

УДК 535.6

Е.Н. Савкова

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь*

## СНИЖЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ СРЕДАХ

*Описан разработанный метод фотометрических и колориметрических измерений с высоким пространственным разрешением и предложена процедура снижения методической составляющей неопределенности, основанная на применении низкочастотной фильтрации цифровых изображений и расширении динамического диапазона измерений.*

**Ключевые слова:** колориметрия, координаты цвета, цветность, неопределенность, цифровое изображение, динамический диапазон.

### Введение

Современные средства технического зрения предоставляют возможности для исследований объектов на основе обработки их цифровых изображений, например, в геодезии при спутниковой многозональной съемке, медицине, текстильной и пищевой промышленности, полиграфии и т.д. Однако в большинстве случаев данные области можно отнести скорее к качественному анализу или оценке прецизионности исследуемых характеристик. Вопросы же правильности, т.е. близости результата измерения к истинному (эталонному, исходному) значению измеряемой величины, чаще всего остаются открытыми, вследствие чего возникают трудности в части обеспечения требуемого уровня доверия к результатам измерений, контроля и испытаний. Корректное применение цифровых камер в качестве измерительных устройств возможно при условии обеспечения метрологической прослеживаемости и решения ряда задач, связанных с

уменьшением значительной (до 30 %) методической составляющей неопределенности, обусловленной ограничениями динамических диапазонов цветопередающих и воспроизводящих устройств, а также аппаратной зависимостью встроенных в них цветовых пространств, в результате чего эти устройства не способны воспроизводить изображения с широкими динамическими диапазонами, допуская при этом потери полезной измерительной информации.

В данной работе кратко изложены основные принципы снижения неопределенности в колориметрии с высоким пространственным разрешением, которые являются основой для эффективных экспресс-методов контроля протяженных объектов, таких как устройства отображения группового и индивидуального пользования, фасады зданий, текстурные поверхности, покрытия и др., что позволит с достаточной для практики точностью воспроизводить и измерять их фотометрические и колориметрические характеристики.

## Цвет как величина со значительной дефинициальной неопределенностью

В настоящее время действуют девять не противоречащих друг другу определений цвета, отражающих специфику его зрительных восприятий. Так, например, согласно Международному электротехническому словарю (МЭС) «цвет (воспринимаемый) – свойство зрительного восприятия, сочетающее хроматические и ахроматические признаки. Воспринимаемый цвет зависит от состава цветовых стимулов, размера, формы, структуры и площади фона цветового стимула, состояния адаптации органа зрения наблюдателя, а также его квалификации, опыта и так далее» [6]. Также установлены определения для терминов «цвет (воспринимаемый) светящегося объекта», «цвет (воспринимаемый) несветящегося объекта», «изолированный цвет», «неизолированный цвет», «апертурный (нелокализованный) цвет». Ниже приведены положения, усиливающие ограниченную детализацию в этих определениях, дающие вклады в его дефинициальную неопределенность.

1. Мак-Адамом установлено, что до сих пор не существует «идеальной» модели описания цвета, поскольку нет возможности отображать различия близких цветов в нужных пропорциях, что объясняется объективными и субъективными особенностями зрительного анализатора [1]. В частности, зрение ограничивается угловыми размерами и положением объекта по отношению к оптической оси глаза (эффект Трокслера), что объясняется отсутствием на краях сетчатки рецепторов колбочек, способных различать цвет. Человеческий глаз также не способен различать цвета удаленных точечных несамосветящихся объектов.

2. Возможно требуют уточнения действующие модели стандартного наблюдателя созданные в 1931 и 1964 гг. для углов зрения  $2^\circ$  и  $10^\circ$  [2] по восприятиям, основанным на ограниченном количестве испытуемых, и не учитывающие изменчивость яркостной адаптации глаза в различных географических регионах земного шара, с учетом появления более совершенных средств измерений. Кроме того, не всегда ясны четкие границы перехода между моделями.

3. В настоящее время достаточно хорошо изучено дневное и ночное зрение, разрабатываются модели сумеречного зрения с учетом эффекта Пуркинье, но проводится мало исследований восприятий на пороге ослепления ( $\sim 10^8$  кд/м<sup>2</sup>) [3], так как продолжительные по времени измерения могут привести к повреждениям сетчатки.

4. Цветовое различие для всех модификаций пространства CIE XYZ находят как стандартное отклонение [7]:

$$DE_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

где  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$  - различия светлоты и координат цвета испытуемого образца и образца сравнения.

Установлено, чтобы глаз мог заметить разницу между цветами, необходимо отклонение хотя бы в  $DE_{ab} = 1$ , однако на практике часто применяют отклонение  $DE_{ab} = 5$  [1].

На все перечисленные особенности, увеличивающие дефинициальную неопределенность цвета, накладываются ограничения его воспроизведения в программно-аппаратных средах. Использование искривленных пространств при математическом описании цветовых тел, их преобразования, эффекты квантования, сжатие графических файлов с потерей данных затрудняют процессы корректной цветопередачи. Воспроизведение оттенков каждого цвета ограничивается по яркости количеством градаций в каждом цветовом канале (8, 12 и 24 бит на канал), а по времени – частотой Найквиста, равной половине частоты дискретизации [4].

## Дифференциальный метод измерений

**Разработанный дифференциальный метод измерений** основан на том, что на поверхности исследуемого объекта выбирают не менее двух опорных контрольных точек (для несамосветящегося объекта они могут быть реализованы на его поверхности, в случае самосветящегося объекта в качестве опорных контрольных точек используются равнояркие первичные излучатели), измеряют их фотометрические и колориметрические характеристики, осуществляют цифровую регистрацию объекта вместе с опорными контрольными точками при различном времени экспозиции или меняющейся апертуре, выполняют компьютерную обработку полученных цифровых изображений, строят свет-сигнальные зависимости в трех цветовых каналах – красном (R), зеленом (G), и синем (B), сопрягают данные зависимости и определяют фотометрические и колориметрические характеристики объекта путем сравнения светлоты исследуемой точки со светлотой опорных контрольных точек по формуле [5]:

$$L = (N - N_{01}) \frac{(L_{02}k_2 - L_{01}k_1)}{N_{02} - N_{01}} + L_{01}k_1 \quad (2)$$

где  $N$  – усредненная светлота участка цифрового изображения, соответствующего изображению исследуемой контрольной точки объекта в цветовом канале (R, G, B), отн.ед.:

$$N = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \quad (3)$$

где  $N_i$  – светлота  $i$ -го элемента цифрового изображения в цветовом канале (R, G, B), отн. ед;  $L_{01}$ ,  $L_{02}$  – яркости опорных контрольных точек, кд/м<sup>2</sup>;  $N_{01}$ ,  $N_{02}$  – усредненные яркости участков цифрового

изображения опорных контрольных точек в цветовом канале (R, G, B), отн. ед.;  $k_1, k_2$  – коэффициенты, зависящие от индикатрис рассеяния поверхности объекта в контрольной точке, отн.ед.

Измерительный канал, модель которого схематически показана на рис. 1, включает объект, аттестованные контрольные образцы (используемые в качестве мер - реперных точек условных шкал), помещаемые в перспективу регистрируемой сцены, регистрирующее устройство (цифровую камеру и устройство отображения информации), а также измерительные принадлежности. Освещенность, формируемая на ПЗС-матрице камеры световым потоком от объекта -  $E_{mn}$ , и исходных образцов -  $E_{0k}$ , посредством встроенного программного обеспечения пересчитывается соответственно в светлоту  $L'_{mn}, L'_{0k}$  при поддержке форматов TIFF или RAW, которая затем путем обработки цифрового изображения трансформируется в светлоту  $\{R_{mn}, G_{mn}, B_{mn}, R_{0k}, G_{0k}, B_{0k}\}$  цветовых каналов пространства RGB. Калибровочные кривые, построенные по

реперным точкам воспроизводимым параметрами исходных образцов обеспечивают возможность оценки правильности измерений и позволяют рассчитать фотометрические параметры (например, яркость  $\{L_{mn}\dots\}$ ) и цветовые характеристики  $\{x_{mn}, y_{mn}, z_{mn}\dots\}$  объекта по всей его поверхности.

### Сличительные эксперименты

На базе производственно-исследовательского отдела физико-химических и оптических измерений НП РУП «Белорусский государственный институт метрологии» был проведен внутривлабораторный сличительный эксперимент, основанный, на том, что в условиях повторяемости и промежуточной прецизионности определялись координаты цвета эталонных хроматических ахроматических образцов (рис/ 1) и посредством их цифровой регистрации с помощью различных систем технического зрения [4].

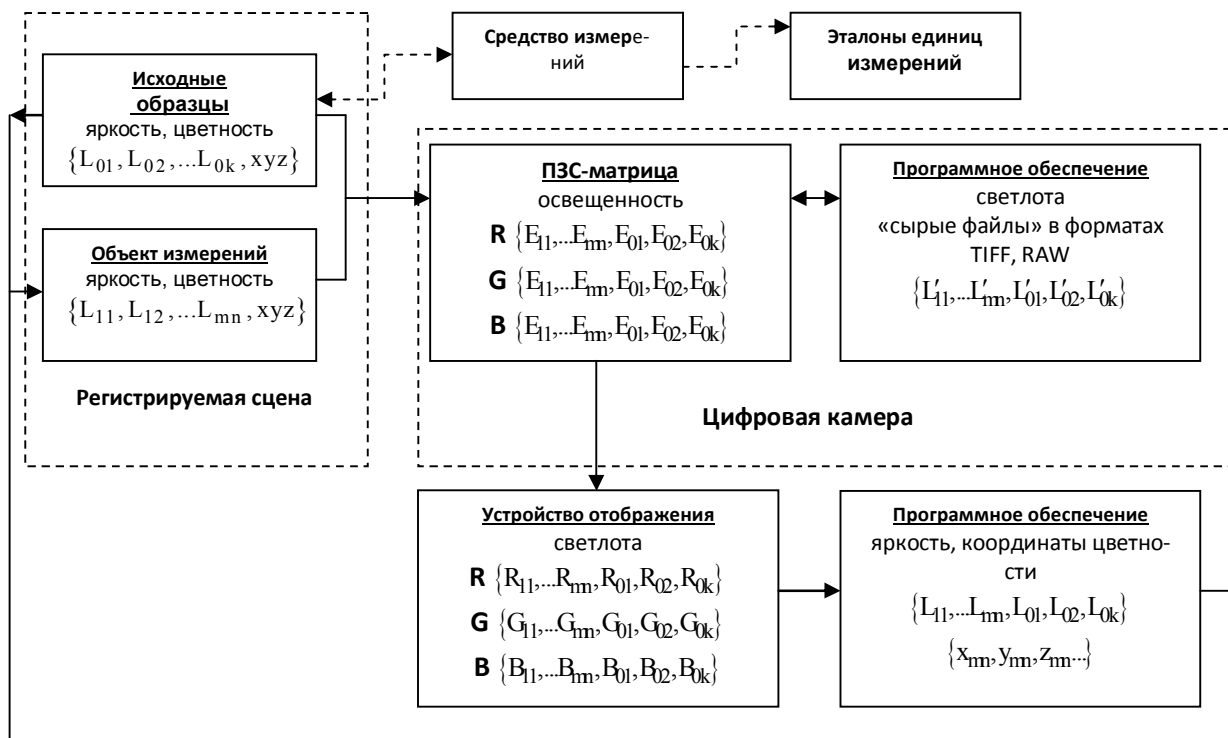


Рис. 1. Модель измерительного канала в колориметрии высокого разрешения

Для реализации принципа сравнения со стандартизованным методом измерений были созданы хроматические и ахроматические (в градациях серого) палитры (рис. 2, б), результаты измеренных значений которых сравнивались с результатами измерений, полученных с помощью колориметра LM 7 Colorimeter C2210.

Для исследования метода применительно к самосветящимся объектам на базе аккредитованной испытательной светотехнической лаборатории ОАО «Руденск» проведен сличительный эксперимент,

основанный на цифровой регистрации видеотерминалов нетбуков, на каждом из которых были созданы однородные цветовые поля. Аттестация самосветящихся объектов осуществлялась на измерительной установке, включающей средство измерений – колориметр C1210 с колориметрической головкой ЦХ-60 «LICHTMESSTECHNIK GMBH BERLIN» (Германия) и источник типа А, с комплектом контрольных светофильтров. Диапазон измерений координат цветности - x: от 0,0039 до 0,7347; y: от 0,0048 до 0,8338. Предел допускаемой абсолютной

погрешности измерений координат цветности  $D_x=D_y=0,007$ .

Диаметр светочувствительной поверхности 60 мм.

Минимальное значение индикации – 0,01 лк; максимальное значение индикации – 600000 лк.

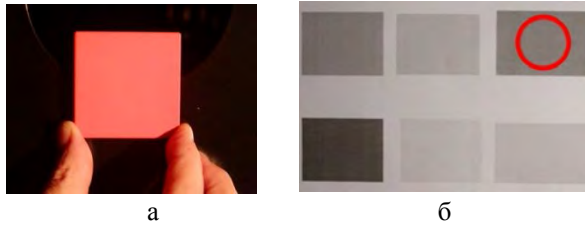


Рис. 2. Образцы, используемые в экспериментах:  
а – эталонный пурпурный образец,  
б – ахроматическая палитра

Серии цифровых изображений, полученные со значениями времени экспозиции 0,3 с, 0,7 с, 1,0 с, 1,3 с, 1,7 с, сохранялись в форматах TIFF и RAW. Результаты на примере реализаций серого и синего для одного объекта полей представлены на рис. 3.

0,1 с	0,2 с	0,3 с
RGB(70, 85,119)	RGB(230,255,255)	RGB(255,255,255)
0,1 с	0,2 с	0,3 с
RGB(0,8,135)	RGB(0, 21, 167)	RGB(0,45,214)

Рис. 3. Цветовые поля, реализованные на объектах при различных параметрах съемки

Результаты показали, что один и тот же регистрируемый объект может иметь множество реализаций (цифровых изображений) в зависимости от применяемого в измерительном канале аппаратного и программного обеспечения, а экспериментальные зависимости светлоты от времени экспозиции аналогичны зависимостям от апертуры по каждому цветовому каналу и являются линейными. Дисперсия определения координат цветности варьировалась от 2,81 до 3,25.

### Поэтапный метод снижения неопределенности

Поэтапный метод снижения неопределенности, приведенный далее, позволяет частично решить проблему уменьшения методической составляющей за счет низкочастотной фильтрации цифровых изображений и расширения динамического диапазона измерений.

*Этап 1. Низкочастотная фильтрация цифровых изображений.* Цель - подавление быстрых вариаций сигнала  $I(x_i, y_i)$  по координатам, которые не связаны с вариациями освещенности (яркости) поверхности исследуемого объекта, а обусловлены неоднородностью элементов ПЗС-матрицы цифровой камеры. Выбор пространственной части, определяющей границу фильтрации, осуществляется на основе Фурье-анализа изображений [7].

Нахождение спектра осуществлялось по формуле:

$$m = \left[ -\frac{M}{2}; \dots; 0, 1; \dots; \frac{M}{2} - 1 \right], \quad (4)$$

где  $h_k$  – исходная дискретная функция (для простоты рассмотрен одномерный случай – рис. 4 а),  $M$  – число точек изображения.

Полученный пространственный спектр изображения показан на рис. 4, б (кривая 1).

Для определения формы фильтра пороговая пространственная частота определена из выражения:

$$A = \sqrt{R_e(H)^2 + I_m(H)^2}, \quad (5)$$

где  $R_e$  – действительная часть функции Фурье;  $I_m$  – мнимая часть функции Фурье. Полученная АЧХ фильтра приведена на рис. 4 б (кривая 2).

Фурье-спектр отфильтрованного сигнала находили путем перемножения матрицы преобразования Фурье и матрицы фильтра:

$$H_m^{ds} = W(m) \cdot H_m, \quad (6)$$

где  $W(m)$  – АЧХ фильтра.

Для восстановления изображения необходимо произвести обратное преобразование Фурье для Фурье-спектра отфильтрованного сигнала.

$$h_k = \frac{1}{M} \sum_{n=M/2}^{M/2-1} W(m) \cdot H(m) \exp\left(j \frac{2\pi mk}{M}\right). \quad (7)$$

Результаты восстановления сигнала представлены на рисунке 4 в, из которого видно, что после преобразования распределение приобрело сглаженный вид (рассеяние уменьшилось на 3-5 %).

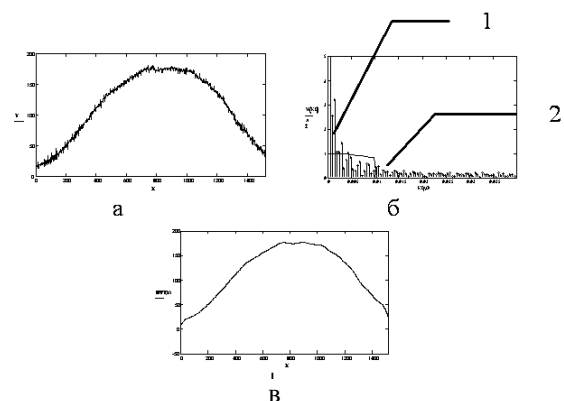


Рис. 4. Обработка цифрового изображения низкочастотным фильтром

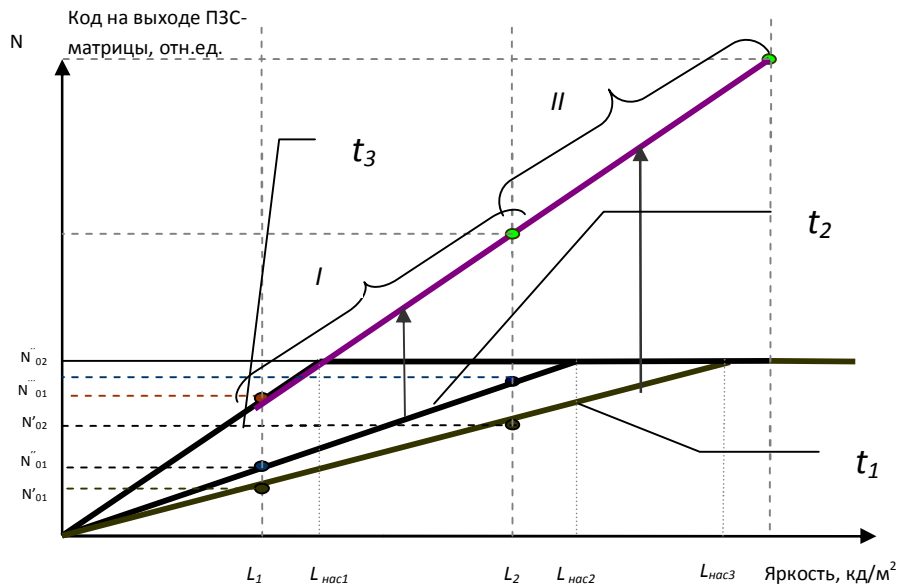


Рис. 5. Расширение динамического диапазона регистрируемой яркости изображений, выполненных при различных выдержках ( $t_1 < t_2 < t_3$ )

*Этап 2. Определение усредненных значений светлоты* в исследуемых областях цифрового изображения в цветовых каналах  $R, G, B$  по формуле (3).

*Этап 3. Определение цветового сектора на встроенной палитре.* Возможны шесть сочетаний координат цвета исследуемых участков изображений, расположенных в порядке возрастания: I -  $R, G, B$ ; II -  $R, B, G$ ; III -  $G, B, R$ ; IV -  $G, R, B$ ; V -  $B, R, G$ ; VI -  $B, G, R$ , каждое из которых соответствует определенному сектору на цветовой палитре. Отнесение элемента к определенному сектору позволяет построить в дальнейшем «линейку цветностей», чтобы исключить метамеризм.

*Этап 4. Проверка наличия критических точек насыщения светлоты в цветовых каналах.* Если одна из координат цвета  $R, G$  или  $B$  равна максимальному значению для данного АЦП (например, при 8 битах на канал - 255 градаций), то следует исследовать соответствующую координату цвета, но уже на изображении, выполненном с меньшей выдержкой. Этапы 2-4 повторять до тех пор, пока значение рассматриваемой координаты не станет меньше максимального значения.

*Этап 5. Построение свет-сигнальных зависимостей в цветовых каналах.* На построенных зависимостях светлоты  $R, G, B$  исходных образцов от времени экспозиции  $t - R(t), G(t), B(t)$  нужно определить рабочую область динамического диапазона с соответствующими параметрами съемки и по известным значениям яркости,  $кд/м^2$  (координат цветности, отн. ед.). Для каждого цветового канала построить калибровочные кривые, приводя им в соответствие соответствующие усредненные отсчеты светлоты цифрового изображения.

*Этап 5. Сопряжение зависимостей.* Для каждой кривой по трем цветовым каналам рассчитать масштабные коэффициенты преобразования  $K_{12}, K_{23}$ :

$$K_{12} = \frac{N_2}{N_1};$$

$$K_{23} = \frac{N_3}{N_2},$$

где  $N_1 = N_1(L) = K_{12}L$ ;  $N_2 = N_2(L) = K_{23}L$ . Для расчета светлоты контрольной точки объекта в пределах  $L_{нас2} \leq L \leq L_{нас3}$ , осуществить сопряжение зависимостей (см. ри. 5 для одного из цветовых каналов):

$$\begin{cases} N_1, & \text{при } L < L_{нас1} \\ N_2 \cdot K_{12}, & \text{при } L_{нас1} < L < L_{нас2} \\ N_3 \cdot K_{12} \cdot K_{23} & \text{при } L_{нас2} < L < L_{нас3} \end{cases} \quad (8)$$

Осуществляя сопряжение зависимостей, математически с достаточной для практики точностью можно рассчитать значения яркости точек на объекте в трех цветовых каналах, расширяя, таким образом, динамический диапазон двумерных колориметрических измерений.

*Этап 6. Пересчет в координаты пространства XYZ* осуществляется согласно стандартизованным моделям. В частности, автором использовались формулы Мешкова:

$$\begin{aligned} X &= 2,7689 R + 1,7517 G + 1,1302 B \\ Y &= 1,0000 R + 4,5907 G + 0,0601 B \\ Z &= 0,0565 G + 5,5943 B \end{aligned} \quad (9)$$

*Этап 7. Расчет координат цветности  $x, y, z$  по формулам:*

$$x = \frac{X}{X + Y + Z};$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z};$$

$$z = 1 - x - y.$$

Поправочні коефіцієнти для смещення склали для часу експозиції 0,3 с  $k_x = 0,99$  і  $k_y = 1,3$ ; для часу експозиції 0,7 с -  $k_x = 1,01$  і  $k_y = 1,3$ . При пересчеті к световым единицам и единицам безразмерностных величин разброс точек относительно калибровочной кривой составлял не более 10 %, что показывает возможность применения данного метода.

По предварительным расчетам, предложенный метод позволяет снизить суммарную стандартную неопределенность измерений до 10-15 %.

### Заклучение

Разработанный авторами [5] метод фотометрических и колориметрических измерений с высоким пространственным разрешением, основанный на применении систем технического зрения, предполагает решение проблемы повышения точности и достоверности результатов. Установлено, что цвет как измеряемая величина в программно-аппаратных средах характеризуется значительной дефинициальной неопределенностью, что обусловлено, во-первых, его фотобиологической природой, во-вторых, ограничениями по разрешающей способности передающих устройств. Кроме того, основной удельный вес вносит методическая составляющая неопределенности, связанная с влияниями аппаратного и программного обеспечения элементов измерительного канала. Данная составляющая может быть уменьшена за счет предложенной процедуры, основанной на низкочастотной фильтрации цифровых изображений по каждому цветовому каналу и расширения их динамических диапазонов путем построения семейства свет-сигнальных характеристик по опорным точкам, воспроизводимых с по-

мощью исходных образцов, продления и сопряжения данных кривых и расчета световых величин и координат цветности. Метод измерений и процедура снижения неопределенности могут быть использованы при исследованиях протяженных самосветящихся и объектов, характеристики которых изменяются во времени, а также для определения спектральных характеристик и индикатрис светоотражающих поверхностей, источников света, коэффициентов пропускания фильтров и ослабителей.

### Список литературы

1. Годен Ж. Колориметрия при видеообработке. Москва: Техносфера, 2008. -328 с.
2. ISO 11664-1:2007. Колориметрия. Часть 1. Стандартные колориметрические наблюдатели CIE.
3. Л.Р. Ронки. Сопоставление некоторых представлений светотехники и науки о зрении. Москва, Светотехника. 2012, №4. С. 26-34.
4. Научная библиотека избранных естественнонаучных изданий научная-библиотека РФ. Теорема Котельникова. Режим доступа: [http://www.sernam.ru/book\\_tec.php?id=14](http://www.sernam.ru/book_tec.php?id=14).
5. Патент Способ измерения силы света источника света. Зуйков И.Е., Савкова Е.Н., G 01 J 1/00 Ву 10453 Заявка №а 20051233. Зарегистрирован в Государственном реестре 2005.12.13.
6. Зуйков И.Е., Савкова Е.Н., Баковец Н.В., Гиль Н.Н., Ковалев П.О. Измерение цвета вторичных излучателей с использованием средств технического зрения. Материалы 5-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2012», Минск, БНТУ, 2012. С.75-77.
7. Зуйков И.Е., Савкова Е.Н. Предварительная обработка цифровых изображений при выполнении фотометрических испытаний светового оборудования транспортных средств. Минск: БНТУ. Материалы 62-й научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов, преподавателей и научных работников приборостроительных специальностей. – С. 90-97. (апрель-июнь 2006 г).

Поступила в редколлегию 21.02.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

### ЗНИЖЕННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ КОЛОРИМЕТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ В ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Є.М. Савкова

В статті описано розроблений метод фотометричних та колориметричних вимірювань з високою просторовою роздільною здатністю та запропонована процедура зниження методичної складової невизначеності, що основана на застосуванні низькочастотної фільтрації цифрових зображень та розширенні динамічного діапазону вимірювань.

**Ключові слова:** колориметрія, координати кольору, кольоровість, невизначеність, цифрове зображення динамічний діапазон.

### REDUCTION OF THE COLORIMETRIC MEASUREMENTS UNCERTAINTY AT SOFTWARE AND HARDWARE ENVIRONMENTS

E.N. Savkova

In this paper the developed method of photometric and colorimetric measurements with the high spatial resolution is described and the reduction of method uncertainty procedure that based on low-pass filtering application of digital images and expansion measurements of dynamic range is proposed.

**Keywords:** colorimetry, color coordinates, chromaticity, uncertainty, digital image, dynamic range.