

УДК 519.7



МОДЕЛЬ КРАЕВОГО КОНТРАСТА ЗРЕНИЯ

М.Ф. Бондаренко¹, С.Ю. Шабанов-Кушнарченко²,
Ю.П. Шабанов-Кушнарченко³

^{1, 2, 3} ХНУРЭ, г. Харьков, Украина

Исследуется модель краевого контраста зрения и ее реакции на различные виды входных сигналов. Представлены диаграммы, характеризующие изменения яркости и светлоты зрительного ощущения в поле зрения. Экспериментально определены численные значения параметров модели краевого контраста зрения человека. Достигнуто удовлетворительное согласование теории с опытом.

МОДЕЛИРОВАНИЕ, НУЛЕВОЙ ПРИБОР, КРАЕВОЙ КОНТРАСТ

1. Постановка задачи

Известно, что орган зрения человека осуществляет подчеркивание границ, содержащихся в изображении, которое обнаруживается в виде явления краевого контраста [1, 2]. Это свойство зрения, несомненно, носит целесообразный характер, поскольку, благодаря наличию краевого контраста, облегчается обнаружение и последующий анализ контура изображения. В настоящей статье предлагается математическая модель обработки зрительной информации, лежащей в основе явления краевого контраста. Ограничиваясь ахроматическими зрительными картинками, рассматриваем их как функции яркости $B = B(x, y)$ координат x, y поля зрения. Зрительное ощущение характеризуем светлотой $S = S(x, y)$.

Модель преобразования информации в органе зрения человека представим в виде схемы, изображенной на рис. 1. Функции $P(x, y)$, $Q(x, y)$ и $T(x, y)$ обозначают некоторые промежуточные сигналы преобразования.

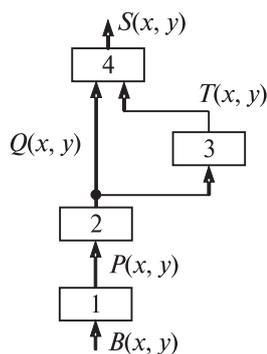


Рис. 1

Блок 1 осуществляет иррадиационное преобразование зрительной информации согласно уравнению:

$$P(x, y) = \frac{k}{2\pi b^2} \int \int_{-\infty}^{\infty} B(\xi, \eta) K_0 \left(\frac{\sqrt{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2}}{b} \right) d\xi d\eta. \quad (1)$$

Функционирование этого блока было рассмотрено в работах [5, 10].

Поскольку явления краевого контраста разыгрываются на значительно более крупных по площади участках поля зрения, чем явления иррадиации, в настоящей статье для упрощения задачи иррадиационные процессы вовсе не учитываются, а блок 1 рассматривается в качестве тождественного преобразователя:

$$P(x, y) = kB(x, y). \quad (2)$$

Блок 2 осуществляет логарифмирование сигнала P :

$$Q = c \lg dP, \quad (3)$$

где c и d – константы, численные значения и размерность которых зависят от выбора единицы измерения соответственно для светлоты и яркости.

Преобразование сигналов в блоке 3 описывается уравнением:

$$-n^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + T = k_k Q, \quad (4)$$

сходным с уравнением иррадиации зрения. Константу k_k назовем постоянной интенсивности краевого контраста, константу n – постоянной затухания краевого контраста. Блок 3 осуществляет вычитание сигналов:

$$S = Q - T. \quad (5)$$

Решение дифференциального уравнения (4) для случая безграничной двумерной зрительной картины имеет вид:

$$T(x, y) = \frac{k_k}{2\pi n^2} \int \int_{-\infty}^{\infty} Q(\xi, \eta) K_0 \left(\frac{\sqrt{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2}}{n} \right) d\xi d\eta, \quad (6)$$

где k_0 – функция Макдональда [3]; ξ и η – переменные интегрирования. В частном случае, когда зрительная картина неоднородна только в направлении координатной оси x , решение уравнения (4) запишется в виде:

$$T(x) = \frac{k_k}{2n} \int_{-\infty}^{\infty} Q(\xi) e^{-\frac{|\xi-x|}{n}} d\xi. \quad (7)$$

Для выяснения функционального смысла параметров k_k и n модели рассмотрим зрительную картину $B(x)$, содержащую вертикальную границу $x=0$. Левая половина поля зрения имеет яркость B_1 , правая – B_2 , то есть:

$$B(x) = \begin{cases} B_1, & \text{если } x \leq 0, \\ B_2, & \text{если } x > 0. \end{cases} \quad (8)$$

В этом случае светлота зрительного ощущения, определяемая с помощью (2), (3), (5) и (7), запишется в виде:

$$S(x) = \begin{cases} S_1 - \Delta S e^{\frac{x}{n}}, & \text{если } x \leq 0, \\ S_2 + \Delta S e^{-\frac{x}{n}}, & \text{если } x > 0, \end{cases} \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} S_1 &= (1 - k_k) c \lg dB_1, \\ S_2 &= (1 - k_k) c \lg dB_2, \\ \Delta S &= \frac{1}{2} k_k c \lg \frac{B_2}{B_1}. \end{aligned} \quad (10)$$

На рис. 2 а и б представлены диаграммы изменения яркости зрительной картины и светлоты зрительного ощущения в функции координаты x . Как видим, на уровне зрительного ощущения граница выглядит подчеркнутой. Подобное подчеркивание границы наблюдается также и в психофизическом эксперименте в виде краевого контраста.

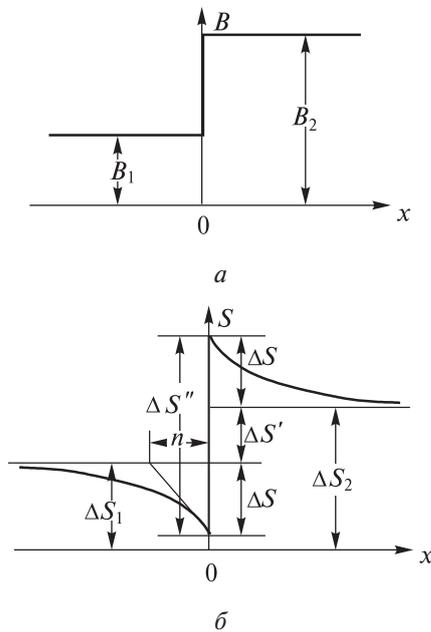


Рис. 2

Определим, во сколько раз увеличивается перепад светлоты на границе, благодаря действию краевого контраста. При отсутствии действия краевого контраста перепад светлоты на границе ΔS был бы равен:

$$\Delta S' = S_2 - S_1 = (1 - k_k) c \lg \frac{B_2}{B_1}. \quad (11)$$

Перепад светлоты с учетом краевого контраста равен:

$$\Delta S'' = 2\Delta S + \Delta S' = c \lg \frac{B_2}{B_1}. \quad (12)$$

Следовательно, за счет действия краевого контраста перепад светлоты на границе увеличивается в

$$\frac{\Delta S''}{\Delta S'} = \frac{1}{1 - k_k} \quad (13)$$

раз.

Формула (13) показывает, что интенсивность подчеркивания контура определяется исключительно значением постоянной модели k_k , чем оправдывается введенное для нее выше название. Из формулы (13) также следует, что постоянная k_k заключена в пределах от 0 до 1. Рост величины параметра k_k приводит к усилению подчеркивания границы. Из диаграммы (рис. 2 б) можно видеть, что при удалении от границы приращение светлоты ΔS , обусловленное краевым контрастом, плавно снижается, затухая до нуля. Темп этого затухания полностью определяется значением константы n , изображенной на диаграмме в виде отрезка прямой.

2. Исследование ступенчатой реакции модели краевого контраста

Теперь, когда математическая модель краевого контраста построена, приступим к ее экспериментальной проверке. Уже простое наблюдение видимой границы между полями различной яркости свидетельствует о факте подчеркивания границы, интенсивность которого постепенно угасает при удалении от границы. Для строгого количественного сравнения реакций глаза и модели необходимо было бы определить фактический закон изменения светлоты при удалении от границы. Однако, к сожалению, сознание наблюдателя, используемое в качестве записывающего прибора, работает очень неточно, и, кроме грубых оценок, здесь ничего другого не удастся извлечь. Однако известно, что сознание наблюдателя можно использовать как весьма точный нулевой прибор, фиксирующий равенство или неравенство светлоты на различных участках зрительного ощущения.

Этим свойством сознания можно воспользоваться при решении обратной задачи. До сих пор мы по заданной зрительной картине определяли, каким будет зрительное ощущение. Теперь ставится обратная задача: задано зрительное ощущение, необходимо подыскать такую зрительную картину, которая порождает именно это зрительное ощущение. Решив эту задачу, мы получим возможность формировать такие простые зрительные ощущения, для анализа которых будет достаточно использования сознания наблюдателя лишь в качестве нулевого прибора. Для возбуждения такого зрительного ощущения придется взять достаточно сложную зрительную картину. Сравнивая теоретически предсказанную зрительную картину со

зрительной картиной, фактически найденной в эксперименте, можно будет осуществить количественную проверку справедливости модели.

Пусть задано произвольное зрительное ощущение $S(x, y)$. Зрительная картина $B(x, y)$, порождающая это ощущение, может быть определена по формулам:

$$B = \frac{1}{d} 10^{\frac{1}{c} Q}, \quad (14)$$

$$Q(x, y) = S(x, y) + \frac{k_k}{2\pi n^2} \iint_{-\infty}^{\infty} Q(\xi, \eta) K_0 \left(\frac{\sqrt{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2}}{\frac{n}{\sqrt{1-k_k}}} \right) d\xi d\eta. \quad (15)$$

В случае, когда зрительное ощущение однородно вдоль оси y , формула (15) запишется в более простом виде:

$$Q(x) = S(x) + \frac{k_k}{2\sqrt{1-k_k}} \int_{-\infty}^{\infty} S(\xi) e^{-\frac{|\xi-x|}{n\sqrt{1-k_k}}} d\xi. \quad (16)$$

Зададимся зрительным ощущением, описываемым следующей системой условий:

$$S(x) = \begin{cases} S_1, & \text{если } x \leq 0, \\ S_2, & \text{если } x > 0. \end{cases} \quad (17)$$

Такое зрительное ощущение разделено вертикальной границей на две области, левая область имеет светлоту S_1 , правая – светлоту S_2 . Характер изменения светлоты зрительного ощущения показан на диаграмме (рис. 3 а).

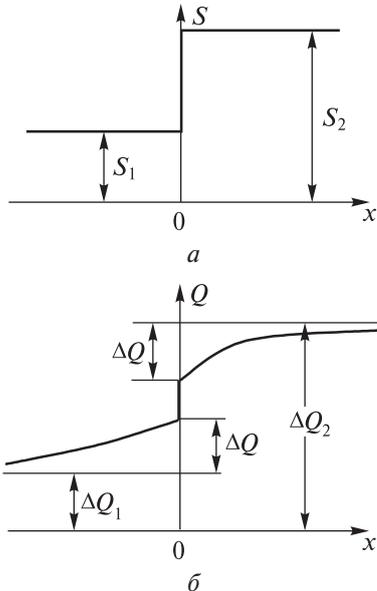


Рис. 3

Зрительная картина, порождающая такое ощущение, определится зависимостью:

$$Q(x) = \begin{cases} Q_1 + \Delta Q e^{\frac{x}{n}\sqrt{1-k_k}}, & \text{если } x \leq 0, \\ Q_2 - \Delta Q e^{-\frac{x}{n}\sqrt{1-k_k}}, & \text{если } x > 0. \end{cases} \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned} Q_1 &= c \lg dB_1, \\ Q_2 &= c \lg dB_2, \\ \Delta Q &= \frac{1}{2} k_k c \lg \frac{B_2}{B_1}. \end{aligned} \quad (19)$$

Переход от переменной $Q(x)$ к яркости зрительной картины $B(x)$ осуществляется по формуле (14). Диаграмма зависимости функции Q , пропорциональной логарифму яркости зрительной картины, от координаты x дана на рис. 3 б.

С целью опытной проверки зависимости (18) на шести испытуемых были выполнены эксперименты, описание которых приведено ниже. С помощью вертушки (диска Максвелла) формировалась специальная зрительная картина, яркость которой изменяется вдоль радиуса по заданному закону, определяемому формулами (14), (18) и (19). Для достижения этого коэффициент отражения ρ диска вертушки должен меняться вдоль радиуса r согласно следующей зависимости:

$$\lg \rho = \begin{cases} \lg \rho_1 + \frac{1}{2} k_k \lg \frac{\rho_1}{\rho_2} e^{\frac{r-r_0}{hn}\sqrt{1-k_k}}, & \text{если } r \leq r_0, \\ \lg \rho_2 - \frac{1}{2} k_k \lg \frac{\rho_2}{\rho_1} e^{-\frac{r-r_0}{hn}\sqrt{1-k_k}}, & \text{если } r > r_0. \end{cases} \quad (20)$$

Здесь: $r_0=60$ мм – радиус на диске вертушки, при котором происходит скачкообразное изменение светлоты; ρ_1 и ρ_2 – коэффициенты отражения, соответствующие яркостям B_1 и B_2 ; $h=200$ мм – расстояние наблюдения.

В одном из опытов было принято: $\rho_1=73\%$, $\rho_2=83\%$, $k_k=0,9$, $n=20'=0,0058$ рад. При этих данных соответствующая фигура, вычерченная черной тушью на кружке из белой бумаги, имеет вид, изображенный на рис. 4 а.

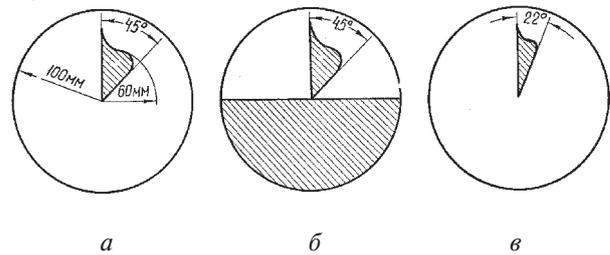


Рис. 4

Рассматривая быстро вращающийся диск Максвелла с указанным выше распределением яркости, испытуемый видит четкую границу без каких-либо признаков краевого контраста или размыва границы. Изменение параметра k_k в пределах $0,85 \div 0,95$ не приводит к заметным искажениям зрительного ощущения. При увеличении параметра k_k до значения $0,95$ и более испытуемый отмечает размыв границы, при уменьшении k_k до $0,85$ и ниже становится заметным краевой контраст. Зрительное ощущение заметно не искажается также при изме-

нении параметра n в пределах $15' \div 30'$. Если взять $n < 15'$, то становится заметной неоднородность светлоты зрительного ощущения вблизи границы, в первую очередь на более темном поле. Если же $n > 30'$, то становится заметным краевой контраст.

Следует отметить, что изменение освещенности диска вертушки в широких пределах (от 10 до 1000 нит) в полном соответствии с теорией не вносит существенных изменений в характер зрительного ощущения, которое с обеих сторон границы продолжает выглядеть равномерным. При значениях параметров $k_k=0,90$ и $n=20'$ были также сформированы зрительные картины для других пар коэффициентов отражения: $\rho_1=32\%$, $\rho_2=42\%$; $\rho_1=78\%$, $\rho_2=83\%$. Для этих картин порождающие их фигуры имеют вид, изображенный на рис. 4 б и в. Опыты с этими образцами также не дали существенных отклонений от теоретически предсказываемого результата. Выполненные опыты свидетельствуют в пользу справедливости предложенной модели краевого контраста зрения.

3. Исследование краевого контраста при предъявлении полосы

Возьмем в качестве входного сигнала модели зрительную картину в виде вертикальной полосы на однородном фоне. Обозначим яркость фона через B_0 , прибавку яркости полосы по сравнению с фоном – через ΔB , ширину полосы в угловых единицах – через Δx . Полагая, что ось полосы проходит через точку фиксации, можем записать следующие выражения для описания яркости зрительной картины:

$$B(x) = \begin{cases} B_0, & \text{если } x \leq -\Delta x/2, \\ B_0 + \Delta B, & \text{если } -\Delta x/2 < x \leq \Delta x/2, \\ B_0, & \text{если } x > \Delta x/2. \end{cases} \quad (21)$$

На рис. 5 а показан ход изменения яркости зрительной картины в зависимости от координаты x .

Ход изменения светлоты зрительного ощущения $S(x)$, вычисляемой по формулам (2)-(5) при условии (21), определится формулами:

$$S(x) = \begin{cases} Q_0 - kQ_0 - k\Delta Qsh \frac{\Delta x}{2n} e^{\frac{x}{n}}, & \text{если } x \leq -\frac{\Delta x}{2}, \\ Q_0 + \Delta Q - k\Delta Q \left(1 - e^{-\frac{\Delta x}{2n} ch \frac{x}{n}} \right), & \text{если } -\frac{\Delta x}{2} < x \leq \frac{\Delta x}{2}, \\ Q_0 - kQ_0 - k\Delta Qsh \frac{\Delta x}{2n} e^{-\frac{x}{n}}, & \text{если } x > \frac{\Delta x}{2}, \end{cases} \quad (22)$$

где:

$$\begin{aligned} Q_0 &= c \lg dB_0, \\ \Delta Q &= c \lg \frac{B_0 + \Delta B}{B_0}. \end{aligned} \quad (23)$$

Диаграмма изменения светлоты зрительно-го ощущения показана на рис. 5 б. Из диаграммы видно, что контуры полосы должны выглядеть

подчеркнутыми с двух сторон. Средняя часть полосы должна быть по светлоте ближе к фону, чем ее края. Простой психофизический эксперимент демонстрирует, что зрительное ощущение, порождаемое полосой, по своему характеру именно таково.

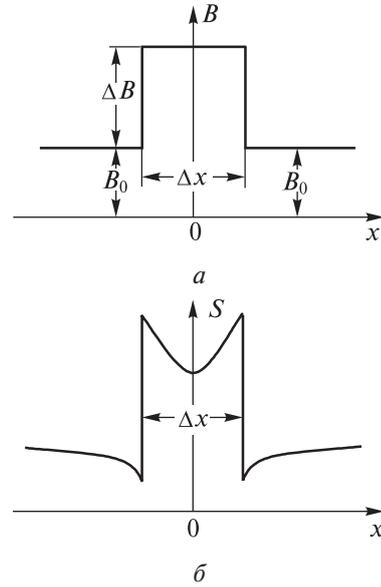


Рис. 5

Воспользуемся диском Максвелла (вертушкой) и вычертим для него на белом бумажном кружке сектор кольца с размерами, указанными на рис. 6. Закручивая вертушку со сверхкритической скоростью (порядка 50 об/сек), мы получим, согласно закону Галбота, зрительное ощущение такое же, как от зрительной картины в виде полосы (21). Небольшое искривление полосы в данном случае не имеет существенного значения. Наблюдая полосу, сформированную на диске вертушки, мы увидим распределение светлоты, соответствующее по своему характеру тому, которое было предсказано на основе анализа модельных реакций (рис. 5 б). Внутри кольца вблизи границ имеет место потемнение, интенсивность которого наиболее велика в непосредственной близости у границ. Вне кольца вблизи границ заметно посветление фона, оно наиболее велико у самих границ. Средняя часть полосы между двумя границами заметно темнее периферических ее частей.

Описанный эксперимент, подтверждая теорию в качественном отношении, почти ничего, однако, не дает для количественной ее проверки, поскольку на глаз очень трудно оценивать уровень светлоты на различных участках зрительного ощущения. Совершенно иначе будет обстоять дело при такой постановке эксперимента, когда испытуемый должен лишь устанавливать равенство или неравенство уровня светлоты на различных участках поля зрения. В этом случае можно осуществить довольно точный количественный анализ зрительного ощущения, поскольку сознание наблюдателя хорошо справляется с ролью нулевого прибора.

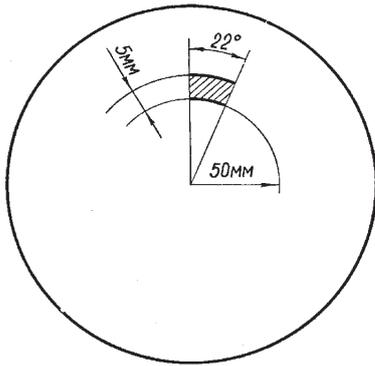


Рис. 6

Чтобы подойти к постановке подобного рода эксперимента, рассмотрим такой случай функционирования модели, когда на ее выходе возникает зрительное ощущение $S(x)$ в виде полосы постоянной светлоты на однородном фоне. Математическое представление такого зрительного ощущения запишем в виде:

$$S(x) = \begin{cases} S_0, & \text{если } x \leq -\frac{\Delta x}{2}, \\ S_0 + \Delta S, & \text{если } -\frac{\Delta x}{2} < x \leq \frac{\Delta x}{2}, \\ S_0, & \text{если } x > \frac{\Delta x}{2}. \end{cases} \quad (24)$$

Диаграмма изменения светлоты зрительного ощущения показана на рис. 7 а.

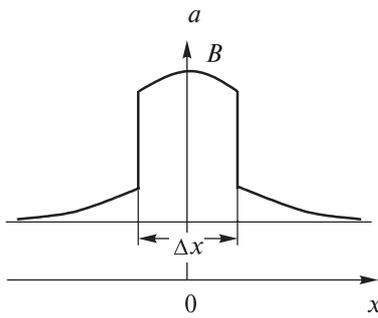
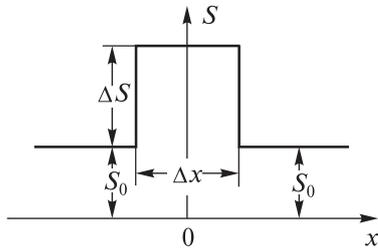


Рис. 7

Чтобы получить такого вида зрительное ощущение, необходимо на вход модели подать некоторую, вполне определенную зрительную картину. Формулы, характеризующие такую зрительную картину, можно получить, решая систему уравнений (14) и (16) при условии (24). Они имеют вид:

$$B = \frac{1}{d} 10^{\frac{1}{c} Q}, \quad (25)$$

$$Q(x) = \begin{cases} Q_0 + k_k \Delta Q sh \frac{\Delta x}{2n} \sqrt{1-k_k} \cdot e^{\frac{x}{n} \sqrt{1-k_k}}, & \text{если } x \leq -\frac{\Delta x}{2}, \\ Q_0 - k_k \Delta Q e^{-\frac{\Delta x}{2n} \sqrt{1-k_k}} \cdot ch \frac{x}{n} \sqrt{1-k_k}, & \text{если } -\frac{\Delta x}{2} < x \leq \frac{\Delta x}{2}, \\ Q_0 + k_k \Delta Q sh \frac{\Delta x}{2n} \sqrt{1-k_k} \cdot e^{-\frac{x}{n} \sqrt{1-k_k}}, & \text{если } x > \frac{\Delta x}{2}. \end{cases} \quad (26)$$

Диаграмма изменения яркости зрительной картины в поле зрения, построенная по формулам (25) и (26), имеет вид, указанный на рис. 7 б. Если теория верна, то при предъявлении зрительной картины, имеющей распределение яркости такое, как на рис. 7 б, наблюдатель должен увидеть полосу совершенно равномерной яркости. Фон вокруг полосы также должен видаться совершенно равномерным. Если зрительная картина подобрана неправильно, то это тотчас же обнаружится в эксперименте и проявится в виде неравномерностей яркости в поле зрения. Сознание наблюдателя легко обнаружит эти неравномерности, выполняя при этом функции весьма точного нулевого прибора. Эксперимент выполнялся на шести испытуемых с помощью той же вертушки, дозировка и распределение яркости зрительной картины регулировались соотношением угловых размеров белого и черного секторов вертушки. Этим достигалось желаемое изменение коэффициента отражения вдоль радиуса диска вертушки.

Чтобы зрительная картина, сформированная на диске вертушки, соответствовала формулам (25) и (26), коэффициент отражения ρ поверхности диска должен изменяться вдоль радиуса r по следующему закону:

$$\lg \rho = \begin{cases} \lg \rho_0 + k_k \lg \left(1 + \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \right) sh \frac{\Delta r}{2hn} \sqrt{1-k_k} \cdot e^{\frac{r-r_0}{hn} \sqrt{1-k_k}}, & \text{если } r - r_0 \leq -\frac{\Delta r}{2}, \\ \lg(\rho_0 + \Delta \rho) - k_k \lg \left(1 + \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \right) e^{-\frac{\Delta r}{2hn} \sqrt{1-k_k}} ch \frac{r-r_0}{hn} \sqrt{1-k_k}, & \text{если } -\frac{\Delta r}{2} < r - r_0 \leq \frac{\Delta r}{2}, \\ \lg \rho_0 + k_k \lg \left(1 + \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \right) sh \frac{\Delta r}{2hn} \sqrt{1-k_k} \cdot e^{-\frac{r-r_0}{hn} \sqrt{1-k_k}}, & \text{если } r - r_0 > \frac{\Delta r}{2}. \end{cases} \quad (27)$$

В формулах (27) $\Delta r = 5\text{мм}$ означает ширину полосы в линейных единицах, $r_0 = 52,5\text{мм}$ – радиус оси

полосы, $h=500\text{мм}$ – расстояние, с которого ведется наблюдение полосы. Коэффициенты отражения ρ_0 и $\rho_0+\Delta\rho$ соответствуют светлотам S_0 и $S_0+\Delta S$ однородных полей. В эксперименте принято $\rho_0=83\%$, $\rho_0+\Delta\rho=78,2\%$.

Раскраска кружков велась при различных значениях параметров k_k и n . Оказалось, что при значениях $k_k=0,9$ и $n=20\text{мм}$ получаем зрительное ощущение без каких-либо следов неравномерности по светлоте как внутри полосы, так и вне ее. В то же время сравнительно небольшие отклонения в значениях этих параметров приводят к появлению неравномерности светлоты зрительного ощущения. Характер отклонений примерно такой же, как это было описано в предыдущем параграфе. Раскраска кружка, дающая равномерное зрительное ощущение, изображена на рис. 8. Подобные опыты проводились также при ширине полосы 10мм и дали аналогичные результаты.

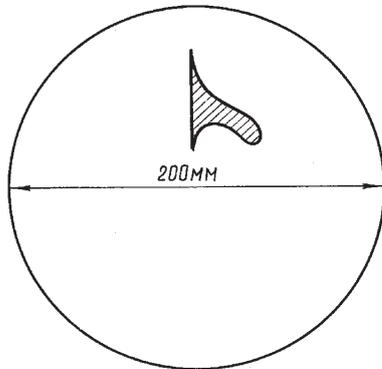


Рис. 8

Такого же рода опыты и теоретические расчеты выполнялись и при других разновидностях зрительных картин и зрительных ощущений – двойном скачке яркости и светлоты, а также “лесенке”. В этих случаях также получено удовлетворительное согласие теории и опыта.

Выводы

Предложена модель краевого контраста зрения, предназначенная для математического описания неоднородных процессов, протекающих в органе зрения человека при предъявлении ему крупных зрительных картин. Из моделей выведены теоретические зависимости, представляющие собой реакции различного вида зрительных картин. Выполненные в работе эксперименты, указывают на удовлетворительное согласование этих зависимостей с данными опыта. Из опыта найдены также численные значения двух введенных в модели констант, характеризующих способность человеческого зрения к подчеркиванию контуров изображения: постоянной интенсивности контраста $k_k=0,9$ и постоянной затухания контраста $n=20$.

Сформулированная в этой и в предыдущих статьях этой серии [4-9] задача математического

моделирования зрения человека при зрительных картинах произвольного вида еще далеко не исчерпана, а полученные в них результаты следует рассматривать лишь как первые шаги на пути ее решения. Одним из ограничений в настоящей работе явилось то, что в экспериментах по проверке построенных моделей испытуемому предъявлялись зрительные картины, яркость которых не всегда варьировалась в достаточно широких пределах. В частности, в опытах не использовались светящиеся поверхности. Другое ограничение состояло в том, что значительная часть рассмотренных моделей относится лишь к однокомпонентному ахроматическому зрению. Мы предприняли попытку достроить математическую модель зрительного анализатора человека с тем, чтобы освободить ее от этих и иных ограничений. Опытных данных для прочного обоснования такой модели пока явно недостаточно, поэтому такая модель по необходимости выглядит, в основном, как умозрительная. Модель представляет собой многоярусную конструкцию, ее схема изображена на рис. 9. Передача сигналов в ней производится по трем каналам ($i=1,2,3$).

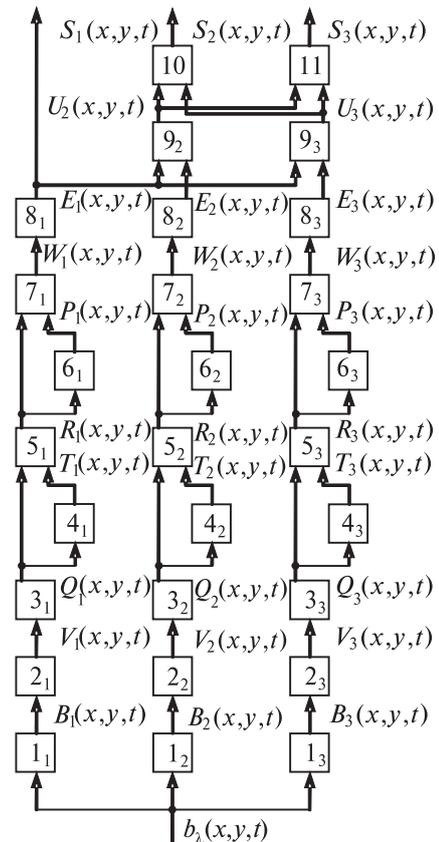


Рис. 9

Ниже приводятся уравнения, описывающие работу отдельных блоков:

Блок 1_i:

$$B_i(x, y, t) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} b_\lambda(x, y, t) m_i(\lambda) d\lambda. \quad (28)$$

Блок 2_i:

$$a_i \frac{\partial V_i(x, y, t)}{\partial t} - b_i^2 \left(\frac{\partial^2 V_i(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_i(x, y, t)}{\partial y^2} \right) + V_i = B_i(x, y, t). \quad (29)$$

Блок 3_i:

$$Q_i(x, y, t) = c_i \lg d_i V_i(x, y, t). \quad (30)$$

Блок 4_i:

$$l_i \frac{\partial T_i(x, y, t)}{\partial t} - n_i^2 \left(\frac{\partial^2 T_i(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i(x, y, t)}{\partial y^2} \right) + T_i = k_{ki} Q_i(x, y, t). \quad (31)$$

Блок 5_i:

$$R_i(x, y, t) = Q_i(x, y, t) - T_i(x, y, t). \quad (32)$$

Блок 6_i:

$$m_i \frac{\partial P_i(x, y, t)}{\partial t} - p_i^2 \left(\frac{\partial^2 P_i(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_i(x, y, t)}{\partial y^2} \right) + P_i = k_{ai} R_i(x, y, t). \quad (33)$$

Блок 7_i:

$$W_i(x, y, t) = R_i(x, y, t) - P_i(x, y, t). \quad (34)$$

Блок 8_i:

$$E_i(x, y, t) = r_i 10^{W_i(x, y, t)} + s_i. \quad (35)$$

Блок 9_i:

$$U_i(x, y, t) = E_i(x, y, t) - E_1(x, y, t), \quad (i = 2, 3). \quad (36)$$

Блок 10:

$$S_2(x, y, t) = \sqrt{U_2^2(x, y, t) + U_3^2(x, y, t)}. \quad (37)$$

Блок 11:

$$S_3(x, y, t) = \arctg \frac{U_2(x, y, t)}{U_3(x, y, t)}. \quad (38)$$

Модель реагирует на зрительные картины $b_\lambda(x, y, t)$ общего вида и формирует вполне определенный сигнал $\bar{S}(x, y, t)$, моделирующий зрительное ощущение. По промежуточным каналам модели передаются сигналы $B_i, E_i, P_i, Q_i, R_i, T_i, U_i, V_i, W_i$,

являющиеся, подобно входным и выходным сигналам модели, функциями координат поля зрения x, y и времени t . Величины $m_i(\lambda), a_i, b_i, c_i, d_i, k_{ki}, k_{ai}, l_i, m_i, n_i, p_i, r_i, s_i$ являются параметрами модели. Первый канал моделирует ахроматическое зрение, второй и третий – цветное зрение. Каждый ярус модели представляет одну из функций зрения. Так, первый ярус представляет спектральную чувствительность зрения, второй – инерцию зрения, ярусы от третьего по пятый – быструю адаптацию зрения и краевой контраст, ярусы от шестого по восьмой – медленную адаптацию и индукцию зрения. Последние два яруса осуществляют формирование цветового фона и насыщенности зрительного ощущения. Все рассмотренные в настоящей работе модели являются частными случаями общей модели зрения. Из 28 блоков, содержащихся в общей модели, в настоящей работе рассматривались только 12. Хотя в большей своей части эта модель еще недостаточно обоснована экспериментом, однако, она, по нашему мнению, может служить отправным пунктом для постановки новых экспериментальных и теоретических исследований.

Список литературы: 1. *Helmholtz H.*, Handbuch der physiologischen Optic, Hamburg u. Leipzig, 1909-1911. 2. *Hering E.*, Die Lehre vom Lichtsinn, 1874. 3. *Ватсон Д.Н.* Теория бесселевых функций: Пер. с англ. ИЛ, М., 1949. 4. *Бондаренко М.Ф., Шабанов-Кушнарченко Ю.П.* Модели цветового зрения // Бионика интеллекта: науч.-техн. журнал. – 2006. – № 1. – С. 27-41. 5. *Бондаренко М.Ф., Шабанов-Кушнарченко С.Ю., Шабанов-Кушнарченко Ю.П.* Модель сглаживания в зрении // Бионика интеллекта: науч.-техн. журнал. – 2007. – № 1. – С. 33-47. 6. *Бондаренко М.Ф., Шабанов-Кушнарченко Ю.П.* Модель статики адаптации органов чувств // Бионика интеллекта: науч.-техн. журнал. – 2007. – № 2. – С. 3-14. 7. *Бондаренко М.Ф., Шабанов-Кушнарченко Ю.П.* Модель динамики адаптации зрения // Бионика интеллекта: науч.-техн. журнал. – 2007. – № 2. – С. 15-20. 8. *Бондаренко М.Ф., Шабанов-Кушнарченко С.Ю., Шабанов-Кушнарченко Ю.П.* Модель инерции зрения // Бионика интеллекта: науч.-техн. журнал. – 2008. – № 1. – С. 3-12. 9. *Бондаренко М.Ф., Шабанов-Кушнарченко С.Ю., Шабанов-Кушнарченко Ю.П.* Модель иррадиации зрения // Бионика интеллекта: науч.-техн. журнал. – 2008. – № 1. – С. 13-22.

Поступила в редколлегию 25.01.2008