

полученных экспериментальных зависимостей (расстояний между характерными точками на кривой видеосигнала от эффективного диаметра зонда) характеру изменения этих зависимостей в случае соответствия реальных профилей сечения объекта и формы плотности электронов зонда модельным. Предложенные критерии выбора оптимальных параметров зонда могут быть использованы также для оценки пригодности РЭМ для реализации метода дефокусировки.

Работа проводилась при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации с использованием оборудования Центров коллективного пользования МФТИ и НИЦГВ (госконтракт № 16.552.11.7038).

Л и т е р а т у р а

1. **David C. Joy** Monte Carlo modeling for electron microscopy and microanalysis. Oxford: Oxford University Press, 1995.

2. **Волк Ч. П. и др.** Проблемы измерения геометрических характеристик электронного зонда растрового электронного микроскопа // Линейные измерения микрометрового и нанометрового диапазонов в микроэлектронике и нанотехнологии. Труды ИОФАН. М.: Наука, 2006. С. 77—120.

3. **Filippov M. N. e. a.** SEM probe defocusing method of measurement of linear sizes of nanorelief elements // Proc. SPIE. 2010. V. 7521. P. 7521161-9.

4. **Данилова М. А. и др.** Тест-объект с шириной линии менее 10 нм для растровой электронной микроскопии // Измерительная техника. 2008. № 8. С. 20—23; **Danilova M. A. e. a.** A test object with a line width less than 10 nm for scanning electron microscopy // Measurement Techniques. 2008. V. 51. N 8. P. 839—843.

5. **Novikov Yu. A. e. a.** Test objects with right-angled and trapezoidal profiles of the relief elements // Proc. SPIE. 2008. V. 7042. P. 704208-1 — 704208-12.

Дата принятия 18.10.2011 г.

535.6+621.398

Искусственные нейронные сети в цветовых измерениях

В. А. СОЛОВЬЕВ, М. Н. МОРОЗОВА

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия, e-mail: morozova89_89@mail.ru

Предложен интегральный колориметр, работающий на принципах искусственных нейронных сетей. Рассмотрены методы повышения точности воспроизведения относительной спектральной чувствительности измерительных каналов колориметра, которая должна соответствовать функции сложения цветов стандартного наблюдателя в процессе производства.

Ключевые слова: цвет, координаты, интегральный колориметр, нейронные сети, функция сложения цветов стандартного наблюдателя, синаптический коэффициент.

The integral colorimeter working on the principles of artificial neural networks is proposed. Methods of improving the accuracy of reproduction of relative spectral sensitivity of colourimeter measuring channels which should correspond to functions of colour composition of standard observer in the process of manufacturing are considered.

Key words: colour, coordinates, integral colourimeter, neural networks, functions of colour composition of standard observer, synaptic coefficient.

Появление на рынке многоэлементных фотоприемников, в том числе и с цифровым выходом, которые широко используются в оптических приборах, позволило взглянуть на идеологию построения интегральных колориметров с позиций искусственных нейронных сетей. Этому способствовало и то, что механизм цветового зрения человека основан на передаче информации о свете и цвете от множества палочек и колбочек зрительного аппарата к мозгу в результате сложного взаимодействия нейронов.

Интегральные колориметры привлекают разработчиков цветоизмерительной аппаратуры простотой и относительной дешевизной. Их работа базируется на принципе одновременного преобразования фотоприемником световых потоков с различной длиной волны в суммарный фототок. Фотоприемники в интегральном колориметре служат в качестве интеграторов, которые суммируют световые потоки разных длин волн λ , с весовыми коэффициентами, учитыва-

ющими функции сложения цветов стандартного наблюдателя. При этом сигналы U_X , U_Y , U_Z каналов измерения координат X , Y , Z цвета определяются в виде [1]:

$$\begin{aligned} X &= K_X U_X = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_p(\lambda) S_X(\lambda) T_X(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda; \\ Y &= K_Y U_Y = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_p(\lambda) S_Y(\lambda) T_Y(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda; \\ Z &= K_Z U_Z = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_p(\lambda) S_Z(\lambda) T_Z(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (1)$$

где K_X , K_Y , K_Z — коэффициенты передачи по каналам измерения X , Y , Z (устанавливаются при калибровке прибора по

образцу с известными координатами цвета); $\varphi_p(\lambda_i)$ — относительное спектральное распределение потока излучения реального источника, установленного в приборе; $S_X(\lambda)$, $S_Y(\lambda)$, $S_Z(\lambda)$ — относительные спектральные чувствительности фотоприемников; $T_X(\lambda)$, $T_Y(\lambda)$, $T_Z(\lambda)$ — спектральные коэффициенты пропускания корректирующих фильтров по соответствующим каналам измерения; $\tau(\lambda)$ — спектральный коэффициент пропускания или отражения измеряемого образца.

Основным условием для выбора корректирующего фильтра является соблюдение равенств

$$\begin{aligned} K_X \varphi_p(\lambda_i) S_X(\lambda_i) T_X(\lambda_i) &= \varphi(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i); \\ K_Y \varphi_p(\lambda_i) S_Y(\lambda_i) T_Y(\lambda_i) &= \varphi(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i); \\ K_Z \varphi_p(\lambda_i) S_Z(\lambda_i) T_Z(\lambda_i) &= \varphi(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\varphi(\lambda)$ — относительное спектральное распределение энергии излучения стандартного источника; $\bar{x}(\lambda_i)$, $\bar{y}(\lambda_i)$, $\bar{z}(\lambda_i)$ — функции сложения цветов стандартного наблюдателя в системе XYZ.

Погрешность измерения координат X, Y, Z цвета будет определяться, в основном, погрешностью выполнения равенств (2). Выполнить эти равенства на всех длинах волн представляется практически не решаемой задачей, поэтому при подборе корректирующих фильтров минимизируют средние квадратические отклонения

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n [K_X \varphi_p(\lambda_i) S_X(\lambda_i) T_X(\lambda_i) - \varphi(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i)]^2 &\rightarrow \min; \\ \sum_{i=1}^n [K_Y \varphi_p(\lambda_i) S_Y(\lambda_i) T_Y(\lambda_i) - \varphi(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i)]^2 &\rightarrow \min; \\ \sum_{i=1}^n [K_Z \varphi_p(\lambda_i) S_Z(\lambda_i) T_Z(\lambda_i) - \varphi(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i)]^2 &\rightarrow \min. \end{aligned} \quad (3)$$

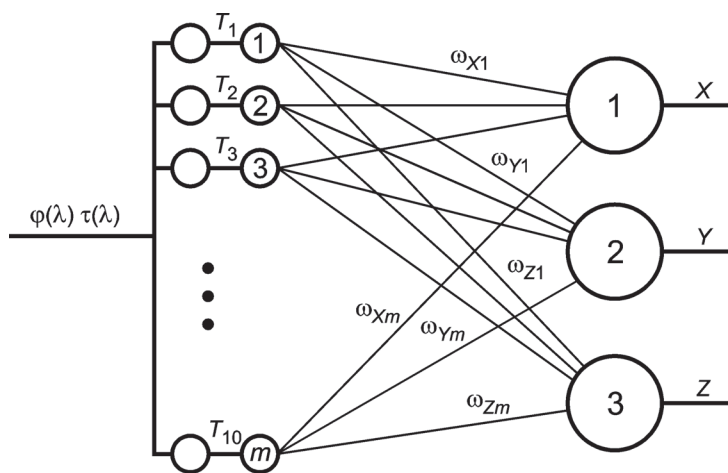


Рис. 1. Структура связей нейроколориметра

Для этого применяют наборы цветных стекол различной толщины. При последовательном расположении цветных стекол корректирующего фильтра подбирают типы цветных стекол и их толщины, чтобы выполнялись условия (3), а результирующий коэффициент пропускания корректирующего фильтра определяют по формуле

$$T_X(\lambda_i) = 10^{-\sum_{p=1}^h k_p(\lambda_i) L_p}, \quad (4)$$

где $k_p(\lambda_i)$, L_p — спектральный коэффициент поглощения p -го цветного стекла на длине волны λ_i и его толщина; h — число цветных стекол в наборе; выражения для $T_Y(\lambda)$, $T_Z(\lambda)$ аналогичны (4).

Комплекс технологических работ, связанных с индивидуальным подбором светофильтров, настолько трудоемок, что говорить о создании интегрального колориметра, работающего в режиме прямых измерений, а не в режиме компарирования [2], с приемлемой точностью измерений в широком диапазоне цветов не приходится. В [3] отмечено, что попытка индивидуального подбора светофильтров приводит к тому, что стоимость интегрального колориметра приближается к стоимости высокоточного спектрофотометра. В то же время индивидуальная подгонка решает проблемы на момент изготовления колориметра. Со временем появляются дополнительные погрешности, вызванные изменениями относительного спектрального распределения потока излучения источника и спектральной чувствительности фотоприемников. Поэтому в (3) сумма средних квадратических отклонений будет со временем увеличиваться, что приведет к росту погрешности измерения, причем уменьшить эту погрешность будет уже невозможно, так как конструктивные параметры светофильтра в процессе эксплуатации изменить сложно.

Необходимы кардинальные решения проблемы, например, построение колориметра на принципах нейронных сетей [4, 5]. Основу нейронной сети колориметра составляют три нейрона 1, 2, 3, выходы которых — аксоны — являются координатами X, Y, Z цвета (рис. 1). Нейроны связаны с множеством фотоприемников $j = 1, \dots, m$ синаптическими связями ω_{Xj} , ω_{Yj} , ω_{Zj} . Перед многоэлементными фотоприемниками установлены цветные светофильтры с коэффициентами пропускания $T_{Xj}(\lambda_i)$, $T_{Yj}(\lambda_i)$, $T_{Zj}(\lambda_i)$. В предлагаемой структуре вклад в координаты X, Y, Z цвета дает не один, а множество фотоприемников с необходимыми синаптическими связями.

Спектральные чувствительности каждой пары светофильтр — фотоприемник отличаются друг от друга, поскольку каждый светофильтр имеет индивидуальную спектральную характеристику. При этом результирующая спектральная чувствительность каналов измерений X, Y, Z, в которые входят m фотоприемников, будет определяться не только суммой ординат спектральных чувствительностей на соответствующих длинах волн, но и синаптическими коэффициентами.

Исходя из приведенной структуры связей нейроколориметра с учетом (1) координаты цвета выражаются как

$$\begin{aligned}
 X &= \sum_{j=1}^m \omega_{Xj} \left[\sum_{i=1}^n K_{Xj} \tau(\lambda_i) \varphi_p(\lambda_i) S_{Xj}(\lambda_i) T_{Xj}(\lambda_i) \Delta\lambda \right]; \\
 Y &= \sum_{j=1}^m \omega_{Yj} \left[\sum_{i=1}^n K_{Yj} \tau(\lambda_i) \varphi_p(\lambda_i) S_{Yj}(\lambda_i) T_{Yj}(\lambda_i) \Delta\lambda \right]; \\
 Z &= \sum_{j=1}^m \omega_{Zj} \left[\sum_{i=1}^n K_{Zj} \tau(\lambda_i) \varphi_p(\lambda_i) S_{Zj}(\lambda_i) T_{Zj}(\lambda_i) \Delta\lambda \right], \quad (5)
 \end{aligned}$$

где $\Delta\lambda$ — шаг измерений.

Как следует из (5), синаптические коэффициенты ω_{Xj} , ω_{Yj} , ω_{Zj} дают дополнительные возможности для повышения точности воспроизведения относительной спектральной чувствительности измерительных каналов, чтобы она соответствовала функции сложения цветов стандартного наблюдателя как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации прибора.

При проектировании колориметра определяют типы и толщины цветных стекол, а также синаптические коэффициенты, которые удовлетворяют условиям минимума целевых функций

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^n \left[\Delta\lambda \sum_{j=1}^m K_{Xj} \varphi_p(\lambda_i) S_{Xj}(\lambda_i) T_{Xj}(\lambda_i) \omega_{Xj} - \varphi(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i) \right]^2 &\rightarrow \min; \\
 \sum_{i=1}^n \left[\Delta\lambda \sum_{j=1}^m K_{Yj} \varphi_p(\lambda_i) S_{Yj}(\lambda_i) T_{Yj}(\lambda_i) \omega_{Yj} - \varphi(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \right]^2 &\rightarrow \min; \\
 \sum_{i=1}^n \left[\Delta\lambda \sum_{j=1}^m K_{Zj} \varphi_p(\lambda_i) S_{Zj}(\lambda_i) T_{Zj}(\lambda_i) \omega_{Zj} - \varphi(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i) \right]^2 &\rightarrow \min. \quad (6)
 \end{aligned}$$

Было проведено моделирование нейронной сети колориметра, где в качестве многоэлементного фотоприемника применяли фотодиодную линейку S8865-64G (HAMAMATSU, Япония), содержащую 64 фотоприемника. Размер каждого фоточувствительного элемента линейки $0,4 \times 0,3$ мм, длина всей линейки 25,6 мм; 32 элемента фотодиодной линейки использовали для организации рабочего канала измерений и 32 — для сравнительного. Перед фотодиодной линейкой устанавливали светофильтр из четырех цветных стекол. В соответствии с целевыми функциями (6) были рассчитаны толщины цветных стекол и синаптические коэффициенты. Светофильтры, устанавливаемые в рабочем и сравнительном каналах, идентичны.

Графики относительных спектральных чувствительностей измерительных каналов X, Y, Z для источников излучения C и D65 приведены на рис. 2. Конструктивные параметры светофильтров, вычисленные для стандартного источника C, применяли и для источников A, B, D65; отличались только синаптические коэффициенты. Из рис. 2 следует, что относительные спектральные чувствительности измерительных каналов X, Y, Z приближаются к функциям $\varphi(\lambda)\bar{x}(\lambda)$, $\varphi(\lambda)\bar{y}(\lambda)$, $\varphi(\lambda)\bar{z}(\lambda)$.

Аналогичные расчеты осуществляли для стандартных источников излучения A, B. Суммы квадратов отклоне-

ний относительных спектральных чувствительностей измерительных каналов от приведенных выше функций составили 0,03 для канала X; 0,01 для канала Y; 0,025 для канала Z. Эти значения лишь косвенно характеризуют степень приближения относительных спектральных чувствительностей измерительных каналов к этим функциям. Поэтому погрешности воспроизведения указанных чувствительностей оценивали по абсолютным погрешностям измерений координат цвета в соответствии с зависимостями

$$\begin{aligned}
 \Delta X &= \sum_{j=1}^m \omega_{Xj} \left[\sum_{i=1}^n K_{Xj} \tau(\lambda_i) \varphi_p(\lambda_i) S_{Xj}(\lambda_i) T_{Xj}(\lambda_i) \Delta\lambda \right] - \\
 &\quad - \varphi(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i) \tau(\lambda_i) \Delta\lambda; \\
 \Delta Y &= \sum_{j=1}^m \omega_{Yj} \left[\sum_{i=1}^n K_{Yj} \tau(\lambda_i) \varphi_p(\lambda_i) S_{Yj}(\lambda_i) T_{Yj}(\lambda_i) \Delta\lambda \right] - \\
 &\quad - \varphi(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \tau(\lambda_i) \Delta\lambda; \\
 \Delta Z &= \sum_{j=1}^m \omega_{Zj} \left[\sum_{i=1}^n K_{Zj} \tau(\lambda_i) \varphi_p(\lambda_i) S_{Zj}(\lambda_i) T_{Zj}(\lambda_i) \Delta\lambda \right] - \\
 &\quad - \varphi(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i) \tau(\lambda_i) \Delta\lambda.
 \end{aligned}$$

Также рассчитывались цветовые различия ΔE в системе CIE Lab между истинным значением координат цвета соответствующего образца и «измеренным».

Для этого из каталога [6] были выбраны 18 цветных стекол, для которых по (4) рассчитаны спектральные коэффициенты пропускания, при этом толщину каждого из стекол принимали равной 0,005 м, а координаты цвета считали истинными. Далее по (5) вычисляли «измеренные» значения координат цвета этих образцов с учетом найденных значений синаптических коэффициентов для источников света типа A, B, C, D65. Затем определяли погрешности ΔX , ΔY , ΔZ и цветовые различия ΔE . Результаты расчетов приведены в табл. 1, 2 (только для источников C, D65), откуда следует, что абсолютные погрешности «измерений» координат цвета, как

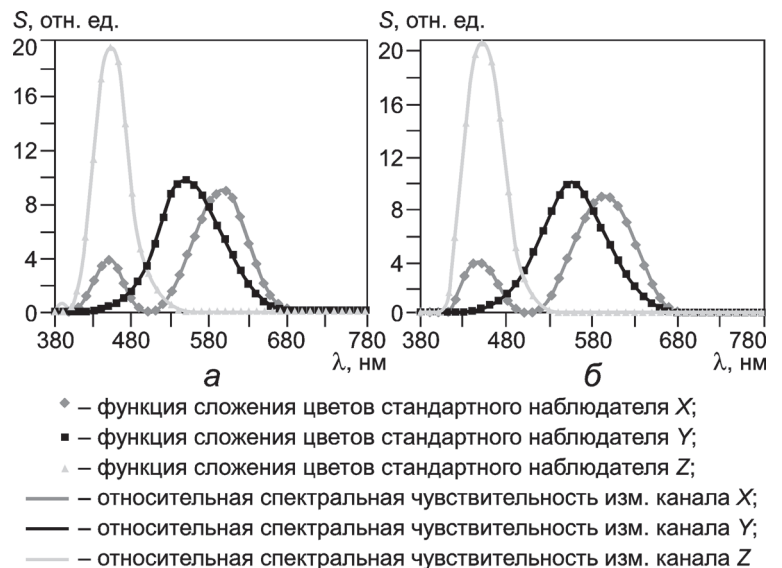


Рис. 2. Графики относительной спектральной чувствительности измерительных каналов X, Y, Z для источников излучения C (а) и D65 (б)

Таблица 1

Результаты расчетов и погрешности «измерений» координат цвета для источника излучения С

Образец цветного стекла	Координаты цвета						Погрешности «измерений» координат цвета и цветовое различие			
	«измеренные»			истинные			ΔX	ΔY	ΔZ	ΔE
	X	Y	Z	X	Y	Z				
Идеально белый	98,041	100,000	118,103	98,041	100,000	118,100	0,147	-0,063	0,393	0,230
СС1	26,875	26,068	96,843	26,849	26,015	96,484	0,026	0,053	0,359	0,191
СС5	9,215	1,614	49,473	9,213	1,578	49,356	0,002	0,035	0,116	0,966
СС8	7,535	2,048	41,241	7,535	2,009	41,142	0,000	0,039	0,100	0,918
СЗС5	43,026	52,694	83,739	43,042	52,652	83,486	-0,016	0,043	0,253	0,044
СЗС8	16,319	18,879	81,260	16,331	18,820	81,077	-0,012	0,059	0,183	0,137
СЗС17	53,615	64,422	105,882	53,617	64,377	105,520	-0,003	0,044	0,364	0,212
СЗС22	22,994	30,535	108,025	23,018	30,470	107,710	-0,024	0,065	0,329	0,365
СЗС23	58,146	73,688	116,306	58,166	73,627	115,910	-0,020	0,061	0,400	0,250
ЗС1	14,721	30,577	8,899	14,726	30,606	8,912	-0,005	-0,029	-0,013	0,006
ЗС8	38,281	62,807	22,953	38,303	62,803	22,998	-0,022	0,004	-0,045	0,113
ЗС10	20,075	33,333	2,532	20,050	33,356	2,558	0,024	-0,024	-0,025	0,064
ЗС11	11,460	27,006	10,450	11,469	27,030	10,459	-0,009	-0,024	-0,009	0,002
ОС5	17,971	12,283	0,086	17,865	12,346	0,098	0,106	-0,063	-0,013	1,204
ЖЗС1	15,417	28,039	2,583	15,409	28,070	2,600	0,008	-0,031	-0,017	0,035
ЖЗС9	16,446	29,953	3,546	16,441	29,977	3,567	0,005	-0,024	-0,021	0,149
ЖС3	85,013	94,938	66,073	84,843	95,062	66,139	0,171	-0,124	-0,066	0,537
ЖС17	76,889	89,316	7,606	76,718	89,447	7,671	0,171	-0,131	-0,065	0,353

Таблица 2

Результаты расчетов и погрешности «измерений» координат цвета для источника излучения D65

Образец цветного стекла	Координаты цвета						Погрешности «измерений» координат цвета и цветовое различие			
	«измеренные»			истинные			ΔX	ΔY	ΔZ	ΔE
	X	Y	Z	X	Y	Z				
Идеально белый	95,425	99,996	109,185	95,018	100,000	108,815	0,407	-0,005	0,370	0,741
СС1	25,318	25,992	88,901	25,254	26,085	88,533	0,064	-0,093	0,368	0,764
СС5	8,348	1,428	44,958	8,346	1,473	44,857	0,002	-0,045	0,100	1,449
СС8	6,833	1,861	37,533	6,833	1,905	37,445	0,000	-0,044	0,089	1,172
СЗС5	41,476	52,904	77,135	41,470	52,975	76,897	0,005	-0,072	0,239	0,328
СЗС8	15,217	19,058	74,824	15,213	19,117	74,644	0,004	-0,059	0,180	0,419
СЗС17	51,670	64,684	97,563	51,634	64,770	97,206	0,036	-0,086	0,356	0,417
СЗС22	51,670	64,684	97,563	21,550	31,149	99,109	0,002	-0,108	0,389	0,393
СЗС23	56,034	73,982	107,181	56,033	74,090	106,792	-0,007	-0,003	-0,002	0,107
ЗС1	14,549	31,139	8,543	14,550	31,144	8,571	-0,001	-0,005	-0,028	0,087
ЗС8	37,738	63,391	21,875	37,734	63,388	21,953	-0,002	-0,001	-0,018	0,641
ЗС10	19,766	33,539	2,475	19,736	33,541	2,525	0,029	-0,002	-0,051	0,411
ЗС11	11,345	27,611	10,010	11,350	27,616	10,030	-0,005	-0,005	-0,020	0,056
ОС5	17,682	12,178	0,079	17,471	12,129	0,100	0,211	0,049	-0,020	1,703
ЖЗС1	15,220	28,411	2,545	15,208	28,413	2,580	0,012	-0,002	-0,035	0,269
ЖЗС9	16,235	30,347	3,465	16,223	30,344	3,505	0,012	0,003	-0,040	0,245
ЖС3	83,245	95,233	61,668	82,845	95,147	61,799	0,400	0,086	-0,131	0,632
ЖС17	75,814	89,817	7,427	75,403	89,681	7,555	0,411	0,136	-0,127	0,822

и цветовые различия, находятся на уровне цветоразличительной способности наблюдателя с нормальным цветовым зрением. Получить такую же точность воспроизведения относительной спектральной чувствительности измерительных каналов X, Y, Z на одиночных фотоприемниках не удалось.

Оценивали также погрешность «измерений» самосветящихся объектов. Для этого использовали справочные данные спектров излучения светодиодов (рис. 3), которые были оцифрованы, и для них рассчитаны координаты цвета и цветности, принятые за истинные значения. Затем по (5) вычисляли «измеренные» значения координат цвета и цветности этих светодиодов для синаптических коэффициентов $\omega_X, \omega_Y, \omega_Z$ при $\varphi_p(\lambda_i) = 1$ и погрешность «измерений» координат цвета. В (5) для $\tau(\lambda)$ принимали значения относительной спектральной плотности потока излучения светодиодов. Результаты расчетов приведены в табл. 3, откуда следует, что погрешность «измерений» координат цветности самосветящихся объектов не превышает 0,0017.

Таблица 3

Результаты расчетов и погрешности «измерений» координат цветности светодиодов

Светодиод	Координаты цветности				Погрешности «измерений» координат цветности	
	«измеренные»		истинные		Δx	Δy
	x	y	x	y		
Синий	0,136	0,054	0,136	0,055	0,0000	-0,0010
Зеленый	0,132	0,736	0,131	0,733	0,0000	0,0030
Красный	0,700	0,300	0,706	0,294	-0,0050	0,0050
R	0,402	0,532	0,402	0,532	-0,0002	-0,0002
G	0,244	0,546	0,244	0,546	0,0000	0,0001
B	0,158	0,019	0,158	0,019	-0,0001	0,0003
XP-E0-0	0,343	0,359	0,342	0,359	0,0003	0,0000
XP-E0-45	0,371	0,368	0,371	0,369	0,0003	-0,0002
XP-E0-85	0,393	0,385	0,393	0,385	0,0002	-0,0003
XP-G0-0	0,331	0,325	0,331	0,325	0,0002	-0,0002
XP-G0-45	0,340	0,337	0,339	0,337	0,0002	-0,0002
XP-G0-85	0,360	0,374	0,360	0,374	0,0000	-0,0003
1	0,593	0,406	0,592	0,408	0,0010	-0,0017
2	0,125	0,681	0,125	0,680	0,0005	0,0007

Таким образом, построение колориметра на принципах нейронных сетей позволяет не только повысить точность воспроизведения относительной спектральной чувствительности измерительных каналов X, Y, Z, чтобы она соответствовала функции сложения цветов стандартного наблюдателя и, как следствие, уменьшить погрешность «измерений» координат цвета, но и упростить технологические процедуры подбора корректирующих светофильтров при серийном производстве. Причем эти процедуры упрощаются настолько, что утверждение авторов [3]: «попытка индивидуального подбора светофильтров приводит к тому, что стоимость интегрального колориметра становится сравнимой со стоимостью хорошего спектрофотометра», — теряет свою правоту. К тому же в период эксплуатации прибора изменения относительного спектрального распределения потока излучения источника и спектральной чувствительности фотоприемников можно компенсировать изменением коэффициентов синаптических связей и таким образом скорректировать

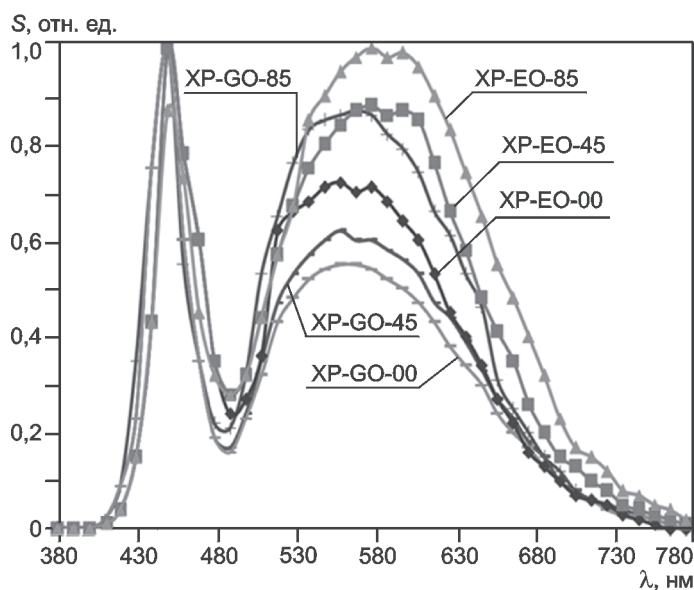
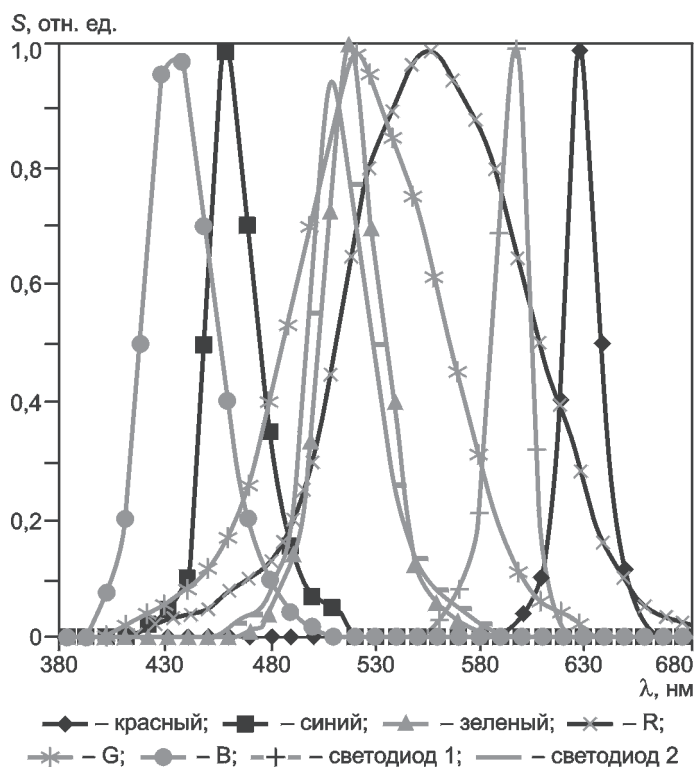


Рис. 3. Спектры излучения светодиодов

относительную спектральную чувствительность измерительных каналов X, Y, Z, чтобы она соответствовала функции сложения цветов стандартного наблюдателя.

Л и т е р а т у р а

1. Соловьев В. А. Измерение относительной спектральной чувствительности фотоэлектронных каналов колориметров интегрального типа // Измерительная техника. 2005.

№ 5. С. 31—34; **Solov'ev V. A.** Measurement of the relative spectral sensitivity of photoelectronic channels of integral-type colorimeters // Measurement Techniques. 2005. V. 48. N 5. P. 461—465.

2. **Соловьев В. А.** Математическая модель колориметра интегрального типа, работающего в режиме компарирования // Метрология. 2004. № 1. С. 20—26.

3. **Джадд Д., Вышецки Г.** Цвет в науке и технике. М.: Мир, 1978.

4. **Пат. 85228 РФ.** Нейроколориметр / А. А. Белаш и др. // Изобретения. Полезные модели. 2009. № 21.

5. **Пат. 2395063 РФ.** Способ измерения координат цвета и нейроколориметр для реализации способа / А. А. Белаш и др. // Изобретения. Полезные модели. 2010. № 20.

6. **Цветное** оптическое стекло и особые стекла / Под ред. Г. Т. Петровского. М.: Изд-во «Дом оптики», 1990.

Дата принятия 13.03.2012 г.

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

006.92

Метрологические характеристики цезиевого репера МЦР102 государственного эталона времени и частоты Российской Федерации

Л. С. МИРОШНИКОВА, С. Б. ПУШКИН

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: onti@vniiftri.ru

Приведены результаты сравнения частоты, воспроизводимой с помощью первичного метрологического цезиевого репера частоты МЦР102 в составе государственного эталона времени и частоты Российской Федерации, с частотой международного атомного времени TAI с 1990 по 2011 г., а также с частотами, воспроизводимыми цезиевыми реперами PTB-CS1 и PTB-CS2, с 2000 по 2011 г.

Ключевые слова: время, частота, государственный эталон, цезиевый репер, метрологические характеристики.

The results of comparisons of frequency reproduced by means of metrological cesium frequency frame MCR 102 within the composition of Russian Federation national time and frequency standard with the frequency of International Atomic Time (TAI) carried out over 1990—2011 period, as well as with the frequencies reproduced by cesium frequency frames PTB-CS1 and PTB-CS2 during 2000—2011 — are presented.

Key words: time, frequency, national standard, cesium frame, metrological characteristics.

На 13-й Генеральной конференции по мерам и весам в 1967 г. было дано определение секунды как интервала времени, в течение которого совершается 9192631770 колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133 (^{133}Cs), при отсутствии внешних воздействий. Согласно этому определению атом ^{133}Cs является стандартом для измерения времени и частоты. Перед ведущими метрологическими лабораториями мира встала задача повышения точности воспроизведения частоты невозмущенного перехода в своих цезиевых реперах частоты.

В работы по созданию первичного метрологического цезиевого репера частоты ВНИИФТРИ включился с 1975 г. Метрологический цезиевый репер МЦР102 был создан группой

специалистов института в 1978 г. и функционирует в составе государственного первичного эталона времени и частоты (ГЭВЧ) более 30 лет. Как и все цезиевые атомно-лучевые реперы времени и частоты, созданные в то время, МЦР102 предназначался для передачи секунды при формировании атомной шкалы времени эталона TA(SU).

Настоящая статья посвящена вопросам создания и развития отечественного цезиевого репера частоты МЦР102 и оценке его метрологических характеристик на различных этапах эксплуатации в составе ГЭВЧ.

Атомно-лучевая система МЦР102 имеет шестиполосную фокусирующую оптику, продольное магнитное С-поле и точечный детектор атомного пучка, длина сверхвысокочастотного (СВЧ) резонатора составляет примерно 100 см. Пролетное пространство экранировано от внешних магнитных