

УДК 535.8, 535.6.07, 621.38

Разработка и исследование цифрового фотоколориметра

© 2020 г. **В. Л. ЖБАНОВА**

Филиал Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт»,
Смоленск

E-mail: vera-zhbanova@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.04.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-09-24-32

Разработан цифровой фотоколориметр на основе приемника, согласованного с собственным рабочим цветовым пространством, и набора светофильтров. Представлено цветовое пространство $M'_2N'_2P'_2$ с характеристиками, схожими с кривыми системы XYZ CIE 1931 г. Для работы на цифровом колориметре разработана программа обработки черно-белых снимков. Пояснен алгоритм обработки изображений в системе CIE LAB. Описана методика проведения эксперимента на разработанном колориметре для нахождения координат цвета образцов на приемниках X1X2Y1Z1 в цветовом пространстве $M'_2N'_2P_2$. Для объективной оценки качества разработанных систем было найдено цветовое различие зеленых, желто-зеленых и желтых светофильтров. Проведен анализ экспериментальных значений. Разработанная система показала удовлетворительный результат. Сделаны выводы по дальнейшему применению разработанного фотоколориметра.

Ключевые слова: колориметр, цифровое устройство, координаты цвета, цветовое различие, программа, система цветоделения, фотоприемник.

Коды OCIS: 230.0230, 110.0110, 100.0100, 150.0150

ВВЕДЕНИЕ

Каждое цифровое устройство имеет определенный алгоритм обработки сигналов для удобства регистрации и воспроизведения информации. Современные цифровые колориметры проводят расчет цвета и цветности в различных колориметрических системах [1–3]. Стоит сразу обозначить, что, в принципе, любое устройство по определению цвета является колориметром. Поэтому современные цифровые фото- и видеокамеры, сканеры, цифровые минилабы также можно отнести к приборам определения цвета. Цифровая фотоколориметрия, являясь частью компьютерной оптики, все чаще применяется в таких сферах деятельности как медицина, биология, сельскохозяйственная промышленность и др. [4–6].

Но пытаясь работать с уже готовым изображением, исследователи часто сталкиваются с проблемами ограниченности изображений, полученных в цифровом виде, в частности, ограниченности цветового охвата регистрирующей системы [7–9].

Цифровые устройства регистрации цветных изображений основаны на различных системах цветоделения [10–12]. Основной проблемой этих устройств является метрологическое обеспечение цветовых измерений. Широко применяются системы цветоделения с пространственным разделением падающего излучения на поверхность матрицы по примеру шаблонов Байера, основанных на светофильтрах с базовыми цветами — красным, синим, зеленым, а иногда и дополнительными.

Эти системы обладают недостатками, не устранными ни в одной модификации. Основной недостаток — характеристики фильтров систем цветоделения [13, 14]. Предлагаемые современные цифровые устройства ориентированы в основном на адекватную передачу яркостной информации, цветовая же составляющая снимка корректируется по большей части лишь специальными алгоритмами обработки.

После регистрации цветного изображения оно проходит два основных этапа преобразования.

1. Цветовая информация регистрируется матричным фотоприемником с определенными спектральными характеристиками, которые чаще имеют два максимума в различных областях спектра [13], что приводит к искажению реальных основных цветов.

Если снимок сохранить в формате RAW, то на этом этапе можно определить координаты полученных цветов. Однако в современных цифровых устройствах предусмотрены цветовые пространства, с которыми работают различные форматы изображений, такие как JPEG или PNG, поэтому проводится второй этап обработки снимка.

2. Данные переводятся в одну из цифровых колориметрических систем sRGB или AdobeRGB. Последние имеют небольшой цветовой охват и кривые сложения с отрицательными ветвями. Это приводит к тому, что при воспроизведении изображения часть цветовой информации будет потеряна, так как ни передающие камеры, ни сканеры не смогут передать ту информацию, которая заложена в этих ветвях кривых. Поэтому разработчики применяют сложные алгоритмы обработки и коррекции данных, полученных на втором этапе преобразования. Как результат, цветовая составляющая снимка претерпевает большие изменения, и цветность изображения уже не соответствует оригиналу.

Ранее были проведены исследования по влиянию выбора колориметрической системы для цифрового матричного фотоприемника с определенной системой цветоделения [14]. Как выяснилось, необходимо либо индивидуально подбирать цветовые пространства для каждого матричного фотоприемника, либо согласовывать формы спектральных характеристик светофильтров и кривых сложения цветовой системы. В связи с этим целью работы являет-

ся экспериментальное исследование цифрового колориметра на базе системы цветоделения с характеристиками, согласованными с разработанным цветовым пространством. В рамках поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- описать разработанные цветовую систему и согласованные фотоприемники на основе набора корректирующих светофильтров,

- создание бокса колориметра для проведения исследований по требованиям Международной комиссии по освещению (МКО — CIE, *Commission internationale de l'éclairage*),

- разработка программного обеспечения для определения цветовых различий, привносимых исследуемым колориметром,

- разработка методики проведения эксперимента, его проведение и анализ полученных результатов.

СИСТЕМА ЦВЕТОДЕЛЕНИЯ ПРИЕМНИКА

При разработке цветовых пространств необходимо учитывать возможности современных цифровых устройств регистрации и воспроизведения изображений. Требуется оптимизировать кривые цветового треугольника пространства таким образом, чтобы они имели минимальные отрицательные ветви, при этом основные цвета системы должны располагаться вблизи локуса и иметь минимальные включения нереальных цветов для дальнейшего согласования регистрирующих и воспроизводящих систем с наименьшими потерями. Таким образом, было предложено улучшить регистрацию цветных изображений сразу на техническом уровне уже на стадии регистрации снимка до преобразования в оперативном запоминающем устройстве и на программном уровне на стадии постобработки изображения.

На основе исследования и анализа разработанных цветовых треугольников было принято решение усовершенствовать треугольник $M'_2N'_2P'_2$ как наиболее перспективный.

Разработанный цветовой треугольник $M'_2N'_2P'_2$ полностью охватывает график цветности ху (рис. 1а). Координаты нового цветового треугольника $M'_2(0,74, 0,26)$, $N'_2(0, 1)$, $P'_2(0, -0,08)$. В отличие от системы CIE RGB 1931 г. он не имеет отрицательных ветвей, а количество включенных нереальных цветов минимальное по сравнению с цветовым тре-

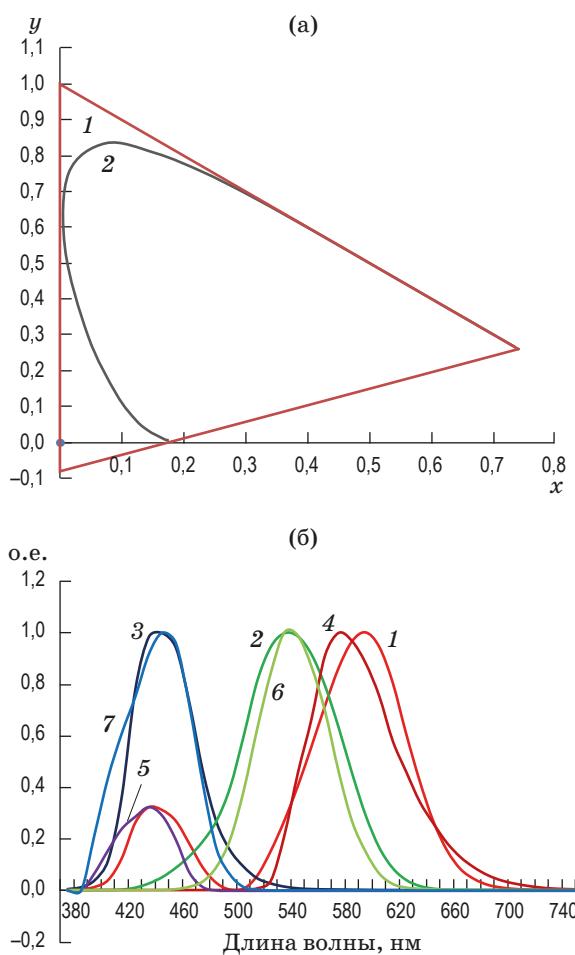


Рис. 1. График ху (а), где 1 — цветовой треугольник $M'_2N'_2P'_2$, 2 — локус. Кривые сложения $M'_2N'_2P'_2$ (б), где 1 — $\bar{m}(\lambda)$, 2 — $\bar{n}(\lambda)$, 3 — $\bar{p}(\lambda)$ и характеристики приемников X1X2Y1Z1, где 4 — $\bar{x}_1(\lambda)$, 5 — $\bar{x}_2(\lambda)$, 6 — $\bar{y}_1(\lambda)$, 7 — $\bar{z}_1(\lambda)$.

угольником системы XYZ 1931 г. Форма кривых новой системы достаточно точно повторяет форму кривых системы XYZ 1931 г. При данном наборе основных цветов удалось разнести максимумы кривых x и y на 33%. Предложенная система практически идеально подходит для реализации системы цветоделения X1X2Y1Z1 и позволит при дальнейших расчетах цвета (после регистрации изображения) получить цвет с минимальными искажениями.

Разработка и исследование новых систем описаны в источниках [14, 15].

Была проделана работа по подбору корректирующих светофильтров под кривые сложения колориметрической системы для матричного фотоприемника типа ПЗС Sony ICX274 [16]. Кривые подбирались таким образом, чтобы

Таблица 1. Набор корректирующих светофильтров

Система $M'_2N'_2P'_2$	Приемники X1X2Y1Z1	Набор корректирующих светофильтров
для M'_2	X1	C3C23, OC5, OC17
	X2	C3C9, FC1, ЖС3, CC15
для N'_2	Y1	ЗС10, C3C23, ЖЗС6
для P'_2	Z1	ЖС3, CC15, C3C21

форма и максимумы кривых максимально наилучшим образом совпадали с кривыми сложения самой системы $M'_2N'_2P'_2$ (рис. 1б). Набор корректирующих светофильтров представлен в табл. 1.

Исследованы разработанные системы $M'_2N'_2P'_2$ и X1X2Y1Z1. При анализе источника равнозернистого спектра E доказана согласованность обеих систем с XYZ СIE 1931 г. Полученные характеристики по форме превосходят современные аналоги и позволяют минимизировать потери при воспроизведении цвета. В результате математического моделирования и сравнения теоретических и практических кривых сложения были получены удовлетворительные результаты [16].

Для исключения поглощения света в цветных оптических стеклах набора корректирующих светофильтров было бы более практически воссоздать разработанные характеристики приемников на пленочных светофильтрах, однако, это дорогостоящий технологический процесс.

СТРУКТУРА КОЛОРИМЕТРА

Для создания цифрового колориметра, который должен работать в новой колориметрической системе, необходимо было разработать специальный бокс для компактности и мобильности устройства. Колориметр должен позволять расположить источник света для исследования любых объектов: прозрачных, полупрозрачных и непрозрачных. Основной задачей моделирования данного колориметра является его компактность, так как в дальнейшем планируется использовать его как переносной. Проведя анализ форм и методов проектирования оптико-электронных

приборов, был сконструирован бокс колориметра, состоящий из отдельных частей для удобства его транспортировки и дальнейшей модернизации.

Нижняя часть колориметра имеет цилиндрическую форму и включает крепление предметного столика, отверстие для крепления молочного стекла, бортик и крепление для короба с набором светофильтров. Предметный столик, на который помещается исследуемый объект, съемный и также имеет регулировку за счет резьбового соединения. Короб для светофильтров является съемным. Светофильтры выбирались по ГОСТ 9411-91 из каталога цветных оптических стекол. Они имеют одинаковую форму и толщину от 2,5 до 6 мм. Короб выполнен с учетом этих параметров и имеет сквозное отверстие, через которое излучение попадает на фотоприемник ПЗС. Диаметр этого отверстия 40 мм, что соответствует диаметру выбранного объектива.

Верхняя часть колориметра имеет полусферическую форму с отверстиями, которые расположены под углами 0 и 45° к нормали для освещения исследуемого объекта под разными углами, рекомендуемыми CIE. В этих отверстиях специально для фиксации в них источника излучения сделана резьба. С учетом габарита и формы источника излучения сделан специальный держатель лампы. Лампа вставляется в него, затем крепление вместе с лампой вкручивается в необходимое отверстие.

Для правильной визуальной оценки цвета необходимо осветить исследуемый объект таким образом, чтобы исключить на нем блики. В приборе реализована фотометрическая схема освещения/наблюдения d/0. Освещение будет проводиться из одной точки. Неиспользуемое отверстие закрывается заглушкой.

Также в нижней и верхней частях корпуса есть отверстия спереди для соединения двух его частей вместе. Они сделаны таким образом, чтобы при состыковке двух частей в передней части прибора создавалось отверстие диаметром 40 мм.

Принцип работы колориметра поясняется его конструктивной схемой, представленной на рис. 2.

Осветитель обеспечивает близкое к диффузному освещение образца в верхней полусфере и экранирует его от внешних световых помех. Данные условия освещения реализованы пу-

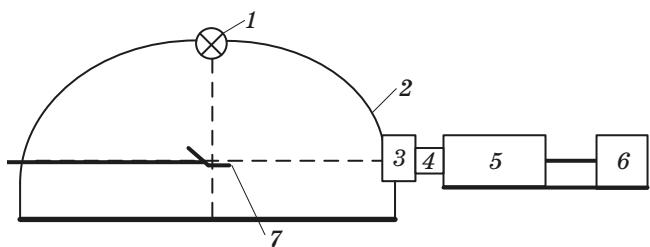


Рис. 2. Вид колориметра в разрезе. 1 — источник света, 2 — фотометрическое устройство, 3 — набор светофильтров, 4 — объектив, 5 — цифровая камера, 6 — ноутбук, 7 — предметный столик.

тем применения бокса полусферической формы, покрытого внутри материалом, обеспечивающим диффузное отражение — сульфатом бария. Источником света в данном исследовании является лампа типа А¹. Приведенный тип источника является базовым в ГОСТ 9411-91 для координат цветности на цветное оптическое стекло, которое выбрано в качестве объекта исследования.

Как показано на рис. 2, излучение от источника под углом 0° к нормали, отражаясь от стенок фотометрического устройства, создает диффузное освещение. Отраженный свет под углом 45° к нормали проходит отдельно через каждый светофильтр в наборе, через объектив, строящий изображение на цифровом матричном фотоприемнике цифровой камеры, регистрирующем снимок и отправляющем его через USB-кабель на ноутбук, где происходит обработка снимков. С помощью разработанной программы оператором выделяется рабочая область изображения. В результате получаются снимки, на основе которых находится среднее распределение яркости по каждой спектральной кривой приемника.

Для работы с исследуемым объектом в колориметре предусмотрен столик. Так как в качестве объекта исследования координат цвета были выбраны светофильтры по ГОСТ 9411-91 с параметрами не более высота/длина/ширина — 40/40/6 мм, которые размещались в коробе съемных светофильтров, то столик из бокса был удален.

Разработанный колориметр позволяет обеспечить адекватную оценку цветов прозрачных и полупрозрачных образцов.

¹ Источник типа А (CIE) — полный световой излучатель (идеальное черное тело) при цветовой температуре 2856 К.

Преимуществами прибора являются достоверная информация о цветовой составляющей изображения контролируемого образца за счет большого тела цветового охвата системы $M'_2N'_2P'_2$, возможность использования приемника X1X2Y1Z1, что позволит получить качественное воспроизведение зеленых и желто-зеленых цветов, а также работа в цветовых пространствах, близких к колориметрической системе XYZ CIE 1931 г., что минимизирует цветовые искажения при преобразовании цветовой информации. Подобный способ позволяет менять колориметрическую систему только лишь с помощью смены набора корректирующих светофильтров и преобразовывать цифровые данные в координаты цвета любого колориметрического пространства с наименьшими погрешностями.

Основной задачей исследования является обеспечение достоверной информации о цветовой составляющей изображения исследуемых объектов посредством регистрации матричным фотоприемником с системой цветоделения на светофильтрах с максимальным телом цветового охвата.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Для нахождения цвета в разработанном колориметре следует сделать четыре снимка с определенным набором светофильтров. Далее необходимо найти яркостные коэффициенты каждого снимка и провести расчет координат цвета. Для определения координат цвета и нахождения цветового различия была выбрана равноконтрастная колориметрическая система CIE LAB. Для разработки программы обработки снимков выбрана среда MATLAB, так как в ней возможно исследование 16-ти битных изображений и у нее достаточно понятийный математический аппарат.

Для реализации программного расчета цветовых характеристик было проведено исследование в системе CIE LAB по трем методам нахождения цветового различия — 1976, 1994 и 2000 гг. Программа проверена на работоспособность. В итоге была выбрана методика, предложенная CIE в 1994 г. как наиболее перспективная [15].

Программа построена таким образом, чтобы либо достаточно было загрузить цифровые

снимки, либо ввести уже известные координаты цвета объекта и источника (опорного белого света²) в системе CIE XYZ. После преобразований цветовых координат находятся цветовые изменения по трем методам, предложенным CIE в 1976, 1994 и 2000 гг.

Программа MATLAB при запуске своего кода обрабатывает его мгновенно, для того чтобы оператор успел выделить нужные области в изображениях и загрузить их в рабочую область программы используются функции pause, устанавливающие выполнение кода на паузу, устанавливаемую в секундах. Проводится анализ четырех снимков. Затем значения средних яркостей изображений посредством функции mean загружаются в программу как M, N, P, где M = X1 + X2, N = Y, P = Z.

Затем осуществляется пересчет координат цвета из системы $M'_2N'_2P'_2$ в CIE XYZ [17. С. 254] через коэффициенты пересчета

$$X_{X1+X2} = 1, \quad X_{Y1} = 0, \quad X_{Z1} = 0,$$

$$Y_{X1+X2} = 0,3514, \quad Y_{Y1} = 0,7227, \quad Y_{Z1} = -0,0741,$$

$$Z_{X1+X2} = 0, \quad Z_{Y1} = 0, \quad Z_{Z1} = 1.$$

Разработанная программа позволяет не только рассчитать цветовые параметры, но и найти цветовые различия при вводе эталонных значений тремя методами. Последние позволяют провести более качественный анализ исследований как объектов, так и самой системы.

По разработанной программе возможно рассчитать координаты цветности только для определенного приемника, так как коэффициенты пересчета из системы $M'_2N'_2P'_2$ в систему XYZ CIE 1931 г. подбираются с учетом спектральных характеристик. Поэтому для унификации программы можно создать подпрограмму загрузки рассчитанных коэффициентов, приведенных в выражениях выше.

Следует отметить, что для расчета теоретических и практических значений в системе CIE LAB были использованы теоретические и практические координаты цвета источника света соответственно (табл. 2).

² Источник, которым освещается объект исследования.

Таблица 2. Координаты цвета источника излучения

Источник света	Практика			Теория		
	X ₀	Y ₀	Z ₀	X ₀	Y ₀	Z ₀
Лампа типа А	20498	17656	3871	1184,85	1078,87	383,65

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения эксперимента выбрана черно-белая видеокамера PL-B959. Она имеет широкий круг применений и высокую производительность, в качестве фотоприемника используется 2,0-х мегапиксельная монохромная матрица ПЗС Sony ICX274. Для регистрации сигнала в различных форматах и предустановках имеется специальная программа PixeLINK Capture OEM. На входе видеокамеры крепятся удлинительные кольца общей длиной 40 мм, позволяющие уменьшить угловое поле системы до 5° [18].

Посредством программы PixeLINK Capture OEM осуществляются управление настройками камеры PL-B959 и создание снимка в формате RAW, что позволяет получить 16-ти битное исходное (без интерполяции) изображение. Чем больше бит будет зарегистрировано, тем больше градаций яркости и меньше ошибки измерений. В закладке Region of Interest выбирается формат пикселя 16 бит, который позволит получить 65536 уровней квантования на пикселе. Камера должна располагаться на таком расстоянии, чтобы отраженное излучение полностью заполняло матрицу, и среднее значение пикселов составляло не более 65000 по яркости — так исключается насыщение матрицы. Формат файла RAW позволит работать с 16-ти битным изображением, что минимизирует шумы и потери. Установка γ-коррекции на 1 в закладке Basic Controls устраняет саму коррекцию изображения, что дает достоверный результат по каждому пикселу, так как входные и выходные значения будут связаны по линейному закону. В той же закладке устанавливается значение экспозиции 10, чтобы матрица быстро не входила в насыщение. Измерения проводились при температуре матрицы не выше 40 °C во избежание тепловых шумов.

Таким образом, в ходе исследований для достоверных результатов измерения были выбраны следующие предустановки камеры:

формат пикселя — 16 бит, формат файла — RAW, γ-коррекция — 1, экспозиция — 10. Причем экспозиция может меняться в зависимости от насыщенности цвета образца.

Для реализации разработанной системы M₂N₂P₂ [16] на установке были сделаны снимки четырех каналов X₁, X₂, Y, Z для каждого объекта исследования на основе приведенной программы.

Регистрация изображения с каждого канала происходила 5 раз. Расчет среднего значения яркости каждого пикселя изображения можно делать как в программе MATLAB, так и в других программах для обработки 16-ти битного изображения. По среднему значению яркости каждого из каналов далее находились координаты цвета объекта и цветовые различия в равноконтрастной колориметрической системе CIE LAB по методике 1994 г.

В качестве объектов исследования выбраны светофильтры, соответствующие ГОСТ 9411-91. Сформированы три набора желтых, желто-зеленых и зеленых светофильтров: их цвета наиболее важны в цветовом ощущении человека. В каждом наборе по 5 светофильтров, что ограничено небольшим номенклатурным перечнем наборов цветных оптических стекол, также были исключены образцы малой цветовой насыщенности. Каждый светофильтр был исследован на спектрофотометре SPECOL 210 с шагом 10 нм. На основе найденных характеристик были рассчитаны координаты цвета каждого светофильтра в системе XYZ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты эксперимента представлены в табл. 3. Все значения координат цвета, полученные на практике, подвергались коррекции с учетом шумов, поэтому из значений вычитались среднестатистические отклонения по каждому каналу. В результате, если параметр был ниже этого отклонения, то в таблицу записывался ноль.

Таблица 3. Координаты цвета светофильтров и цветовое различие

Свето-фильтр	Координаты цвета*						Цветовое различие CIE LAB, 1994	
	Практика			Теория				
	X	Y	Z	X	Y	Z		
ЖС12	18684	15973	1758	996,45	918,37	106,35	7,3	
ЖС16	18485	15887	556	987,67	911,82	59,22	4,03	
ЖС17	19244	16173	258	946,40	839,20	22,58	6,95	
ЖС18	17933	15472	0	907,09	749,13	6,99	11,34	
ЖС20	17241	14409	55	960,32	823,33	28,34	5,03	
				Среднее значение			6,9	
ЖЗС1	3134	4506	0	159,66	246,21	14,59	5,80	
ЖЗС5	16502	15223	1513	856,91	829,18	156,80	7,75	
ЖЗС6	15706	13899	587	754,01	748,34	92,29	10,96	
ЖЗС12	202	459	0	13,91	26,07	1,44	0,92	
ЖЗС18	15112	14402	635	788,68	773,81	73,50	9,03	
				Среднее значение			6,8	
ЗС1	3142	4933	0	129,23	237,35	32,78	10,29	
ЗС3	2022	3617	953	96,76	188,30	89,15	5,16	
ЗС8	11685	12304	1491	672,52	749,96	168,98	5,66	
ЗС10	4572	5690	0	206,01	298,48	12,19	6,92	
ЗС11	2387	4117	80	102,63	213,47	41,35	8,56	
				Среднее значение			7,3	

Примечание. *Теоретические и практические координаты цвета источника света типа А, необходимые для расчета координат цвета, приведены в табл. 2.

Среднее цветовое различие в каждой группе составило около 7 ед. (см. табл. 3). Полученные значения во многом зависят от согласования спектральных характеристик приемников и кривых сложения цветового треугольника $M'_2N'_2P'_2$, а также от динамического диапазона матричного фотоприемника. Точное согласование кривых сложения ограничивается набором цветных оптических стекол, а динамический диапазон — возможностями матричного фотоприемника.

Большие значения координат цвета таких светофильтров как ЖС18, ЖЗС6 и ЗС1 связаны скорее с их цветовой насыщенностью и оптической плотностью. Несмотря на то, что камеру подстраивали под исследуемый светофильтр, меняя выдержку, снимки иногда получались либо слишком затемненными, либо высветленными, из-за чего в полезном сигнале увеличивался уровень шумов фотоприемника.

Как указано в источнике [3. С. 76], «современные технологии печати могут обеспечить значение соответствия цвета репродукции оригиналу в пределах 2–6 ед.», что для современных регистрирующих устройств тоже вполне приемлемый результат особенно с учетом всех ограничений, накладываемых на проведенный эксперимент.

Для сравнительной оценки результатов координаты цвета переведены в координаты цветности равноконтрастной системы $u'v'$ 1976 г. и представлены в табл. 4. По значениям, представленным в табл. 4, видно, что цветовое различие превышает допустимое отклонение 0,005. Но если сравнить результаты по цветовому различию Δe с приведенными в источнике [9], то станет понятно, что полученные значения в несколько раз меньше теоретически рассчитанных данных для других матричных приемников с характеристиками,

Таблица 4. Координаты цветности светофильтров и цветовые различия

Свето-фильтр	Координаты цветности в системе ху				Координаты цветности в системе u'v'				Различия цветности		Цветовое различие*	
	Теория		Практика		Теория		Практика					
	х	у	х	у	u'	v'	u'	v'	Δu'	Δv'		
ЖС12	0,4930	0,4544	0,5131	0,4386	0,2641	0,5477	0,2836	0,5455	0,0194	0,0022	0,0196	
ЖС16	0,5042	0,4655	0,5292	0,4549	0,2662	0,5529	0,2861	0,5532	0,0199	0,0003	0,0199	
ЖС17	0,5234	0,4641	0,5394	0,4534	0,2783	0,5553	0,2931	0,5543	0,0148	0,0010	0,0148	
ЖС18	0,5454	0,4504	0,5368	0,4632	0,2983	0,5542	0,2869	0,5570	0,0114	0,0027	0,0117	
ЖС20	0,5300	0,4544	0,5438	0,4545	0,2868	0,5532	0,2953	0,5553	0,0085	0,0021	0,0088	
Среднее значение по группе											0,015	
ЖЗС1	0,3797	0,5856	0,4049	0,5951	0,1639	0,5687	0,1736	0,5740	0,0097	0,0053	0,0110	
ЖЗС5	0,4650	0,4499	0,4983	0,4569	0,2490	0,5421	0,2662	0,5493	0,0172	0,0072	0,0187	
ЖЗС6	0,4728	0,4693	0,5207	0,4603	0,2461	0,5495	0,2784	0,5537	0,0323	0,0041	0,0326	
ЖЗС12	0,3358	0,6294	0,2949	0,7051	0,1359	0,5733	0,1085	0,5837	0,0274	0,0105	0,0294	
ЖЗС18	0,4821	0,4730	0,5001	0,4799	0,2501	0,5520	0,2578	0,5567	0,0078	0,0047	0,0091	
Среднее значение по группе											0,020	
ЗС1	0,3236	0,5943	0,3891	0,6109	0,1365	0,5640	0,1629	0,5756	0,0264	0,0116	0,0289	
ЗС3	0,2586	0,5032	0,3067	0,5487	0,1214	0,5315	0,1368	0,5505	0,0154	0,0190	0,0245	
ЗС8	0,4226	0,4712	0,4586	0,4829	0,2164	0,5431	0,2329	0,5517	0,0164	0,0086	0,0186	
ЗС10	0,3987	0,5777	0,4455	0,5545	0,1746	0,5692	0,2034	0,5695	0,0288	0,0003	0,0288	
ЗС11	0,2871	0,5972	0,3625	0,6253	0,1197	0,5603	0,1483	0,5755	0,0286	0,0152	0,0323	
Среднее значение по группе											0,026	

Примечание. * Цветовое различие определяется как евклидово расстояние между двумя точками в равноконтрастной системе u'v' 1974 г.

не согласованными по форме с кривыми сложения цветовых систем. Цветовые различия теоретически рассчитанных координат цветности в источнике [14] для матричных фото-приемников с различными спектральными характеристиками для 14 цветов Манселла в системе u'v' 1974 г. составляют в среднем от 0,015 до 0,18 в зависимости от выбранного рабочего цветового пространства. Для представленного колориметра экспериментальные значения составили максимум 0,03, что доказывает конкурентоспособность разработанного приемника на основе цветового пространства с характеристиками, близкими к системе XYZ CIE 1931 г., перед другими цифровыми устройствами регистрации цветных изображений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В основе работы лежат теоретические, эмпирические и количественные методы исследования. Основным подходом при реализации проекта являлся экспериментально-исследовательский. Для решения поставленных задач были использованы основные положения колориметрии, колориметрические системы, их преобразования и способы создания цветовых пространств.

Описана методика работы фотоколориметра в собственном рабочем цветовом пространстве $M'_2N'_2P'_2$. При создании колориметра были разработаны программа и корпус устройства для определения координат цвета объекта по четырем снимкам. Проведено исследование цифрового фотоколориметра с новыми

характеристиками и получены удовлетворительные результаты. Доказана перспективность разработки систем цветоделения матричных фотоприемников с новыми спектральными характеристиками, близкими к кривым сложения цветовых треугольников колориметрических систем, особенно к таким как XYZ CIE 1931 г.

По полученным результатам разработанный фотоколориметр можно применять в таких областях как медицина (для анализа крови и костной ткани), химии и физике (определение концентрации вещества), биологии (для исследования генетических изменений биологических тканей), ювелирной промышленности (определение цвета и цветности алмазов и бриллиантов), горнодобывающей промышленности (определение цвета и цветности горных пород и руд), а также текстильной промышленности для определения цвета тканей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00176.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кривошеев М.И., Кустарев А.К. Цветовые измерения. М.: Энергоатомиздат, 1990. 240 с.
2. Марин М. Цифровые фотоаппараты. СПб: Питер, 2003. 204 с.
3. Домасев М.В., Гнатюк С.П. Цвет, управление цветом, цветовые расчеты и измерения. СПб: Питер, 2009. 224 с.
4. Setiawan A.W., Mengko R., Putri A.P.H., et al. Classification of palm oil fresh fruit bunch using multiband optical sensors // Internat. J. Electrical and Computer Engineering. 2019. V. 9. № 4. P. 2386–2393.
5. Jitanan S., Chimlek P. Quality grading of soybean seeds using image analysis // Internat. J. Electrical and Computer Engineering. 2019. V. 9. № 5. P. 3495–3503.
6. Sutkowski M.I., Saukova Y.A. Research of digital camera dynamic range on the imaging processing basis // Приборы и методы измерений. 2017. Т. 8. № 3. С. 271–278. (DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-271-278).
7. Канаева И.А., Болотова Ю.А. Методы коррекции цвета и яркости при создании панорамных изображений // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 5. С. 885–897. (DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-885-897).
8. Cepeda-Negrete J., Sanchez-Yanez R., Correa-Tome F., et al. Dark image enhancement using perceptual color transfer // IEEE Access. 2018. V. 6. P. 14935–14945. (DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2763898).
9. Пальчикова И.Г., Смирнов Е.С. Интервальная оценка параметров цвета из цифровых изображений // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41. № 1. С. 95–102.
10. Жбанова В.Л. Системы цветоделения матричных фотоприемников: монография. Смоленск: Универсум, 2018. 186 с. (ISBN: 978-5-91412-392-2).
11. Mihoubi S., Lapray P.J., Bigue L. Survey of demosaicking methods for polarization filter array images // SENSORS. 2018. V. 18. № 11. Article Number: 3688 (DOI: 10.3390/s18113688).
12. Kartik Venkataraman. Color filter imaging array and method of formation // US Patent 7708686 B2. May 04, 2010.
13. Lyon R.F., Hubel P.M. Eyeing the camera: Into the next century // IS&T Reporter «The window on imaging». 2002. V. 17. № 6. P. 1–7.
14. Zhanova V.L., Nubin V.V. A method of improving colour rendition of digital photo- and videocameras // Light & Engineering. 2014. V. 22. № 2. P. 84–89. (ISSN: 0236-2945).
15. Zhanova V.L. The use of mathematical packages when researching colorimetry // 2018 IV Internat. Conf. Information Technologies in Engineering Education (Inforino). Moscow, 2018. P. 1–4. (DOI: 10.1109/INFORINO.2018.8581794).
16. Жбанова В.Л. Система цветоделения с характеристиками, близкими к XYZ МКО 1931 г. // Научный вестник НГТУ. 2019. Т. 74. № 1. С. 167–180. (DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-167-180).
17. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники: учебн. пособие для вузов в 2-х ч. // Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия. 2-е изд., перераб. и доп. / М.: Энергоатомиздат, 1989. 432 с.
18. Zhanova V.L., Parvu Yusov Y.B. Experimental investigation of the color-separation system of photodetector array // JOT. 2019. V. 86. № 3. P. 177–182. (DOI: 10.1364/JOT.86.000177).