.18	1.18	1.26
Nikon D90	3K	0.80	0.66	0.66	0.66	0.65	0.66	1.04	1.11	0.92	0.82	0.85
	TK	1.16	1.42	1.42	1.40	1.34	1.19	1.18	1.04	0.77	0.87	0.96
CIE XYZ	3K	1.16	1.16	1.16	1.15	1.12	1.11	1.48	1.49	1.10	0.93	0.93
	TK	1.82	2.39	2.38	2.35	2.25	1.86	1.36	1.34	1.48	1.45	1.35

Как видно из таблицы 1, точность АПМ со спектрозональной калибровкой лучше, чем с тривиальной. Для всех океанических типов вод (см. столбцы «I», «IA», «IB», «II», «III») ошибка моделирования для спектрозональной калибровки (строки «ЗК») меньше, чем для тривиальной (строки «TK»). Так для Canon 500D ошибка АПМ со спектрозональной калибровкой оказывается меньше на 27%-30% относительно ошибки с тривиальной калибровкой; для Nikon D90 – на 45%-54%; для стандартного наблюдателя CIE – на 40%-51%. На прибрежных типах вод в ряде случаев ошибка АПМ с тривиальной калибровкой меньше, чем для океанических типов вод: для Canon 500D ошибка алгоритма со спектрозональной калибровкой оказывается не более чем на 1% больше относительно ошибки с тривиальной калибровкой; для Nikon D90 – не более 19% (такая существенная разница только на одном типе воды «5С»); для стандартного наблюдателя CIE – не более 11%. В любом случае из столбца «Все» можно получить, что

для камер Canon 500D и Nikon D90 средняя ошибка цветопередачи АПМ со спектрозональной калибровкой оказывается меньше, чем с тривиальной, на 19% и 31% соответственно, а для стандартного наблюдателя СІЕ – на 36%. Усредненная по всем данным ошибка цветопередачи АПМ со спектрозональной калибровкой оказывается на 29% меньше относительно АПМ с тривиальной калибровкой.

7. СВОЙСТВА СПЕКТРОЗОНАЛЬНОЙ КАЛИБРОВКИ

Докажем некоторые теоретические свойства поканального моделирования (13) со спектрозональной калибровкой.

Определение 3. Два сенсора называются связанными условием Максвелла-Лютера-Айвза (MЛA), если для их соответствующих вектор-функций чувствительностей $\chi'(\lambda)$ и $\chi(\lambda)$ верно

$$\boldsymbol{\chi}(\lambda) = A \, \boldsymbol{\chi}'(\lambda), \tag{23}$$

где A – обратимая матрица, называемая матрицей Максвелла-Лютера-Айвза (сокр. матрицей МЛА).

Пусть c и c' – координаты цветов $C(\lambda)$ в естественных СКЦ сенсоров $\chi(\lambda)$ и $\chi'(\lambda)$ соответственно. Если сенсоры $\chi'(\lambda)$ и $\chi(\lambda)$ связаны условием МЛА (23), то легко получить, что

$$\boldsymbol{c} = A \, \boldsymbol{c}'. \tag{24}$$

Таким образом, матрица МЛА A представляет собой также преобразование координат цветов в СКЦ сенсора $\chi(\lambda)$, из чего следует, что цветовые пространства сенсоров, связанных условием МЛА, совпадают.

Свойство 1. Для любых двух сенсоров, связанных условием МЛА, результаты поканального моделирования в калибровочных координатах совпадут, когда калибровочные матрицы являются спектрозональными матрицами соответствующих сенсоров.

Доказательство. Пусть $\chi(\lambda)$ и $\chi'(\lambda)$ – сенсоры, связанные условием МЛА: $\chi(\lambda) = A \chi'(\lambda)$; c и c' – изображения одной и той же сцены в естественных СКЦ сенсоров $\chi(\lambda)$ и $\chi'(\lambda)$ соответственно, которые согласно (1) определяются падающим на сенсоры некоторым произвольным излучением $C(\lambda)$; t и t' – векторы пропускания в естественных СКЦ сенсоров $\chi(\lambda)$ и $\chi'(\lambda)$ соответственно, вычисленные по формуле (12) для некоторого произвольного спектрального пропускания $T(\lambda)$; L и L' – соответствующие спектрозональные матрицы сенсоров $\chi(\lambda)$ и $\chi'(\lambda)$. Из того, что сенсоры $\chi(\lambda)$ и $\chi'(\lambda)$ связаны условием МЛА следует, что c = A c' и t = A t'. Для спектрозональных матриц сенсоров $\chi(\lambda)$ и $\chi'(\lambda)$ верно, что L = A L' [7].

Обозначим результаты поканального моделирования для первого сенсора в его спектрозональных калибровочных координатах как

$$\boldsymbol{p}_d = L^{-1} \, \boldsymbol{c} \otimes L^{-1} \, \boldsymbol{t}, \tag{25}$$

а для второго

$$\boldsymbol{p}'_d = L'^{-1} \, \boldsymbol{c}' \otimes L'^{-1} \, \boldsymbol{t}'. \tag{26}$$

Покажем, что $\boldsymbol{p}_d = \boldsymbol{p}_d'$:

$$p_{d} = L^{-1} \boldsymbol{c} \otimes L^{-1} \boldsymbol{t} =$$

$$= L^{\prime-1} A^{-1} A \boldsymbol{c}^{\prime} \otimes L^{\prime-1} A^{-1} A \boldsymbol{t}^{\prime} =$$

$$= L^{\prime-1} \boldsymbol{c}^{\prime} \otimes L^{\prime-1} \boldsymbol{t}^{\prime} = \boldsymbol{p}_{d}^{\prime},$$
(27)

что и требовалось доказать. 🔳

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен алгоритм имитации ПИ на основе поканального моделирования в калибровочных координатах цветов для предъявления человеку с помощью дисплея. Проведено сравнение точности этого алгоритма при тривиальной и спектрозональной калибровках. Для оценки точности алгоритмов моделирования строится и обосновывается функция ошибки цветопередачи. С помощью численных экспериментов на наборе из 3 сенсоров; расстояний от камеры до объектов, варьирующихся от 1 до 10 метров; 10 типов вод Ерлова и 350 окрасок Кринова было показано, что средняя ошибка цветопередачи предложенного алгоритма со спектрозональной калибровкой оказывается на 29% меньше, чем с тривиальной калибровкой. Кроме того, вводится понятие сенсоров, связанных условием Максвелла-Лютера-Айвза. Показано, что для любых двух сенсоров, связанных условием Максвелла-Лютера-Айвза, результаты поканального моделирования в спектрозональных калибровочных координатах совпадают.

В дальнейшем планируется разработка алгоритмов моделирования подводных изображений на основе наземных изображений, использующих другие спектральные модели, и исследование свойств этих алгоритмов с помощью численных экспериментов.

9. БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю особую благодарность Д.П. Николаеву за ценные советы и замечания при работе над данной статьей, а также В.П. Божковой и А.В. Белокопытову за помощь в оформлении и редактировании текста работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Foresti G.L. Visual inspection of sea bottom structures by an autonomous underwater vehicle. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2001, vol. 31, no. 5, pp. 691–705.
- Lavest J.-M., Guichard F., Rousseau C. Multi-view reconstruction combining underwater and air sensors. Proceedings of International Conference on Image Processing, 2002, vol. 3, pp. 813–816.
- Kahanov Y., Royal J.G. Analysis of hull remains of the Dor D vessel, Tantura lagoon, Israel. The International journal of nautical archaeology, 2001, vol. 30, no. 2, pp. 257–265.
- 4. Mangeruga M., Cozza M., Bruno F. Evaluation of underwater image enhancement algorithms under different environmental conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2018, vol. 6, no. 1, pp. 10.
- Skarlatos D., Agrafiotis P., Balogh T., Bruno F., Castro F., Petriaggi B. D., Demesticha S., Doulamis A., Drap P., Georgopoulos A. Project iMARECULTURE: advanced VR, iMmersive serious games and augmented REality as tools to raise awareness and access to European underwater CULTURal heritagE. *Euro-Mediterranean Conference*, 2016, pp. 805–813.
- ANSI/IEC 60529–2004, Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Code). National Electrical Manufacturers Association, 2004.
- Shepelev D.A., Bozhkova V.P., Ershov E.I., Nikolaev D.P. Simulation Of Underwater Color Images Using Banded Spectral Model. Proceedings of 34th International ECMS Conference on Modelling and Simulation, 2020, vol. 34, no. 1, pp. 11–18.
- Boffety M., Galland F., Allais A.-G. Color image simulation for underwater optics. *Applied optics*, 2012, vol. 51, no. 23, pp. 5633–5642.
- Anwar S., Li C., Porikli F. Underwater scene prior inspired deep underwater image and video enhancement. *Pattern Recognition*, 2020, vol. 98, pp. 107038.
- 10. Chang H., Cheng C., Sung C. Single Underwater Image Restoration Based on Depth Estimation and Transmission Compensation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2019, vol. 44, no. 4, pp. 1130-1149.
- Hu Y., Wang K., Zhao X., Wang H., Li Y. Underwater Image Restoration Based on Convolutional Neural Network. Proceedings of The 10th Asian Conference on Machine Learning, 2018, vol. 95, pp. 296–311.
- Li C.-Y., Guo J.-C., Cong R.-M., Pang Y.-W., Wang B. Underwater image enhancement by dehazing with minimum information loss and histogram distribution prior. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, vol. 25, no. 12, pp. 5664–5677.
- 13. Peng Y.-T., Cosman P.C. Underwater image restoration based on image blurriness and light absorption. *IEEE transactions on image processing*, 2017, vol. 26, no. 4, pp. 1579–1594.
- Schechner Y.Y., Karpel N. Clear underwater vision. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2004), 2004, vol. 1, pp. 536–543.
- 15. Schechner Y.Y., Karpel N. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis. *IEEE Journal of oceanic engineering*, 2005, vol. 30, no. 3, pp. 570–587.
- Zhao X., Jin T., Qu S. Deriving inherent optical properties from background color and underwater image enhancement. Ocean Engineering, 2015, vol. 94, pp. 163–172.
- Uplavikar P., Wu Z., Wang Z. All-In-One Underwater Image Enhancement using Domain-Adversarial Learning. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Workshops, 2019.
- Ding X., Wang Y., Yan Y., Liang Z., Mi Z., Fu X. Jointly Adversarial Network to Wavelength Compensation and Dehazing of Underwater Images. arXiv preprint arXiv:1907.05595, 2019.
- Yu X., Qu Y., Hong M. Underwater-GAN: Underwater image restoration via conditional generative adversarial network. *International Conference on Pattern Recognition*, 2018, pp. 66–75.
- Li J., Skinner K.A., Eustice R.M., Johnson-Roberson M. WaterGAN: Unsupervised generative network to enable real-time color correction of monocular underwater images. *IEEE Robotics and Automation letters*, 2017, vol. 3, no. 1, pp. 387–394.

- Nikolaev D.P., Nikolayev P.P. Comparative analysis of Gaussian and linear spectral models for Colour constancy. Proceedings of 19th European Conference on Modelling and Simulation, 2005, pp. 300–305.
- Nikolaev D.P., Nikolayev P.P., Bozhkova V.P. Efficiency comparison of analytical Gaussian and linear spectral models in the same colour constancy framework. *International Journal of Simulation–Systems, (IJSSST, Special Issue on: Vision and Visualization)*, 2006, pp. 21–36.
- Nikolaev D.P., Nikolayev P.P. On spectral models and colour constancy clues. Proceedings of 21st European Conference on Modelling and Simulation, 2007, pp. 318–323.
- Finlayson G.D., Zakizadeh R., Gijsenij A. The Reproduction Angular Error for Evaluating the Performance of Illuminant Estimation Algorithms. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, vol. 39, no. 7, pp. 1482–1488.
- Akkaynak D., Treibitz T. Sea-thru: A method for removing water from underwater images. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019, pp. 1682–1691.
- Ancuti C., Ancuti C.O., Vleeschouwer C. Color balance and fusion for underwater image enhancement. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, vol. 27, no. 1, pp. 379–393
- Alman D.H., Berns R.S., Komatsubara H., Li W., Luo M.R., Melgosa M., Nobbs J.H., Rigg B., Robertson A.R., Witt K. Improvement to industrial colour-difference evaluation. *Central Bureau of the International Commission on Illumination, Vienna*, 2001.
- Luo M.R., Cui G., Rigg B. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000. Color Research & Application, 2001, vol. 26, no. 5, pp. 340–350.
- Anderson M., Motta R., Chandrasekar S., Stokes M. Proposal for a standard default color space for the internet – sRGB. Color and imaging conference, 1996, vol. 1996, no. 1, pp. 238–245.
- Коноваленко И.А., Смагина А.А., Николаев Д.П., Николаев П.П. ProLab: психофизически равномерная проективная система цветовых координат. *PREPRINTS.RU*, 2020, C. 1–35, URL: https: //preprints.ru/article/368/version/2.
- Jiang J., Liu D., Gu J., Süsstrunk S. What is the space of spectral sensitivity functions for digital color cameras? 2013 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV), 2013, pp. 168–179.
- Roshan E., Funt B. Color Sensor Accuracy Index Utilizing Metamer Mismatch Radii. Sensors, 2020, vol. 20, no. 15, pp. 4275.
- Ohta N., Robertson A.R. Measurement and calculation of colorimetric values. In: Colorimetry. John Wiley & Sons, Ltd, 2006, pp. 153–174.
- 34. Digital Negative (DNG) Specification (1.5.0.0). Adobe Inc., 2019.
- 35. Jerlov N. Irradiance optical classification. Optical Oceanography, 1968, pp. 118–120.
- Barnard K., Martin L., Funt B., Coath A. A Data Set for Colour Research. Color Research and Application, 2002, vol. 27, no. 3, pp. 148–152.

Color reproduction accuracy in channel-wise simulation of underwater images

Shepelev D.A.

Abstract—This work investigates the accuracy of the channel-wise methods simulating the color underwater images based on the terrestrial images to be visually presented to a person on a display. The algorithm for the underwater images simulation based on the channel-wise approximation of the Beer-Lambert-Bouguer law in the calibrated color coordinates is proposed. This work studies the choice of the calibration affecting the accuracy of this algorithm. Two types of the calibrated coordinates are considered: first, trivial coordinates coincident with the color coordinates of an uncalibrated sensor; second, banded spectral coordinates obtained using the banded spectral model. The dataset, consisting of 3 sensors, 350 Krinov reflectances, and 10 Jerlov water types, was used to perform the numerical experiments for the underwater images simulation. These experiments showed that the average color reproduction error of the proposed algorithm with the banded spectral calibration is 29% less than with the trivial calibration. This work also introduces the concept of the sensors constrained by Maxwell-Luther-Ives condition. We show that for such sensors the results of the channel-wise simulation in the corresponding banded spectral coordinates are identical.

KEYWORDS: underwater imaging, simulation of underwater images, color distortions, underwater image enhancement, color image augmentation, generating ground truth, spectral color models.