

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ МОДЕЛИ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА ПРИ НАБЛЮДЕНИИ МЕЛЬКАЮЩИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Е. И. Ярмошевич*, Е. Е. Михайлова**

**Федеральное государственное учреждение «Федеральный государственный научно-исследовательский испытательный центр радиоэлектронной борьбы и оценки эффективности снижения заметности МО РФ»*

***Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 1.03.2009 г.

Аннотация. Выполнен анализ функциональной спектральной пространственно-временной модели зрительной системы при наблюдении мелькающих ахроматических изображений для условий фотоопического зрения. Параметрические передаточные функции прямого и непрямого каналов первичного отдела зрительной системы зависят от угловой чувствительности сетчатки, яркости фона адаптации, контраста изображения, временной частоты модуляции яркости изображения. Показано достоверное совпадение с экспериментальными данными [1, 2] для пороговых условий наблюдения.

Ключевые слова: ахроматические изображения, фотоопическое зрение, зрительная система.

Abstract. Has been done analysis of functional spectral spatio-temporal model of straight and non-straight channels of primary stages of human visual system for photopic achromatic flickering image. Parametric transfer functions of channels depend on angle sensitiveness of retina, adaptation background brightness, contrast of image, temporal frequency of Z-intensity modulation. Reliable match with experimental data [1, 2]. for threshold adaptation levels are shown.

Keywords: achromatic image, photooptic visual system.

ВВЕДЕНИЕ

Известные функциональные модели зрения [1–4], в которых учитывается модуляция яркости изображения по времени применимы для пороговых условий наблюдения. В [1, 2, 4] на основе анализа экспериментальных данных установлены аналитические выражения для модуляционной передаточной функции зрительной системы (ЗС), параметры которой зависят от значений яркости адаптации. Модуляционные передаточные функции были получены для равнорких полей размером 7 — 60 град с модуляцией яркости по времени, а также для решёток с гармоническим распределением яркости по пространственной координате и модуляцией по времени таким образом, что две соседние полосы всегда находились в противофазе. Яркость адаптации была постоянной. Отличия модуляционных передаточных функций

при наблюдении полей и решёток сводятся к отличиям в значениях коэффициента усиления звена, моделирующего торможение в рецепторной клетке, и в числе последовательно включённых звеньев. Значения параметров свидетельствуют о том, что при наблюдении модулированных полей торможение более развито, чем при наблюдении решёток [1–3]. Это позволяет предположить, что при наблюдении полей дифференцирующие свойства первичного отдела выражены сильнее и в количественном отношении отличаются на одно дифференцирующее звено. Основой для определения вида модуляционных передаточных функций в [1,2] была гипотеза, согласно которой процессы в сетчатке, управляющие реакцией на мелькания, состоят из диффузионного процесса (принадлежность рецепторных клеток) и процесса торможения (принадлежность нейронных сетей в плексиформном и внутреннем ядерном слоях). Согласно этой гипотезе широкий динамический диапазон фотоопического зрения определяется

диффузионным процессом. Тормозная сеть действует как звено автоматического регулирования усиления, уменьшая низкочастотную чувствительность. Это эффективно расширяет действующую полосу частот для высоких уровней адаптации.

Модель, рассматриваемая в данной работе, основана на параметрической идентификации модуляционной передаточной функции зрительной систем с учётом количественных закономерностей, известных из психофизических, психофизиологических и нейрофизиологических экспериментов при наблюдении статических изображений [5], что позволило более подробно учесть зависимость её параметров от условий наблюдения по сравнению с известными моделями не только от яркости адаптации, но и от контраста объекта, угловой чувствительности сетчатки и опосредовано через пороговый контраст от времени действия стимула.

Методика параметрической идентификации оптической передаточной функции зрительной системы приведена в [6-8] и заключалась в следующем. За основу были взяты известные экспериментальные данные измерения модуляционных передаточных функций ЗС из обзора [9] и экспериментальные зависимости разрешающей способности ЗС от яркости фона адаптации, контраста объекта и угловой чувствительности ЗС [10, 11]. По этим данным с использованием частотного метода синтеза передаточных функций были найдены аппроксимации пространственных передаточных функций оптики глаза и сетчатки по Баттерворту для пороговых условий наблюдения. При аппроксимации модуляционной передаточной функции сетчатки предполагалось, что ЗС осуществляет преобразование низкочастотного фильтра, моделирующего оп-

тику глаза, в полосовой фильтр [8]. Для определения зависимости параметров модуляционной передаточной функции ЗС от угла фиксации изображения объекта на сетчатке была решена задача аппроксимации функции угловой чувствительности ЗС, и с учетом этого определены зависимости параметров передаточной функции ЗС от яркости фона адаптации и контраста для дневных условий наблюдения во всем поле зрения с погрешностью не более 30% от известных экспериментальных данных [9-11].

На основе гипотезы, что передаточная функция первичного отдела ЗС определяется в виде масштабированной передаточной функции ЗС [12], компьютерным моделированием методом перебора возможных вариантов сочетания эквивалентных фильтров оптики глаза и сетчатки была определена функциональная структура модельного рецептивного поля канала формы ЗС, приведенная на рисунке 1. Предполагалось, что РП покрывают всю поверхность сетчатки непрерывно.

На рис. 1 представлена функциональная схема модельного рецептивного поля (РП) канала формы зрительной системы, на вход которого подается сигнал в виде пространственно-временной дельта-функции. Передаточная функция первичного отдела (см. **ниже (6)**) моделировалась в виде последовательного соединения трёх основных звеньев: безынерционно-нелинейного звена, моделирующего угловую чувствительность сетчатки (3); эквивалентного фильтра нижних частот (7), учитывающего адаптацию оптики глаза; эквивалентного полосового фильтра (8), учитывающего ослабление сигнала на нижних и верхних частотах. Последние два звена охвачены отрицательной обратной связью с целью обеспечения линейности на

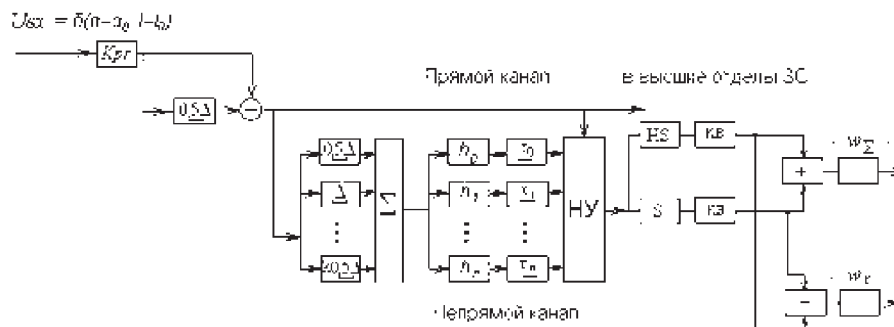


Рис. 1. Функциональная схема модельного рецептивного поля канала формы зрительной системы.

средних и высоких частотах в соответствии с известными экспериментальными данными.

Сигнал прямого канала (9) формируется торможением сигнала первичного отдела и через линии задержки поступает в нейронную сеть (10), формирующую узкополосные колебания равной длительности (12). Далее эти колебания через линии задержки поступают в когерентное накопительное устройство (НУ). Время накопления сигнала определяется постоянной времени прямого канала. С выхода НУ сжатый сигнал (11) поступает в квадратурные каналы **S** и **HS**. Сигнал канала **HS** ортогонален сигналу канала **S** и связан с ним преобразованием Гильберта. Далее сигналы поступают на квадратичные детекторы и проходят устройство суммарно-разностной обработки с усреднением по зоне суммации РП. Функции $\langle w_\Sigma \rangle$ и $\langle w_r \rangle$ представляют собой эквивалентные импульсные переходные функции непрямого канала для суммарной и разностной обработки сигналов соответственно.

Целью данной работы является анализ функциональной спектральной пространственно-временной модели зрительной системы (ЗС) при наблюдении модулированных по времени полей и решёток на основе учёта зависимости параметров передаточных функций прямого и непрямого каналов от частоты амплитудной модуляции и сравнения полученных результатов с зависимостями, установленными в [1, 2].

1. МЕТОДИКА

Амплитудная модуляция яркости по пространственной координате и времени для синусоидальной решетки может быть записана в следующем виде:

$$\Phi(\alpha, t) = B + \Delta B \sin(2\pi\nu\alpha) \sin(2\pi f_m t),$$

где B — средняя яркость, ΔB — амплитуда яркости, α — пространственная координата, град., ν — пространственная частота модуляции, лин/град., f_m — частота временной модуляции, Гц. В работе рассматривался случай, когда значение яркости адаптации было постоянным, а модуляция яркости поля осуществлялась только по времени от среднего значения вниз. Амплитудная модуляция приводит к модуляции полосы пропускания первичного отдела зрительной системы путём её расширения и смещения по оси частот. Наиболее подвержена изменению верхняя граничная частота, определяемая выражением (1)

$$v_k(\alpha, B, K, t) = 60F(K(t), \alpha) \sum_{n=0}^4 s_n e_n (Bf(\alpha))^{n+0,9}, \quad (1)$$

где

$$F(K, \alpha) = (f(\alpha))^{0,5} K^{1-0,17K(1+f(\alpha))}. \quad (2)$$

В (1) и (2) обозначены: вектор $e = [1, 204, -0, 224, 0, 022, -9, 979 \cdot 10^{-4}, 1, 713 \cdot 10^{-5}]^T$, коэффициенты s_n введены для согласования размерностей и их численное значение равно 1, размерность граничной частоты — лин/град; B — яркость фона адаптации, K — контраст объекта (неоднородности) с фоном, α — угол относительно зрительной оси, град; $f(\alpha)$ — угловая чувствительность сетчатки, определяемая выражением (3)

$$f(x) = C_0 e^{-\left(\frac{x}{\sqrt{2}x_0}\right)^2} + \sum_{n=1}^6 C_n e^{-\left(\frac{x-x_0 \cdot n}{\sqrt{2}x_0 \cdot n}\right)^2}, \quad (3)$$

где $C = [0, 748, 0, 024, 0, 338, -0, 309, 0, 692, -0, 766, 0, 436]^T$, $x_0 = 3,5$ град.

В работе рассматривался случай наблюдения равномерного поля, модулированного по времени, с контрастом, изменяющимся согласно (4) с удвоенной частотой модуляции, при постоянном значении яркости адаптации.

$$K(t, f_m) = 1 - \frac{\Delta B}{B} k(f_m) |\sin(2\pi f_m t)|, \quad (4)$$

где f_m — частота модуляции,

$$\lg k(f_m) = 0, 25 \left(\lg \left(\frac{1}{4f_m} \right) \right)^2 - 0, 05. \quad (5)$$

Зависимость (5) отражает увеличение пороговой контрастной яркости в $k(f_m)$ раз [13]. При этом полагалось, что эффективное время мелькания может быть определено как четвертая часть периода модуляции.

Передаточная функция первичного отдела зрительной системы $K_{pr}(\alpha, B, K, j\omega, t)$ определялась выражением (6) [5], в котором параметры зависят от времени

$$K_{pr}(\alpha, B, K, j\omega, t) = \frac{f(\alpha)K_{opt}(\alpha, B, K, j\omega, t)K_r(\alpha, B, K, j\omega, t)}{1 + K_{opt}(\alpha, B, K, j\omega, t)K_r(\alpha, B, K, j\omega, t)}, \quad (6)$$

где

$$K_{opt}(\alpha, B, K, j\omega, t) = \frac{\omega_\kappa(\alpha, B, K, t)}{\omega_\kappa(\alpha, B, K, t) + j\omega}, \quad (7)$$

ω_k — пространственная частота среза по уровню 0,707;

$$K_r(\alpha, B, K, j\omega, t) = \frac{\Delta\omega_r(\alpha, B, K, t)j\omega}{(j\omega)^2 + \Delta\omega_r(\alpha, B, K, t)j\omega + \omega_0^2(\alpha, B, K, t)}, \quad (8)$$

где $\Delta\omega_r(\alpha, B, K, t) = \omega_0(\alpha, B, K, t) / q$, q — добротность фильтра, $q = 0,67$. При изменении условий наблюдения добротность фильтра остается постоянной. В ходе численных экспериментов было установлено, что $\omega_0(\alpha, B, K, t)$ составляет $\omega_k(\alpha, B, K, t) / q$, ($\omega_k = 2\pi\nu_k$, ν_k — верхняя граничная частота модуляционной передаточной функции зрительной системы по уровню 0,1, определяемая выражением (1)). С учётом этого коэффициент передачи прямого канала определяется выражением (9)

$$K_{str}(\alpha, B, K, j\omega, t) = K_{pr}(\alpha, B, K, j\omega, t)(1 - e^{-0,5j\omega\Delta(\alpha, t)}), \quad (9)$$

а коэффициент передачи непрямого канала — выражением (10)

$$K_{nstr}(\alpha, B, K, j\omega, t) = \sum_{k=0}^{17} K_{str}(\alpha, B, K, j\omega, t) \times (1 - e^{-0,5j\omega\Delta(\alpha, t)}) e^{-0,5kj\omega\Delta(\alpha, t)}, \quad (10)$$

где $\Delta(\alpha, t) = \nu_k^{-1}$. Эквивалентный фильтр, соответствующий (10), представляет собой гребенчатый фильтр с 11-ю эффективно действующими узкополосными каналами с постоянной полосой пропускания в отсутствие модуляции.

Исследование непрямого канала проводилось по методике [5], согласно которой его импульсная переходная функция формировалась путём когерентного сложения семи парциальных сигналов, прошедших соответствующие линии задержки, и определялась выражением (11)

$$H(t, \xi, \alpha, f_m) = \sum_{n=4}^{10} h(t, \xi, \alpha, f_m, n), \quad (11)$$

где $h(t, \xi, \alpha, f_m, n)$ — импульсная переходная функция n -го парциального эквивалентного узкополосного фильтра (10) определялась следующим выражением

$$h(t, \xi, \alpha, f_m, n) = c \frac{\sin((\xi - \tau(t, \alpha, f_m, n))2\pi\Delta\nu(t, \alpha, f_m))}{\xi - \tau(t, \alpha, f_m, n)} \times \cos(2\pi\nu_0(t, \alpha, f_m, n)(\xi - \tau(t, \alpha, f_m, n))), \quad (12)$$

$\tau(t, \alpha, f_m, n)$ — время задержки n -го парциального сигнала; $\Delta\nu(t, \alpha, f_m)$ — полоса пропускания парциальных фильтров; $\nu_0(t, \alpha, f_m, n)$ — центральная частота n -го парциального сигнала: $\nu_0(t, \alpha, f_m, n) = (n + 0,6) \Delta\nu(t, \alpha, f_m)$; $\Delta\nu(t, \alpha, f_m) = \nu_k / 9,4$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования представлены на рис. 2—5 для значения яркости адаптации, равного 31,6 нт и приведены к одному масштабу по амплитуде для выявления влияния модуляции. Результаты, представленные на рис. 2—4, сравнивались с экспериментальными зависимостями, полученными в [1, 2].

Сравнение проводилось для совпадающих значений параметров с относительной погрешностью, не превышающей 30%. Значения коэффициента усиления передаточной функции первичного отдела зрительной системы (6) совпали с экспериментальными значениями коэффициента усиления при наблюдении мелькающих полей для двух из четырёх значений яркости 31,6 и 316 нт с погрешностью менее 30% для поля размером 7 град [1, 2]. Экспериментальные значения коэффициентов усиления, соответствующие указанным значениям яркости, приведены в числителе 15,4/19,3 и 23,5/23,6 и зависят только от яркости адаптации. В знаменателе указаны значения коэффициентов усиления передаточной функции сетчатки (8).

Сплошные кривые на рисунках 2а, 3, 4а соответствуют экспериментальным модуляционным передаточным функциям зрительной системы при наблюдении мелькающего поля с угловым размером 7 град. [1, 2].

На рис. 2б, 3, 4б пунктирная кривая соответствует экспериментальным модуляционным передаточным функциям зрительной системы при наблюдении синусоидальной мелькающей решётки, заполняющей поле зрения с угловым размером 7град [1, 2].

На рис. 2а,б приведены модуляционные передаточные функции первичного отдела с не изменяющимися по времени параметрами при наблюдении мелькающего поля (рис. 2а, ромбы, кривая получена с использованием выражения (6)) и мелькающей синусоидальной решётки (рис. 2б, кружки, кривая получена с использованием выражения (9)), усреднённые по зоне суммации рецептивного поля канала в поле

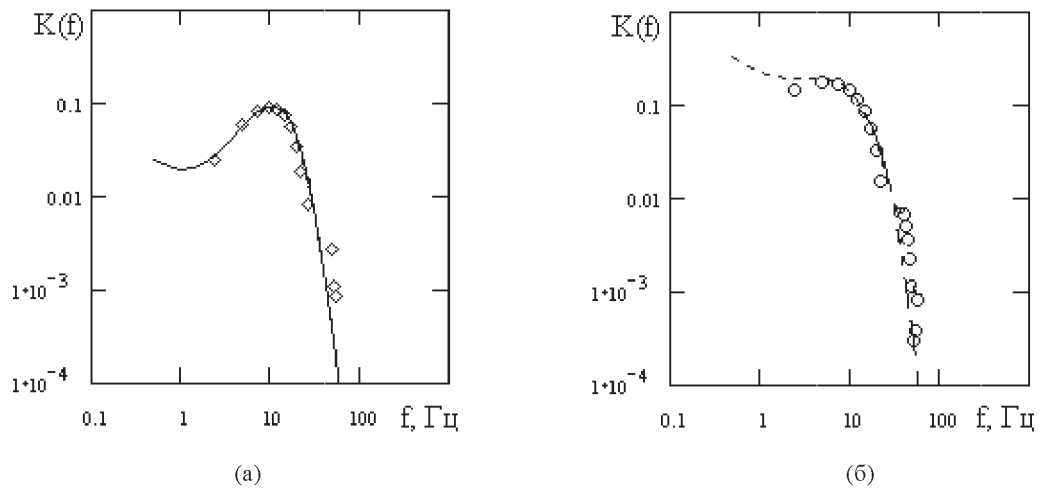


Рис. 2. Модуляционные передаточные функции прямого канала а) и первичного отдела б) с не изменяющимися по времени параметрами.

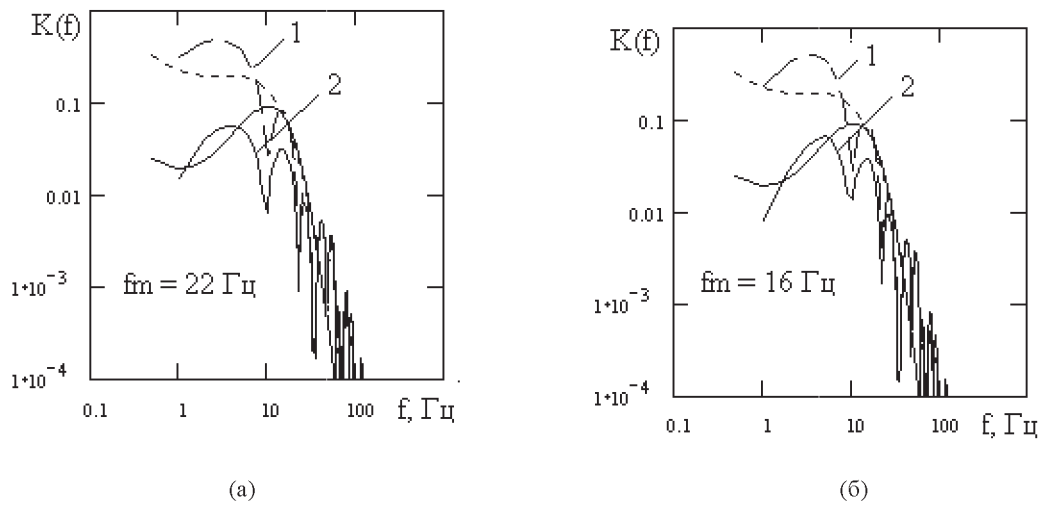


Рис. 3. Модуляционные передаточные функции первичного отдела (1) и прямого канала (2) с модулированными по времени параметрами.

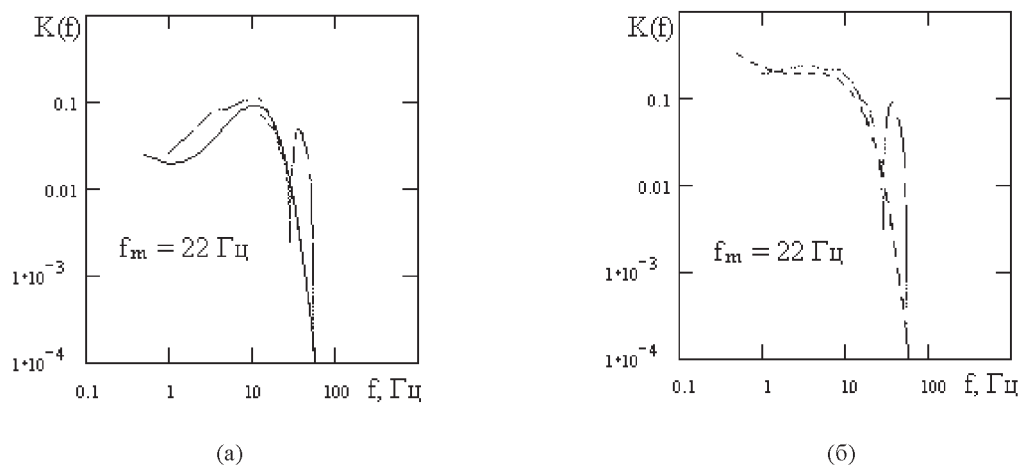


Рис. 4. Модуляционные передаточные функции непрямого канала с модулированными по времени параметрами для разностной (а) и суммарной (б) обработок сигналов.

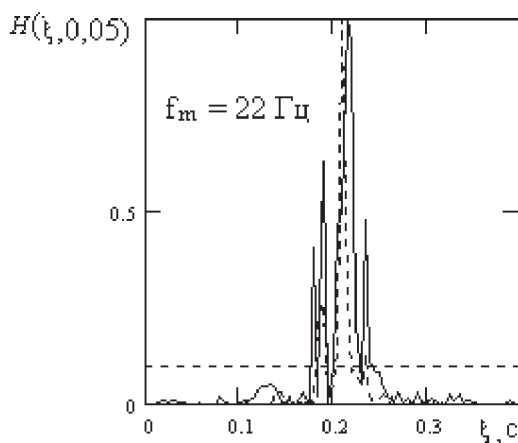


Рис. 5. Выходной сигнал непрямого канала на выходе квадратичного детектора.

зрения 7 град. Из приведённых зависимостей следует, что при пороговых условиях передаточная функция зрительной системы при наблюдении мелькающего равномерного поля является масштабированной передаточной функцией прямого канала первичного отдела, а передаточная функция зрительной системы при наблюдении синусоидальной мелькающей решётки является масштабированной передаточной функцией первичного отдела зрительной системы. Совпадение масштабированных кривых с экспериментальными указывает на возможность использования метода «замороженных» коэффициентов для оценки огибающей модуляционной передаточной функции зрительной системы при наблюдении объектов с модулированной по времени яркостью в пороговых условиях.

На рисунках 3а, 3б приведены модуляционные передаточные функции первичного отдела: кривая 1 для модуляционной передаточной функции (6) и прямого канала: кривая 2 для модуляционной передаточной функции (9) с переменными по времени параметрами для частот модуляции 22 и 16 Гц. Модуляционные передаточные функции усреднялись по зоне суммации рецептивного поля прямого канала в поле зрения 7 град и за время одного кадра (35 мс), соответствующего постоянной времени прямого канала. Различия в кривых 1 и 2 свидетельствуют о том, что при модуляции равномерного поля зрительная система оценивает скорость изменения сигнала, а при наблюдении структурного объекта зрительная система оце-

нивает амплитуду сигнала. Поэтому передаточные функции зрительной системы при наблюдении модулированных по времени равномерного поля и синусоидальной решётки отличаются на одно дифференцирующее звено.

На рисунке 4 представлены модуляционные передаточные функции канала формы зрительной системы, построенные на основе выходного сигнала непрямого канала с использованием выражений (11,12) по методике [5]. На рисунке 4а приведена модуляционная передаточная функция эквивалентного фильтра, согласованного с сигналом, прошедшим разностную обработку, а на рисунке 4б — модуляционная передаточная функция с эквивалентного фильтра, согласованного с сигналом, прошедшим суммарную обработку для частоты модуляции 22 Гц. На приведённых кривых отчетливо видна гармоника, близкая к удвоенному значению частоты модуляции. При пороговых условиях наблюдения высокочастотные гармоники малы, а низкочастотные гармоники сглаживаются за счёт усреднения по полю зрения. Вследствие появления постоянной составляющей передаточные функции каналов изменяются по типу от высокочастотного к низкочастотному.

На рис. 5 приведены нормированные зависимости выходного сигнала непрямого канала, прошедшего квадратичный детектор для частоты модуляции 22 Гц (сплошная кривая) и в отсутствие модуляции (пунктирная кривая) для момента времени наблюдения, равного 50 мс. Пунктирной линией отмечен уровень амплитуды, равный 0,1. Приведённые зависимости показывают, что модуляция разрушает когерентность парциальных сигналов и выходной сигнал размывается. Для данного примера сигнал по уровню 0,1 уширился с 2,1 до 3,6 угл. мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый сравнительный анализ модуляционных передаточных функций первичного отдела, прямого и непрямого каналов, описываемых функциональной спектральной пространственно-временной моделью зрительной системы [5], с экспериментальными модуляционными передаточными функциями зрительной системы при наблюдении мелькающих равномерных полей и структурных объектов в виде мелькающих синусоидальных решёток в пороговых условиях показал достоверное совпадение теоретических результатов с эксперимен-

тальными [4, 2]. Показано, что в отличие от известных теоретических моделей, учитывающих зависимость параметров только от яркости адаптации, разработанная модель [5] позволяет достоверно оценивать не только огибающую сигнала, но и его структуру, за счёт более полного учёта зависимости параметров оптической передаточной функции первичного отдела от условий наблюдения. На основе проведённого анализа можно предположить, что при прохождении сигнала от первичного отдела к высшим масштабированные передаточные функции каналов зрительной системы не претерпевают существенных изменений для пороговых условий наблюдения при постоянном значении яркости адаптации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kelly D.H. Theory of Flicker and Transient Responses, I. Uniform Fields // JOSA. — 1971. — Vol. 61. — № 4. — P. 537—546.
2. Kelly D.H. Theory of Flicker and Transient Responses, II. Counterphase Gratings // JOSA. — 1971. — Vol. 61. — № 5. — P. 632—640.
3. Kelly D.H. Spatio-temporal frequency characteristics of color-vision mechanisms // JOSA — 1974. — Vol. 64. — № 7. — P. 983—990.
4. Красильников Н.Н. Пространственно-временная функциональная модель первичных звеньев зрительной системы / Н. Н. Красильников, Ю. Е. Шелепин, О. И. Красильникова // Оптический журнал. — 2004. — Т. 71. — № 7. — С. 24-31.
5. Ярмошевич Е.И. Функциональная спектрально-пространственно-временная модель формирования изображений объектов зрительной системой человека / Е. И. Ярмошевич, Е. Е. Михайлова, М. А. Пономаренко // Вестник ВГУ, Серия: «Сис-

темный анализ и информационные технологии». — 2008. — №1. — С. 74—78.

6. Бахметьева Н.В. Оценка линейности зрительной системы человека частотным методом // Н. В. Бахметьева, Е. И. Ярмошевич / Труды IV Межд. науч.-тех. конф. «Кибернетика и технологии XXI века», 13—14 мая 2003 г. — Воронеж: НПФ «Саквояж». ВГУ. 2003. — С. 293—299.

7. Михайлова Е.Е. Аппроксимация разрешающей способности зрительной системы человека функцией яркости адаптации, контраста и углового смещения объекта // Е. Е. Михайлова, Р. И. Рюмин, Е. И. Ярмошевич / Труды IV Межд. науч.-тех. конф. «Кибернетика и технологии XXI века», 13—14 мая 2003 г. — Воронеж: НПФ «Саквояж». ВГУ. 2003. — С. 288—293.

8. Хакимов Н.Т. Аппроксимация амплитудно-частотных характеристик основных структур зрительной системы человека-оператора / Н. Т. Хакимов, Е. И. Ярмошевич // Вестник ВИ МВД России. — 1999. — №2(4). — С. 22—25.

9. Островская М.А. Частотно-контрастная характеристика глаза // Оптико-мех. пром-сть. — 1969. — т. 36. — № 2. — С. 45-54.

10. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники: Ч2. Физиологическая оптика и колориметрия. — М.: Энергоатомиздат. — 1989. — 432 с.

11. Травникова Н.П. Эффективность визуального поиска. М.: Машиностроение. — 1985. — 128 с.

12. Красильников Н.Н. Частотно-контрастная характеристика зрительной системы при наличии помех / Н. Н. Красильников, Ю. Е. Шелепин // Физиология человека. — 1996. — Т. 22. — № 4. — С. 33—38.

13. Аксюттов Л.Н. Операционный порог восприятия контраста при ограниченном времени наблюдения // Оптический журнал. — 2003. — Т. 70. — № 6. — С. 42—48.

Ярмошевич Евгений Иванович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного научно-исследовательского испытательного центра радиоэлектронной борьбы и оценки эффективности снижения заметности МО РФ.

Михайлова Елена Евгеньевна — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры программного обеспечения и администрирования информационных систем Воронежского государственного университета. Тел. 208—337 (раб) E-mail:lm2002@mail.ru

Yarmoshevitch E.I. — Candidate of Technical Sciences, senior major research Federal state establishment “Federal State research experimental center of radio-electronic fight and noticeability reduction efficiency assessment of the Defence Ministry of the Russian Federation”.

Mikhailova E.E. — Associate Professor, candidate of physics-math. Sciences, the dept. of the Software and Information System Administration, Voronezh State University. Tel. 208—337. E-mail:lm2002@mail.ru