

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 6

1996

УДК 621.397.252

В. Н. Поветко

(Воронеж)

О ПРИМЕНЕНИИ ТЕОРИИ ОБНАРУЖЕНИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННО-ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ
ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗРЕНИЯ

Получены соотношения для функциональных моделей цветового и ахроматического зрения, не требующие априорного учета каких-либо алгоритмов преобразования сигналов нейронами глаза. Предлагаемые функциональные модели проверены на количественное и качественное соответствие различным экспериментальным данным и эмпирическим формулам для описания возможностей зрения.

Введение. Функциональные модели зрения (ФМЗ) необходимы при решении многих научно-технических задач [1, 2]. Хороших результатов при разработке ФМЗ позволяет достичь применение статистической теории оптимального приема сигналов [3—5]. Однако известные работы этого направления ограничиваются простыми моделями обнаруживаемых или различаемых сигналов с аддитивным белым шумом. Не учитывается ряд особенностей изображений пространственно-протяженных объектов (ППО), процессов их регистрации и оптимальной обработки. Как следствие, рассматриваемые модели сигналов не позволяют построить ФМЗ без дополнительного введения некоторых линейных и нелинейных преобразований изображений нейронами глаза. Наличие таких преобразований имеет экспериментальное обоснование, но не известны причины их появления. Параметры преобразований в различных условиях обнаружения ППО могут отличаться, что снижает прогностическую ценность известных ФМЗ.

Целью настоящей работы является оценка возможности построения ФМЗ, в которых оператор представляется «оптимальным приемником изображений ППО», но для объяснения известных закономерностей зрительного обнаружения и распознавания (различения) ППО не требуется постулировать наличие в нейронной системе глаза каких-либо априорных преобразований изображений.

Обоснование ФМЗ в части формул для характеристик обнаружения ППО. Как и в классической теории обнаружения и распознавания сигналов в шумах [6, 7], основные трудности моделирования процессов зрительного восприятия изображений [8, 9] при учете не только белого гауссова шума, но и других, состоят не в решении задачи синтеза оптимальных алгоритмов обнаружения или распознавания ППО, а в получении показателей качества типа вероятности обнаружения. В большинстве случаев точных аналитических формул для показателей качества получить не удастся. Имея целью найти такие приближенные формулы с оценкой их точности, решим задачи синтеза и анализа оптимального алгоритма обнаружения (различения) ППО для следующей модели сигналов:

— оптическая система глаза при фиксированной средней яркости реальной сцены осуществляет линейную фильтрацию изображений;

— сетчатка глаза представляет собой матрицу фотоприемников, регистрирующих реализацию поглощенных квантов — фотоотсчетов I_j , $j = 1, \dots, N_m$, где N_m — число фотоприемников в матрице;

— фотоприемники имеют случайные флуктуации квантовой эффективности и некоторый уровень «темновых фотоотсчетов», а также отличаются спектральной чувствительностью, образуя три спектральных канала;

— статистические свойства фотоотсчетов, флуктуации числа которых обусловлены несколькими независимыми причинами, аппроксимируются нормальным законом распределения вероятностей;

— решение о наличии различий между изображениями ППО и фона принимается на основе являющегося достаточной статистикой (далее статистикой) Z логарифма отношения правдоподобия при гипотезе наблюдения изображения ППО (или первого различаемого объекта) и ее альтернативе (наблюдение только фона или второго различаемого объекта) путем сравнения его с некоторым пороговым значением Z_n .

Вследствие сделанных допущений для статистического описания фотоотсчетов достаточно двух первых моментов вида

$$m_j = I_j^* + \sigma_r^*, \quad \sigma_j^2 = I_j^* + \sigma_r^2 + p^2 I_j^{*2}, \quad (1)$$

где m_j и σ_j^2 — математическое ожидание и дисперсия числа фотоотсчетов в j -м элементе матрицы фотоприемников; I_j^* — среднее число фотоотсчетов, обусловленных изображением реальной сцены; σ_r^2 — дисперсия «темновых фотоотсчетов»; p^2 — дисперсия относительных флуктуаций (неоднородности) квантовой эффективности фотоприемников. В (1) учтено, что при фиксированной квантовой эффективности фотоприемников среднее число фотоотсчетов равно их дисперсии.

Статистика Z для рассматриваемой модели сигналов имеет вид:

$$Z = 0,5 \sum_{j=1}^{N_m} [(I_j - m_{1j})^2 / \sigma_{1j}^2 - (I_j - m_{2j})^2 / \sigma_{2j}^2], \quad (2)$$

где индексы 1 и 2 при m_j и σ_j^2 соответствуют гипотезам наблюдения фона (первого различаемого объекта) и ППО (второго различаемого объекта) соответственно. Легко убедиться, что в (2) можно ограничиться суммированием только по тем N фотоприемникам, которые «накрыты» изображением ППО.

Законы распределения вероятности статистики (2) получим рекомендуемым [6] численным методом интегрирования мнимой части (Im) характеристической функции. Применительно к вероятности правильного обнаружения P_0 расчетная формула имеет вид

$$P_0 = 0,5 + \pi^{-1} \int_0^{\infty} \text{Im} [g_2(\nu) \exp(-i\nu Z_n)] \nu^{-1} d\nu, \quad (3)$$

где ν — аргумент характеристической функции; $g_2(\nu)$ — характеристическая функция статистики Z при гипотезе наблюдения ППО; i — мнимая единица. Необходимое для расчетов значение параметра Z_n находится из аналогичной зависимости для вероятности ложной тревоги. Характеристические функции статистики вида (2) для обеих гипотез находятся достаточно просто [6].

Для исследования закономерностей обнаружения ППО и отыскания приближенных аналитических зависимостей для характеристик обнаружения вида (3) выполнен ряд расчетов. Для простоты не учитывались фильтрующие свойства оптической системы глаза и контраст ППО принимался постоянным для всех N фотоприемников, «накрываемых» его изображением. На рис. 1 представлены результаты расчетов вероятности обнаружения P_0 при уровне вероятности ложных тревог $P_{лт} = 10^{-3}$ и различных размерах обнаруживаемого ППО N в зависимости от модуля его контраста K на равномерном фоне

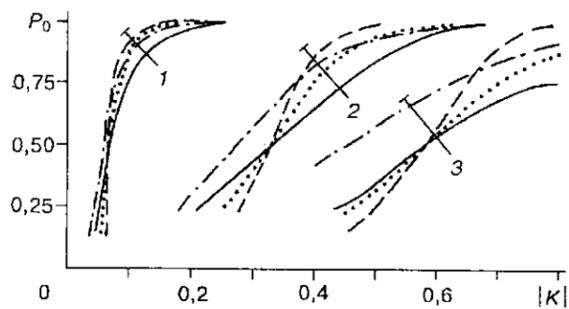


Рис. 1

($I_{\phi}^* = I_{\phi}$). Сплошные кривые соответствуют положительному, штриховые — отрицательному контрасту ППО, штрихпунктирные и точки — результаты расчетов по различным приближенным формулам ($1 - N = 20, I_{\phi} = 500$; $2 - N = 2, I_{\phi} = 30$; $3 - N = 1, I_{\phi} = 40$; для всех — $p^2 = 0,01$). На рис. 2 представлены зависимости порогового (по уровню вероятности 0,5) контраста обнаружения ППО от яркости фона (значений I_{ϕ}) ($1 - N = 1$; $2 - N = 10$; $3 - N = 20$; для всех — $p^2 = 0,01, P_{\text{лт}} = 0,001, \sigma_r^2 = 1$).

Закономерности оптимального обнаружения ППО хорошо согласуются с закономерностями их визуального обнаружения. Эффективность обнаружения растет с увеличением размеров и контраста ППО, а также яркости фона. Имеют место и более «тонкие» совпадения. Так, при уровне вероятности обнаружения $P_0 = 0,75$ (такой уровень вероятности принят в [10, с. 44] для анализа пороговых контрастов обнаружения ППО) абсолютное значение отрицательного порогового контраста несколько меньше, чем положительного. При уменьшении размеров обнаруживаемых ППО и яркости фона различия в эффективности обнаружения светлых (положительный контраст) и темных (отрицательный контраст) ППО увеличиваются и достигают 15–30 % от абсолютных значений пороговых контрастов. Такие особенности визуального обнаружения ППО известны [10], но объясняются только на качественном уровне субъективным влиянием иррадиации [11]. С уменьшением уровня вероятности обнаружения до 0,5 различия в численных значениях положительных и отрицательных пороговых контрастов практически исчезают, что, вероятно, может объяснить отсутствие принципиальных различий между обнаружением светлых и темных ППО в результатах Блэуэлла [12].

Кривые на рис. 2 хорошо согласуются с известным законом Вебера — Фехнера: примерным постоянством порогового контраста при изменении

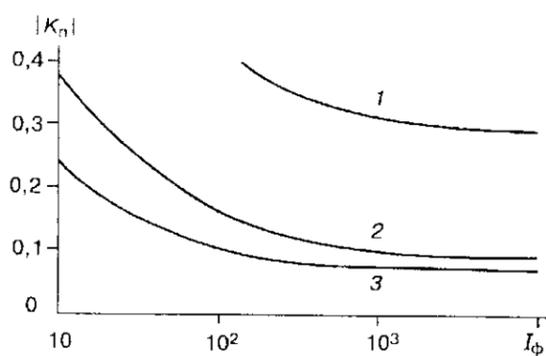


Рис. 2

яркости фона в условиях дневной освещенности и его увеличением в сумерки [11]. В исследуемой модели обнаружения ППО такая закономерность обусловлена наличием мультипликативного шума, порождаемого флуктуациями чувствительности фотоприемников. С увеличением дисперсии относительных флуктуаций чувствительности p^2 область примерного постоянства порогового контраста расширяется, а сам пороговый контраст увеличивается. При размерах ППО порядка 40 угл. мин и ограничении возможности его обнаружения контрастом 0,007 (принятый максимум контрастной чувствительности глаза [13]) p^2 элементов сетчатки можно оценить величиной, меньшей 8 %. Для сравнения эта величина достигает у современных твердотельных матриц 10 % [13] и соизмерима с уровнем относительных флуктуаций интенсивности оптических излучений при их распространении в турбулентной атмосфере [14].

Данные на рис. 1 позволяют оценить точность различных приближенных формул для вероятности обнаружения ППО. Штрихпунктирными линиями представлена вероятность обнаружения ППО, рассчитанная путем аппроксимации законов распределения вероятности статистики (2) нормальными распределениями с соответствующими гипотезам математическими ожиданиями и дисперсиями. Погрешности приближения в области значений вероятности $P_0 < 0,9$ достаточно велики. Поэтому найдено другое приближение, отличающееся от первого видом зависимости от указанных математических ожиданий и дисперсий. Результатом модификации является формула

$$P_0 = (2\pi)^{-0,5} \int_{-\infty}^{q-q_0} \exp(-0,5x^2) dx, \quad (4)$$

где q и q_0 определяются соотношениями:

$$P_{\text{дт}} = (2\pi)^{-0,5} \int_{-\infty}^{q_0} \exp(-0,5x^2) dx; \quad (5)$$

$$q^2 = \sum_{j=1}^N I_{ij}^* K_j^2 / (1 + \varepsilon_j + p^2 I_{ij}^*);$$

$$K_j = (I_{2j}^* - I_{1j}^*) / I_{1j}^*, \quad \varepsilon_j = \sigma_j^2 / I_{1j}^*.$$

Результаты расчетов по формулам (4) и (5) представлены на рис. 1 точками. Оказалось, что это приближение является более простым при расчетах и более точным, чем первое. Оно позволяет оценивать вероятность обнаружения как величину, примерно равную средней между вероятностями обнаружения ППО с положительным и отрицательным контрастами. В случае обнаружения ППО со сложной структурой контраста (часть изображения светлее, часть — темнее фона) погрешности приближения уменьшаются, а при ограничении возможностей обнаружения ППО только белым шумом из (4), (5) следуют известные зависимости [8, 9].

Найденные достаточно простые зависимости для оценки характеристик обнаружения (различения) ППО матричными фотоприемниками с учетом квантового, теплового и обусловленного флуктуациями их чувствительности шумов требуют расчета параметра обнаружения q^2 , который в случае цветового зрения можно представить в виде суммы трех слагаемых q_k^2 , $k = 1, \dots, 3$. Каждое из них рассчитывается в соответствии с (5) с учетом только тех фотоприемников, которые «накрыты» изображением ППО и относятся к данному спектральному (цветовому) каналу. Однако на практике удобнее пользоваться интегральными формами для q_k^2 и соответственно q^2 вида

$$q_k^2 = T \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} a_k I_{1k}(x, y) K_k^2(x, y) [1 + \varepsilon_k(x, y) + p^2 S_0 I_{1k}(x, y)] dx dy, \quad (6)$$

где T — соизмеримое с постоянной времени глаза время накопления фотоотсчетов; a_k — плотность (относительное число) фотоприемников k -го спектрального канала ($a_1 + a_2 + a_3 = 1$); $I_{1k}(x, y)$ — интенсивность фотоотсчетов ($1 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$) для изображения фона в точке плоскости фотоприемников с координатами (x, y) ; $K_k(x, y)$ — контраст изображения объекта для k -го спектрального канала, определяемый аналогично (5); $\epsilon_k(x, y)$ — относительная интенсивность теплового шума; S_3 — площадь элемента матрицы фотоприемников; t — время корреляции флуктуаций чувствительности, примерно равное постоянной времени глаза. Зависимость $I_{1k}(x, y)$ и $\epsilon_k(x, y)$ от координат можно опустить, если фон вблизи обнаруживаемого ППО считать равномерным.

Формально предельный переход от суммы (5) к интегралу (6) справедлив, если размеры элемента матрицы фотоприемников много меньше размеров пятна рассеяния оптической системы глаза. Обоснованием приемлемости такого допущения является то, что размеры колбочек сетчатки глаза примерно в 2 раза меньше не учитывающего дополнительно присущих оптической системе глаза aberrаций диаметра пятна дифракционного рассеяния излучений [11]. Кроме того, экспериментальные данные [15, с. 21] свидетельствуют, что освещенность сетчатки глаза в изображении светящейся линии на удалении в 10 диаметров колбочек от центра изображения составляет 10 % от максимальной. Таким образом, условие перехода к формуле (6) можно считать в достаточной степени выполненным.

Возможные значения параметров ФМЗ и оценка ее соответствия экспериментальным данным для цветового зрения. Для сопоставления закономерностей обнаружения (различения) изображений ППО в соответствии со статистикой (2) и закономерностей их визуального обнаружения на определенном уровне интенсивности фотоотсчетов и контраст изображения должны быть представлены через известные параметры оптической системы и фотоприемников глаза и заданы их численные значения. Многие из необходимых данных и основные формулы для расчета интенсивностей фотоотсчетов содержатся в [11]. Опуская промежуточные выкладки и нормируя интеграл в (6) аналогично [9], приходим к формуле вида

$$q_k^2 = a_k A_k \delta^2 K_{mk}^2 Q_k^2 T / [1 + A_k t(L) \delta_3^2 p^2]; \quad (7)$$

$$A_k = 0,25\pi \lambda_{mk} \tau_{ок} \eta_k d^2(L) L_k / (\hbar c),$$

где λ_{mk} и η_k — длина волны максимума спектральной чувствительности и квантовая эффективность фотоприемников k -го цветового канала; $\tau_{ок}$ — коэффициент пропускания излучения оптической системой глаза; $d(L)$ — диаметр зрачка глаза в зависимости от яркости фона адаптации L ; L_k — яркость фона для k -го цветового канала, вычисляемая с учетом его нормированной спектральной чувствительности; \hbar — постоянная Планка; c — скорость света; δ^2 — угловые размеры обнаруживаемого ППО (в ср); K_{mk} — максимальный по абсолютной величине (без учета пространственно-частотной фильтрации изображения оптической системой глаза) контраст ППО в цветовом канале; Q_k^2 — параметры, учитывающие влияние пространственно-частотных искажений изображения ППО [9]; $t(L)$ — зависящая от яркости фона постоянная времени глаза; δ_3^2 — угловые размеры фоторецепторов. В (7) для простоты опущена относительная интенсивность «темновых фотоотсчетов», имеющая существенное значение только при малых значениях яркости фона (обнаружение ночью).

Параметры Q_k^2 в соответствии с [9] вычисляются на основе идеального изображения ППО и нормированной функции рассеяния оптической системы глаза и по определению больше нуля, но меньше единицы. Для ППО простой формы (круг, квадрат, прямоугольник и т. п.) параметр Q_k^2 мало зависит от формы ППО и в зависимости от угловых размеров δ (угл. мин) представлен на рис. 3 [9], где 1 — квадрат; 2, 3 — прямоугольники с отношениями сторон 1 : 4 и 1 : 9 соответственно; 4 — мира с двумя темными и двумя светлыми

полосами. При расчетах принято, что функция рассеяния описывается функцией Гаусса с диаметром пятна рассеяния 3 угл. мин, а угловые размеры ППО определяются как угловые размеры равновеликого по площади круга.

С ростом δ параметр $Q_k^2(\delta)$ пропорционален δ , затем $\delta^{0.5}$ и при $\delta > 10-15$ угл. мин стремится к единице. При этом необходимо учитывать, что диаметры пятна рассеяния для различных цветовых каналов глаза несколько отличаются. Максимальное рассеяние экспериментально установлено для синевioletовых излучений, что обусловлено особенностями хроматических аберраций оптической системы глаза [11].

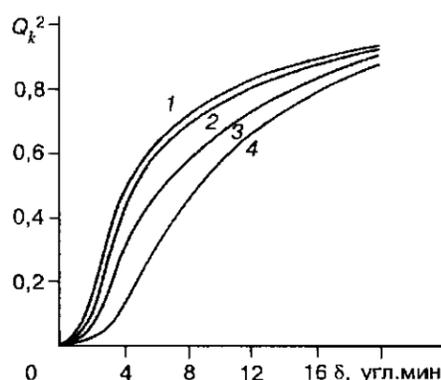


Рис. 3

Однако более существенно «вложение» в единую матрицу фотоприемников различных цветовых каналов. За счет неплотного размещения в матрице фотоприемников каждого из трех каналов в максимуме функции рассеяния точечного источника излучений может не оказаться одного или двух фотоприемников. В параметре обнаружения (5) это обстоятельство учитывается значением контраста K_j для j -го фотоприемника конкретного цветового канала. В параметре обнаружения вида (6) или (7) оно учитывается введением эквивалентных функций рассеяния оптической системы для каждого цветового канала с диаметрами пятна рассеяния, большими на величину, пропорциональную $a_k^{-0.5}$.

Перечисленные в (7) параметры оптической системы и фоторецепторов глаза известны с различной точностью. Точность одних из них (λ_{mk} , τ_{ok} , d , t , δ_s) достаточно высока [2, 11], значения других оценены разными авторами по-разному. Для определенности подставим в (7) их следующие правдоподобные значения: $\lambda_{m1} = 0,45$, $\lambda_{m2} = 0,54$, $\lambda_{m3} = 0,57$ мкм; $p^2 \delta_s^2 = 5 \cdot 10^{-10}$; $\tau_{o1} = \tau_{o2} = \tau_{o3} = 0,57$; $\eta_1 = 0,20$, $\eta_2 = 0,13$, $\eta_3 = 0,08$; $a_1 = 0,005$, $a_2 = 0,330$, $a_3 = 0,665$. В результате приходим к модели цветового зрения вида

$$\begin{aligned}
 q &= 10^5 d_{mm}(L) [\delta^2 T(D_1 + D_2 + D_3)]^{0.5}; \\
 D_1 &= 0,1 L_1 K_{m1}^2 Q_1^2 [1 + 100 M(L) L_1]^{-1}; \\
 D_2 &= 5,12 L_2 K_{m2}^2 Q_2^2 [1 + 78 M(L) L_2]^{-1}; \\
 D_3 &= 6,82 L_3 K_{m3}^2 Q_3^2 [1 + 51 M(L) L_3]^{-1}; \\
 M(L) &= d_{mm}^2(L) t(L),
 \end{aligned} \tag{8}$$

где индекс 1 при L , K_m , Q означает соответствие «синему», а индексы 2 и 3 — «зеленому» и «красному» каналам цветового зрения соответственно; диаметр зрачка глаза выражен в мм.

Достоверность ФМЗ вида (8) подтверждается следующим.

1. В случае высокой яркости фона ($L_k > 0,5$) и больших угловых размеров обнаруживаемых объектов ($Q_k^2 \rightarrow 1$) из (8) следует:

$$q = 2 \cdot 10^5 \{ \delta^2 T [0,005 K_{m1}^2 + 0,330 K_{m2}^2 + 0,665 K_{m3}^2] t^{-1}(L) \}^{0.5}. \tag{9}$$

По форме зависимости от контрастов ППО в цветовых каналах и значениям коэффициентов при них (9) практически совпадает с метрикой цветового

пространства Стайлса [2], которая рекомендована Международной комиссией по освещению (МКО) как наиболее приемлемая для описания закономерностей цветоразличения стандартным наблюдателем. При сохранении в (9) параметров Q_k^2 в зависимости от угловых размеров объектов δ получим расширение метрики Стайлса на случай малоразмерных ППО и возможность построения семейств равноконтрастных цветовых пространств с параметром «угловые размеры объектов». Эмпирические метрики таких пространств до настоящего времени не известны.

2. На рис. 4 представлены результаты контрольных расчетов порогов обнаружения цветных ППО в зависимости от их угловых размеров δ . В качестве обнаруживаемых ППО приняты объекты, сформированные монохроматическими излучениями с длинами волн 0,45, 0,53 и 0,65 мкм, аддитивно проецируемыми на фон наблюдения. Спектральная яркость фона принята постоянной в пределах видимого диапазона излучений с яркостью в световых единицах 30 кд/м^2 . Рассчитывался яркостный контраст объектов, при котором q оказывался равным 3,2. При расчетах $Q_k^2(\delta)$ принято, что угловые размеры пятен рассеяния в цветовых каналах с учетом всех факторов составляют 14,1, 4,1 и 3,1 угл. мин в «синем», «зеленом» и «красном» каналах соответственно.

В соответствии с результатами расчетов при уменьшении угловых размеров наиболее быстро уменьшаются возможности обнаружения ППО синего, а лучше всего обнаруживаются объекты желтого цвета. Это согласуется с известными экспериментальными данными [4, 12]. При изменении яркости и цвета фона значения рассчитываемых с использованием (8) пороговых контрастов изменяются, что также согласуется с известными закономерностями цветового зрения.

3. Достоверность (8) проверялась также путем расчетов значения q при различении ППО с разной спектральной яркостью и порогов цветоразличения монохроматических излучений в зависимости от длины их волны.

Результаты расчетов по первой задаче представлены в таблице и свидетельствуют о количественном совпадении значений параметра обнаружения цветовых различий q со значениями цветовых расстояний по эмпирическим формулам МКО [2]. В области синих (голубых) цветов q примерно одинаково близок к значениям расстояний по формулам CIELUV (ΔE_{uv}) и CIELAB (ΔE_{ab}), в области зеленых цветов q ближе к значениям ΔE_{ab} , в области красных — несколько больше обоих эмпирических расстояний между цветами. Все это согласуется с результатами измерений цветовых расстояний (контрастов) методом дымки [16], где также получены большие различия в восприятии красных цветов, чем ожидалось по эмпирическим формулам.

Результаты расчетов порогов цветоразличения монохроматических излучений (минимальная разность длин волн, при которой равнояркие излучения

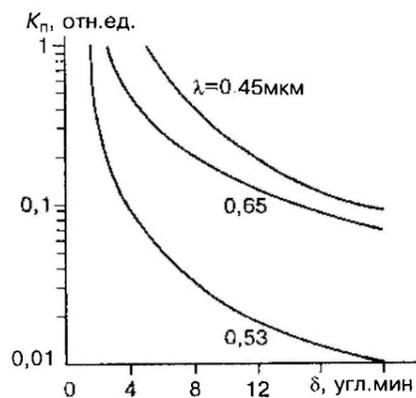


Рис. 4

различаются по цвету) оказались неустойчивыми к виду нормированных спектральных чувствительностей цветовых каналов зрения. Отклонения, соизмеримые с различиями спектральных чувствительностей по Джадду [2] и Юстовой [17], приводят к изменению результатов расчетов на порядок. Особенно большая неустойчивость результатов расчетов возникает на границах видимого диапазона длин волн излучений и вблизи максимумов спектральной чувствительности цветовых каналов. Известная неопределенность экспериментальных данных о спектральных чувствительностях цветовых каналов зрения [2] и обнаруженная неустойчивость рассматриваемой ФМЗ выделяют моделирование порогов цве-

Результаты расчетов цветовых расстояний

Номер п/п	Координаты цвета (X, Z) и цветности (x, y) равноярких (Y = 30) объектов				Цветовые расстояния		
	X ₁ /X ₂	Z ₁ /Z ₂	x ₁ /x ₂	y ₁ /y ₂	q	ΔE _{uvv} CIELUV	ΔE _{abv} CIELAB
1	6,96/5,68	6,52/4,87	0,16/0,14	0,69/0,74	14,8	12,3	15,5
2	6,96/6,13	6,52/7,67	0,16/0,14	0,69/0,68	8,3	6,3	9,7
3	6,96/8,31	6,52/7,85	0,16/0,18	0,69/0,65	10,4	9,9	13,7
4	6,96/7,41	6,52/5,14	0,16/9,17	0,69/0,71	12	5	7,5
5	10/8	10/12	0,2/0,16	0,6/0,6	15	14	37,6
6	10/9	10/10	0,2/0,18	0,6/0,61	5	6,5	8,2
7	9/8	10/12	0,18/0,16	0,61/0,6	11,2	8,4	10,4
8	64/62	6/8	0,64/0,62	0,9/0,3	35,5	15,1	8,9
9	71,1/64	10/6	0,64/0,64	0,27/0,3	84,9	31,4	21,1
10	22,5/25,5	97,5/94,5	0,15/0,17	0,2/0,2	17,8	13,6	3,3

тора различия монохроматических излучений в особую задачу. При наблюдении несектрально чистых (немонохроматических) ППО и фонов относительно малые ошибки задания нормированных спектральных чувствительностей цветовых каналов существенно не сказываются и рассматриваемая ФМЗ хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Моделирование ахроматического зрения. Принципиально ФМЗ (8) применима и при оценках возможностей обнаружения нецветных ППО. Однако при моделировании ахроматического зрения она недостаточно удобна из-за индивидуального учета трех различных цветовых каналов. Целесообразно привести ее к виду, содержащему параметры только яркостного канала.

Для этого учтем, что при ахроматических изображениях контрасты в цветовых каналах зрения можно считать равными, а яркости L_i — пропорциональными яркости L . Коэффициенты пропорциональности определяются как интегралы от функций нормированных спектральных чувствительностей каналов и в случае использования данных Юстовой [17] равны: $L_1 = 0,55L$, $L_2 = 0,86L$, $L_3 = 1,05L$. Поэтому модель (8) преобразуется к виду

$$q = 10^5 d_{mm}(L) \delta [TLK_m^2 f(\delta, L)]^{0,5}, \quad (10)$$

где $f(\delta, L)$ — функция угловых размеров обнаруживаемого ППО и яркости фона, определяемая как сумма остатков от функций D_k в (8). Для функции $f(\delta, L)$ можно предложить приближение вида

$$f(\delta, L) \approx 12,44 [1 + 62 d_{mm}^2(L) l(L) L^{-1} Q^2(\delta)], \quad (11)$$

где Q^2 рассчитывается при диаметре пятна рассеяния в яркостном канале зрения, равном 3 угл. мин. Относительная погрешность $\Delta f/f$ такого приближения составляет менее 10%. Модель (10), (11) может быть получена непосредственно из (5) в результате аналогичного (8) энергетического расчета при подстановке следующих правдоподобных значений параметров яркостного канала зрения: $\lambda_m = 0,55$ мкм, $\tau_o = 0,57$, $p^2 \delta_s^2 = 5 \cdot 10^{-10}$, $\eta = 0,1$.

С учетом вышеизложенного пороговый контраст обнаружения нецветного ППО K_n можно рассчитать по формуле

$$K_n = 10^{-5} q_0 \{12,44 d_{mm}^2(L) L \delta^2 Q^2(\delta) T / [1 + 62 d_{mm}^2(L) l(L) L]\}^{-0,5}. \quad (12)$$

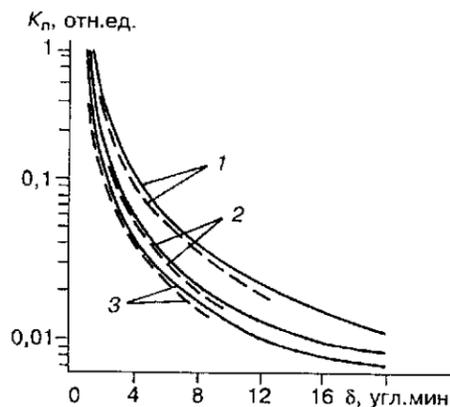


Рис. 5

Результаты расчетов в соответствии с (12) при значениях $q_0 = 3,2$, $T = 0,25$ с в зависимости от δ (в угл. мин) при различной яркости фона представлены на рис. 5. Кривые 1—3 соответствуют яркостям фона B_{ϕ} в световых единицах 3, 30 и 300 кд/м^2 . Штриховыми линиями представлены соответствующие эмпирические зависимости Луизова из [18]. Вид зависимостей 1—3 и численные значения теоретических и эмпирических пороговых контрастов свидетельствуют о хорошем описании закономерностей зрительного обнаружения ППО моделью (10). В зависимости от угловых размеров обнаруживаемого ППО δ можно выделить области, в которых пороговый контраст пропорционален δ^2 , $\delta^{1,5}$ и δ , что хорошо согласуется с различными эмпирическими данными [18].

Выводы и рекомендации. Полученные оценки позволяют сделать вывод о возможности построения с использованием подхода из [8, 9] ФМЗ для цветных и ахроматических информационных систем, в которых для его описания используются те же по физическому смыслу параметры, что и для систем технического зрения. Предлагаемые ФМЗ не требуют априорного учета каких-либо алгоритмов преобразования сигналов нейронами глаза.

Использованные при расчетах численные значения параметров ФМЗ могут быть уточнены, так как не все они получены путем прямых измерений. Для наилучшего выбора численных значений указанных параметров необходимы точные экспериментальные данные о пороговых контрастах зрительного обнаружения и различения ППО в зависимости от условий обнаружения. В доступной литературе такие данные искажены вследствие графической формы представления или отсутствия описания некоторых условий эксперимента. Поэтому окончательный выбор параметров ФМЗ является задачей специальной работы. Возможность хорошего выбора (в крайнем случае подбора) численных значений параметров предлагаемых ФМЗ обусловлена не только их относительно большим числом (что уже гарантирует возможность достаточно точного описания экспериментальных данных), но и установленным наличием частных условий обнаружения, в которых доминирующее значение приобретают отдельные из подлежащих уточнению параметров.

Автор выражает благодарность профессору В. А. Понькину за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гранрат Д. Дж. Роль моделей зрения человека в обработке изображений // ТИИЭР. 1981. 69, № 5.
2. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. М.: Мир, 1978.

3. Красильников Н. Н. Новое в развитии обобщенной функциональной модели зрения для информационных систем // Автометрия. 1992. № 2.
4. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. Ч. 1. М.: Мир, 1982.
5. Красильников Н. Н. Обобщенная функциональная модель зрения и ее применение в системах обработки и передачи изображений // Автометрия. 1990. № 6.
6. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. М.: Наука, 1979.
7. Сосулин Ю. Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. М.: Сов. радио, 1978.
8. Красильников Н. Н. Теория передачи и воспроизведения изображений. М.: Радио и связь, 1986.
9. Поветко В. Н., Понькин В. А. Эффективность обнаружения пространственно-протяженных объектов // Радиотехника и электроника. 1993. 38, № 4.
10. Мешков В. В. Осветительные установки. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1947.
11. Мешков В. В., Матвеев А. Б. Основы светотехники. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия. М.: Энергоатомиздат, 1989.
12. Ллойд Дж. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978.
13. Полупроводниковые формирователи изображений. М.: Мир, 1979.
14. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967.
15. Мешков В. В. Основы светотехники. Ч. 2. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961.
16. Бертонас В. Измерение и расчет цветовых контрастов // Опт.-мех. пром-сть. 1979. № 9.
17. Луизов А. В. Цвет и свет. Л.: Энергоатомиздат, 1989.
18. Луизов А. В. Глаз и свет. Л.: Энергоатомиздат, 1983.

Поступила в редакцию 15 января 1996 г.