

Колориметрическое исследование самосветящихся объектов в программно-аппаратных средах методом реализации многомерных шкал

Е. Н. Савкова

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь,
e-mail: evgeniya-savkova@yandex.ru

Показано, что для протяжённых самосветящихся объектов с широким диапазоном яркостей пока не решены вопросы метрологической прослеживаемости, поскольку при обработке цифровых изображений используются ранговые шкалы встроенных систем. Для таких шкал отсутствует «фиксированная» единица, что не позволяет получить надёжные результаты и обеспечить единство измерений. Описан эксперимент по оценке точности определения интенсивности (координат) цвета самосветящихся объектов. В условиях повторяемости и промежуточной прецизионности по сравнению с референтной методикой измерений определены координаты цвета и цветности самосветящихся объектов (опорных образцов) путём их многократной цифровой регистрации с помощью систем технического зрения. Определены возможности разрабатываемой методологии колориметрических исследований в программно-аппаратных средах с позиций построения многомерной условной шкалы.

Ключевые слова: колориметрия, цифровое изображение, цветность, цветовая шкала, точность.

Введение. Объективная колориметрия подразделяется на базовую и высшую [1]. Базовая колориметрия – «это инструмент прогнозирования того, будут ли соответствовать друг другу по цвету два световых потока (визуальных стимулов) с разным спектральным распределением энергии при заданных условиях наблюдений; прогноз определения трёхстимульными значениями двух визуальных стимулов, и если трёхстимульные значения у одного стимула точно такие же, как и у другого, то цветовое соответствие будет констатировано усреднённым наблюдателем с нормальным цветовым зрением» [2]. Таким образом, базовая колориметрия основывается на стандартизованных моделях условий наблюдения и находит применение при контроле продукции в медицине, химической, лакокрасочной промышленности, полиграфии [3–5]. В работе [4] описаны колориметрические методы определения следов металлов, в [6] предложены методы исследований влияния водохранилищ на изменение окисляемости и цветности речной воды, автором [7] разработаны методы и средства оперативной идентификации пород древесины. В работах [5, 8, 9] представлены колориметрические методы исследований космических объектов – галактик и туманностей, позволяющие получать информацию о распределениях энергии в их спектре, её абсолютной величине и временных характеристиках переменности.

Колориметрия высокого разрешения определена как методология качественных и количественных методов исследований цветовых характеристик самосветящихся и несамосветящихся объектов, основанная на технологиях

цифровой регистрации и обработке цифровых изображений, позволяющей с заданным уровнем достоверности обеспечивать надёжные результаты. Методология колориметрии высокого разрешения или колориметрии в программно-аппаратных средах разрабатывается на базе научно-исследовательской лаборатории оптико-электронного приборостроения Белорусского национального технического университета в рамках заданий Государственной программы научных исследований «Электроника и фотоника».

Актуальность настоящей работы определяется тем, что в настоящее время повсеместно используются устройства отображения информации индивидуального и коллективного пользования, вблизи которых люди проводят много времени на работе и отдыхе, поэтому важнейшей проблемой является их исследование с позиций безопасности и эргономики. В то же время развиваются перспективные методы контроля объектов, основанные на применении технологий цифровой регистрации с высоким пространственным разрешением и обработке полученных изображений. Данные методы предполагают принятие решений о соответствии–несоответствии объекта установленным требованиям по контролируемому параметру на основе графических данных, считываемых с устройства отображения информации, при измерительном, визуальном и регистрационном контроле.

Учитывая высокую стоимость и потенциальную опасность объектов исследований, а также многообразие средств технического и программного обеспечения, входящих в измерительную систему, первой важной проблемой

является обеспечение метрологической прослеживаемости при измерительном контроле, которое предполагает ссылки на опорные образцы (эталоны, стандартные образцы) путем иерархии калибровок. Существует опыт определения координат цветности продукции – несамосветящихся объектов, с использованием систем технического зрения, например, в медицине, полиграфии, лакокрасочной промышленности, в основу которого положен дифференциальный метод измерений, основанный на определении небольших цветовых различий для узких измерительных задач. Вопросы метрологической прослеживаемости пока не решены для протяжённых самосветящихся объектов с широким диапазоном яркостей, вследствие использования ранговых шкал встроенных систем при обработке цифровых изображений. Применение ранговых шкал не позволяет получать надёжные результаты, поскольку в этих шкалах нет «фиксированной» единицы, т. е. не выполняется условие обеспечения единства измерений.

Вторая проблема касается регистрационного и визуального видов контроля, предполагающего принятие решений о состоянии объекта на основе регистрации событий или наличия (отсутствия) какого-либо признака (капиллярная дефектоскопия, визуально-оптический контроль внутренних поверхностей объектов, лазерное сканирование зданий, зондирование поверхности Земли и др.). В данном случае предусмотрены специальные программы проверки квалификации лабораторий, основанные на использовании шкал наименований для идентификации определенного (известного) свойства или вещества. Однако такие программы применяются для аккредитованных лабораторий в пределах их области аккредитации и не затрагивают научной сферы деятельности.

Цель настоящей статьи – разработка информационно-методического обеспечения и метрологического обеспечения процессов исследований колориметрических свойств объектов в программно-аппаратных средах. Указанные среды основаны на технологиях цифровой регистрации с высоким пространственным разрешением и обработке графических данных и позволяют повысить точность, информативность и эффективность контроля объектов на всех стадиях жизненного цикла за счёт обеспечения метрологической прослеживаемости путём создания условной многомерной шкалы.

Основные положения колориметрии в программно-аппаратных средах. Сформулируем основные положения колориметрии в программно-аппаратных средах:

цифровое изображение представляет собой результат свёртки цветовых охватов элементов информационно-измерительного канала, включающего источник света, освещаемый объект, матричное фотоприёмное устройство, программное обеспечение, устройство отображения информации. Каждый элемент канала есть потенциальный объект исследований в зависимости от поставленной задачи – оценки цветопередачи источника света, контроля цветовых и яркостных свойств освещаемого объекта, оценки возможностей программного обеспечения системы, регулировки цифровой камеры, настройки устройства отображения информации и др. Таким образом, цифровое изображение

является информационной моделью одного из элементов при условии, что все остальные элементы валидированы [10];

принципы и методы измерений фотометрических и колориметрических характеристик объектов в программно-аппаратных средах основаны на цифровой регистрации объекта и аттестованных опорных образцов матричным фотоприёмным устройством, оптико-электронных преобразованиях в информационно-измерительном канале и обработке полученных цифровых изображений, при которой строят градуировочные зависимости интенсивности цифрового изображения от яркости опорных образцов и времени экспозиции для трех цветовых каналов и определяют яркость и цветность объекта в контрольной точке. Аттестованные (опорные) образцы обеспечивают метрологическую прослеживаемость путем построения многомерной условной шкалы и представляют собой неточечные первичные или вторичные излучатели с равномерно распределенной яркостью (коэффициентом отражения) [11];

определение цветовых характеристик в дискретных системах технического зрения с произвольным количеством входных и выходных величин основано на явлениях метамеризма, статистической избыточности, эффектах квантования и заключается в усреднении сигналов цифрового изображения по некоторой области в контексте пространственно-временных факторов, следовательно, методология применима к неточечным (протяжённым) объектам. Дефинициальная неопределённость характеризует наименьшую в многомерном функциональном пространстве область рассеяния значений, обусловленную ограниченной детализацией в определении цвета как субъективного ощущения и афинной векторной величины. Дефинициальная неопределённость зависит от номинальных ступеней квантования, воспроизводимых условными шкалами цифрового изображения, которые в трёхмерных цветовых пространствах в предельном случае представляют собой эллипсы Мак-Адама [12];

результат измерения координат цветности как векторной величины описывается вектор-столбцом (математическим ожиданием) и набором ковариационных матриц (неопределённостью). Метрологическое моделирование результатов колориметрических измерений в программно-аппаратных средах в дискретных системах с произвольным количеством входных и выходных величин основано на модульных восходящем и нисходящем подходах к построению моделей математических ожиданий результатов измерений и моделей их рассеяния (неопределённости и ковариации), комплексировании составляющих неопределённости с учётом энтропии измерительной информации [13].

Метод численного моделирования условной многомерной колориметрической шкалы. Данный метод предложен в [11] и заключается в создании наборов аттестованных опорных образцов. Опорные образцы представляют собой неточечные излучатели, относящиеся к определённому сектору цветовой палитры и образующие при цифровой регистрации с пошагово увеличивающимся временем экспозиции векторы в цветовом пространстве XYZ. Начало векторов совпадает с нулевой точкой отсчёта

пространства. Векторы пересекают плоскость цветового локуса графика цветностей и формируют на ней геометрическое место точек цветности, что позволяет обеспечить единство измерений. В процессе численного моделирования устанавливаются закономерности отображения градуировочных зависимостей в пространстве XYZ для его разделения (зонирования) на секторы [11]. Это позволяет в процессе измерений определять требуемый сектор цветового пространства и тем самым уменьшать методическую составляющую неопределённости измерения координат цветности. Палитра разбивается на секторы по принципу преобладания R (красной), G (зелёной) и B (синей) составляющих, расположенных по убыванию интенсивности в следующем порядке: сектор I – RGB ; сектор II – RBG ; сектор III – GBR ; сектор IV – GRB ; сектор V – BRG ; сектор VI – BGR . Интенсивности (координаты цвета) R , G , B каждого элемента в пределах секторов определяются путём усреднения интенсивностей по области примерно от 60×60 до 128×128 пикселей. Затем координаты цифрового изображения трансформируются $RGB \rightarrow XYZ$ и рассчитываются координаты цветности.

Исследуются по три ячейки одинаковой цветности (от светлого к более тёмному) из каждого сектора. На основе пересчётов определяются границы секторов в пространстве XYZ. Такое разбиение позволяет определить зоны цветности в видимом диапазоне опорных образцов – первичных излучателей, используемых для построения градуировочных зависимостей. Далее оптимизируется количественный и качественный составы опорных образцов в зависимости от требуемых фотометрических и колориметрических характеристик. Цветовое пространство XYZ зонировается в автоматизированном режиме с использованием разработанной компьютерной программы «Фотон» (Свидетельство о регистрации № 009, БНТУ, 2016).

Методология моделирования основана на модульном принципе поэтапной обработки графических данных для осуществления перехода от фотометрического измерения скалярных величин к колориметрическому измерению векторных величин. В способе измерения яркости самосветящегося объекта на поверхности исследуемого объекта выделяют контрольные точки или участки, размещают опорные источники света с известной яркостью, с помощью матричного фотоприёмного устройства осуществляют многократную регистрацию самосветящегося объекта и опорных источников света с пошагово увеличивающимся временем экспозиции, выполняют компьютерную обработку полученных цифровых изображений, при которой определяют интенсивность участков цифровых изображений и яркость в контрольном участке самосветящегося объекта по формуле [14, 15]:

$$L = (N - N_{01})(L_{02} - L_{01}) / (N_{02} - N_{01}) + L_{01}; \quad (1)$$

$$N = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i, \quad (2)$$

где N – усреднённая интенсивность соответствующего участка цифрового изображения, N_i – интенсивность i -го элемента цифрового изображения, отн. ед.; N_{01} , N_{02} , L_{01} , L_{02} – усредненные значения интенсивности участков цифрового изображения и значения яркости опорных источников света соответственно.

По результатам измерений интенсивности участков цифровых изображений строили градуировочные зависимости, показанные на рис. 1, 2. Использование опорных источников света позволяет по градуировочным зависимостям определять яркость самосветящегося объекта в контролируемых участках. Таким образом осуществляется расширение динамического диапазона измерений [15].

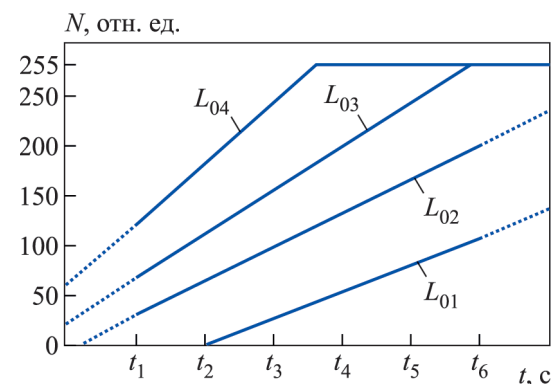


Рис. 1. Градуировочные зависимости интенсивности участка цифрового изображения от времени экспозиции

Fig. 1. Calibration dependences of the digital image section intensity on the exposure time

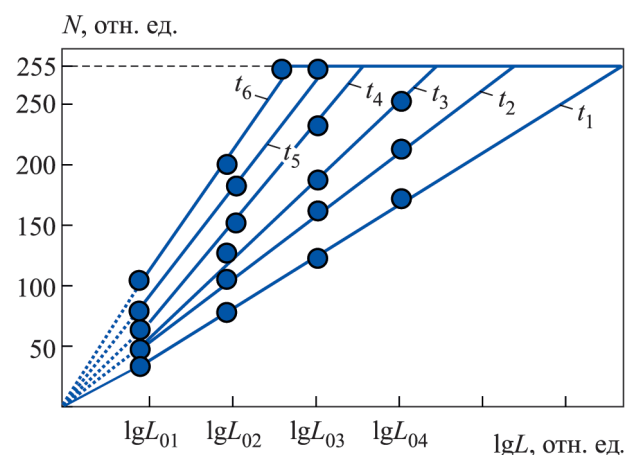


Рис. 2. Градуировочные зависимости интенсивности цифровых изображений от яркости опорных источников света при различных значениях времени экспозиции

Fig. 2. Calibration dependences of digital image intensity on the reference light sources brightness for different exposure times

Таблица 1

Экспериментальные данные колориметрических измерений цветов «жёлтый тёмный» и «жёлтый светлый»

Цвет	t, с	Координаты цвета в пространствах RGB, XYZ						Координаты цветности		
		R	G	B	X	Y	Z	x	y	z
Жёлтый тёмный	0,1	161	150	0	708,5479	423,755	262,755	0,4012	0,4475	0,1523
	0,2	201	210	3	927,7965	1165,2273	28,6479	0,3803	0,4314	0,1883
	0,3	233	229	11	1058,7252	1284,9314	74,4758	0,3981	0,4459	0,1560
Жёлтый светлый	0,1	178	172	2	796,4170	481,5528	303,5528	0,4296	0,4632	0,1072
	0,2	215	222	19	1005,6647	1235,2773	118,8347	0,4313	0,4681	0,1006
	0,3	252	249	39	1178,0139	1397,4282	232,2462	0,4126	0,4642	0,1232

Таблица 2

Экспериментальные данные колориметрических измерений цветов «синий тёмный» и «синий светлый»

Цвет	t, с	Координаты цвета в пространствах RGB, XYZ						Координаты цветности		
		R	G	B	X	Y	Z	x	y	z
Синий тёмный	0,1	0	8	135	166,5906	166,5906	166,5906	0,1241	0,1021	0,7738
	0,2	0	21	167	225,5291	106,4414	935,4346	0,1259	0,1041	0,7700
	0,3	0	45	214	320,6893	219,4429	1199,7230	0,1264	0,1038	0,7708
Синий светлый	0,1	3	16	144	199,0827	199,0827	190,7760	0,1393	0,1162	0,7445
	0,2	6	30	177	269,2098	154,3587	991,8861	0,1310	0,1179	0,7511
	0,3	10	56	225	355,5554	216,3319	1261,0900	0,1416	0,1169	0,7415

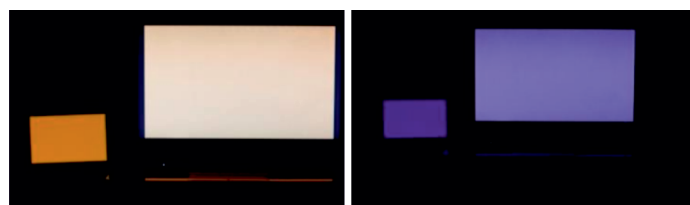


Рис. 3. «Синий» и «жёлтый» опорные образцы для проведения эксперимента

Fig. 3. Reference samples for the experiment

С увеличением времени экспозиции интенсивность цифрового изображения в пределах цветового охвата также возрастает. Это активная область диапазона измерений обычно составляет 60 дБ.

Эксперимент по реализации шкалы был проведен на базе аккредитованной испытательной лаборатории ОАО «Руденск» (г. Руденск, Республика Беларусь). В качестве опорных образцов использовались самосветящиеся объекты – мониторы видеотерминалов, на каждом из которых были созданы однородные цветовые поля. Опорные образцы (самосветящиеся объекты) были подобраны таким образом, чтобы они представляли согласованные пары по

цветности, т. е. находились в одном и том же секторе цветового пространства XYZ, что позволило построить векторы, в совокупности представляющие многомерную условную шкалу. Примеры пар экспериментальных (опорных) образцов представлены на рис. 3. Светотехнические характеристики образцов были определены с помощью измерительной установки, включающей колориметр C1210 с колориметрической головкой (Lichtmesstechnik GMBH Berlin, Германия), источник типа А, с комплектом контрольных светофильтров. Диапазон измерений координат цветности $x=0,0039...0,7347$; $y=0,0048...0,8338$. Предел допускаемой абсолютной погрешности измерений координат цветности $\Delta x=\Delta y=0,007$. Диаметр светочувствительной поверхности 60 мм. Индикация от 0,01 до 600000 лк.

С помощью цифровой камеры полупрофессионального класса Nikon 5100 с оптикой Nikon 35mm f/1.8G AF-S DX

Nikkor (Nikon, Япония) из одной и той же точки пространства осуществляли съёмку опорных образцов при времени экспозиции $t=0,1; 0,2; 0,3$ с. Изображения сохраняли в формате RAW. Далее обрабатывали цифровые изображения и определяли интенсивности R, G, B в красном, зеленом и синем цветовых каналах соответственно, а затем рассчитывались координаты цвета по формулам [16]:

$$X=2,7689R+1,7517G+1,1302B; \quad (3)$$

$$Y=1,0000R+4,5907G+0,0601B; \quad (4)$$

$$Z=0,0565G+5,5943B. \quad (5)$$

Преобразования координат цвета в координаты цветности осуществляли по формулам, указанным в ГОСТ 13088-67 «Колориметрия. Термины, буквенные обозначения» и работе [17]:

$$x=X/(X+Y+Z); \quad (6)$$

$$y=Y/(X+Y+Z); \quad (7)$$

$$z=Z/(X+Y+Z). \quad (8)$$

Далее в соответствии с ИСО 5725-2-2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений» находили математические ожидания (средние арифметические значения $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$) координат цветности и их средние квадратические отклонения (СКО) s_x , s_y , s_z :

$$s_x = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 / (m-1)}; \quad (9)$$

$$s_y = \sqrt{(y_j - \bar{y})^2 / (m-1)}; \quad (10)$$

$$s_z = \sqrt{(z_j - \bar{z})^2 / (m-1)}, \quad (11)$$

где x_j , y_j , z_j – j -е значения координат цветности; m – количество значений в совокупности (для данного эксперимента $m=3$).

Суммарное СКО s_Σ согласно ISO 7724-2-2008 «Краски и лаки. Колориметрия. Ч. 2. Цветовые измерения» определяли как

$$s_\Sigma = \sqrt{s_x^2 + s_y^2 + s_z^2}. \quad (12)$$

По формулам, приведённым в ИСО 5725-4-2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 4. Основные методы определения правильности стандартного метода измерений», рассчитывали смещения:

$$\delta_x = \bar{x} - \mu_x; \quad (13)$$

$$\delta_y = \bar{y} - \mu_y; \quad (14)$$

$$\delta_z = \bar{z} - \mu_z, \quad (15)$$

где μ_x , μ_y , μ_z – эталонные значения координат цветности, измеренные стандартным методом.

В табл. 1–3 представлены экспериментальные данные по определению координат цвета и цветности для трёх пар образцов, в табл. 4 – рассчитанные для координат x , y , z указанных образцов средние значения, смещения и СКО.

Зависимости интенсивностей в цветовых каналах для указанных образцов представлены на рис. 4.

Проверка результатов на метрологическую совместимость по критериям Кохрена и Граббса в соответствии с ИСО 5725-2-2002 не выявила выбросов результатов. Стандартное отклонение повторяемости составило $s_R \approx 0,045$ единиц цветности. Стандартное отклонение внутрилабораторной воспроизводимости, рассчитанное согласно ИСО 5725-3-2002, составило $s_w \approx 0,046$ единиц цветности.

В табл. 5 приведены данные расчётов смещений (погрешностей) измерения координат цвета опорных образцов.

Таблица 3

Экспериментальные данные колориметрических измерений цветов «красный тёмный» и «красный светлый»

Цвет	t , с	Координаты цвета в пространствах RGB, XYZ						Координаты цветности		
		R	G	B	X	Y	Z	x	y	z
Красный тёмный	0,1	129	25	1	402,1108	334,7335	44,9227	0,5115	0,2811	0,2074
	0,2	183	33	4	569,0356	402,1108	24,2417	0,5114	0,2829	0,2057
	0,3	244	47	6	764,7227	460,1235	36,2213	0,5153	0,2894	0,1953
Красный светлый	0,1	140	34	4	451,7246	451,7246	64,0786	0,5564	0,3220	0,1216
	0,2	194	44	6	621,0226	396,3514	36,0518	0,5489	0,3212	0,1299
	0,3	253	55	8	805,9168	505,9693	47,8619	0,5515	0,3222	0,1263

Таблица 4

Расчётные параметры экспериментальных (опорных) образцов

Цвет	x	y	z	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$	δ_x	δ_y	δ_z	s_x	s_y	s_z	s_Σ
Жёлтый тёмный	0,3920	0,4445	0,1635	0,3840	0,4355	0,1655	0,0080	–0,0090	0,0200	0,026	0,0250	0,0270	0,0450
Жёлтый светлый	0,4229	0,4670	0,1101	0,4245	0,4651	0,1113	0,0160	–0,0190	0,0120	0,027	0,0270	0,0280	0,0460
Синий тёмный	0,1250	0,1030	0,7720	0,1261	0,1033	0,7715	0,0110	–0,0300	0,0500	0,027	0,0270	0,0280	0,0470
Синий светлый	0,1326	0,1173	0,7501	0,1373	0,1170	0,7457	0,0047	–0,0003	–0,0044	0,0027	0,0028	0,0028	0,0047
Красный тёмный	0,5104	0,2826	0,2070	0,5127	0,2845	0,2028	0,0660	0,0190	–0,0420	0,0240	0,0240	0,0250	0,0420
Красный светлый	0,5506	0,3219	0,1276	0,5523	0,3218	0,1259	0,0170	–0,0010	–0,0170	0,0250	0,0250	0,0260	0,0440

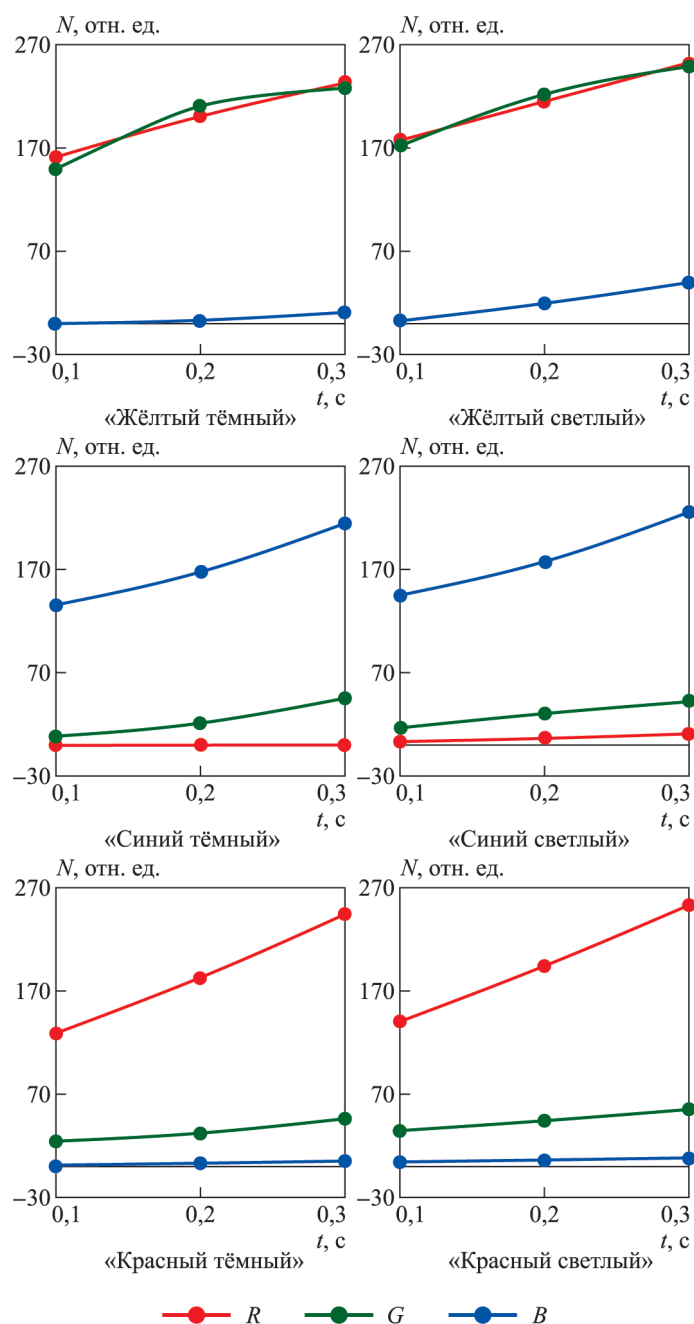


Рис. 4. Зависимости интенсивностей N от времени t экспозиции, полученные при обработке цифровых изображений «жёлтых», «синих» и «красных» опорных образцов

Fig. 4. Dependences of intensities N on exposure t obtained during processing of digital images of reference samples

В результате эксперимента установлены практически линейные зависимости (см. рис. 4) интенсивностей R , G , B в цветовых каналах пространства RGB от времени t экспозиции в активной части динамического диапазона, что может быть использовано для построения условных шкал.

Таблица 5

Погрешности координат цвета опорных образцов

t, c	«Жёлтый»			«Синий»			«Красный»		
	ΔR	ΔG	ΔB	ΔR	ΔG	ΔB	ΔR	ΔG	ΔB
0,1	17	22	2	3	8	9	21	9	3
0,2	14	12	16	6	9	10	11	11	2
0,3	19	20	28	10	11	11	11	8	2

Заключение. Расширение динамического диапазона методов колориметрических измерений позволяет преодолеть ограниченность цветовых охватов элементов информационно-измерительного канала. Предложенная последовательность действий, описывающая процесс построения колориметрической условной шкалы, обеспечивает увеличение разрешения измерения цвета за счёт фиксации номинальных ступеней квантования в цветовых каналах изображений и уменьшение методической составляющей неопределённости. Любой регистрируемый реальный объект может иметь почти бесконечное множество виртуальных реализаций, ограниченное только ресурсами лаборатории. Корректное использование систем технического зрения, в частности, цифровых камер профессионального и полупрофессионального классов, в качестве измерительных устройств в колориметрии программно-аппаратных сред предполагает обеспечение единства измерений. Это единство достигается путём построения условных шкал яркости компьютерных изображений в цветовых каналах и фиксации на них реперных точек метрологической прослеживаемости. В качестве таких реперных точек предложено использовать равнояркие поверхности самосветящихся объектов, например, органических светодиодов или видеотерминалов.

Современные системы технического зрения имеют высокое пространственное разрешение и разрешение по яркости в пределах активной области динамического диапазона, поэтому их можно использовать для колориметрических исследований протяжённых объектов, при этом относительная расширенная неопределённость измерения цветности находится в диапазоне $\pm(1-8)\%$.

Разрабатываемая методология колориметрии в программно-аппаратных средах позволяет оценивать характеристики объектов документировать результаты исследований в режиме реального времени, что может иметь большое значение при эксплуатационном контроле и подтверждении соответствия объектов.

Список литературы

1. Вышецки Г. Развитие современной колориметрии. Международная ассоциация цвета, 1973, pp. 21–51.
2. Фершильд М. Д. Модели цветового восприятия. Пер. с англ. 2-я редакция. Рочестерский технологический институт, Манселловская научная лаборатория по цвету, 2006. 439 с.

URL: <https://mexalib.com/view/36926> (дата обращения: 05.05.2020).

3. Сорокин Д. А. Градация цветового различия и идентификация фарфора методами многомерного шкалирования: автореф. дис. канд. техн. наук (Российская экономическая академия им. Г. В. Плеханова, Москва, 2009).

4. Сендел Е. Колориметрические методы определения следов металлов. Пер. с англ. М.: Мир, 1964. 90 с.

5. Пармасын Э. С. Колориметрия и поляриметрия некоторых кометарных туманностей. Ереван: Бюраканская астрофизическая обсерватория Академии наук Армянской ССР, Ереванский государственный университет, 1963. 10 с.

6. Соколов Д. И. Влияние водохранилищ на изменение окисляемости и цветности речной воды (на примере источников водоснабжения г. Москвы): автореф. дис. канд. геогр. наук (МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, 2013).

7. Воронин А. А. Разработка и исследование спектрального метода и аппаратуры для оперативной идентификации пород древесины: автореф. дис. канд. техн. наук (Государственный университет информатики и технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, 2011).

8. Шаповалова А. И. Детальная колориметрия галактик в окрестности NGC 1068 и иррегулярных галактик: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук (Ереванский государственный университет, Ереван, 1975).

9. Шарипова Л. М. Спектрофотометрия звезд, ядер активных галактик и колориметрия слабых звездобразных околядерных объектов: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук (Крымская астрофизическая обсерватория, 2001).

10. Савкова Е. Валидационная модель информационного измерительного канала в системах технического зрения // Международный журнал современной техники и технологий, 2017, Т. 1. № 4. С. 28–33. URL: <http://www.newengineeringjournal.com/archives/2017/vol1/issue4/2-1-11> (дата обращения 05.05.2020).

11. Савкова Е., Матюш И. Метрологическое обеспечение колориметрии в программно-аппаратных средах // Международный журнал инновационных исследований в электронике и коммуникациях. 2016. Т. 3. № 5. С. 6–19. <https://doi.org/10.20431/2349-4050.0305002>

12. Савкова Е. Основные положения колориметрии высокого разрешения // Материалы 11-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2018», Минск, 14–16 ноября 2018 г., Минск: БНТУ, 2018. С. 152–154.

13. Савкова Е. Н. Моделирование результата измерения в колориметрии высокого разрешения // Мир измерений. 2016. № 2. С. 54–62.

14. Савкова Е. Н., Зуйков И. Е. Способ измерения яркости несамосветящихся объектов с использованием матричных фотоприемных устройств // Материалы IX Международной научно-практической конференции «Современные исследования и развитие-2013», София, Болгария, 17–25 января 2013. Т. 2. Математика. Физика. Современные технологии информации. Харьков, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, 2013. С. 38–42.

15. Савкова Е. Н., Зуйков И. Е. Колориметрические измерения на основе цифровой регистрации с высоким пространственным разрешением // Материалы 6-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2013», Минск, 20–22 ноября, 2013, Минск: Белорусский национальный технический университет. С. 176–178.

16. Мешков В. В., Матвеев А. Б. Основы светотехники: Учеб. пособие для вузов в 2-х частях. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1989. 432 с.

17. Годен Ж. Колориметрия при видеообработке. Пер. с англ. М.: Техносфера, 2008. 328 с.

References

1. Wyszecki G., *International Colour Association*, 1973, pp. 21–51.

2. Fairchild M. D., *Modeli cvetovogo vospriyatiya*, 2nd edition, Rochester Institute of technology, Mansell color science laboratory, 2006, 439 p., available in Russian at: <https://mexalib.com/view/36926> (accessed: 05.05.2020).

3. D. A. Sorokin, Extended abstract of candidate's dissertation in Technical Sciences (Plekhanov Russian Academy of Economics, Moscow, 2009).

4. Sendel E., *Kolorimetricheskie metody opredeleniya sledov metallov*, Moscow, Mir Publ., 1964, 90 p. (in Russian).

5. Parmasyan E. S., *Kolorimetriya i polyarimetriya nekotorykh komentarnykh tumannostej*, Byurakan Astrophysical Observatory of the Academy of Sciences of the Armenian SSR, Yerevan Yerevan State University Publ., 1963. 10 p. (in Russian).

6. D. I. Sokolov, Extended abstract of candidate's dissertation in Geography (Lomonosov Moscow State University, Moscow, 2013).

7. A. A. Voronin, Extended abstract of candidate's dissertation in Technical Sciences (Saint Petersburg, State University of Informatics and technologies, mechanics and optics, 2011).

8. A. I. Shapovalova, Extended abstract of candidate's dissertation in Geography Physical and Mathematical Sciences (Yerevan, Yerevan State University, 1975).

9. L. M. Sharipova, Extended abstract of candidate's dissertation in Geography Physical and Mathematical Sciences (Crimean astrophysical Observatory, Crimea, 2001).

10. Saukova Y., *International Journal of Advanced Engineering and Technology*, 2017, vol. 1, no. 4, pp. 28–33, available at: <http://www.newengineeringjournal.com/archives/2017/vol1/issue4/2-1-11> (accessed: 05.05.2020).

11. Saukova Y., Matyush I., *International Journal of Innovative Research in Electronics and Communications (IJIREC)*, 2016, vol. 3, no. 5, pp. 6–19. <https://doi.org/10.20431/2349-4050.0305002>

12. Saukova Y., *Proceedings of the 11th International scientific and technical conference "Instrumentation-2018"*, Minsk, November 14–16, 2018, Minsk, BNTU Publ., 2018, pp. 152–154.

13. Saukova Y., *Mir izmerenij*, 2016, no. 2, pp. 54–62 (in Russian).

14. Saukova Y., Zuikov I. E., *Proceedings of the IX International scientific and practical conference "Modern research and development-2013"*, Sofia, Bulgaria, January 17–25, Kharkov, Kharkov National University of Radio Electronics Publ., 2013, vol. 27, pp. 38–42.

15. Saukova Y., Zuikov I. E., *Proceedings of the 6th International scientific and technical conference "Instrumentation-2013"*, Minsk, 20–22 November, Minsk, BNTU Publ., pp. 176–178.

16. Meshkov V. V., Matveev A. B., *Osnovy svetotekhniki. Ucheb. posobie dlya vuzov in 2 pts. Pt. 2. Fiziologicheskaya optika i kolorimetriya Fundamentals of lighting engineering*, Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 432 p. (in Russian).

17. Gauden J., *Kolorimetriya pri videoobrabotke*, Moscow, Technosphaera Publ., 2008. 328 p. (in Russian).

Дата поступления: 06.04.2020.

Дата принятия: 27.05.2020.

Colorimetric research of self-luminous objects in software and hardware environments by the method of multidimensional scales implementation

Yauheniya N. Saukova

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus, e-mail: evgeniya-savkova@yandex.ru

It is shown that the issues of metrological traceability for extended self-luminous objects with a wide range of brightness have not yet been resolved, since the rank scales of embedded systems are used for processing digital images. For such scales, there is no "fixed" unit, which does not allow you to get reliable results and ensure the unity of measurements. An experiment is described to evaluate the accuracy of determining the intensity (coordinates) of the color of self-luminous objects. In terms of repeatability and intermediate precision compared to the reference measurement method, the color and chromaticity coordinates of self-luminous objects (reference samples) were determined by their multiple digital registration using technical vision systems. The possibilities of the developed methodology for colorimetric studies in hardware and software environments from the point of view of constructing a multidimensional conditional scale are determined.

Key words: colorimetry, digital image, chromaticity, color scale, accuracy.