

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ЧЕЛОВЕКА

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

Выполнен анализ качества функционирования спектральной пространственно-временной модели формирования ахроматического изображения объектов с пространственным распределением яркости по математическому ожиданию и среднеквадратическому значению отношения контрастной яркости изображения объекта к контрастной яркости объекта, и коэффициенту их взаимной корреляции. Показано, что при квадратурной обработке сигнала наблюдаются минимальные отличия модельного изображения от исходного

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] на основе эвристического синтеза показана возможность построения функциональной пространственно-временной модели формирования ахроматического изображения объекта ЗС человека на основе гипотезы о структуре зрительной системы как совокупности независимых пространственно-частотных каналов фильтрации сигналов. В данной модели пространственный сигнал формировался в зоне суммации рецептивного поля выходного нейрона и представлял собой максимально сжатый суммарный сигнал шести-семи парциальных сигналов, прошедших многоотводную линию задержки с неравномерным съемом сигналов. Далее этот сигнал выпрямлялся, складывался с квадратурным сигналом и подавался на квадратичный детектор. Эквивалентный коэффициент передачи модели определялся как спектральная функция согласованного по полосе пропускания выходного сигнала, прошедшего вышеописанную обработку. Выходной сигнал рецептивного поля формировался как сумма локального среднего значения сигнала в рецептивном поле и разностного сигнала, представляющего собой сигнал ошибки, характеризующей локальную модуляцию.

Для повышения достоверности функциональной модели необходимо учитывать известные закономерности формирования сигнала в ЗС: формирование уровня адаптации для всей

зрительной системы, формирование локальных уровней адаптации, а также известное свойство ЗС понижать уровень внутреннего шума в выходных отделах первичной зрительной коры по сравнению с сетчаткой [2]. Сигналы, формируемые первичным отделом, являются импульсными частотно-модулированными сигналами, начальная фаза которых, длительность и частота модуляции являются случайными величинами, зависящими от пространственно-временного распределения контраста по объекту. В выходных отделах ЗС сигналы являются случайными по амплитуде. Поэтому в качестве модели сигналов в ЗС можно принять модель квазидетерминированного сигнала со случайными амплитудой и начальной фазой. Известно, что оптимальной обработкой таких сигналов является квадратурная обработка с последующим квадратичным детектированием [3].

В связи с этим целью данной работы является анализ функциональной спектральной модели формирования ахроматического изображения объекта ЗС человека [1], дополненной формированием уровня адаптации и квадратурными каналами с последующим квадратичным детектированием.

МЕТОДИКА

В качестве модели отдельной нейронной сети звена первичной фильтрации рассматривалась линейная нейронная сеть с коэффициентом передачи, определяемым выражением [1]

© Ярмошевич Е. И., Михайлова Е. Е., 2007

$$K_{\text{ndr}}(j\omega) = \sum_{k=0}^{17} K_{\text{OTF}}(j\omega) (\exp(j\omega\Delta) - \exp(-j\omega\Delta)) \exp(-2kj\omega\Delta), \quad (1)$$

где $K_{\text{OTF}}(j\omega)$ — оптическая передаточная функция первичного отдела ЗС, Δ — величина, обратная верхней граничной частоте оптической передаточной функции первичного отдела ЗС.

В отличие от модели [1], квадратурные каналы можно сформировать следующим образом: В гребенчатом фильтре (см. рис. 1) с коэффициентом передачи $K_{\text{ndr}}(j\omega)$ можно выделить сигнал, формируемый четвертым (отсчет начинается с нуля) парциальным фильтром, взять его за опорный и с его помощью осуществить разбиение исходного гребенчатого фильтра на два: с четвертого по десятый канал и с первого по третий путем переноса спектров относительно центральной частоты четвертого парциального фильтра. На рисунке 1 показаны: кривая 1 — огибающая коэффициента передачи непрямого канала $K_{\text{ndr}}(j\omega)$, кривая 2 соответствует выражению, стоящему под знаком суммы в (1) для $k=0$, кривая 3 — огибающая четвертого парциального фильтра.

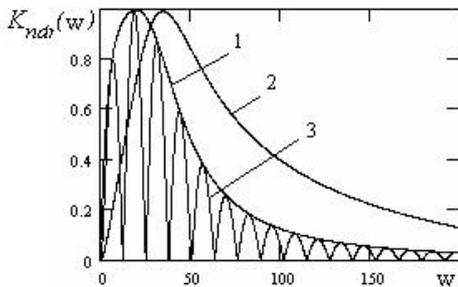


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики коэффициентов передачи фильтров непрямого канала ЗС

Полоса пропускания отдельного парциального фильтра определяет зону пространственно-временной суммации сигнала в рецептивном поле. Моделированием установлено, что суммарные сигналы на выходах полученных фильтров будут находиться в квадратурах (ортогональны). Вышеописанное формирование квадратурных каналов согласуется с известными из нейрофизиологии ЗС фактами, свидетельствующими о том, что высокочастотные сигналы формируются первичной зрительной корой с большими задержками, чем низкочастотные,

и фаза сигнала, сформированного рецептивными полями первичной зрительной коры с ортогональными импульсными характеристиками, имеет минимальные значения в полосе пропускания каждого рецептивного поля коры [4].

В работе анализировались две возможные схемы (см. рис. 2) построения эквивалентного фильтра модели, осуществляющей преобразование сигнала в выходном рецептивном поле ЗС.

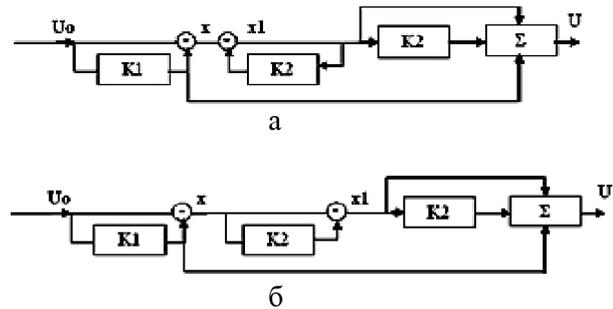


Рис. 2. Возможные схемы формирования эквивалентного коэффициента передачи модели

На рис. 2 приведены две схемы обработки входного сигнала, которые далее будем называть Схема1 (рис. 2а) и Схема2 (рис. 2б). На данных схемах фильтр $K1$ выполняет пространственное усреднение по полю зрения ЗС, и его коэффициент передачи определяется спектральной функцией квадрата функции угловой чувствительности ЗС. В модели принято допущение, что фильтр $K2$ является квазиоптимальным фильтром, согласованным по полосе пропускания, определяемой шириной спектра сигнала, снимаемого с выхода квадратичного детектора с интегратором.

Разностный сигнал x на Схеме1 формируется в зоне суммации рецептивного поля, дополнительно дифференцируется в петле обратной связи фильтра $K2$ и усредняется в прямой цепи фильтром с коэффициентом передачи, равным коэффициенту передачи фильтра $K2$. Этим самым понижается уровень шума, поступившего с выхода квадратичного детектора, а усреднение сигнала $x1$ в прямой цепи дополнительно сглаживает шумы, появившиеся после дифференцирования.

Для Схемы2 сигнал $x1$ формируется в параллельных ветвях следующим образом: в прямой ветви сигнал x передается без изменений, а в параллельной ветви усредняется фильтром $K2$, и полученный сигнал вычитается из x . Далее

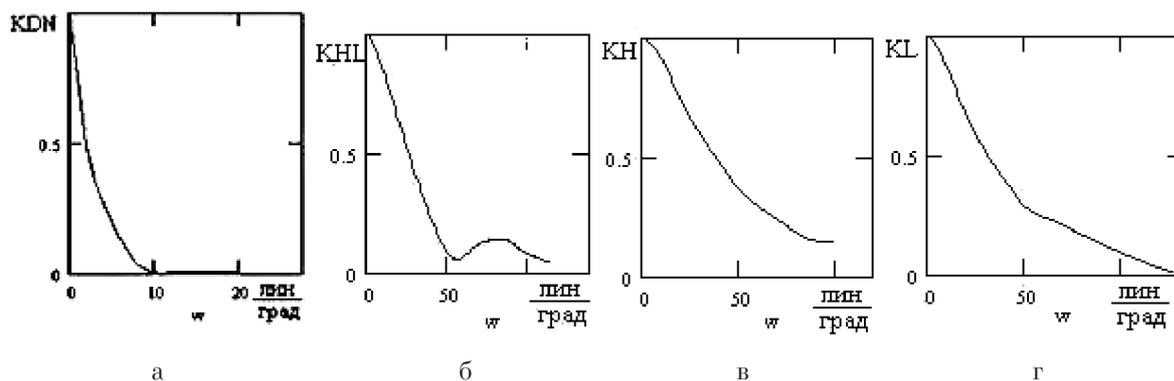


Рис. 3. Модуляционные передаточные функции фильтров $K1$ и $K2$.

сигнал $x1$ усредняется фильтром с коэффициентом передачи, равным коэффициенту передачи фильтра $K2$.

На рис. 3 приведены модуляционные передаточные функции, пересчитанные к пространственным частотам, фильтров $K1$ (рис. 3а) и $K2$ (рис. 3б,в,г). В зависимости от того, какой коэффициент передачи фильтра $K2$ будет использоваться в модели, выбирается коэффициент передачи с модуляционной передаточной функцией KHL , KH или KL . Коэффициент передачи KHL определялся спектром суммарного сигнала на выходе квадратурных каналов. Коэффициенты передачи KH и KL определялись аналогично для отдельных квадратурных каналов.

Оценка качества модели формирования изображения ЗС человека проводилась для вышеописанных схем формирования выходного сигнала.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исходное изображение (см. рис. 4) представлялось матрицей 128×128 элементов разложения с числом отсчетов яркости равным 256 [5].



Рис. 4. Исходное изображение

Анализ качества функционирования обсуждаемой модели проводился по следующим энергетическим показателям:

- математическому ожиданию и среднеквадратическому отклонению коэффициента эффективности, определяемого отношением контрастной яркости изображения объекта к контрастной яркости исходного объекта в каждом элементе разложения [6]. Под контрастной яркостью понимается разность между значением яркости в каждой точке и средним значением яркости по всему изображению;

- коэффициенту взаимной корреляции яркости исходного и модельного изображений;

- среднеквадратическому отклонению яркости модельного изображения.

Энергетические показатели качества модели приведены в таблице, где g , σ_g — математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение коэффициента эффективности; $corr$ — коэффициент взаимной корреляции яркости исходного и модельного изображений; σ_B — среднеквадратическое отклонение яркости модельного изображения.

Определение показателей качества проводилось для следующих исходных данных: математическое ожидание яркости исходного изображения (см. рис. 4) равно 113 условных единиц (усл. ед.), а среднеквадратическое отклонение равно 77,3 усл. ед. Модельные изображения исходного объекта, приведенные на рис. 5 для Схемы1 и на рис. 6 для Схемы2, получены для адаптации ЗС на средний контраст, значение которого равно 0,5. Для таких условий адаптации постоянная времени интегратора принималась равной 0,072 с, а время интегрирования — 0,033 с.

На рис. 5а, 6а приведены изображения для коэффициента передачи KHL , на рис. 5б, 6б — для коэффициента передачи KH , на рис. 5в,

Энергетические показатели качества модели

Эквивалентные коэффициенты передачи											
KHL				KH				KL			
q	σ_q	$corr$	σ_B	q	σ_q	$corr$	σ_B	q	σ_q	$corr$	σ_B
Схема1											
1,04	0,16	1	79,7	1,09	0,38	0,999	83,4	1,01	0,045	1	77,8
Схема2											
0,81	2,17	0,983	68,0	0,78	2,1	0,984	64,9	0,82	2,3	0,982	69,3



Рис. 5. Модельные изображения, полученные с использованием схемы 1



Рис.6. Модельные изображения, полученные с использованием Схемы2.

бв — для коэффициента передачи KL . Сравнивая между собой энергетические показатели качества модельных изображений, можно сделать следующие выводы.

При моделировании по Схеме 1 математическое ожидание коэффициента эффективности больше единицы и отличается от нее до 10 % для всех коэффициентов передачи, среднеквадратическое отклонение коэффициента эффективности меньше единицы. Среднеквадратическое отклонение яркости модельного изображения отличается от среднеквадратического отклонения яркости исходного изображения до 10%, что согласуется с изменениями коэффициента эффективности.

При моделировании по Схеме 2 математическое ожидание коэффициента эффективности меньше единицы и отличается от нее до 20 % для всех коэффициентов передачи. Среднеквадратическое отклонение коэффициента эффективности приблизительно равно 2. Среднеквад-

ратическое отклонение яркости модельного изображения отличается от среднеквадратического отклонения яркости исходного изображения до 20 %. Из этого следует, что формирование изображения объекта ЗС человека по Схеме 1 предпочтительнее чем по Схеме 2. Сравнение модельных изображений, приведенных на рис. 5 и 6, с исходным (см. рис. 4) показывает, что коэффициент взаимной корреляции практически нечувствителен к изменениям контраста на изображениях, в то время как среднее значение коэффициента эффективности и его среднеквадратическое отклонение более чувствительны к изменениям контраста относительно исходного изображения. Отклонение значений q от единицы и σ_B от среднеквадратического отклонения исходного изображения для Схемы 2 изменяются в среднем пропорционально: изменениям q на ~10—20 % соответствуют изменения σ_B также на ~10—20 %. Сравнение качества модельных изображений с исходным

показало, что при моделировании по Схеме1 в отдельных точках может быть усиление яркости, которое приводит к искажению деталей модельного изображения даже при малых отличиях среднего значения и среднеквадратического отклонения коэффициента эффективности от единицы. Вероятно, это связано с осцилляциями коэффициента передачи по ошибке, которые могут быть устранены введением в модель корректирующих звеньев либо минимизацией фазовых искажений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнена оценка качества функциональной модели формирования изображения ЗС человека по математическому ожиданию и среднеквадратическому отклонению коэффициента эффективности и коэффициентов вза-

имной корреляции исходного изображения объекта с модельным для типовых исходных данных дневного зрения. Показано, что оценивать качество изображения по коэффициенту взаимной корреляции недостаточно, так как он практически нечувствителен к малым изменениям контраста на изображениях.

Оценка качества функциональной модели показала, что квадратурная схема обработки сигнала с формированием локальной обратной связи в рецептивном поле (Схема1) является правдоподобной, так как обеспечивает в среднем минимальные отличия модельного изображения от исходного.

*Статья принята к опубликованию
25 октября 2007 г.*