

УДК. 62.506.2

Ю. П. ШАБАНОВ-КУШНАРЕНКО, д-р техн. наук,
В. Я. СЕРДЮЧЕНКО, канд. техн. наук, *В. А. ГРАБИНА*, канд. техн. наук

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ИНДУКТИВНОГО
ЦВЕТОВОГО КОНТРАСТА**

Настоящая работа является продолжением статьи [1], в которой описана модель индуктивных свойств зрения, отличительной особенностью которой является то, что она получена из некоторой системы аксиом дедуктивным путем.

Эта модель имеет вид

$$y = \Phi(B_1, B_2) = J[\alpha_k(B_1), \alpha_k(B_2)], \quad k = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где B_1, B_2 — функции $B(\lambda, x, y)$, описывающие распределение спектра излучения в каждой точке поля зрения; J — функция сравнения, значение которой (0 или 1) определяется условиями конкретной экспериментальной процедуры; $\alpha_k(B)$ — линейные функционалы, характеризующие с точностью до взаимно-однозначного соответствия преобразование, осуществляемое в органе зрения человека при одновременном цветовом контрасте.

Известно, что при аксиоматическом построении модели ее справедливость полностью определяется достоверностью аксиом. Здесь описываются опыты по проверке аксиом аддитивности, размерности и непрерывности, из которых была получена модель одновременного цветового контраста.

Аксиома аддитивности. Если $\Phi(B'_1, B''_1) = 1$ и $\Phi(B'_2, B''_2) = 1$, то

$$\Phi(B'_1 + B'_2, B''_1 + B''_2) = 1. \quad (2)$$

Аксиома размерности. Существует набор функций $\{e_k\}, e_k = B'_k - B''_k, B'_k, B''_k \in K, k = 1, 2, 3$ такой, что для всякой функции найдется единственная совокупность чисел $\alpha_k, k = 1, 2, 3$, удовлетворяющая условиям

$$\Phi(B, \sum_k \alpha_k e_k) = 1. \quad (3)$$

Аксиома непрерывности. Непрерывному изменению функции $B(\lambda, x, y)$ соответствует непрерывное изменение чисел α_k , существование и единственность которых следует из свойства размерности.

Остановимся на основных положениях методологии проведения экспериментов при изучении цветовой индукции. Первый вопрос касается трехкомпонентности зрения. Известно, что при некоторых условиях зрение может быть двух- и даже однокомпонентным. Это наблюдается при восприятии изображений очень малой и очень большой яркости, а также на периферийных участках поля зрения. Если проводить эксперименты в таких условиях, то оказывается, что набор чисел α_k (из аксиомы размерности), обеспечивающих равенство цветов в точках сравнения, не единственен. Наиболее интересным является изучение одновременного цветового контраста при трехкомпонентности зрения. Поэтому мы исключили из рассмотрения сумеречное зрение и процессы на периферии поля зрения. В опытах участвовали также только трихроматы с клинически нормальным зрением.

Эти же условия выполняются при исследовании модели стационарных и однородных процессов [2, с. 50—54]. В этой же работе указывается еще ряд особенностей, возникающих при

(1) Исследовании цветового зрения, связанных, например, с наличием «зоны нечувствительности», внутри которой можно изменять числа α_i без изменения результата опыта. Неточности в проведении экспериментов, связанные с наличием «зоны нечувствительности», также имеют место при исследовании индуктивных свойств зрения. В опытах по индукции зрения считаем также неточности несущественными.

Экспериментальная проверка аксиом проводилась на дисках Максвелла. В опытах использовались две вертушки, на каждой из которых формировалась зрительная картина с определенным распределением цвета в поле зрения. Известно, что этот метод позволяет проводить исследования с одномерными зрительными картинами, которым соответствуют функции вида $V(\lambda, x)$. В нашем случае зрительные картины представляют собой фоны с произвольным распределением цвета вдоль радиуса диска; на этих фонах формируются узкие полоски, цвет которых отличается, в общем случае, от цвета фона. При предъявлении таких зрительных картин органу зрения испытуемого у него возникает эффект цветовой индукции, заключающийся в изменении цвета полосок под влиянием окружающего фона. Степень проявления этого эффекта будет различной, в зависимости от соотношения угловых размеров полоски и фона, спектров излучений фона и полоски, их яркости и некоторых других факторов. Угловые размеры полоски желательно выбирать поменьше, чтобы не возникли неоднородности ощущения по ширине полоски, связанные с явлениями яркостного краевого контраста. Опыт показывает, что для этого ширина полоски не должна превышать величину в 1—2 угл. град. Формировать полоску слишком малой ширины тоже нельзя, так как трудно будет оценивать ее цвет. В опытах, описания которых приведены в работах [3, 4], использовались зрительные картины в виде полей прямоугольной формы с размерами ($2^\circ \times 2^\circ$, $20^\circ \times 25^\circ$) и ($1,5^\circ \times 1^\circ$, $23,5^\circ \times 14,5^\circ$).

В опытах по проверке аксиом одновременного цветового контраста мы выбирали ширину полоски, равную 1° , а размер фона — 20 угл. град. Для получения возможности изменения спектральных излучений фона и полоски в опытах применялись разрезные диски различных диаметров, изготовленные из цветной бумаги. Все они вставлены своими прорезями в прорези белых бумажных кружков и установлены на вертушке, как показано на рис. 1. Известно, что такой составной диск допускает регулировку спектра, благодаря изменению угловых размеров его секторов.

В опытах использовались белые, черные, красные, зеленые и синие кружки. На рис. 1 все кружки обозначены соответствующими буквами: б — белый, ч — черный, к — красный, з — зеленый, с — синий.

В качестве белого использовался кружок с коэффициентом отражения $\rho_b = 0,83$, в качестве черного — кружок с $\rho_c = 0,0$. Коэффициенты отражения и координаты цветности определялись на колориметре КНО-3 в лаборатории цветных измерений ВНИСИ.

В опытах применялись кружки, имеющие следующие координаты цветности:

красный: $x = 0,607$; $y = 0,336$; $\rho = 0,344$;

синий: $x = 0,258$; $y = 0,248$; $\rho = 0,078$;

зеленый: $x = 0,283$; $y = 0,526$; $\rho = 0,320$.

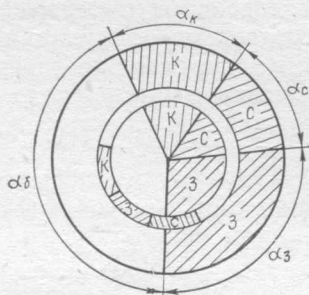


Рис. 1.

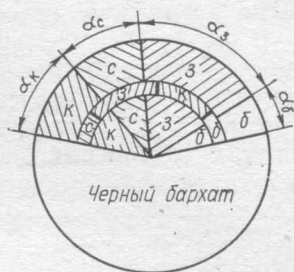


Рис. 2.

При проверке аксиомы аддитивности необходимо иметь возможность производить сложение двух зрительных картин. Для выполнения этой операции изготавливался дополнительно разрезной кружок ($\varnothing 200$ мм) из черного бархата ($\rho_{чб} = 0,2\%$). Этот кружок вставлялся в прорези остальных кружков, как показано на рис. 2.

Изготовленные таким способом диски устанавливаются на двух вертушках и приводятся во вращение со скоростью, близкой к 50 об/сек. Наблюдатель должен сравнить цвета полосок двух зрительных картин $B_1(\lambda, x)$ и $B_1''(\lambda, x)$ (на полное колориметрическое равенство). При неравенстве цветов разрешается изменять зрительные картины до тех пор, пока цвета полосок не сравняются (для удобства регулирования цвета полоски на вертушке устанавливается дополнительно один кружок желтого цвета).

Аналогично добиваются равенства ощущений в той же точке для зрительных картин B_2 и B_2'' .

Затем складывают попарно указанные зрительные картины $B_1' + B_2$ и $B_1'' + B_2''$. Для этого разрезные кружки, образующие зрительную картину B_2' , вставляют в прорези кружков, образующих картину B_1 таким образом, что цветные сектора кружков B_2' становятся на место сектора из черного бархата картины B_1' .

Это значит, что новая зрительная картина B'_3 будет отличаться от $B'_1 + B'_2$ по яркости, но отличие незначительное, так как коэффициент отражения черного бархата ($\rho_{\text{ч}} \sigma = 0,2\%$) существенно меньше коэффициентов отражения цветной бумаги.

Таким же способом осуществлялось сложение зрительных картин B'_1 и B'_2 .

В результате сложения получаем кружки, позволяющие формировать зрительные картины, которым соответствуют функции

$$B'_3(x) = B'_1(x) + B'_2(x) \text{ и } B''_3(x) = B''_1(x) + B''_2(x).$$

Испытуемому вновь предлагается сравнить ощущение в тех же фиксированных точках зрительных картин B'_3 и B''_3 .

В табл. 1 приведены результаты одного из опытов с испытуемым Г. В опыте углы α' фиксированы, а равенство ощущений достигается за счет изменения углов α'' , определяющих цвет полосы зрительной картины B'' . В таблице указаны значения угловых размеров секторов, при которых наступает равенство ощущений, для двух пар изображений B'_1, B''_1 и B'_2, B''_2 .

В строке « $B_1 + B_2$ » таблицы указаны соответствующие размеры секторов дисков, формирующие зрительные картины B'_3 и B''_3 , полученные после суммирования исходных картин. Сравнивая эти изображения, испытуемый отмечал равенство цветов в точке фиксации.

В экспериментах принимали участие 7 испытуемых. С каждым из них были проведены опыты для зрительных картин с произвольным распределением спектра излучений фона (например, в виде «скачка», «двойного скачка» и т. д.).

Все проведенные эксперименты подтвердили справедливость аксиомы аддитивности.

Методика проведения опытов по проверке аксиомы размерности не отличалась от той, которая применялась при проверке аксиомы аддитивности. Только в этом случае на одном из полей сравнения формировалась произвольная зрительная картина B'' , а на другом — картина B' в виде равномерного фона, цвет которого сравнивался с цветом картины B'' в выбранной точке фиксации.

В одном из опытов зрительная картина B'' выбиралась в виде фона с полоской, цвет которой отличался от цвета фона.

На рис. 3 показана схема кружков, используемых в этом опыте.

На одной из вертушек устанавливался набор разрезных цветных кружков, позволяющих регулировать цвет фона и полоски картины B'' . Углы соответствующих секторов обозначены: $\alpha''_{\text{фк}}$, $\alpha''_{\text{фс}}$, $\alpha''_{\text{фж}}$ — для изменения цвета фона; $\alpha''_{\text{пк}}$, $\alpha''_{\text{пз}}$, $\alpha''_{\text{по}}$, $\alpha''_{\text{пж}}$ — для изменения цвета полоски.

Наименование картин			
Участок	B'_1 , град	B'_2 , град	$B'_1 + B'_2$, град
Фон	$\alpha'_{ж} = 50$	$\alpha'_3 = 60$	$\alpha'_{ж} = 50$
	$\alpha'_6 = 40$	$\alpha'_6 = 40$	$\alpha'_3 = 60$
	$\alpha'_{чб} = 270$	$\alpha'_{чб} = 260$	$\alpha'_6 = 80$ $\alpha'_{чб} = 170$
Полоска	$\alpha'_0 = 50$	$\alpha'_{ж} = 70$	$\alpha'_0 = 50$
	$\alpha'_6 = 40$	$\alpha'_6 = 30$	$\alpha'_{ж} = 70$
	$\alpha'_{чб} = 270$	$\alpha'_{чб} = 260$	$\alpha'_6 = 70$ $\alpha'_{чб} = 170$
	B''_1	B''_2	$B''_1 + B''_2$
Фон	$\alpha''_к = 50$	$\alpha''_к = 60$	$\alpha''_к = 110$
	$\alpha''_6 = 40$	$\alpha''_6 = 40$	$\alpha''_6 = 80$
	$\alpha''_{чб} = 270$	$\alpha''_{чб} = 260$	$\alpha''_{чб} = 170$
	$\alpha''_0 = 46,5$	$\alpha''_{ж} = 73$	$\alpha''_0 = 46,5$
	$\alpha''_ч = 10$	$\alpha''_к = 7$	$\alpha''_{ж} = 73$
	$\alpha''_6 = 33,5$	$\alpha''_6 = 20$	$\alpha''_к = 7$
	$\alpha''_{чб} = 270$	$\alpha''_{чб} = 260$	$\alpha''_6 = 53,5$
			$\alpha''_ч = 10$
			$\alpha''_{чб} = 170$

На другой вертушке установлен набор цветных кружков, сектора которых обозначены α_0 , $\alpha_к$ и α_3 . Эти кружки позволяют плавно изменять цвет картины B' .

Диски вращаются со скоростью 50 об/сек. Испытуемому предлагается установить равенство цветов полоски на правой половине поля сравнения и фона B' , для чего разрешается изменять угловые размеры секторов α_0 , $\alpha_к$ и α_3 . Цель опытов состояла в установлении возможности выравнивания этих цве-

тов при единственной совокупности значений углов $\alpha''_ф$, $\alpha''_п$ и $\alpha''_к$, $\alpha''_с$, $\alpha''_з$.

Опыты показали, что в некоторых случаях трудно добиться равенства цветов регулировкой углов α_c , α_z и α_k . В этом случае приходится добавлять к кружкам, формирующим зрительную картину B'' , секторы $\alpha''_с$, $\alpha''_к$ и $\alpha''_з$, как показано на рис. 3.

В табл. 2 приведены усредненные результаты по данным 5 опытов для испытуемого II при различных зрительных картинах B'' .

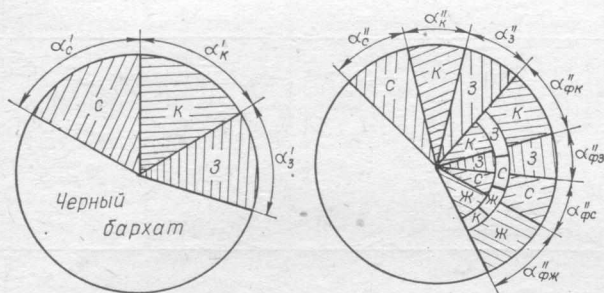


Рис. 3.

В графе «Левое поле сравнения» указаны угловые размеры цветных секторов, формирующих зрительную картину B' .

В графе «Правое поле сравнения» приведены величины секторов, определяющих цвет фона ($\alpha''_ф$) и цвет полосы ($\alpha''_п$), а также угловые размеры секторов α'' .

В опытах принимали участие 7 испытуемых. Результаты проведенных экспериментов подтвердили справедливость аксиомы размерности.

Аксиома непрерывности выполняется в колориметрических опытах всегда [2].

Все опыты проводились при освещенности $E=300$ лк. Варьирование освещенности в пределах $50 \div 700$ лк не вносило значительных изменений в результаты экспериментов. Ввиду сложности проведения экспериментов по достижению полного колориметрического равенства двух зрительных картин в точке фиксации в опытах принимали участие обученные испытуемые.

Кроме того, так как в этой работе не ставилась задача определения количественных характеристик цветовой индукции зрения, то при проведении опытов не исследовался вопрос о возможности усреднения данных нескольких испытуемых (например, гипотеза об однородности ряда дисперсии по G критерию).

Из справедливости аксиом аддитивности, размерности и непрерывности следует достоверность модели одновременного цветового контраста (1).

Таблица 2

		Номер опыта				
Поля сравнения	1	2	3	4	5	
Левое поле	$\alpha'_a = 190^\circ$	$\alpha'_k = 9^\circ$	$\alpha'_a = 142^\circ$	$\alpha'_c = 220^\circ$	$\alpha'_z = 26^\circ$	
	$\alpha'_z = 25$	$\alpha'_a = 144$	$\alpha'_k = 5$	$\alpha'_z = 150$	$\alpha'_c = 191$	
	$\alpha'_{чб} = \text{остальное}$	$\alpha'_z = 24$	$\alpha'_z = 37$			
Правое поле	$\alpha''_{фж} = 180^\circ$	$\alpha''_{фк} = 175^\circ$	$\alpha''_{фк} = 175^\circ$	$\alpha''_{фк} = 180^\circ$	$\alpha''_{фк} = 176^\circ$	
	$\alpha''_{по} = 180$	$\alpha''_{пс} = 175$	$\alpha''_z = 14$	$\alpha''_{пс} = 180$	$\alpha''_{пс} = 176$	
	$\alpha''_z = 48$		$\alpha''_k = 5$	$\alpha''_k = 5$	$\alpha''_z = 19$	
	$\alpha''_{чб} = \text{остальное}$		$\alpha''_{пс} = 175$			
	6	7	8	9	10	
Левое поле	$\alpha'_z = 15^\circ$	$\alpha'_c = 310^\circ$	$\alpha'_c = 230^\circ$	$\alpha'_z = 22^\circ$	$\alpha'_z = 16^\circ$	
	$\alpha'_c = 345$	$\alpha'_z = 17$	$\alpha'_z = 8$	$\alpha'_c = 274$	$\alpha'_c = 208$	
Правое поле	$\alpha''_{фк} = 180^\circ$	$\alpha''_{фк} = 255^\circ$	$\alpha''_{фк} = 160^\circ$	$\alpha''_{фк} = 315^\circ$	$\alpha''_{фк} = 239^\circ$	
	$\alpha''_{пс} = 180$	$\alpha''_{пс} = 255$	$\alpha''_{пс} = 160$			
	$\alpha''_k = 5$			$\alpha''_{по} = 315$	$\alpha''_{по} = 239$	
	$\alpha''_c = 125$	$\alpha''_z = 7$	$\alpha''_z = 160$			
	11	12	13	14	15	
Левое поле	$\alpha'_z = 18^\circ$	$\alpha'_a = 178^\circ$	$\alpha'_c = 160^\circ$	$\alpha'_k = 174^\circ$	$\alpha'_z = 50^\circ$	
	$\alpha'_c = 297$	$\alpha'_k = 7$	$\alpha'_z = 137$	$\alpha'_z = 24$	$\alpha'_k = 138$	
		$\alpha'_z = 4$		$\alpha'_c = 112$		
Правое поле	$\alpha''_{фк} = 270^\circ$	$\alpha''_{фк} = 140^\circ$	$\alpha''_{фк} = 142^\circ$	$\alpha''_{фз} = 134^\circ$	$\alpha''_{фс} = 101^\circ$	
	$\alpha''_{пс} = 270$	$\alpha''_{по} = 140$	$\alpha''_{пз} = 142$	$\alpha''_{пк} = 134$	$\alpha''_{пч} = 101$	
			$\alpha''_a = 6$	$\alpha''_a = 165$	$\alpha''_c = 85$	

Вопрос применимости модели для любых зрительных картин, а также определения ядер интегральных преобразований (1) требует дальнейшего изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шабанов-Кушнаренок Ю. П., Сердюченко В. Я., Грабина В. А. Математическое моделирование индуктивного цветового контраста.—В кн.: Проблемы бионики. Вып. 17, Харьков, 1976, с. 3—8.
2. Шабанов-Кушнаренок Ю. П. Математическое моделирование некоторых функций человеческого зрения. Автореф. дис. на соиск. учен. степени д-ра техн. наук. Харьков, 1970, с. 12—14.
3. Nayatani Y. Estimation of color induction by simultaneous color contrast.—«Proc. Int. Color Meeting «Color 69», Stockholm, 1969, vol. 1, p. 219—228.
4. Heinrich F. Untersuchungen zum farbigen Simultankontrast.—«Optik», 1965, 22, № 3, S. 162—168.

Поступила 25 ноября 1976 г.