На правах рукописи



Шепелев Денис Александрович

Методы моделирования цветных подводных изображений на основе RGB-D изображений надводных сцен

Специальность 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук Работа прошла аппробацию в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (ИППИ РАН).

Научный руководитель:	кандидат физико-математических наук Николаев Дмитрий Петрович
Ведущая организация:	Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколков- ский институт науки и технологий»

Защита состоится «21» декабря 2020 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета ФПМИ.05.13.18.010 по адресу: 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) https://mipt.ru/education/post-graduate/ soiskateli-tekhnicheskie-nauki.php.

Работа представлена «09» октября 2020 г. в Аттестационную комиссию федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п. 3.1 ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Алгоритмы анализа и улучшения подводных изображений используются при автоматическом обследовании подводных объектов, в системах предотвращения утопления, для исследования подводных археологических артефактов. Распространение смартфонов, работоспособных под водой, сделало эти алгоритмы востребованными и в вычислительной фотографии.

Понятие улучшения изображений может трактоваться весьма широко, и в работах по этой теме зачастую решаются несхожие задачи, но есть специфическая постановка, характерная именно для подводных изображений. Из-за существенного поглощения и рассеяния в воде нельзя считать, что интенсивность зарегистрированного изображения пропорциональна яркости объектов сцены, то есть нарушается один из фундаментальных законов классической обработки изображений. В случае цветных изображений под водой искажается не только яркость, но и цветность объектов, что затрудняет интерпретацию изображений. Проблемы цветопередачи при подводной съемке ещё в 60-х годах систематизировал А. Рогов, а в 70-х годах В. Максимов уже исследовал вопрос, как в этих условиях могут эффективно функционировать биологические зрительные системы. В данной работе под улучшением подводных изображений понимается построение изображения с такими цветовыми характеристиками, как если бы после отражения от объекта свет не поглощался и не рассеивался в среде.

При разработке подобных алгоритмов важно иметь измеримые критерии точности их работы, позволяющие проводить их ранжирование и оптимизацию параметров. Критерии задаются на множестве пар изображений: для каждого входного изображения задано идеальное целевое изображение, с которым и сравнивается результат работы алгоритма. Важным требованием к такому набору данных является его разнообразие и большие размеры. Для формирования таких пар физическими средствами необходимо подготовить набор сцен, каждая из которых снимается как минимум дважды: один раз в воде с заданными свойствами, а второй – в идеальной среде (на воздухе, или в чистой воде, как в общедоступном наборе данных, подготовленном А. Дуарте с соавт.). Ясно, что такой подход даже в лабораторных условиях является весьма трудоёмким. Поэтому обычно проверочные данные получают с помощью моделирования.

Методами машинной графики можно реализовать визуализацию необходимых изображений по описанию сцены. Такая визуализация требует формального задания геометрии всех предметов сцены, параметров их окраски, источников света и т.п. и строится расчетом многократных отражений и рассеяния света, то есть весьма сложна системно и вычислительно. При этом используемые модели могут оказаться переупрощенными, а результаты – далёкими от фотореалистичности.

3

В работах специалистов по моделированию подводных изображений – С. Анвара, П. Косман, И. Пенга и др. – получил широкое распространение другой, аугментационный, подход. Под аугментационными здесь понимаются методы моделирования, основанные на преобразовании натурных данных, а не на полном расчете модели по известным ее параметрам. При моделировании подводных изображений важным параметром является расстояние между сенсором и объектом, поэтому в качестве натурных изображений используются т.н. RGB-D изображения, несущие в себе информацию как о цвете («RGB»), так и о дальности («D» – depth). Именно этот подход исследуется в работе.

Большинство упомянутых авторов в качестве численного метода используют т.н. поканальный метод моделирования, в котором значения пикселей изображения численно преобразуются независимо в различных каналах согласно узкополосной аппроксимации классической спектральной модели формирования подводных изображений МакГлеймери – Яффе. Однако несколько лет назад в работах Д. Аккайнак и Т. Трейбич было показано, что поканальный численный метод неконстистентен – значения параметров, обеспечивающие приемлемую точность при его использовании, зависят от параметров сенсора, причем предлагаемый авторами метод их определения требует знания спектральных характеристик объектов сцены, что неприемлемо для целей аугментационного моделирования.

Поканальные методы широко используются и при обработке надводных изображений, где для преодоления указанных трудностей используется, в частности, метод спектральных моделей, в котором сначала по отклику камеры оценивается спектр падающего на неё излучения, а дальнейшее моделирование ведется с точным учетом законов линейной оптики для всего видимого диапазона. В работах же по обработке подводных изображений такая модификация поканального метода до сих пор не получила распространения.

Качество цветопередачи подводных изображений страдает в том числе по причине низкой освещенности, что приводит к нехарактерно низким для надводных изображений соотношениям сигнал/шум. Известно, что ослабление света в воде существенно зависит от длины волны. В результате, на цветной подводной фотографии отношение сигнал/шум в красном канале может быть значительно меньше, чем в других каналах, из-за чего алгоритмы восстановления могут порождать заметные цветностные артефакты. Ч. Ли с соавт. в своей работе 2020 г., посвященной наборам данных и методикам для тестирования алгоритмов улучшения подводных изображений, прямо указывают на проблему шумности подводных изображений, как на существенную. При этом данную проблему невозможно исследовать существующими аугментационными методами, так как в них не производится моделирования шума. Итак, использование наборов данных, полученных текущими реализациями аугментационного подхода, для тестирования алгоритмов улучшения подводных изображений, может приводить к неверной оценке обеспечиваемой ими точности цветопередачи, включая шумовые характеристики. Поэтому актуальна разработка новых методов аугментационного моделирования, решающих указанные проблемы.

Целью данной работы является разработка методов аугментационного моделирования подводных изображений, позволяющих оценивать алгоритмы улучшения подводных изображений по параметрам точности цветопередачи и уровня шума.

Для достижения этой цели поставлены и решены следующие задачи:

- 1. Разработать методы аугментационного моделирования цветных подводных изображений, пригодных для сенсоров с различными характеристиками, но не требующих знания спектральной яркости наблюдаемых объектов.
- 2. Разработать методы аугментационного моделирования цветных подводных изображений, приближенных к натурным по характерным соотношениям сигнал/шум.
- 3. Разработать алгоритм моделирования подводных изображений на основе наземных RGB-D изображений и исследовать его точностные характеристики.
- Разработать комплекс программ, реализующий разработанные методы и алгоритмы и позволяющий исследовать точностные характеристики цветопередачи алгоритмов моделирования подводных изображений.

Научная новизна:

- 1. Расширена область применения спектрозональной цветовой модели, ранее использовавшейся в задачах цветовой константности.
- Предложен метод поиска параметров спектрозональной цветовой модели, обеспечивающий наименьшую среднюю ошибку цветопередачи алгоритма аугментационного моделирования подводных изображений.
- Впервые показано, что при поканальном аугментационном моделировании подводных изображений без добавления шума отношение сигнал/шум на имитации может оказаться существенно завышенным.
- Предложен метод аугментационного моделирования подводных изображений, согласованный с классической моделью дробового шума.

Практическая значимость. Разработанный комплекс программ предназначен для исследования точностных свойств алгоритмов аугментационного моделирования подводных изображений. Разработанные методы моделирования, в свою очередь, предназначены для получения наборов данных для тестирования алгоритмов улучшения цветных подводных изображений. Основные результаты работы использовались в ИППИ РАН при выполнении НИОКР по созданию новых алгоритмов улучшения подводных фотографий, метод аугментационного моделирования шума – для обучения нейросетей в продукте «Cyclops» компании ООО «Визиллект Сервис», а метод оптимального подбора параметров спектрозональной модели – в продукте «Smart IDReader» компании ООО «Смарт Энджинс Сервис», что подтверждается соответствующими актами. Предложенные в диссертационном исследовании методы аугментационного моделирования были использованы ИППИ РАН при выполнении проектов РНФ «Цифровые технологии и их применения» (№ 14-50-00150) и «Система мониторинга сельскохозяйственных показателей в видимом, инфракрасном и гиперспектральном режимах съемки» (№ 20-61-47089).

Методология и методы исследования. Результаты, полученные в диссертационной работе, относятся к цифровой обработке изображений, цветовой теории и теории вероятности. В работе используются методы компьютерного моделирования, линейной алгебры и непрерывной оптимизации. Все результаты обосновываются формально-дедуктивно или вычислительным экспериментом. Работа подготовлена в соответствии с паспортом специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», технические науки. Решаемые в работе задачи соответствуют пп. 1, 5 и 8 («Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений», «Комплексные исследования научных и технического моделирования и вычислительного эксперимента» и «Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования» соответственно).

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1. При поканальном аугментационном моделировании подводных изображений без явной цветовой калибровки ошибка моделирования существенно зависит от используемой системы цветовых координат.
- При поканальном аугментационном моделировании подводных изображений без учета шума отношение сигнал/шум на имитации будет завышенным, если ослабление света в воде не равно нулю.
- Разработанный алгоритм аугментационного моделирования подводных изображений в калибровочных координатах позволяет существенно (более, чем на 20%) снизить среднюю ошибку цветопередачи при использовании общедоступных наборов спектральных данных.

- 4. Разработанный метод аугментационного моделирования подводных изображений с добавлением шума позволяет получать изображения с параметрами шума, согласующимися с классической моделью дробового шума на изображении.
- 5. Разработанный комплекс программ реализует предложенные в работе методы и алгоритмы моделирования подводных изображений и позволяет тестировать алгоритмы моделирования цветных подводных фотографий, а также алгоритмы их улучшения в части цветопередачи.

Достоверность изложенных в работе аналитических результатов обеспечена использованием формально-дедуктивных правил вывода из хорошо известных теорем аналитической геометрии и теории вероятности. Достоверность полученных численных результатов подтверждена посредством воспроизводимых вычислительных экспериментов на большом множестве общедоступных спектральных данных и на самостоятельно собранном наборе натуральных подводных изображений. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на VI Международной конференции «Информационные технологии и нанотехнологии» (Самара, 2020); совместном научном семинаре Лабораторий №2 и №11 ИППИ РАН; семинаре Московского центра исследований и разработок Хуавэй. Текст доклада на Международной конференции по имитационному моделированию (34th International ECMS Conference оп Modelling and Simulation – Берлин, 2020) представлен в соответствующем сборнике.

<u>Личный вклад.</u> Все основные результаты диссертации получены и обоснованы автором самостоятельно. Постановка задач и формализация результатов проводились совместно с научным руководителем.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 печатных работах, 3 из которых изданы в журналах, индексируемых RSCI; 1—в журнале, индексируемом Scopus и WoS; 1—в журнале, рекомендованном BAK; 3—в тезисах докладов.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В первой главе проведен обзор работ, посвященных улучшению и моделированию подводных изображений (ПИ); вводятся основные модели

и понятия, используемые в работе. В отличие от воздушной среды показатели ослабления и рассеяния света водной среды существенно зависят от длины волны, а также значительно превышают соответствующие показатели воздушной. Это приводит к уменьшению яркости и искажению цветов объектов на ПИ относительно цветов надводного изображения (НИ), что иллюстрируется на рис. 1г и 1д.



Рис. 1 — Результаты¹ аугментационного моделирования ПИ и работы алгоритма улучшения ПИ на имитациях и натуральных ПИ: а) — идеальное НИ; б) — имитация ПИ; в) — результат работы алгоритма на имитации ПИ; г) — идеальное НИ; д) — натуральное ПИ; е) — результат работы алгоритма на натуральном ПИ

В разделе 1.1 проводится обзор и классификация задач улучшения ПИ. В результате задачи улучшения ПИ были классифицированы следующим образом: 1a) получить изображение, в котором яркость каждого пикселя пропорциональна яркости соответствующего объекта подводной сцены; 1б) получить такое изображение, что яркость каждого его пикселя пропорциональна яркости соответствующего объекта сцены, находящейся под белым светом, не искаженным водой; 2a) получить изображение, снятое в прозрачной (не мутной) и не окрашенной воде; 2б) получить изображение, снятое в прозрачной (не мутной) и не окрашенной воде, под белым светом; 3a) получить изображение сцены так, как если бы камера и сцена находились не в воде, а на воздухе; 3б) получить изображение сцены

 $^{^1}Zhao,X.$ Deriving inherent optical properties from background color and underwaterimage enhancement [текст] / X. Zhao, T. Jin, S. Qu // Ocean Engineering. 2015. Vol. 94. P. 163—172

так, как если бы камера и сцена находились не в воде, а на воздухе, под белым светом; 4) повысить разборчивость деталей ПИ; 5) получить наиболее визуально предпочтительное ПИ.

В разделе 1.2 рассмотрены основные подходы к оценке качества алгоритмов улучшения ПИ. Показано, что наборы из пар идеальных целевых НИ и рассчитанных на их основе имитаций ПИ используются при разработке, тестировании и оценке качества алгоритмов улучшения ПИ, решающих задачи 1-4.

В разделе 1.3 рассмотрены основные модели формирования оптических ПИ, используемые в аугментационном моделировании ПИ и при решении задач 1-3. На основе спектральных моделей МакГлеммери – Яффе, Шехнера – Карпеля и Прайзендёрфера выделяется класс моделей формирования оптического ПИ $W(\lambda, \boldsymbol{x})$, обобщающийся следующим образом:

$$W(\lambda, \boldsymbol{x}) = D(\lambda, \boldsymbol{x}) + B(\lambda, \boldsymbol{x}),$$

$$D(\lambda, \boldsymbol{x}) = C(\lambda, \boldsymbol{x}) T(\lambda, \boldsymbol{x}) = C(\lambda, \boldsymbol{x}) e^{-\beta(\lambda) \rho(\boldsymbol{x})},$$
(1)

где \boldsymbol{x} – координаты точки на изображении, соответствующие направлению, по которому приходит свет из сцены в оптический центр камеры; $D(\lambda, \boldsymbol{x})$ и $B(\lambda, \boldsymbol{x})$ – оптические изображения, называемые соответственно прямой компонентой и компонентой обратного рассеяния оптического ПИ; $C(\lambda, \boldsymbol{x})$ – спектральная яркость объекта под водой; $T(\lambda, \boldsymbol{x}) = e^{-\beta(\lambda)\rho(\boldsymbol{x})}$ – спектральное пропускание толщи воды между объектом и камерой; $\rho(\boldsymbol{x})$ – расстояние от оптического центра камеры до объекта вдоль направления, проецирующего в точку \boldsymbol{x} ; $\beta(\lambda)$ – показатель ослабления водной среды.

В разделе 1.4 рассмотрено, как используются наземные RGB-D изображения для моделирования ПИ. В существующих работах для расчета имитации ПИ на основе НИ с заданной картой дальности $\rho(\boldsymbol{x})$ переходят от модели (1) к следующей модели:

$$w_i(\boldsymbol{x}) = d_i(\boldsymbol{x}) + b_i(\boldsymbol{x}),$$

$$d_i(\boldsymbol{x}) = c_i(\boldsymbol{x}) t_i(\boldsymbol{x}) = c_i(\boldsymbol{x}) e^{-\beta_i \rho(\boldsymbol{x})},$$
(2)

где $d_i(\boldsymbol{x}) - i$ -ый канал изображения прямой компоненты; $b_i(\boldsymbol{x}) - i$ -ый канал изображения компоненты обратного рассеяния; $c_i(\boldsymbol{x}) - i$ -ый канал НИ; $t_i(\boldsymbol{x})$ – параметр пропускания в *i*-ом канале; β_i – параметр ослабления в *i*-ом канале. Изображение обратной компоненты часто моделируется как:

$$b_i(\boldsymbol{x}) = b_i^{\infty} \left(1 - t_i(\boldsymbol{x}) \right), \tag{3}$$

где $b_i^{\infty} - i$ -ый канал цветового вектора \boldsymbol{b}^{∞} , соответствующего цвету воды при наблюдении свободного от объектов горизонта. Примеры натурального НИ и имитации ПИ, рассчитанной согласно модели (2), представлены на рис. 1а и 16. В этом разделе раскрываются две проблемы существующих аугментационных алгоритмов, использующих при расчетах модель (2). Во-первых, с помощью численного моделирования показано, что результат моделирования (а значит, и точность) существующих аугментационных алгоритмов существенно зависит от системы координат, в которой заданы цвета НИ (см. рис. 2).



Рис. 2 — Результаты расчетов имитаций прямых компонент ПИ цветовой мишени DGK Color Tools WDKK согласно модели (2) при параметре пропускания $t = (0.1 \ 0.3 \ 0.9)^T$ (слева направо): исходное НИ; имитация ПИ, когда цвета НИ были заданы в CIE XYZ; имитация ПИ, когда цвета НИ были заданы в линейном sRGB. Изображения визуализированы в

sRGB

Во-вторых, существующие алгоритмы моделирования не учитывают наличие шума на НИ и ПИ, из-за чего использование имитаций ПИ, полученных с помощью этих алгоритмов, может приводить к ошибочным выводам при тестировании алгоритмов улучшения ПИ, которые не обеспечивают достаточный уровень шумоподавления (см. рис. 1). Как видно из рис. 1а–1в, разработанный Джао и соавт. алгоритм хорошо справляется с улучшением имитаций ПИ. Однако когда вместо имитации на вход алгоритма поступает натуральное ПИ (см. рис. 1г–1е), тот же алгоритм порождает заметные цветностные артефакты, и данную проблему невозможно обнаружить при тестировании на имитированных данных, рассчитанных согласно модели (2).

Предлагается решать эти проблемы с помощью учета в модели аугментации (2) связи цветового вектора с характеристиками сенсора и спектром падающего на него излучения, а также дисперсии дробового шума со средними значениями регистрируемого излучения.

В разделе 1.5 приводятся основные понятия цветовой теории, такие как *цветовое пространство* и *система координат цветов* (СКЦ), кратко описаны физические явления, лежащие в основе формирования изображения. В данной работе для моделирования сигнала сенсора используется *линейная модель сенсора*:

$$\boldsymbol{c} = \int_0^\infty C(\lambda) \, \boldsymbol{\chi}(\lambda) \, d\lambda, \tag{4}$$

где $C(\lambda)$ – спектральная освещенность сенсора; $\chi(\lambda)$ – вектор-функция чувствительности сенсора; c – отклик неоткалиброванного сенсора, который представляет собой координаты цвета излучения $C(\lambda)$ в естественной системе координат цветов (СКЦ) сенсора. Определяется понятие колориметрического сенсора. В общем случае, сенсор камеры $\chi(\lambda)$ не является колориметрическим, но несмотря на это, в случае бытовых камер, снимающих в видимом диапазоне, для перехода в СКЦ стандартного наблюдателя СIE обычно используют линейное преобразование координат цветов

$$\boldsymbol{c}' = M \, \boldsymbol{c},\tag{5}$$

где M – обратимая матрица, которая называется матрицей цветовой коррекции или цветокорректирующей матрицей. Определяется понятие сенсоров, связанных условием Максвелла-Лютера-Айвза (сокр.: сенсоров, связанных условием МЛА). Два сенсора называются связанными условием МЛА, если компоненты вектор-функции чувствительности сенсоров совпадают, или компоненты вектор-функции чувствительности одного сенсора являются линейно независимыми линейными комбинациями компонент вектор-функции чувствительносто.

В разделе 1.6 описывается модель Яне дробового шума на изображении. Яне экспериментально показал, что выборочная дисперсия сигнала линейно зависит от его выборочного среднего $\bar{c}(\boldsymbol{x})$:

$$S_c^2(\boldsymbol{x}) = g\,\bar{c}(\boldsymbol{x}) + \sigma^2,\tag{6}$$

где g – коэффициент усиления сигнала камеры; σ – стандартное отклонение нормально распределенных источников шума в электронной схеме. Параметры g и σ для каждого канала предполагаются одинаковыми. Далее для краткости будем называть выборочные среднее и дисперсию просто средним и дисперсией соответственно. В том же разделе показано, что отношение сигнал/шум $SNR_c=\bar{c}/S_c$ монотонно растет вместе со средним значением \bar{c} .

Во второй главе исследуется поканальный метод моделирования ПИ. Будем называть метод моделирования ПИ поканальным методом моделирования, если он вычисляет имитацию ПИ f(x) по НИ c(x) согласно следующей модели:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) &= \hat{\boldsymbol{d}}(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{b}(\boldsymbol{x}), \\ \hat{\boldsymbol{d}}(\boldsymbol{x}) &= \boldsymbol{c}(\boldsymbol{x}) \otimes \boldsymbol{t}(\boldsymbol{x}). \end{aligned} \tag{7}$$

где $\hat{d}(x)$ – имитация изображения прямой компоненты; $0 \leq t(x) \leq 1$ – карта параметров пропускания; \otimes – обозначает поканальное умножение; b(x) – имитация изображения компоненты обратного рассеяния. Ясно, что модель аугментации (2) является частным случаем модели (7). В диссертационной работе обнаружено, что почти во всех предыдущих работах явно

не указаны координаты поканального моделирования, что не позволяет верифицировать результаты аугментационных алгоритмов, предложенных в них. Для того, чтобы исследовать точностные свойства поканального метода моделирования, далее считается, что входное НИ c(x) задано в естественной СКЦ сенсора с вектор-функцией чувствительности $\chi(\lambda)$.

В разделе 2.1 рассмотрены различные способы вычисления карты параметров пропускания, необходимой для расчетов имитации прямой компоненты согласно выражению (7), и которая напрямую влияет на точность результатов моделирования. Показано, что в предыдущих работах параметры пропускания t(x) либо зависят от неизвестной $C(\lambda, x)$, либо вычисляются на основе произвольно выбранных параметров, не зависящих от характеристик сенсора. В силу указанных причин в диссертационной работе предлагается и используется следующий способ вычисления параметров пропускания в естественной СКЦ сенсора $\chi(\lambda)$ на основе спектрального пропускания $T(\lambda, x)$:

$$\boldsymbol{t}(\boldsymbol{x}) = \int_0^\infty T(\lambda, \boldsymbol{x}) \, \boldsymbol{\chi}(\lambda) d\lambda.$$
(8)

В разделе 2.2 рассматривается случай, когда моделирование производится не в естественной СКЦ сенсора, а в некоторой *калибровочной СКЦ*:

$$\boldsymbol{p}_d(\boldsymbol{x}) = L^{-1} \, \boldsymbol{c}(\boldsymbol{x}) \otimes L^{-1} \, \boldsymbol{t}(\boldsymbol{x}), \tag{9}$$

где L – некоторая обратимая матрица преобразования координат цветов, называемая далее калибровочной матрицей; $p_d(x)$ – результат поканального моделирования прямой компоненты в калибровочной СКЦ. Расчеты по формуле (9) называются поканальным моделированием в калибровочных координатах. Калибровочная матрица L преобразует координаты цветов из калибровочной СКЦ в естественную СКЦ сенсора. Тривиальной калибровкой называется такая калибровка, когда в качестве калибровочной матрицы выбирается единичная матрица E. Для того чтобы представить результат поканального моделирования прямой компоненты в естественной СКЦ сенсора, необходимо преобразовать результат поканального моделирования в калибровочной СКЦ следующим образом:

$$\hat{\boldsymbol{d}}_{L}(\boldsymbol{x}) = L \boldsymbol{p}_{d}(\boldsymbol{x}) = L \left(L^{-1} \boldsymbol{c}(\boldsymbol{x}) \otimes L^{-1} \boldsymbol{t}(\boldsymbol{x}) \right).$$
(10)

Численным экспериментом показано, что выбор калибровочной СКЦ влияет на результаты и точность расчетов $\hat{d}_L(x)$.

В разделе 2.3 предлагается алгоритм поканального моделирования $(A\Pi M)$ в калибровочных координатах. Пусть на входе даны НИ в естественной СКЦ сенсора c(x) и карта спектрального пропускания $T(\lambda, x)$. Тогда АПМ в калибровочных координатах вычисляет изображение прямой компоненты следующим образом:

- 1. По $T(\lambda, x)$ вычисляется вектор пропускания t(x) согласно (8).
- 2. Координаты цветов c(x) и t(x) преобразовываются в калибровочные координаты цветов:

$$\boldsymbol{p}_c(\boldsymbol{x}) = L^{-1} \boldsymbol{c}(\boldsymbol{x}), \ \boldsymbol{p}_t(\boldsymbol{x}) = L^{-1} \boldsymbol{t}(\boldsymbol{x}).$$

3. Изображение прямой компоненты $p_d(x)$ в калибровочной СКЦ вычисляется через покомпонентное перемножение векторов $p_c(x)$ и $p_t(x)$:

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

4. Результат переводится в естественную СКЦ сенсора:

$$\hat{\boldsymbol{d}}_L(\boldsymbol{c}(\boldsymbol{x}), T(\lambda, \boldsymbol{x})) = L \, \boldsymbol{p}_d(\boldsymbol{x}).$$

В разделе 2.4 исследуется вопрос о том, как может быть измерена точность алгоритмов моделирования ПИ на основе НИ. Для измерения ошибки моделирования предлагается использовать функцию *ошибки цветопередачи*, которая строится на основе некоторой *функции цветового различия*. 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 $\chi(\lambda)$; P – некоторые параметры моделирования, например, показатель ослабления $\beta(\lambda)$, расстояние между объектом и камерой ρ и т.д.; $w(C(\lambda), P)$ – референсное изображение прямой компоненты в СКЦ сенсора; $f(c(C(\lambda)), P)$ – результат некоторого алгоритма моделирования ПИ на основе изображения $c(C(\lambda))$ и параметров P. *Ошибкой цветопередачи* алгоритма моделирования f на $C(\lambda)$ и P называется следующая функция

$$\varepsilon_{\boldsymbol{f}}(C(\lambda), P) = E\Big(\boldsymbol{w}\big(C(\lambda), P\big), \boldsymbol{f}\big(\boldsymbol{c}(C(\lambda)), P\big)\Big).$$
(11)

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

Проводится обзор используемых в существующих работах метрик качества, которые могут быть использованы как функции цветового различия. Показано, что в случае моделирования ПИ следует использовать функции цветового различия, которые измеряют ошибку не только в цветности, но и яркости. В качестве таких функций цветового различия могут быть использованы MSE, CIEDE2000 и т.д.

В разделе 2.5 предлагается способ калибровки с помощью спектрозональной модели (C3M) и исследуются его свойства. Функция $C(\lambda)$ принадлежит C3M, а сама функция называется спектрозональной, если:

$$C(\lambda) = \boldsymbol{p}^T \, \boldsymbol{\delta}(\lambda), \tag{12}$$

где
 p– вектор параметров спектрозональной функции,
а $\boldsymbol{\delta}(\lambda)$ спектральная вектор-функция следующего вида:

$$\delta_i(\lambda) = \begin{cases} 1, & \text{если } \lambda \subset \Delta_i \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$
(13)

где { Δ_i } такие, что $i \neq j : \Delta_i \cap \Delta_j = \emptyset$. Функции $\delta_i(\lambda)$ образуют базис в пространстве спектрозональных функций, а вектор p представляет собой координаты (параметры) функции $C(\lambda)$ в этом базисе. Показано, что переход из пространства координат спектрозональных функций в естественную СКЦ сенсора является линейным преобразованием:

$$\boldsymbol{c} = L \, \boldsymbol{p},\tag{14}$$

где L – спектрозональная матрица преобразования параметров в естественные координаты цветов сенсора. Каждый элемент спектрозональной матрицы L_{ij} вычисляется по формуле:

$$L_{ij} = \int_{\Delta_j} \chi_i(\lambda) \, d\lambda. \tag{15}$$

Доказывается, что для любых двух сенсоров, связанных условием МЛА, результаты поканального моделирования в калибровочных координатах совпадут, когда калибровочные матрицы являются спектрозональными матрицами соответствующих сенсоров.

В разделе 2.6 предлагается метод поиска параметров C3M, обеспечивающих наименьшую среднюю ошибку цветопередачи (11) АПМ со спектрозональной калибровкой на некотором наборе спектральных данных.

В разделе 2.7 рассматривается вопрос о возможности моделирования ПИ с помощью нелинейных спектральных моделей, которые ранее использовались при решении задач цветовой константности. Вводится понятие функции спектрального отображения. Предлагается метод моделирования прямой компоненты ПИ на основе функции спектрального отображения.

В **третьей главе** исследуются проблемы воспроизведения шума на имитациях ПИ, смоделированных с помощью поканального метода (7). Значения показателей ослабления и рассеяния в водной среде значительно отличаются в разных диапазонах длин волн, из-за чего средние значения сигнала в разных каналах натурального ПИ могут сильно различаться. А так как согласно модели Яне отношение сигнал/шум изображения монотонно растёт вместе со средним значением сигнала, то и уровень шума в разных каналах ПИ может существенно различаться, чего не наблюдается на НИ. Так, например, на натуральных ПИ отношение сигнал/шум в красном канале может быть значительно меньше, чем в среднем по каналам (см. рис. 3). В этой главе, используя модель Яне дробового шума на изображении, показывается, что существующие аугментационные алгоритмы на основе модели (7) не могут имитировать эффекты, проиллюстрированные на рис. 3.



Рис. 3 — Изображение цветовой мишени, снятой на воздухе и в воде: а) – НИ цветовой мишени; б) – красный канал НИ в естественной СКЦ сенсора; в) – зеленый канал НИ в естественной СКЦ сенсора; г) – ПИ цветовой мишени; д) – красный канал ПИ в естественной СКЦ сенсора; е) – зеленый канал ПИ в естественной СКЦ сенсора

В разделе 3.1, используя модель Яне, получены ожидаемые теоретические оценки дисперсии сигнала ПИ, рассчитанного с помощью поканального метода. Модель (7) связывает среднее значение сигнала НИ $\bar{c}(\boldsymbol{x})$ с соответствующим средним значением сигнала ПИ:

$$\overline{f}_{\eta}(\boldsymbol{x}) = \overline{f}(\boldsymbol{x}) = t(\boldsymbol{x})\,\overline{c}(\boldsymbol{x}) + b(\boldsymbol{x}).$$
(16)

А согласно модели Яне, дисперсия сигнала ПИ должна линейным образом зависеть от его среднего:

$$S_{f_{\eta}}^{2}(\boldsymbol{x}) = g \,\overline{f}(\boldsymbol{x}) + \sigma^{2} = g \, t(\boldsymbol{x}) \,\overline{c}(\boldsymbol{x}) + g \, b(\boldsymbol{x}) + \sigma^{2}.$$
(17)

Имитация ПИ $f_{\eta}(\boldsymbol{x})$, дисперсия которого удовлетворяет равенству (17), может быть рассчитана как

$$f_{\eta}(\boldsymbol{x}) = \overline{f}(\boldsymbol{x}) + \eta(\boldsymbol{x}) = t(\boldsymbol{x})\,\overline{c}(\boldsymbol{x}) + b(\boldsymbol{x}) + \eta(\boldsymbol{x}),\tag{18}$$

где $\eta(\boldsymbol{x})$ – реализация случайной величины, распределенной согласно нормальному закону $\mathcal{N}(0, S_{f_n}(\boldsymbol{x})).$

На рис. 4 представлены результаты численного моделирования по формуле (18). На полученной имитации ПИ видно, что уровень шума в красном канале выше, чем в зеленом, что хорошо соответствует натуральному ПИ, представленному на рис. 3.



Рис. 4 — Результаты расчета имитации ПИ по формуле (18) (слева направо): входное НИ без шума; имитация ПИ; соответствующий красный канал ПИ; соответствующий зеленый канал ПИ

В разделе 3.2 показано, что при расчетах имитаций ПИ поканальным методом (7), отношение сигнал/шум полученных имитаций будет завышенным. Так как при расчете имитаций в поканальном методе (7) преобразуется зашумленный сигнал $c(\boldsymbol{x})$, из (6) следует, что среднее $\overline{f}(\boldsymbol{x})$ и дисперсия $S_f^2(\boldsymbol{x})$ преобразованного сигнала будут равны:

$$\overline{f}(\boldsymbol{x}) = t(\boldsymbol{x})\,\overline{c}(\boldsymbol{x}) + b(\boldsymbol{x}),
S_{f}^{2}(\boldsymbol{x}) = g\,t^{2}(\boldsymbol{x})\,\overline{c}(\boldsymbol{x}) + t^{2}(\boldsymbol{x})\,\sigma^{2}.$$
(19)

Так как параметр пропускания $0 \leq t(\mathbf{x}) \leq 1$, из выражений (17 и 19) следует, что дисперсия имитации ПИ S_f^2 не превосходит ожидаемой теоретической оценки дисперсии $S_{f_n}^2$. Из этого следует, что отношение сигнал/шум $SNR_f = \overline{f}/S_f$ не меньше $SNR_{f_n} = \overline{f}/S_{f_n}$:

$$\frac{SNR_f}{SNR_{f_n}} = \frac{S_{f_n}}{S_f} \ge 1.$$
(20)

На рис. 5 построены графики зависимостей отношений сигнал/шум SNR_f и $SNR_{f_{\eta}}$ от параметра пропускания t. Для простоты b рассчитывалось по формуле (3); при расчетах предполагалось, что $b^{\infty} = 0.1 \bar{c}$. Согласно рис. 5 точность моделирования отношения сигнал/шум с помощью поканального метода без добавления шума может заметно падать вместе с расстоянием, так как при его увеличении параметр пропускания уменьшается.

На рис. 6 представлены результаты численного моделирования по формуле (7). При расчетах использовались те же параметры, что и при расчетах рис. 4. На полученной имитации ПИ видно, что уровни шума в





линия) и *SINR*_{f_{η}} (пунктирная линия) от параметра пропускания *t* красном и зеленом каналах существенно не различаются, что не соответствует теоретически ожидаемым результатам на рис. 4 и натуральному ПИ на рис. 3.



Рис. 6 — Результаты расчета имитации ПИ поканальным методом без добавления шума (7) (слева направо): зашумленное входное НИ; имитация ПИ; соответствующий красный канал ПИ; соответствующий зеленый канал ПИ

В разделе 3.3 исследуются представленные в предыдущих работах методы поканального моделирования, которые добавляют гомоскедастичный шум. С помощью численного моделирования показывается, что точность моделирования отношения сигнал/шум таких методов также может падать вместе с расстоянием.

В разделе 3.4 предлагается метод поканального моделирования с добавлением гетероскедастичного шума. Пусть g_{in}, σ_{in} – параметры модели Яне входного НИ $c(\boldsymbol{x})$, а g_{out}, σ_{out} – параметры модели Яне выходного ПИ. Согласно (19) дисперсия $S_{f,in}^2(\boldsymbol{x})$ сигнала, вычисленного поканальным методом без добавления шума (7), равна:

$$S_{f,in}^2(\boldsymbol{x}) = g_{in} t^2(\boldsymbol{x}) \,\overline{c}(\boldsymbol{x}) + t^2(\boldsymbol{x}) \,\sigma_{in}^2.$$
⁽²¹⁾

А согласно (17) теоретическая оценка дисперсии сигнала выходного ПИ $S^2_{f_n,out}(\boldsymbol{x})$ должна быть равна:

$$S_{f_{\eta,out}}^{2}(\boldsymbol{x}) = g_{out} t(\boldsymbol{x}) \bar{c}(\boldsymbol{x}) + g_{out} b(\boldsymbol{x}) + \sigma_{out}^{2}.$$
(22)

Тогда будем моделировать ПИ следующим образом:

$$f_{\varepsilon_{in,out}}(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} t(\boldsymbol{x}) c(\boldsymbol{x}) + b(\boldsymbol{x}), & \text{если } S^2_{f_{\eta},out}(\boldsymbol{x}) \le S^2_{f,in}(\boldsymbol{x}) \\ t(\boldsymbol{x}) c(\boldsymbol{x}) + b(\boldsymbol{x}) + \varepsilon_{in,out}(\boldsymbol{x}), & \text{иначе,} \end{cases}$$
(23)

где $\varepsilon_{in,out}(\boldsymbol{x})$ – реализация случайной величины, распределенной согласно нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратичным отклонением $\sigma_{\varepsilon_{in,out}}(\boldsymbol{x})$ равным:

$$\sigma_{\varepsilon_{in,out}}(\boldsymbol{x}) = \sqrt{S_{f_{\eta},out}^2(\boldsymbol{x}) - S_{f,in}^2(\boldsymbol{x})}.$$
(24)

Т.е. предлагается добавлять шум только тогда, когда теоретическая оценка дисперсии (22) оказывается больше дисперсии (21). В качестве оценки среднего значения $\bar{c}(\boldsymbol{x})$ в каждом пикселе, необходимого для вычисления $S_{f_{\eta},out}^2(\boldsymbol{x})$ и $S_{f,in}^2(\boldsymbol{x})$, предлагается использовать $c(\boldsymbol{x})$. Ясно, что при $g_{in} = g_{out} = g$ и $\sigma_{in} = \sigma_{out} = \sigma$ среднее и дисперсия сигнала ПИ, рассчитанного по формулам (23 и 24), стремятся к теоретическим оценкам (16 и 17).

На рис. 7 представлены имитации ПИ, рассчитанные предложенным методом поканального моделирования с добавлением шума (23 и 24). При расчетах полагалось $g_{in} = g_{out} = g$ и $\sigma_{in} = \sigma_{out} = \sigma$, и использовались те же параметры, что и при расчетах рис. 4. Видно, что полученные результаты хорошо соответствуют теоретически ожидаемым результатам на рис. 4 и натуральному ПИ, представленному на рис. 3.



Рис. 7 — Результаты расчета имитации ПИ предлагаемым поканальным методом с добавлением шума (23 и 24) (слева направо): зашумленное входное НИ; имитация ПИ; соответствующий красный канал ПИ; соответствующий зеленый канал ПИ

В четвертой главе описаны разработанный программный комплекс и результаты проведенных с помощью него численных экспериментов. В разделе 4.1 описан разработанный программный комплекс на языке Python 3.5, состоящий из следующих компонент: модуль для работы со спектральными данными; программа спектрального расчета НИ; программа спектрального расчета ПИ; программа калибровки цифровой камеры; программа аугментационного моделирования набора ПИ с идеалами; программа измерения точности алгоритмов аугментационного моделирования. На рис. 8 представлена схема разработанного программного комплекса. Общая длина кода составляет чуть менее 3000 строк. Пример ПИ, рассчитанного программой аугментационного моделирования на основе наземного RGB-D изображения, представлен на рис. 9.



Рис. 8 — Схема разработанного программного комплекса



Рис. 9 — Результаты имитации ПИ (слева направо): надводное RGB изображение; его карта дальности; имитация ПИ

В разделе 4.2 приведено описание численного эксперимента по измерению точности цветопередачи разработанного АПМ прямой компоненты в случае тривиальной и спектрозональной калибровок.

В пункте 4.2.1 ставится вопрос о том, в какой СКЦ должна вычисляться функция цветового различия, на основе которой строится ошибка цветопередачи (11). В диссертационной работе рассматривается случай, когда моделирование ПИ проводится с целью показать изображение человеку с помощью дисплея. Поэтому функция цветового различия измеряется в СКЦ стандартного наблюдателя СІЕ. Для перехода в СКЦ стандартного наблюдателя СІЕ из естественной СКЦ сенсора используются цветокорректирующие матрицы, а в качестве функции цветового различия используется СІЕDE2000. В пункте 4.2.2 описаны общедоступные спектральные данные, которые используются в эксперименте, и процесс их предварительной обработки. В качестве показателей ослабления использовались показатели вертикального диффузного ослабления 10 типов вод Ерлова. Для каждого типа воды моделировались изображения прямых компонент 350 окрасок Кринова, при расстояниях от камеры до объектов, варьирующихся от 1 до 10 метров. В качестве вектор-функций чувствительностей сенсоров использовались вектор-функции чувствительностей сенсоров камер Canon 500D и Nikon D90 и вектор-функция цветового соответствия стандартного наблюдателя СІЕ. Используя эти данные, были рассчитаны наборы функций спектральных пропусканий, спектральных яркостей и наземных изображений.

В пункте 4.2.3 описывается численный эксперимент. Используя рассчитанные наземные изображения, спектральные яркости и пропускания, для каждого сенсора моделировались изображения прямых компонент с помощью АПМ с соответственно тривиальной и спектрозональной калибровками. Для каждого сенсора параметры спектрозональной модели были предварительно подобраны так, чтобы они минимизировали среднее значение ошибки цветопередачи АПМ со спектрозональной калибровочной матрицей по всем данным. Затем для каждого сенсора были подсчитаны соответствующие значения ошибок цветопередачи (11) АПМ с тривиальной калибровкой и АПМ со спектрозональной калибровкой.

В пункте 4.2.4 описываются и анализируются результаты численного эксперимента. Показано, 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 сенсорам и данным ошибка цветопередачи АПМ со спектрозональной калибровкой оказывается на 29% меньше относительно АПМ с тривиальной калибровкой.

В разделе 4.3 приведено описание эксперимента на натуральных данных по измерению точности разработанного метода поканального моделирования в естественной СКЦ сенсора с добавлением шума.

В пункте 4.3.1 описывается процесс сбора и обработки набора ПИ цветовой мишени DGK Color Tools WDKK. В воде разводилась краска в различных пропорциях, что позволило получить 5 различных типов воды. Для каждого типа воды производились съемки на 3 расстояниях (30, 40 и 50 см). В итоге было отобрано 15 ПИ, по 1 на каждые тип воды и расстояние, и одно НИ. На каждом изображении были размечены положения 18 цветовых областей на мишени.

Значения пикселей собранных изображений были обработаны так, чтобы значения сигнала каждого изображения находились в диапазоне

[0, 100]. Кроме того, для компенсации разницы в ISO и времени выдержки значения сигналов ПИ были дополнительно отмасштабированы. Таким образом, в результате обработки изображений были получены НИ c и множество ПИ $\{w\}$.

В пункте 4.3.2 описана процедура оценки параметров модели Яне на собранных изображениях. Полученные оценки параметров модели Яне лежат в следующих диапазонах: $g \in [0.10, 0.25], \sigma^2 \in [0.00, 0.23].$

В пункте 4.3.3 описана процедура оценки параметров пропускания t и компоненты обратного рассеяния b для каждого канала и каждой области цветовой мишени ПИ. Рассчитанные параметры пропускания и компоненты обратного рассеяния лежат в следующих диапазонах: $t \in [0.02, 0.80]$, $b \in [0.00, 0.35]$.

В пункте 4.3.4 приводится описание численного эксперимента и его результатов. Используя полученные значения параметров пропускания t и рассеяния b, по каждому пикселю цветовой области НИ были рассчитаны соответствующие имитации пикселей цветовых областей ПИ с помощью поканального метода моделирования без добавления шума (7) и предложенного поканального метода моделирования с добавлением шума (23 и 24). Для каждой цветовой области i и канала j натурального ПИ w_{ij} и их имитаций f_{ij} и $f_{\varepsilon ij}$, полученных соответственно методом без добавления шума (7) и предложенным методом с добавлением шума (23 и 24), были вычислены соответствующие оценки среднего и дисперсии сигнала: $(\overline{w}_{ij}, S^2_{f_{\varepsilon ij}})$, $(\overline{f}_{ij}, S^2_{f_{ij}})$ и $(\overline{f}_{\varepsilon ij}, S^2_{f_{\varepsilon ij}})$. На основе полученных значений среднего и дисперсии были рассчитаны соответствующие оценки отношений сигнал/шум: $SNR_{w_{ii}}, SNR_{f_{ii}}$ и $SNR_{f_{\varepsilon ij}}$.

Абсолютная ошибка моделирования отношения сигнал/шум метода $m \in \{f, f_{\varepsilon}\}$ на цветовой области i и канале j ПИ w вычислялась как:

$$E_{w,m,ij} = |SNR_{w_{ij}} - SNR_{m_{ij}}|.$$
 (25)

Согласно расчетам на собранном наборе изображений значения абсолютной ошибки моделирования отношения сигнал/шум поканального метода без добавления шума лежат в 95% доверительном интервале [2.26, 2.48], а предложенного поканального метода с добавлением шума – [0.11, 0.13]. Соответствующие значения средних ошибок поканального метода без добавления шума и предложенного поканального метода с добавлением шума равны $E_f = 2.37$ и $E_{f_{\varepsilon}} = 0.12$, т.е. средняя абсолютная ошибка моделирования отношения сигнал/шум предложенного поканального метода с добавлением шума равны в 20 раз меньше, чем у поканального метода без добавления шума на собранном наборе данных в 20 раз меньше, чем у поканального метода без добавления шума.

В <u>заключении</u> приведены основные результаты работы, которые состоят в следующем:

- 1. Разработан алгоритм поканального моделирования цветных подводных изображений на основе наземных RGB-D изображений в калибровочных координатах цветов.
- Доказано, что для любых двух сенсоров, связанных условием Максвелла-Лютера-Айвза, результаты поканального аугментационного моделирования в калибровочных координатах цветов совпадут, когда матрицы преобразования в эти координаты являются соответствующими спектрозональными матрицами сенсоров.
- 3. Предложен численный метод поиска параметров спектрозональной цветовой модели, обеспечивающий наименьшую среднюю ошибку цветопередачи алгоритма поканального аугментационного моделирования подводных изображений в спектрозональной калибровочной системе координат.
- 4. Вычислительным экспериментом показано, что ошибка цветопередачи разработанного алгоритма поканального моделирования в калибровочных координатах цветов в среднем на 29% меньше, чем в естественных координатах цветов сенсора при измерении на общедоступных наборах данных.
- 5. Разработан численный метод аугментационного моделирования подводных изображений с добавлением шума, позволяющий получать изображения с параметрами шума, согласующимися с классической моделью Яне дробового шума на изображении.
- 6. На собранном наборе изображений показано, что значения абсолютной ошибки моделирования отношения сигнал/шум поканального метода моделирования без добавления шума лежат в 95% доверительном интервале [2.26, 2.48], а предложенного поканального метода моделирования с добавлением шума в [0.11, 0.13]. Средние значения ошибок поканального метода без добавления шума и предложенного поканального метода с добавлением шума равны соответственно 2.37 и 0.12, т.е. средняя абсолютная ошибка моделирования отношения сигнал/шум предложенного поканального метода с добавлением шума равны соответственно 2.37 и 0.12, т.е. средняя абсолютная ошибка моделирования отношения сигнал/шум предложенного поканального метода с добавлением шума в 20 раз меньше, чем у поканального метода без добавления шума.
- 7. Разработан комплекс программ, реализующий предложенные в работе методы и алгоритмы моделирования подводных изображений и позволяющий тестировать и сравнивать различные аугментационные алгоритмы моделирования цветных подводных фотографий, а также генерировать наборы данных для оптимизации (обучения) и тестирования алгоритмов улучшения цветных подводных фотографий.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus и Web of Science

1. Моделирование дробового шума цветных подводных изображений [текст] / Д. А. Шепелев [и др.] // Компьютерная оптика. — 2020. — т. 44, № 4. — с. 671—679.

В изданиях, входящих в базу цитирования RSCI

- 2. Шепелев, Д. А. О точности цветопередачи при поканальном моделировании подводных изображений [текст] / Д. А. Шепелев // Информационные процессы. — 2020. — т. 20, № 3. — с. 254—268.
- 3. О проблемах сопоставления пикселей стереопары с точки зрения линейной модели формирования цветного изображения [текст] / Д. А. Шепелев [и др.] // Сенсорные системы. — 2017. — т. 31, № 2. — с. 150—160.
- 4. Алгоритм взвешенного поиска проективного оптического потока, устойчивый к бликам [текст] / Д. А. Шепелев [и др.] // Сенсорные системы. 2018. т. 32, № 1. с. 73—82.

В изданиях из списка ВАК РФ

5. Разработка языка описания наблюдаемых свойств распознаваемых объектов в отсутствие примеров [текст] / А. Е. Марченко [и др.] // Труды ИСА РАН. — 2018. — т. 68, Спецвыпуск № S1. — с. 51—64.

В сборниках трудов конференций

- 6. О проблеме моделирования подводных изображений на основе надводных [текст] / Д. А. Шепелев [и др.] // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020). Сборник трудов по материалам VI Международной конференции и молодежной школы. т. 4. 2020. с. 1081—1089.
- Simulation Of Underwater Color Images Using Banded Spectral Model [TEKCT] / D. A. Shepelev [et al.] // Proceedings of the 34th International ECMS Conference on Modelling and Simulation ECMS 2020. Vol. 34. — 2020. — P. 11—18.
- Титов, В. Определение параметров поглощения и рассеяния на основе быстрого преобразования Хафа [текст] / В. Титов, Д. Шепелев, Д. Николаев // Сборник трудов 43-й междисциплинарной школыконференции ИППИ РАН «Информационные технологии и системы 2019». 2019. с. 495—500.

Шепелев Денис Александрович

Методы моделирования цветных подводных изображений на основе RGB-D изображений надводных сцен

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук

Подписано в печать ____. Заказ № _____ Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1.5. Тираж 20 экз. Типография _____