

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ЧЕЛОВЕКА

Е. И. Ярмошевич*, Е. Е. Михайлова**, М. А. Пономаренко*

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

***Воронежский государственный университет*

Разработана функциональная спектральная пространственно-временная модель формирования изображения объектов с пространственно-временным распределением яркости в виде оптической передаточной функции, коэффициентов передачи прямого и непрямого каналов формирования изображения, с полосами пропускания, зависящими от яркости фона, контраста объекта и угловой чувствительности зрительной системы человека.

ВВЕДЕНИЕ

Известные функциональные модели зрения, основанные на гипотезе согласованной фильтрации, показали, что при решении наблюдателем задач обнаружения, опознавания изображений и измерения их координат зрительная система может быть представлена оптимальным обнаружителем или измерителем для заданного критерия оптимальности. Однако реализация таких моделей требует полной информации о текущих значениях параметров изображения и зрительной системы: необходимо иметь алгоритмы формирования сигналов нейронного возбуждения в основных отделах зрительного анализатора [1–6]. В настоящее время основным способом получения такой информации является обобщение экспериментальных данных о функционировании его основных подсистем для согласования характеристик нижних уровней зрительной системы (ЗС) с характеристиками уровня принятия решения об опознавании тестовых изображений [1, 2, 4, 9–11].

С целью обоснования характеристик сигналов и алгоритмов их формирования в данной работе решается задача эвристического синтеза функциональной спектральной пространственно-временной модели каналов ЗС, формирующих сигналы сетчаткой и первичной зрительной корой на основе параметрического описания

оптической передаточной функции ЗС с учетом основных ограничений, выявленных в психофизических, психофизиологических и нейрофизиологических экспериментах [1]. В обобщенном виде эти ограничения рассматриваются в рамках двух гипотез: 1) ЗС является локально-однородной нестационарной комплексированной системой формирования сигналов и оценки их параметров; 2) ЗС представляет собой иерархическую систему с независимыми пространственно- и время-частотными каналами, формирующими помехоустойчивую систему сигналов для преобразования рецепторного возбуждения в нейронное возбуждение верхних структур зрительного анализатора, и синтеза изображения объектного пространства с минимальной потерей информации.

Наличие в зрительной системе пространственно- и время-частотных каналов приводит к необходимости их функционального моделирования для решения задачи формирования изображения в ЗС.

В связи с этим целью данной работы является эвристический синтез функциональной спектральной пространственно-временной модели структуры одного из основных каналов ЗС-канала передачи информации о форме объектов (канала формы) от первичного отдела к высшим с учетом особенностей формирования сигналов, проходящих через наружное колоччатое тело в зрительную кору [1] для ахроматического зрения и дневных условий наблюдения.

© Ярмошевич Е. И., Михайлова Е. Е., Пономаренко М. А., 2008

1. МЕТОДИКА

При синтезе модели использовалось следующее, ставшее уже типовым, допущение: в связи с тем, что формирование пространственного распределения сигналов на уровнях основных выходных нейронов осуществляется по принципу «точка в точку» и в каждой точке сетчатки наблюдается перекрытие 30—35 рецептивных полей, будем считать среду формирования сигнала (нейроны и нейронные сети) непрерывной [1, 7]. Результаты исследования модуляционной передаточной функции зрительной системы в отсутствие внешнего шума позволили авторам работы [5] сделать следующий существенный вывод: передаточная функция зрительной системы повторяет передаточную функцию звена первичной фильтрации.

Нейрофизиологическими исследованиями установлено, что канал формы состоит из двух каналов — прямого (передача сигналов между основными нейронами от низших отделов ЗС — к высшим) и непрямого (передача сигналов между основными нейронами от низших отделов ЗС — к высшим через нейронные сети) [1, 7].

На этой основе в качестве модели отдельной нейронной сети звена первичной фильтрации будем рассматривать линейную нейронную сеть, основным элементом которой является модельный нейрон, передаточная функция которого совпадает с оптической передаточной функцией зрительной системы. На основе обобщения экспериментальных зависимостей разрешающей способности от яркости фона адаптации, контраста наблюдаемого объекта, угла визирования объекта относительно зрительной оси глаза показано, что оптическая передаточная функция может быть аппроксимирована устойчивой структурой, основным элементом которой является полосовой фильтр [8, 9]. С учетом того, что зрительная система является локально однородной и нестационарной, коэффициент передачи полосового фильтра будет параметрическим, и, следовательно, оптическая пространственная передаточная функция ЗС также будет параметрической и может быть представлена в следующем виде

$$K_{OTF}(\alpha, B, K) = \frac{f(\alpha)K(j\omega)K_f(\alpha, B, K, j\omega)}{1 + K(j\omega)K_f(\alpha, B, K, j\omega)}, \quad (1)$$

где $f(\cdot)$ — функция угловой чувствительности ЗС;

$$K(j\omega) = \frac{\omega_k}{\omega_k + j\omega}, \quad (2)$$

ω_k — пространственная частота среза по уровню 0,707;

$$K_f(\alpha, B, K, j\omega) = \frac{\Delta\omega_f(j\omega)}{(j\omega)^2 + \Delta\omega_f(j\omega) + \omega_0^2(\alpha, B, K)}, \quad (3)$$

где $\Delta\omega_f = \omega_0(\alpha, B, K)/q$, q — добротность фильтра, $q = 0,67$; B — яркость фона адаптации; K — контраст объекта. Яркость и контраст в общем случае зависят от времени. При изменении условий наблюдения добротность фильтра остается постоянной. В ходе численных экспериментов было установлено, что

$\omega_0(\alpha, B, K)$ составляет $\left(\frac{1}{6} \dots \frac{1}{7}\right)\omega_k(\alpha, B, K)$, ($\omega_k = 2\pi\Delta f_{res}$, Δf_{res} — полоса частот модуляционной передаточной функции зрительной системы по уровню 0,1). С учетом этого коэффициент передачи прямого канала определяется следующим выражением

$$K_{dr}(j\omega) = K_{OTF}(j\omega)(\exp(j\omega\Delta) - \exp(-j\omega\Delta)). \quad (4)$$

Пространственно-частотный коэффициент передачи непрямого канала определяется выражением

$$K_{nдр}(j\omega) = \sum_{k=0}^{28} K_{OTF}(j\omega)(\exp(j\omega\Delta) - \exp(-j\omega\Delta)) \exp(-2kj\omega\Delta), \quad (5)$$

где Δ — угловое разрешение зрительной системы. Моделированием выражение (5) установлено, что пространственно-частотный коэффициент передачи непрямого канала является гребенчатым фильтром и состоит из 11 парциальных фильтров с равными полосами пропускания, центральные частоты которых связаны линейной зависимостью

$$\begin{aligned} \mu_n &= \mu_0 + n \Delta\mu, \\ \Delta\mu &= \mu_{10} / 10,6, \\ \mu_0 &= 0,6 \Delta\mu, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\Delta\mu$ — полоса пропускания парциального фильтра, μ_{10} — совпадает с граничной частотой модуляционной оптической передаточной функции (МОПФ). В работе на основе проведенных исследований установлено, что если задержку сигнала, прошедшего парциальный фильтр, определять выражением $1/\mu_n$, то суммарное время задержки сигнала, прошедшего

4...6 фильтров, например, с десятого по пятый, определяет минимальное время зрительной инерции

$$\tau = \sum_{n=5}^{10} 1/\mu_n, \quad (7)$$

а минимальная центральная частота парциального фильтра определяет критическую частоту слияния мельканий для немодулированных во времени сигналов [8].

Выражения (1...7) совместно с известной функциональной схемой для квазиоптимального приема последовательности когерентных дискретно-частотных сигналов [13] являются основой для эвристического синтеза функциональной структуры спектральной пространственно-временной модели.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам исследований формирования изображений с помощью синтезированной функциональной модели можно сформулировать следующие положения:

1. Рецептивное поле (РП) выходного нейрона непрямого канала формируется параллельными каналами передачи узкополосных сигналов, разделенных по частоте, но перекрывающихся по времени (дискретно-частотные сигналы). Суммирование этих сигналов на выходном нейроне (когерентное накопление) обеспечивает формирование сигнала с максимальной разрешающей способностью для заданных условий наблюдения. Низкочастотная составляющая изображения формируется усреднением сигнала как по времени, так и по пространству в зоне суммации рецептивного поля выходного нейрона. Пространственное усреднение осуществляется на выходе детектора суммированием сигналов в зоне суммации РП.

2. Сравнение значений времен суммации, известных из экспериментов, с аналогичными значениями, полученными на модели, позволя-

ет сделать вывод о том, что в формировании сигнала изображения непрямого канала могут участвовать до 7 дискретно-частотных сигналов. Время инерции ЗС определяется временем когерентного накопления в непрямом канале с учетом детектирования.

3. Формирование изображения осуществляется по схеме, представленной на рис. 1 путем объединения сигналов пространственно разнесенных каналов, формируемых выходными нейронами соответствующих отделов ЗС. На рис. 1 обозначены: $U_{вх}$ — исходное изображение объекта (см. рис. 4а), линейная нейронная сеть первичного отдела ЗС моделируется выражением (5), фильтры $\Phi_0 \dots \Phi_k$ на приемной стороне (первичной зрительной коре) также моделируются выражением (5), $\tau_0 \dots \tau_k$ — времена запаздывания сигналов, приходящих на когерентное накопительное устройство (НУ), S — сигнал; HS — преобразование Гильберта сигнала S; Кв — квадратичный детектор; выходные сигналы U_1 и U_2 формируются на выходе интеграторов, имеющих разные постоянные времени (для U_1 постоянная времени равна 14 мс, для U_2 — 80 мс). Из приведенной схемы следует, что выходное изображение является сигналом по ошибке (см. рис. 4б). Изображение, которое соответствует сигналу U_2 , приведено на рис. 4в и является продифференцированным изображением $U_{вх}$.

На рис. 2 представлена функциональная эквивалентная схема, на которой $K_{экр}$ — эквивалентная передаточная функция, определяющаяся отношением сигналов $U_{вых}$ к $U_{вх}$ (сплошная кривая на рис. 3) или отношением сигналов $U_{вх}$ к U_2 (штриховая кривая на рис. 3).

Изображения, представленные на рис. 4 б, в, моделировались для следующих условий наблюдения: средняя яркость фона адаптации исходного изображения (см. рис. 4) принималась равной ~ 100 нт, средний максимальный

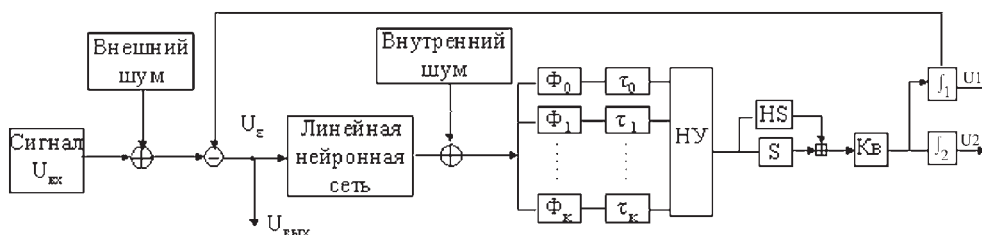


Рис. 1. Функциональная схема преобразования сигнала в непрямом канале ЗС

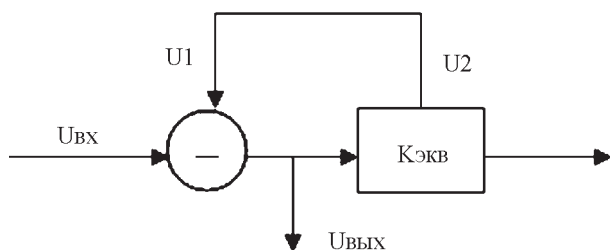


Рис. 2. Эквивалентная функциональная схема преобразования сигнала.

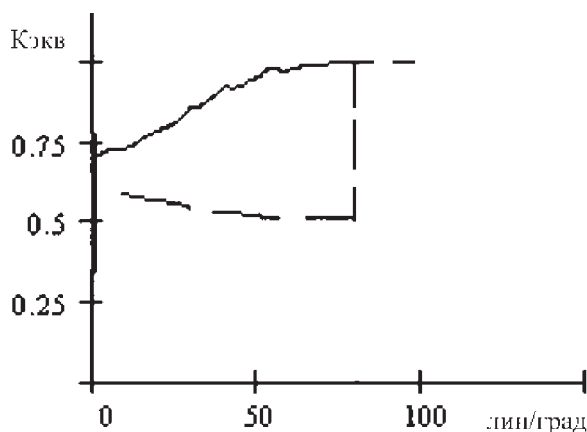


Рис. 3. Зависимость эквивалентной передаточной функции от пространственной частоты

контраст ~ 0.7 . Значения коэффициента корреляции выходного изображения (рис. 4 б) с оригиналом [12] больше 0,9, что позволяет сделать вывод о достоверности функциональной модели формирования изображения.

Таким образом, разработанная функциональная спектральная пространственно-временная модель каналов ЗС может явиться основой для имитационного моделирования оценки эффективности восприятия изображений со сложным пространственно-временным распределением яркости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физиология зрения. — М.: Наука, 1992. — 704 с.
2. Красильников Н.Н. Функциональная модель зрения / Н. Н. Красильников, Ю. Е. Шелепин // Оптический журнал. — 1997. — Т. 64. — № 2. — С. 72—81.
3. Поветко В.Н. О применении теории обнаружения пространственно-протяженных объектов для функционального моделирования зрения / В. Н. Поветко // Автметрия. — 1996. — № 6. — С. 16—25.
4. Красильников Н.Н. Применение принципов оптимального наблюдателя при моделирова-



а



б



в

Рис. 4. Исходное (а) и модельные (б, в) изображения

нии зрительной системы / Н. Н. Красильников, Ю. Е. Шелепин, О. И. Красильникова // Оптический журнал. — 1999. — Т. 66. — № 9. — С. 17—23.

5. 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.

6. Красильников Н.Н. Исследование эффективности зрительной системы человека при опознавании статических изображений / Н. Н. Красильников, О. И. Красильникова, Ю. Е. Шелепин // Оптический журнал. — 2002. — Т. 69. — № 6. — С. 27—34.

7. Шевелев И.А. Динамика зрительного сенсорного сигнала / И. А. Шевелев. — М.: Наука, 1971. — 248 с.

8. Ярмошевич Е.И. Оценка времени зрительной инерции и критической частоты слияния мельканий / Е. И. Ярмошевич, Е. Е. Михайлова // Информатика: проблемы, методология, технологии: мате-

риалы седьмой международной научно-методической конференции (8—9 февраля 2007 г.). — Воронеж : Воронежский государственный университет, 2007. — С. 502-505.

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

10. *Трифонов М.И.* Исследование частотно-контрастной характеристики зрительной системы в

условиях помех / М. И. Трифонов, Н. Н. Павлов, В. Г. Шаревич, Ю. Е. Шелепин, А. В. Попов // Физиология человека. — 1990. — Т.16. — №2. — С. 41—45.

11. *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.

12. Mathcad 7 professional, Mathsoft, Inc. 1986-1997.

13. *Лезин Ю.С.* Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов / Ю. С. Лезин. — М. : Сов. Радио. — 1963. — 320 с.