

Обсуждение и компьютерное моделирование нейронной сети, использующей микродвижения глаз для выделения контрастов на изображении

А.К. Ловецкий

Институт проблем передачи информации, Российской академия наук, Москва, Россия

Поступила в редакцию 31.03.2006

Аннотация—Исследуется модель нейронной сети, использующей микродвижения глаз для выделения слабых контрастов на изображении [1]. В работе обсуждается функционирование модели при движениях глаз, содержащих как дрейф, так и корректирующие скачки, причем особое внимание обращено на компенсацию переходных процессов. Проведено компьютерное моделирование. Обсуждаются дальнейшие необходимые этапы работы.

1. ВВЕДЕНИЕ

В [1] была предложена модель нейронной сети, использующей микродвижения глаз для выделения слабых контрастов на изображении. Была проанализирована ее работа при наличии разброса параметров первичных рецепторов. Особое внимание было уделено компенсации переходных процессов (при появлении и исчезновении изображений).

Как известно, естественные движения глаз содержат кроме дрейфа скачки с амплитудой $5 \div 50$ угловых минут. Считается [2, стр. 87], что одно из назначений непроизвольных скачков состоит в коррекции положения сетчаточной проекции точки фиксации взора. Как только проекция вследствие дрейфа начинает выходить за пределы центральной области fovea, корректирующий скачок возвращает ее обратно.

В [1] переходные процессы, связанные со скачками, рассмотрены не были. Им было уделено внимание при компьютерном моделировании в [3, 4]. Однако моделировалась лишь сеть основных каналов (работа дополнительных каналов модели не рассматривалась).

В настоящей работе ставилась задача проанализировать работу как основных, так и дополнительных каналов модели [1] при смене точки фиксации взора и скачках, а также провести полное компьютерное моделирование переходных процессов.

2. СХЕМА КОМПЕНСАЦИИ СДВИГОВ НЕЙРОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

В моделях [1, 4], использующих микродвижения глаз для выделения контрастов на изображении, предполагается наличие компенсатора сдвигов нейронного изображения. На наличие компенсаторов в реальной зрительной системе, по крайней мере для макродвижений глаз, указывается в [5].

Схематически компенсацию можно представить следующим образом: сетчатка (рис. 1) состоит из изолированных друг от друга каналов (1, 2, 3, ...). Все каналы устроены одинаково. На входе — рецептор, далее — элементы, осуществляющие обработку сигнала. С выхода сетчатки сигналы попадают на систему неподвижных контактных пластин и связанную с ней нейронную сеть.

На верхней части рис. 1 точка А сцены проектируется в момент времени $t = t_0$ на третий канал сетчатки и, соответственно, на третий канал нейронной сети. Жирной стрелкой показано направление смещения сетчатки относительно сцены вследствие микродвижений глаз.

На нижней части рисунка в момент времени $t = t_0 + \Delta t$ та же самая точка А сцены вследствие микродвижений глаз проектируется уже на пятый канал сетчатки. Тем не менее выходной сигнал попадает по-прежнему в третий канал нейронной сети.

Таким образом, изображение неподвижной сцены остается неподвижным в нейронной сети независимо от движения сетчаточной проекции. Этот принцип используется при моделировании работы систем с прямым путем информационного потока в сетчатке [6, стр. 45].

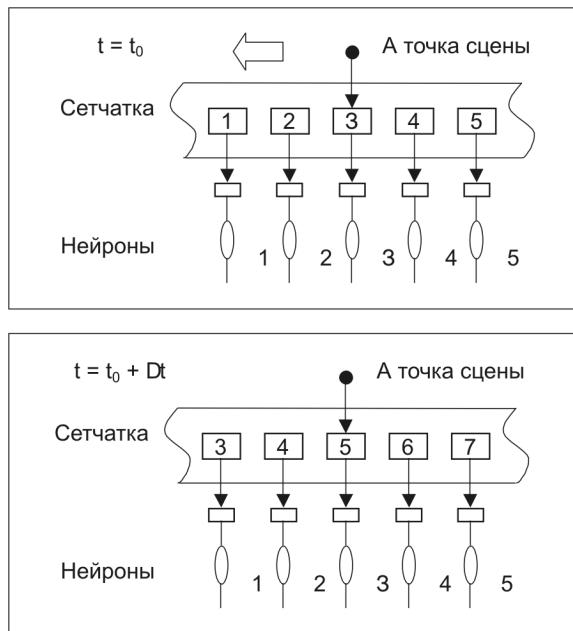


Рис. 1. Схема компенсации сдвигов нейронного изображения.

3. МОДЕЛЬ

Модель была предложена Д.Г. Лебедевым и Г.В. Дорониной в [1]. Для сокращения записи рассматривается одномерный вариант сети. Переход к двумерному случаю не вызывает затруднений. В данном изложении опущены этап логарифмирования сигнала и учет разброса параметров рецепторов, как не имеющие отношения к теме данного исследования.

На рис. 2 показана схема обработки сигнала в сети.

Неподвижное в системе координат OX оптическое изображение задано функцией яркости $E(x)$. На уровне I расположен слой рецепторов (колбочек). Стрелки, направленные вверх, показывают точки считывания яркости рецепторами. От каждого рецептора сигнал поступает в канал обработки информации. Рецепторы и каналы заданы на i -сетке с шагом d . Сетка i и связанные с ней уровни I-III обработки сигнала в сети движутся благодаря микродвижениям глаз. В начальный момент времени начала отсчетов системы координат OX и сеток i и z совмещены. Сетка z связана с пластинами компенсатора микродвижений и имеет тот же шаг, что и сетка i . Ползунки в начальный момент времени занимают на пластинах крайнее левое положение (рис. 2).

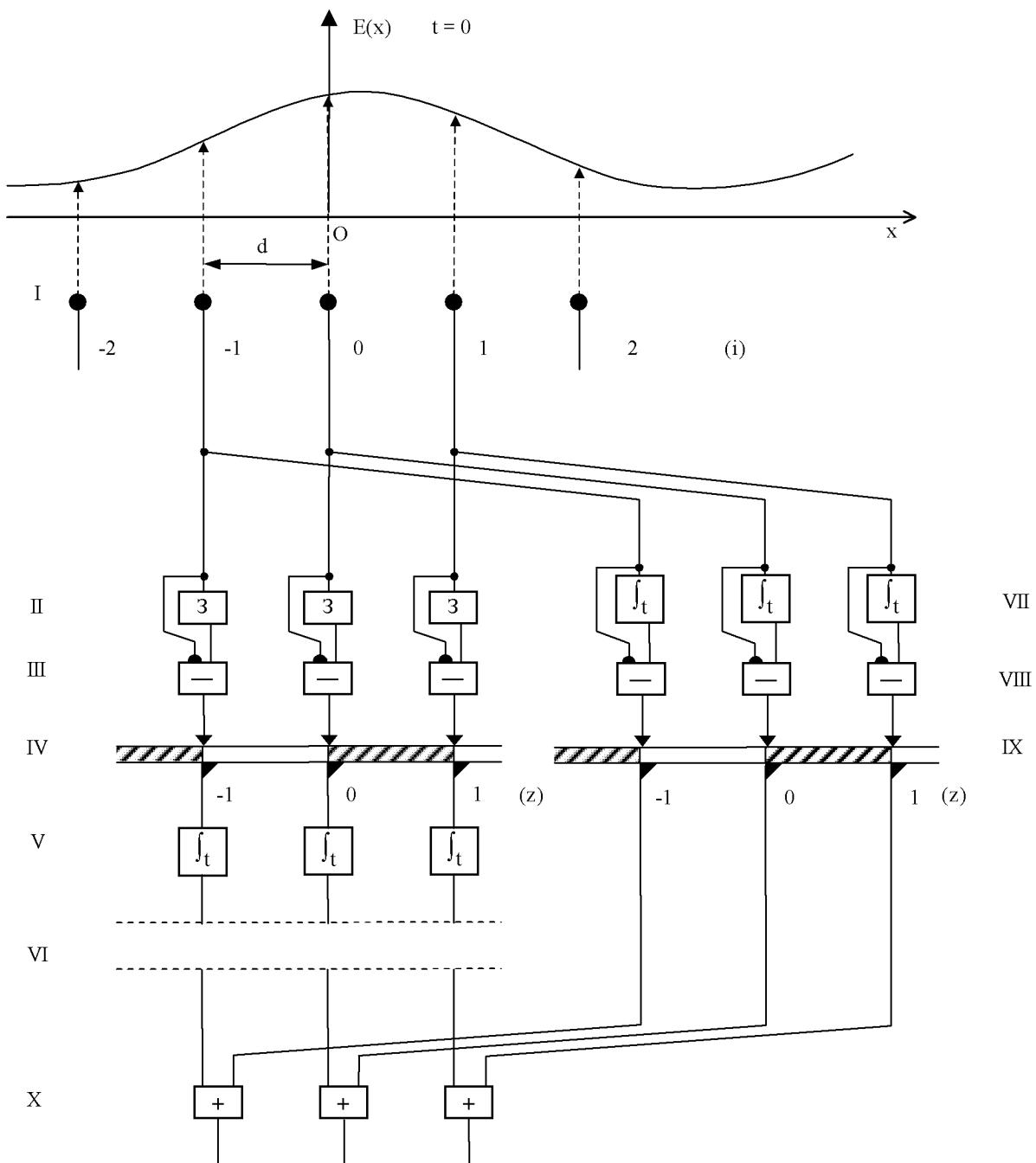


Рис. 2. Схема обработки сигнала в модели: I — преобразование свет/сигнал, II — задержка на время τ_1 , III — получение разностного сигнала, IV — компенсатор микросдвигов нейронного изображения в системе основных каналов, V — накопление сигнала с постоянной времени τ_2 , VI — получение контурного сигнала сетью с пространственными связями, VII — накопление сигнала с постоянной времеми τ_2 , VIII — получение разностного сигнала, VII и VIII — выделение низко-частотной компоненты сигнала фильтром с постоянной времеми τ_2 , IX — компенсатор микросдвигов нейронного изображения в системе дополнительных каналов, X — суммирование сигналов систем основных и дополнительных каналов.

При считывании (I-й уровень) вырабатывается сигнал

$$B_i^I(t) = E(id + r_x(t)),$$

где $r_x(t)$ — функция дрейфа, $r_x(0) = 0$.

Далее производится задержка сигнала на время τ_1 :

$$B_i^{II}(t) = E(id + r_x(t - \tau_1))$$

На III-м уровне получается разность сигналов в точках, отстоящих друг от друга на $r_x(t) - r_x(t - \tau_1)$:

$$B_i^{III}(t) = B_i^I(t) - B_i^{II}(t) = E\left(id + r_x(t)\right) - E\left(\left(id + r_x(t)\right) - (r_x(t) - r_x(t - \tau_1))\right)$$

На IV-м уровне сети расположен компенсатор сдвигов нейронного изображения, принцип действия которого был разобран в п. 2. Пластины компенсатора связаны с z -сеткой. Выходной сигнал можно описать следующим образом:

$$B_z^{IV}(t) = B_{i(z,t)}^{III}(t) = E\left(zd + \left\{\frac{r_x(t)}{d}\right\}d\right) - E\left(zd + \left\{\frac{r_x(t)}{d}\right\}d - (r_x(t) - r_x(t - \tau_1))\right), \quad (1)$$

где фигурные скобки $\{X\}$ обозначают дробную часть X .

На V-м уровне сети производится накопление сигнала с постоянной τ_2 , связанной со временем образования пустого поля [2, стр. 46].

$$\begin{aligned} B_z^V(t) &= \frac{1}{\tau_2} \int_0^t E\left(zd + \left\{\frac{r_x(\xi)}{d}\right\}d\right) \exp \frac{\xi - t}{\tau_2} d\xi - \\ &- \frac{1}{\tau_2} \int_0^t E\left(zd + \left\{\frac{r_x(\xi)}{d}\right\}d - (r_x(\xi) - r_x(\xi - \tau_1))\right) \exp \frac{\xi - t}{\tau_2} d\xi \end{aligned} \quad (2)$$

Участок оптического изображения, лежащий над z -й пластинкой компенсатора, имеет достаточно малую длину (d), соответствующую расстоянию между рецепторами в фoveальной области ($\sim 0,5$ угл. мин [2, стр. 46]). Оптика глаза срезает высокие частоты достаточно эффективно, чтобы предположить, что в пределах участка сетчаточной проекции длиной d значительных изменений яркости быть не может. Используя в качестве оценки среднюю яркость z -го участка оптического изображения (E_z), вместо первого интеграла в (2) можно записать

$$E_z \frac{1}{\tau_2} \int_0^t \exp \frac{\xi - t}{\tau_2} d\xi = E_z \left(1 - \exp \frac{-t}{\tau_2}\right)$$

Второй интеграл в (2) также описывает процесс усреднения сигнала $E(x)$, но здесь участок оптического изображения, с которого считывается сигнал для усреднения, может иметь длину, значительно большую, чем d . Ведь задержка τ_1 сигнала, введенная на II-м уровне сети, приводит к тому, что к моменту касания ползунком z -й пластинки может подойти сигнал, считанный над другой пластинкой. Результаты компьютерного эксперимента [3, 4] показывают, что усреднение, как правило, проводится по области $z \pm 2$, поэтому второй интеграл в (2) можно рассматривать как усреднение E_z по области $z \pm 2$. Таким образом, можно представить выражение (2) в виде

$$B_z^V(t) = (E_z - \bar{E}_z) \left(1 - \exp \frac{-t}{\tau_2}\right) \quad (3)$$

Результат усреднения (\bar{E}_z) зависит от значений функции дрейфа на интервале $[0, t]$, однако нас интересует сам факт вычитания усредненного изображения из исходного изображения, поэтому в обозначении \bar{E}_z эта зависимость не указана.

Разность функции и ее усреднения является одним из наиболее часто используемых определений контура изображения [7]. Следовательно, на выходе V-го уровня формируется контурный сигнал. В работе [4] путем компьютерного моделирования с использованием реальных микродвижений глаз при воздействии яркой точки был получен отклик с выхода V-го уровня сети в виде матрицы весовых коэффициентов, т.е. получена структура рецептивного поля. При этом весовые коэффициенты центрального и периферических элементов матрицы имеют противоположные знаки (антагонистичность центра и периферии рецептивного поля) и уравновешены, так что на гладкой поверхности яркости отклик рецептивного поля близок к нулю.

При разработке модели следует предусмотреть восстановление исходного изображения из его контуров только для того, чтобы показать адекватность стимуляции и ощущения, а также (как будет показано ниже), чтобы показать связь сигналов основных и дополнительных каналов. Блок восстановления помещен на VI-м уровне сети. Подробно процедура восстановления описана в [3].

$$B_z^{VI}(t) \approx E_z \left(1 - \exp \frac{-t}{\tau_2} \right) \quad (4)$$

При предъявлении или устраниении тех или иных неподвижных изображений мы на самом деле не встречаемся с процессом плавного нарастания или убывания яркостей во времени, на которые указывает (4). Значит, следует скомпенсировать нежелательный переходный процесс. В модели предлагается использовать систему дополнительных каналов (уровни VII-IX на рис. 2).

Система дополнительных каналов начинается от рецепторов, т.е. каждый i -ый канал разветвляется на основной канал (II-й и III-й уровни) и дополнительный (VI-й и VII-й уровни). Система дополнительных каналов имеет свой компенсатор микродвижений, управляемый, так же как и компенсатор в системе основных каналов, сигналом $r_x(t)$, благодаря чему компенсаторы действуют синхронно.

На VII-м и VIII-м уровнях расположен фильтр высоких временных частот — производится накопление сигнала с постоянной времени τ_2 , затем берется разность:

$$B_i^{VIII}(t) = E(id + r_x(t)) - \frac{1}{\tau_2} \int_0^t E(id + r_x(\xi)) \exp \frac{\xi - t}{\tau_2} d\xi$$

Далее производится компенсация микродвижений:

$$B_z^{IX}(t) = E \left(zd + \left\{ \frac{r_x(t)}{d} \right\} d \right) - \frac{1}{\tau_2} \int_0^t E \left(zd + \left\{ \frac{r_x(t)}{d} \right\} d - (r_x(t) - r_x(\xi)) \right) \exp \frac{\xi - t}{\tau_2} d\xi \quad (5)$$

Интеграл в (5) берется от функции $E(x)$ вдоль пути, заканчивающегося над z -й пластинкой, с весовой функцией $\exp((\xi - t)/\tau_2)$. Существенный вклад в величину интеграла вносят лишь значения в конце пути, то есть при $\xi \in [t - \alpha\tau_2, t]$, где α — некоторая константа. Можно считать, что $\alpha\tau_2 \leq 3$ сек (т.к. на равномерном фоне вклад интеграла на отрезке $[0, t - 3]$ составит менее 5%). Анализ записей дрейфа [2, стр. 79-81] показывает, что за это время дрейф не выходит за пределы окрестности точки ($x = zd$) диаметром $10 \div 15$ угловых минут (т.е. $20d \div 30d$). Таким

образом, в установившемся режиме выходной сигнал дополнительных каналов представляет собой разность между исходным изображением и его усредненной копией:

$$B_z^{IX}(t) \approx E_z - \bar{\bar{E}}_z \frac{1}{\tau_2} \int_{t-\alpha\tau_2}^t \exp \frac{\xi-t}{\tau_2} d\xi = E_z - \bar{\bar{E}}_z (1 - \exp(-\alpha)) \approx E_z - \bar{\bar{E}}_z$$

где $\bar{\bar{E}}_z$ — результат усреднения E_z более сильного, чем в (3).

В местах контрастных переходов этот сигнал отличен от нуля и при сложении с изображением, восстановленным из контурного (VI-й уровень сети основных каналов), даст локальное усиление контрастов. Подобный эффект присутствует в зрительной системе, поэтому его наличие не вызывает возражений.

В некотором отдалении от контрастов справедливо следующее приближение для выходного сигнала системы дополнительных каналов:

$$B_z^{IX}(t) \approx E_z - E_z \frac{1}{\tau_2} \int_0^t \exp \frac{\xi-t}{\tau_2} d\xi = E_z \exp \frac{-t}{\tau_2} \quad (6)$$

Сложение сигнала (4) с выхода VI-го уровня сети основных каналов и сигнала (5) с выхода IX-го уровня сети дополнительных каналов на гладких участках изображения дает выходной сигнал модели:

$$B_z^{VI}(t) + B_z^{IX}(t) \approx E_z \left(1 - \exp \frac{-t}{\tau_2} \right) + E_z \exp \frac{-t}{\tau_2} = E_z$$

Таким образом, введением системы дополнительных каналов удалось полностью скомпенсировать действие переходного процесса, возникающего в системе основных каналов в случае появления или исчезновения входного изображения.

4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

При моделировании использовались изображения формата 384x256 рецепторов. Каждый рецептор моделировался светочувствительной площадкой 3x3 пикселя. Между рецепторами — зазор в 1 пиксел. Таким образом, межрецепторное расстояние моделировалось 4 пикселями. Рецепторы располагались в псевдо-гексагональном порядке (нечетные строки сдвинуты по горизонтали относительно четных на полрецептора).

Использовалась оцифрованная запись дрейфа. Межрецепторное расстояние полагалось равным 0.5 угл. мин.

Моделирование проводилось при следующих значениях параметров модели:
 τ_1 (время задержки на III-м уровне сети) — 0.02 с;
 τ_2 (параметр накопления сигнала на V-м уровне сети) — 0.5 с;
установившийся режим — 3.6 с.

На рис. 3 показаны результаты компьютерного моделирования работы сети при появлении изображения. Как видно из рис. 3.D, модель выдает сигнал, адекватный входному изображению, сразу же после появления изображения. По прошествии некоторого времени (рис. 3.E, рис. 3.F) заметно подчеркивание контрастов, которое обусловлено дополнительными каналами модели.

На рис. 3.B показан контурное изображение с V-го уровня сети. Нулевой уровень сигнала показан серым фоном, сигнал контрастирован в 8 раз.

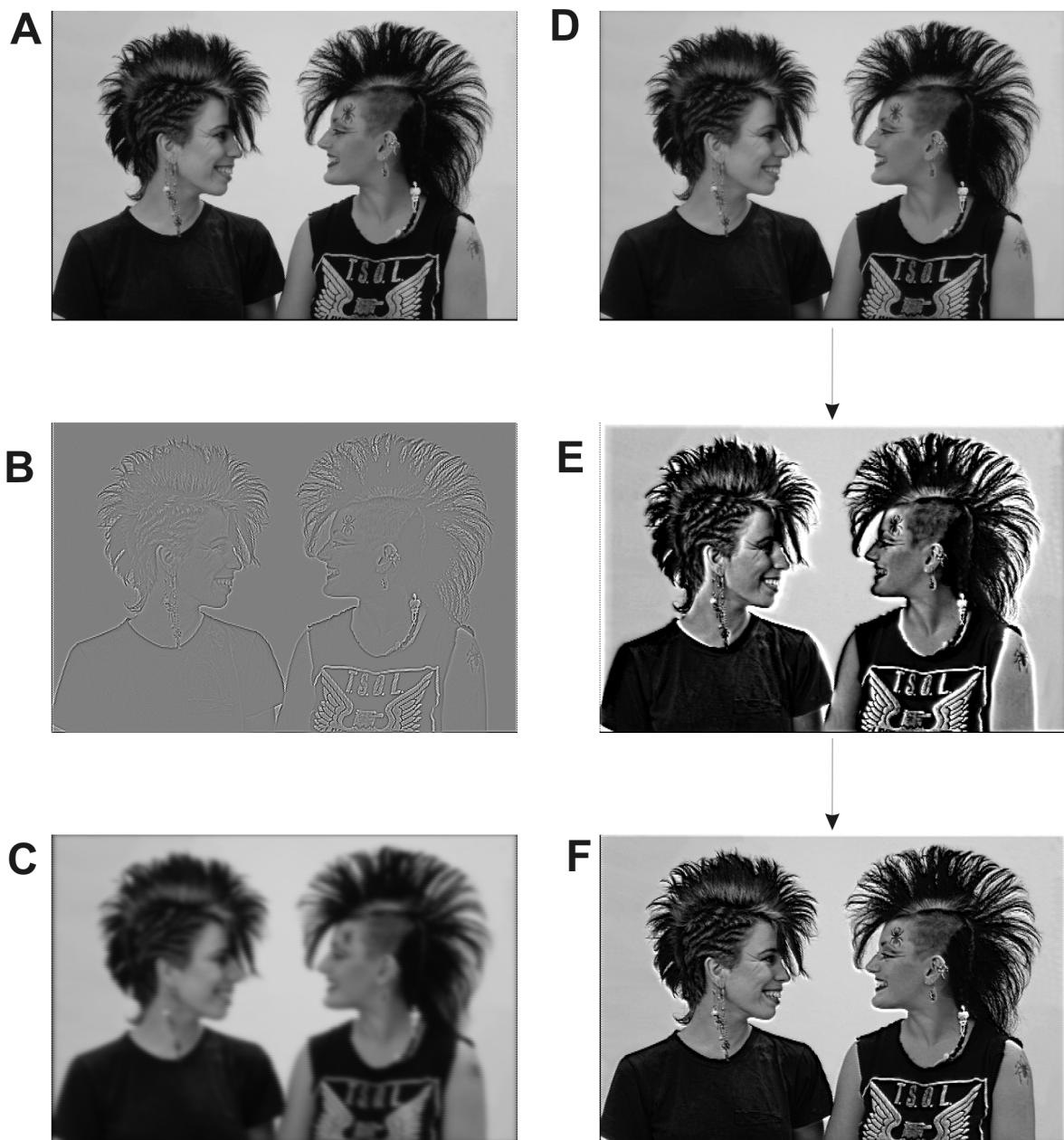


Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования работы сети при появлении изображения А. Входное изображение; В. Контурное изоизображение в основных каналах, V-й уровень сети, установившийся режим; С. Вспомогательное расфокусированное изображение. Нулевой уровень сигнала показан серым фоном, сигнал контрастирован в 8 раз; Д. Выходное изображение модели, 0.1 с после появления входного изображения; Е. Выходной изображение модели, 2.0 с после появления входного изображения; Ф. Выходной изображение модели, установившийся режим

На рис. 3.С показано вспомогательное расфокусированное изображение, используемое при восстановлении яркостного сигнала из контурного (VII-й уровень сети). Для того, чтобы выполнялось соотношение (4) (плавное нарастание и убывание яркостного сигнала во времени), расфокусированное изображение „пропускалось“ через такие же накопители, как расположенные на V-м уровне сети.

5. СМЕНА ТОЧКИ ФИКСАЦИИ ВЗОРА

Предположим, что до момента времени $t = \lambda$ наблюдатель фиксировал взор на точке оптического изображения $E(x)$. В момент времени $t = \lambda$ наблюдатель перемещает (считаем, что мгновенно) точку фиксации взора на величину p , т.е. в точку изображения $E(x - p)$. На схеме рис. 1 это будет выглядеть как сдвиг оптического изображения $E(x)$ на величину p .

Заметим, что в ситуации, когда одно изображение заменяется (мгновенно) другим, происходит аналогичная смена сетчаточной проекции. Поэтому случай смены изображений можно не рассматривать и ограничиться анализом случая смены точки фиксации взора.

Итак, до момента времени λ в системе основных каналов, в соответствии с (2), происходило накопление контурного сигнала изображения $E(x)$. В момент времени λ происходит замена изображения $E(x)$ на $E(x - p)$. Далее, в соответствии с (2), происходит затухание контурного сигнала от $E(x)$ и накопление контурного сигнала от $E(x - p)$. Используя в качестве оценки среднюю яркость z -го участка оптического изображения (E_z) и учитывая то обстоятельство, что за время от λ до $\lambda + \tau_1$ при $\tau_1 \ll \tau_2$ существенного изменения амплитуды накопленного сигнала произойти не может, обратимся к (3) для описания выходного сигнала системы основных каналов в случае смены точки фиксации взора.

$$B_z^V(t) = (E_z - \bar{E}_z) \left(1 - \exp \frac{-\lambda}{\tau_2} \right) \exp \frac{\lambda - t}{\tau_2} + (E_{z-p} - \bar{E}_{z-p}) \left(1 - \exp \frac{\lambda - t}{\tau_2} \right) \quad (7)$$

Аналогично, обратившись к (6), напишем выражение для выходного сигнала системы дополнительных каналов в рассматриваемом случае.

$$B_z^{IX}(t) = \left((E_{z-p} - \bar{E}_{z-p}) - (E_z - \bar{E}_z) \left(1 - \exp \frac{-\lambda}{\tau_2} \right) \right) \exp \frac{\lambda - t}{\tau_2} \quad (8)$$

Выходной сигнал сети в целом получим сложением (7) и (8)

$$B_z^X(t) = B_z^V(t) + B_z^{IX}(t) = E_{z-p} - \bar{E}_{z-p}$$

Т.е. при смене фиксации взора на выходе сети сигнал от „старого“ изображения сразу заменяется на сигнал от „нового“ изображения.

При компьютерном моделировании удобнее и нагляднее рассматривать процесс замены одного входного изображения (рис. 4.А) другим (рис. 4.В). После смены изображений следы от старого изображения остаются заметными в течение 1–1.5 с как в основных, так и в дополнительных каналах (рис. 4.С-Ф). При этом искажения присутствуют только в местах контрастных переходов первого входного изображения; вдали от контрастных переходов модель демонстрирует адекватное восприятие нового изображения сразу после смены.

6. ВЛИЯНИЕ КОРРЕКТИРУЮЩИХ МИКРОСКАЧКОВ

Предположим, что наблюдатель фиксировал взор на точке изображения $E(x)$. Пусть в момент времени $t = \lambda$ происходит корректирующий скачок на величину p .

На схеме рис. 1 это будет выглядеть как смещение системы i -каналов (I-й, II-й, III-й, VII-й и VIII-й уровни сети) на величину скачка p . При этом изображение $E(x)$ остается неподвижным в системе координат OX . Считаем, что зрительная система рассматривает корректирующий скачок как составную часть дрейфа (кстати, как дрейф, так и корректирующие скачки не заметны самому наблюдателю). Поэтому компенсаторы дрейфа (IV-й и IX-й уровни сети)

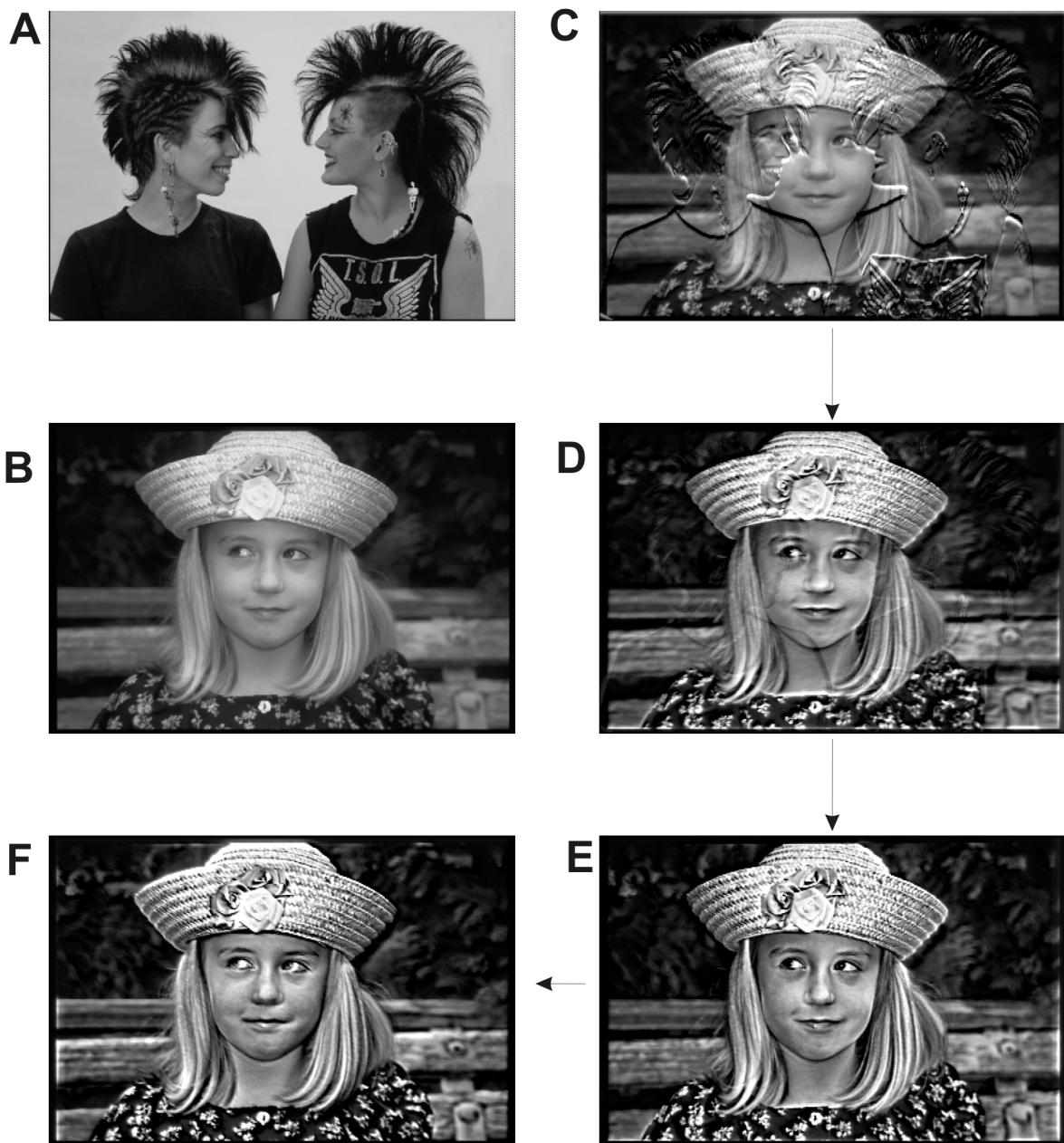


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования работы сети при смене изображений А. Входное изображение 1; В. Входное изображение 2; С. Выходное изображение модели, 0,1 с после смены входного изображения; Д. Выходное изображение модели, 0,8 с после смены входного изображения; Е. Выходное изображение модели, 1,7 с после смены входного изображения; Ф. Выходное изображение модели, установившийся режим

среагируют, как и ранее, на смещение сетчаточной проекции, и нейронное изображение в основных каналах, начиная с IV-го уровня сети, останется неподвижным (с точностью до d , что допустимо).

Конечно, обсуждаемая динамическая модель обеспечивает нормальную работу (выделение локальных контрастов на изображении) при тех микродвижениях сетчаточной проекции, которые присущи так называемому „дрейфу“. Значение задержки τ_1 на II-м уровне сети подбиралось таким образом, чтобы при статистике именно дрейфа выполнялось приближенное

равенство

$$|r_x(t) - r_x(t - \tau_1)| \approx d$$

Вследствие скачка значение модуля разности может резко увеличиться. При этом, как видно из (1), будут сравниваться значения яркости двух точек изображения, отстоящих друг от друга на расстояние, значительно превышающее d . Такое сравнение яркости никак нельзя связать с выделением локального контраста. Его следует квалифицировать как помеху, попадающую в выходной сигнал. К счастью, действие помехи продолжается недолго (от момента времени λ до $\lambda + \tau_1$), и при $\tau_1 \ll \tau_2$ она не сможет существенным образом повлиять на значение выходного сигнала, накопленного до скачка на V-м уровне сети. Далее, при $t > \lambda + \tau_1$ процесс выделения контурного сигнала происходит как обычно, и, таким образом, можно считать, что корректирующий скачок не изменяет значение выходного сигнала системы основных каналов.

Тем не менее при моделировании [3,4] использовались ключевые элементы, которые запирались на время τ_1 сразу после перевода взора, появления или смены изображения (это приводит к незначительному ослаблению сигнала, что не существенно). Это в какой-то мере иллюстрирует предположение Хьюбела о том, что „зрение отключается на период скачка“ [6, стр. 87].

На выходе системы дополнительных каналов после скачка имеем:

$$\begin{aligned} B_z^{IX}(t) &= E \left(zd + \left\{ \frac{r_x(t) + p}{d} \right\} d \right) - \\ &- \frac{1}{\tau_2} \int_0^{\lambda} E \left(zd + \left\{ \frac{r_x(t) + p}{d} \right\} d - (r_x(t) + p - r_x(\xi)) \right) \exp \frac{\xi - t}{\tau_2} d\xi - \\ &- \frac{1}{\tau_2} \int_{\lambda}^t E \left(zd + \left\{ \frac{r_x(t) + p}{d} \right\} d - (r_x(t) - r_x(\xi)) \right) \exp \frac{\xi - t}{\tau_2} d\xi = \\ &= E \left(zd + \left\{ \frac{r_x(t) + p}{d} \right\} d \right) - \\ &- \frac{1}{\tau_2} \int_0^t E \left(zd + \left\{ \frac{r_x(t) + p}{d} \right\} d - (r_x(t) - r_x(\xi)) \right) \exp \frac{\xi - t}{\tau_2} d\xi + \\ &+ \frac{1}{\tau_2} \exp \frac{\lambda - t}{\tau_2} \int_0^{\lambda} (E(x_1(z, t, \xi)) - E(x_1(z, t, \xi) - p)) \exp \frac{\xi - \lambda}{\tau_2} d\xi, \quad (9) \end{aligned}$$

где

$$x_1(z, t, \xi) = zd + \left\{ \frac{r_x(t) + p}{d} \right\} d - (r_x(t) - r_x(\xi))$$

Сравнивая (5) и (9), мы видим, что к сигналу дополнительных каналов после скачка добавляется медленно убывающая помеха (последнее слагаемое в (9)) в виде разности усреднений изображения $E(x)$ вдоль путей, отстоящих друг от друга на величину p микроскачка, т.е. на десятки межрецепторных расстояний. Рассмотрим, к примеру, наиболее чувствительный к искажениям случай, когда точки $x_1(z, t, t)$ и $(x_1(z, t, t) - p)$ расположены на гладком участке изображения, то есть в некотором удалении от контрастов. Тогда сразу после скачка ($t > \lambda$, $t \rightarrow \lambda$) выходной сигнал системы будет сопровождаться помехой в виде разности изображения $E(x)$ и „смещенного“ изображения $E(x - p)$.

Эту помеху нельзя устраниить отключением системы дополнительных каналов на время ее действия, как это было сделано для системы основных каналов. Время ее затухания гораздо больше, так как связано с постоянной времени $\tau_2 = 0.5$ с.



Рис. 5. Результаты компьютерного моделирования работы сети при микроскачке А. Входное изображение 1; В. Выходное изображение модели, 0.1 с после микроскачка

Поэтому сигнал (9) от дополнительных каналов уже никак нельзя считать компенсирующим переходный процесс, как это было в (5).

Вывод о неработоспособности модели при наличии скачков в естественных движениях глаз подтверждается и компьютерным моделированием (рис. 5)

7. ВЫВОДЫ

Анализ и компьютерное моделирование работы нейронной сети, предложенной в [1], включая основные и дополнительные каналы, показали:

1. Предъявление изображения вызывает на выходе модели изображение, адекватное входному.
2. При смене точки фиксации взора или смене одного изображения другим переходной процесс частично компенсируется, хотя следы от контрастных переходов „старого“ изображения сохраняются довольно долго.
3. При наличии в естественных движениях глаз корректирующих скачков модель оказывается неработоспособной.

При дальнейшем развитии модели желательно реализовать ее нормальную работу во всех перечисленных выше условиях. Для этого в первую очередь требуется усовершенствование системы дополнительных каналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев Д.Г., Доронина Г.В., Модель нейронной сети, выделяющей слабые контрасты на изображении при наличии разброса параметров первичных рецепторов. Биофизика, 1995. Т. 40. Вып. 3. С. 617.
2. Ярбус А.Л., Роль движений глаз в процессе зрения. М.: Наука, 1965.
3. Доронина Г.В., Лебедев Д.Г., Компьютерное моделирование работы нейронной сети, выделяющей контрасты на изображении. Биофизика, 1996. Т. 41. Вып. 6. С. 1317.
4. Лебедев Д.Г., Сафонов К.В., Выделение контрастов на изображении зрительной системой с моносинаптической ON-, OFF-сетчаткой. Сенсорные системы, 1998. Т. 12. Вып. 3. С. 343.
5. Пигарев И.Н., Нейронная сеть зрительной системы пространственной локализации объектов. В кн.: Интеллектуальные процессы и их моделирование. Информационные сети. М.: ИППИ, 1994. С. 97.
6. Хьюбел Д., Глаз, мозг, зрение. М.: Мир, 1990.
7. Марр Д., Зрение. Информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов. М.: Радио и связь, 1987.