

УДК 612.8

ЭФФЕКТ КАЖУЩЕГОСЯ РАЗМЫТИЯ РЕЗКИХ И ОБОСТРЕНИЯ РАЗМЫТЫХ ГРАНИЦ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

© 2004 г. Н. Н. Красильников*, доктор техн. наук; О. И. Красильникова*, канд. техн. наук;
Ю. Е. Шелепин**, доктор мед. наук

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург

** Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург

Проведен теоретический анализ феномена увеличения воспринимаемой резкости сильно размытых границ и размытия резких границ, обусловленного движением наблюдаемых объектов. Показано, что этот феномен вызван запаздыванием сигналов торможения относительно сигналов возбуждения и насыщением сигналов при их передаче по магно-каналам зрительной системы. Развита функциональная модель сетчатки глаз. Результаты расчетов, выполненных с использованием модели, хорошо совпадают с экспериментальными данными. Модель позволила предсказать, а затем экспериментально обнаружить два новых феномена.

Коды OCIS: 330.0330.

Поступила в редакцию 19.04.2004.

Введение

Хорошо известно, что при наблюдении движущегося объекта его резкие границы воспринимаются зрителем размытыми, т. е. менее резкими, чем на самом деле. При этом степень наблюдаемого размытия растёт с увеличением скорости движения объекта, что обусловлено инерционностью зрительной системы человека. Однако менее известным является тот экспериментально наблюдаемый факт, что при наблюдении движущихся объектов, имеющих изначально размытые границы, воспринимаемая резкость этих границ возрастает, т. е. изначально размытые границы воспринимаются зрителем как более резкие, чем на самом деле. Этому, казалось бы, парадоксальному феномену в последнее время был посвящён ряд экспериментальных исследований, в результате которых были разработаны эмпирические модели для объяснения этого феномена [1–6]. Недостатком этих моделей является то, что в них даже не делаются попытки описания реальных процессов обработки сигналов в реальных нейронных структурах сетчатки глаз. По существу эти модели представляют собой системы аппроксимирующих формул. Так, например, в одной из наиболее удачных моделей, которая описана в [6], для объяснения наблюдаемого феномена просто постулируется, что динамический диапазон нейронных путей, по которым передаются сигналы от движущейся границы, по терминологии авторов "the semi-saturation contrast", обратно пропорциона-

лен скорости движения границы. При этом не выдвигается каких-либо предположений, почему динамический диапазон нейронных путей зависит непосредственно от скорости движения границы. Такой подход вполне допустим лишь на ранних стадиях исследований, так как он не раскрывает механизмов, лежащих в основе указанного феномена, и не позволяет прогнозировать восприятие изображений движущихся объектов в широком диапазоне изменения условий наблюдения. Вместе с тем, такая необходимость существует, например, при разработке новых алгоритмов сжатия движущихся изображений с целью получения более высоких степеней компрессии для использования в цифровом телевидении, цифровом видео, в системах виртуальной реальности.

Цель публикуемой работы состояла в разработке модели, которая в отличие от существующих моделей не являлась бы набором аппроксимирующих формул, а описывала бы реальные процессы, протекающие в нейронных структурах зрительной системы человека, и на этой базе позволила бы количественно описать рассматриваемый феномен.

Процессы, протекающие в зрительной системе человека при наблюдении движущихся объектов

Проведённые нами исследования описанного феномена привели к заключению, что в его основе лежат следующие свойства зрительной системы человека:

1) временная задержка сигналов торможения относительно сигналов возбуждения, имеющая место в сетчатке;

2) насыщение сигналов, возникающее вследствие ограниченности динамического диапазона нейронных путей, по которым они передаются в высшие отделы зрительной системы.

Ни одно из этих свойств, взятых по отдельности, не объясняет полностью данный феномен, рассмотрение их в совокупности приводит к пониманию целого ряда особенностей зрительного восприятия. Каждое из этих свойств играет важную роль в работе первичных отделов зрительной системы и проявляет себя в различных эффектах.

Так, временная задержка сигналов торможения относительно сигналов возбуждения является причиной эффекта Брока-Зульцера [7-9], который, как известно, состоит в том, что при увеличении длительности вспышки, интенсивность которой постоянна, ее видимая яркость вначале возрастает, а затем, пройдя максимум, начинает уменьшаться, стремясь к некоторому стационарному уровню. Механизм эффекта заключается в том, что в момент вспышки сигнал, формируемый в зрительной системе, определяется только процессами возбуждения и лишь с некоторой задержкой времени формируется сигнал торможения. Этот сигнал торможения, вычитаясь из сигнала возбуждения, снижает уровень результирующего сигнала, поступающего в высшие отделы зрительной системы, и тем самым снижает уровень воспринимаемой зрителем яркости [9].

Механизм влияния скорости движения объекта на восприятие зрителем резкости его изначально размытых границ более сложен. Рассмотрим его более подробно. При проекции изображения на сетчатку глаза в сетчатке возникает пространственное распределение возбуждений, которое называют нейронным изображением. Движение проекции объекта по сетчатке глаза вследствие инерционности процессов, протекающих в нейронных структурах зрительной системы, в том числе в рецепторах сетчатки, приводит к увеличению размытия границ в нейронном изображении. Это размытие границ будет тем больше, чем выше скорость движения. Поскольку при движении проекции границы объекта по сетчатке глаза она накрывает все новые участки (рецепторы), то для этих участков сетчатки появление проекции границы объекта эквивалентно возникновению вспышки, если объект светлее фона, или "отрицательной вспышки", если он темнее фона. По этой причине появление проекции на этих участках сетчатки вызывает своего рода "местный эффект Брока-Зульцера", т. е. вызывает "всплеск" сигнала, увеличивая тем самым наблюдаемую крутизну фронта размытой границы и даже создавая небольшой выброс.

Важным моментом при рассмотрении описываемых процессов является зависимость степени участия центральной и периферийной зон сетчатки в восприятии резкости границ при наблюдении движущегося объекта от его скорости и от размеров их зоны изначального размытия. Так, при наблюдении сравнительно медленно движущихся объектов с малыми зонами размытия границ полезная информация, по которой зрительная система может судить о резкости границ, поступает только от центральной зоны сетчатки, в которой рецептивные поля имеют малые размеры, и на зону размытия приходится более одного рецептивного поля. В этом случае, как показывают эксперименты и математический анализ процессов, протекающих в зрительной системе, увеличение скорости движения объекта приводит к увеличению воспринимаемой зоны размытия его резких границ вследствие инерции нейронов сетчатки. Здесь речь идет об изначальных зонах размытия, которые не превышают $10'$. В этом случае сигналы, поступающие от периферии сетчатки, не содержат информации, по которой можно было бы судить о величине зон размытия, поскольку размеры рецептивных полей существенно превышают размеры зон и единственным источником сигнала, по которому осуществляется определение их протяженности, является центральная область сетчатки.

При наблюдении быстро движущихся объектов, изначальная зона размытия границ которых велика, полезная информация, по которой зрительная система может судить о резкости границ, поступает теперь уже не только от центральной зоны сетчатки, но также и от ее периферии. Так происходит потому, что зона размытия границы теперь настолько велика, что на нее приходится более одного рецептивного поля не только в центральной, но и в периферийной части сетчатки. Данный факт является ключевым в понимании того, что в оценке протяженности зоны размытия границы в этом случае принимает также участие и периферия сетчатки. Увеличение скорости движения в силу инерции нейронов сетчатки приводит к дальнейшему увеличению зоны размытия и, как следствие, к дальнейшему увеличению той площади сетчатки, рецептивные поля которой участвуют в процессе оценки протяженности зоны размытия. Но по мере удаления от центра сетчатки к ее периферии, как известно, изменяются свойства проводящих путей, по которым сигналы передаются от сетчатки в высшие отделы зрительной системы. Проводящие пути в центре сетчатки сформированы в основном из мелких клеток (парво), динамический диапазон которых велик, и поэтому они не вносят амплитудных ограничений в передаваемые сигналы. По

мере удаления от центра сетчатки к периферии проводящие пути из мелких клеток заменяются проводящими путями из крупных клеток (магно), динамический диапазон которых существенно меньше, и поэтому они вносят весьма заметные амплитудные ограничения в передаваемые сигналы. Так, по данным, которые приводятся в [6], различие в динамических диапазонах парво- и магно-проводящих путей может достигать 20 раз. Вследствие этого ограничения воспринимаемая протяженность зоны размытия сокращается. Таким образом, при увеличении скорости движения объектов с сильно размытыми границами в разрешении границ все больше вовлекается периферия сетчатки, которая посылает искаженную информацию о зонах размытия вследствие амплитудного ограничения сигналов.

Поскольку результирующий сигнал, по которому зрительная система может судить о величине зоны размытия границы, складывается из сигналов, поступающих от центральной и периферийной областей сетчатки, то при увеличении скорости движения сигналы от периферии будут приобретать все больший вес. Следовательно, все большую роль будет играть ограничение сигналов в проводящих путях зрительной системы, приводящее к уменьшению воспринимаемой зрителем зоны размытия.

Совместное воздействие двух описанных выше факторов приводит к увеличению кажущейся резкости движущейся размытой границы, наблюдаемой в опытах. Однако эффект возрастания воспринимаемой резкости границ вследствие движения объекта проявляется только в случае, если изначальная зона размытия превышает некоторое критическое значение, величина которого составляет около $10'$. Если это условие не выполняется, то эффект отсутствует.

Математический анализ процессов, протекающих в зрительной системе при наблюдении движущихся объектов

Несмотря на то что математический анализ исследуемого эффекта весьма громоздок, тем не

менее мы считаем необходимым привести его основные этапы, по которым читатель может легко проследить весь путь выводов. В противном случае ряд сделанных заключений оказался бы бездоказательным. Переходя к рассмотрению процессов, протекающих в зрительной системе, пренебрежем инерцией нейронных сетей, ответственных за формирование сигналов торможения. Как показали проведенные оценки, это мало сказывается на конечном результате. Будем также считать, что феномен наблюдается в условиях, когда сетчатка адаптирована к средней освещенности. На рис. 1 приведена упрощенная функциональная модель первичных отделов зрительной системы, ответственных за возникновение рассматриваемого феномена. В этой схеме представлены:

звено 1, посредством которого учитывается инерционность нейронных сетей, главным образом, рецепторов сетчатки и связанных с ними биполярных клеток;

звено 2, учитывающее ослабление сигнала при формировании сигнала торможения;

звено 3 задержки сигнала торможения относительно сигнала возбуждения на время τ при их прохождении через амакриновые клетки;

алгебраический сумматор сигналов возбуждения $e_{\text{exl}}(x, y, t)$ и торможения $e_{\text{inh}}(x, y, t)$, моделирующий взаимодействие сигналов возбуждения и торможения, которое имеет место в системе амакриновых клеток при их передаче на ганглиозные клетки;

звено 4, посредством которого учитывается ограниченность динамического диапазона проводящих нейронных путей зрительной системы, которая обусловлена в основном проводящими путями из крупных клеток (магно).

Рассмотрим теперь более подробно преобразования сигналов в сетчатке, приводящие к возникновению эффекта обострения изначальной размытой границы движущегося объекта.

Согласно [10–12] сигнал $e_b(x, y, t)$, возникающий на выходах биполярных клеток в условиях наблюдения неподвижных объектов, пропорциона-

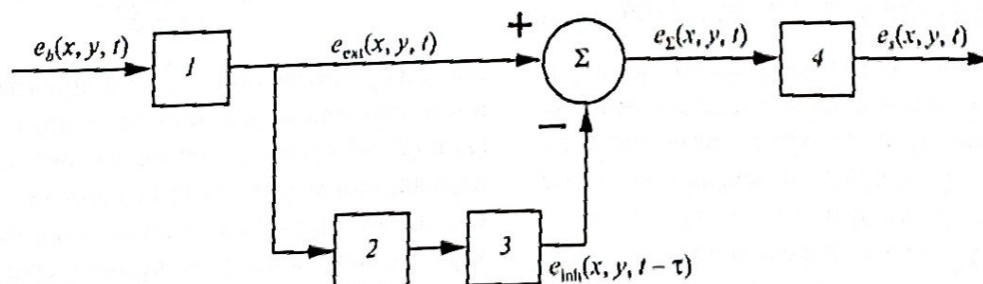


Рис. 1. Упрощенная функциональная модель первичных отделов зрительной системы (пояснения в тексте).

лен распределению контрастов на сетчатке и равен

$$e_b(x, y, t) = c_c \frac{E(x, y, t) - \bar{E}}{\bar{E}},$$

где $\bar{E}$ – средняя освещенность сетчатки, x и y – координаты, t – время, c_c – коэффициент, согласующий размерности. Обозначая приращение освещенности в проекции на сетчатке относительно его среднего значения $\bar{E}$ через $\Delta E(x, y, t)$, запишем это выражение в более удобном виде

$$e_b(x, y, t) = c_c K(x, y, t), \quad (1)$$

где $K(x, y, t) = \Delta E(x, y, t) / \bar{E}$ имеет смысл локального контраста, распределение которого по сетчатке определяется распределением освещенности, создаваемым проекцией наблюдаемого изображения. При наблюдении движущихся объектов необходимо учесть инерционность нейронных сетей, о которой говорилось выше (звено 1 на рис. 1), путем свертки сигнала $e_b(x, y, t)$ с импульсной функцией $h(t)$, характеризующей эту инерционность, при этом сигнал возбуждения

(2)

Импульсная функция $h(t)$ может быть аппроксимирована экспонентой

$$h(t) = \frac{1}{T_b} \exp(-t/T_b), \quad (3)$$

где T_b – постоянная времени зрительной системы.

Согласно функциональной схеме, сигнал торможения будет запаздывать относительно сигнала возбуждения на время τ и, кроме того, он будет меньше сигнала возбуждения за счет имеющего место ослабления (звено 2 на рис. 1), что учтем посредством введения коэффициента a :

$$e_{inh}(x, y, t) = a e_{ext}(x, y, t - \tau). \quad (4)$$

При этом сигнал, формируемый в результате взаимодействия сигналов возбуждения и торможения, которым определяется возбуждение ганглиозной клетки, определится как

$$e_{\Sigma}(x, y, t) = e_{ext}(x, y, t) - a e_{inh}(x, y, t - \tau). \quad (5)$$

При передаче этого сигнала в высшие отделы зрительной системы оказываются задействованными как парво-, так и магно-пути. В то время как первые имеют большой динамический диапазон, динамический диапазон вторых существенно меньше, что приводит к эффекту насыщения передаваемых сигналов. Если результирующее размытие границ в нейронном изображении невелико, то информация о протяженности их зон размытия, как уже отмечалось, посту-

пает от центральной области фovea сетчатки, поскольку только в этой области плотность рецепторов достаточна для разрешения этих зон, т. е. на каждую зону размытия приходится не менее двух рецепторов. Так как в центральной области в основном задействованы парво-пути, то в этом случае сигналы передаются практически без насыщений (ограничений). Если же результирующие зоны размытия велики, то в передаче информации о них принимают участие не только рецептивные поля, расположенные в центральной части фovea, но и рецептивные поля, удаленные от центра. Это приводит к тому, что передача сигналов начинает обслуживаться не только парво-путями, но также и магно-путями, а это, в свою очередь приводит к ограничению тем большей части сигналов, чем больше парво-путей задействовано. Таким образом, степень ограничения сигналов оказывается функцией протяженности результирующей зоны размытия границ движущегося объекта в нейронном изображении, которая в первом приближении может быть представлена как

$$\Delta_V = \sqrt{\Delta_0^2 + (VT_b)^2}, \quad (6)$$

где Δ_0 – начальное размытие, VT_b – дополнительное размытие, обусловленное проявлением инерции зрения вследствие движения границы.

Поскольку в общем случае зрительная система при определении степени размытия границы использует сигналы, поступающие как по парво-, так и по магно-путям, введем в рассмотрение некий средний сигнал $e_s(x, y, t)$, который является взвешенной суммой первых и вторых сигналов. Этот средний сигнал связан с сигналами $e_{\Sigma}(x, y, t)$ через функцию, которая учитывает имеющее место ограничение динамического диапазона части сигналов,

$$e_s(x, y, t) = \frac{(1 - a - s)e_{\Sigma}(x, y, t)}{(1 - a)[|e_{\Sigma}(x, y, t)| + s]}, \quad (7)$$

где s – параметр, определяющий степень ограничения сигнала. Зависимость параметра s от результирующей зоны размытия аппроксимирована выражением

$$s = \frac{s_0}{1 + c_s \Delta_V^2}, \quad (8)$$

где s_0 и c_s – постоянные коэффициенты. Правомерность использования аппроксимирующих формул (7) и (8) обусловлена двумя обстоятельствами. Во-первых, они отражают суть протекающих процессов, во-вторых, их использование обеспечивает хорошее совпадение результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными. Первой особенностью ограничивающей функции является то, что она ограничивает как положительные, так и от-

рицательные значения сигнала. Вторая особенность заключается в том, что степень ограничения зависит от протяженности результирующей зоны размытия Δ_r , увеличиваясь по мере ее роста за счет дополнительного размытия, обусловленного проявлением инерции зрения при движении границы. Таким образом, степень ограничения сигнала в конечном итоге, как это следует из формул (6)–(8), зависит от скорости движения границы.

Вывод формул для расчета сигнала, определяющего профиль распределения воспринимаемой яркости в направлении границ

Рассмотрим процессы, протекающие в сетчатке в случае наблюдения движущейся границы. С этой целью выберем на сетчатке точку с координатами $x = 0, y = 0$ и рассмотрим случай, когда по сетчатке со скоростью V перемещается проекция решетки, состоящей из светлых и темных полос в направлении, указанном стрелкой на рис. 2а. Примем, что изменения освещенности на границах полос этой решетки описываются синусоидальным законом. Для рассматриваемой точки сетчатки прохождение через нее последовательности светлых и темных полос эквивалентно последовательности возникающих во времени импульсов, длительность которых равна длительности прохождения этих полос через данную точку сетчатки, при этом зависимость изменения освещенности выбранной точки от координаты x может быть пересчитана в зависимость изменения освещенности от времени t по формуле

$$t = x/V. \quad (9)$$

Обозначая через X пространственный период решетки, а через αX – протяженность зон размытия границ, где α – относительное значение протяженности зоны размытости, запишем выражения для временного периода прохождения полос решетки через рассматриваемую точку на сетчатке T , а также для длительности фронтов (зон размытия) возникающих импульсов T_F

$$T = X/V, \quad (10)$$

$$T_F = \alpha X/4V. \quad (11)$$

Отметим, что максимальное значение относительной протяженности зоны размытия границ может составлять 1, т. е. 100%, при этом распределение яркости в решетке будет описываться синусоидальным законом. Для определения зависимости от времени сигнала $e_b(t)$ в явном виде необходимо использовать кусочное описание функции, представляющей изменения локального контраста $K(x, y, t)$ изображе-

ния движущихся полос на сетчатке. В рассматриваемом случае выражение для описания этой зависимости, показанной кривой 1 на рис. 2б, имеет вид

$$e_b(t) = e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) + e_4(t) + e_5(t) + e_6(t) + e_7(t), \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} e_1(t) &= c_c K \sin(\pi t / 2T_F), \\ e_2(t) &= c_c K, \\ e_3(t) &= c_c K \cos\left(\frac{\pi(t - T/2 + T_F)}{2T_F}\right), \\ e_4(t) &= -c_c K, \\ e_5(t) &= c_c K \cos\left(\frac{\pi(t - T + T_F)}{2T_F}\right), \\ e_6(t) &= c_c K, \\ e_7(t) &= c_c K \cos\left(\frac{\pi(t - 3T/2 + T_F)}{2T_F}\right). \end{aligned} \quad (13)$$

В этих формулах через $K = \Delta E/\bar{E}$ обозначен контраст Майкельсона, определяемый перепадом освещенности между чередующимися светлыми и темными полосами, максимальное значение которого может составлять 1. С использованием формул (2), (3), (12) и (13) было получено выражение для сигнала e_{ex} , которое ввиду его громоздкости приведено в Приложении.

По выведенным формулам были рассчитаны профили распределения сигналов e_s , передаваемых от сетчатки при прохождении по ней проекции движущихся полос в высшие отделы зрительной системы. Один из этих профилей показан на рис. 2б кривой 2. На этом же рисунке показан профиль распределения сигнала e_b , который, как это следует из формулы (1), пропорционален распределению локальных контрастов проекций движущихся полос на сетчатку. Обе зависимости на рисунке приведены к одному масштабу. Обратный переход от найденных зависимостей сигналов от времени t к зависимостям этих сигналов от пространственной координаты x очевиден и осуществляется путем умножения координаты t на скорость движения проекции полос по сетчатке V .

Из рассмотрения рисунка видно, что крутизна нарастания результирующего сигнала e_s , которым и определяется в конечном итоге распределение визуальной яркости в наблюдаемом изображении движущихся полос, существенно больше крутизны нарастания сигнала e_b , пропорционального распределению освещенности на сетчатке. Из этого следует, что визуально наблюдаемая зона размытия световых границ для рассматриваемого случая меньше

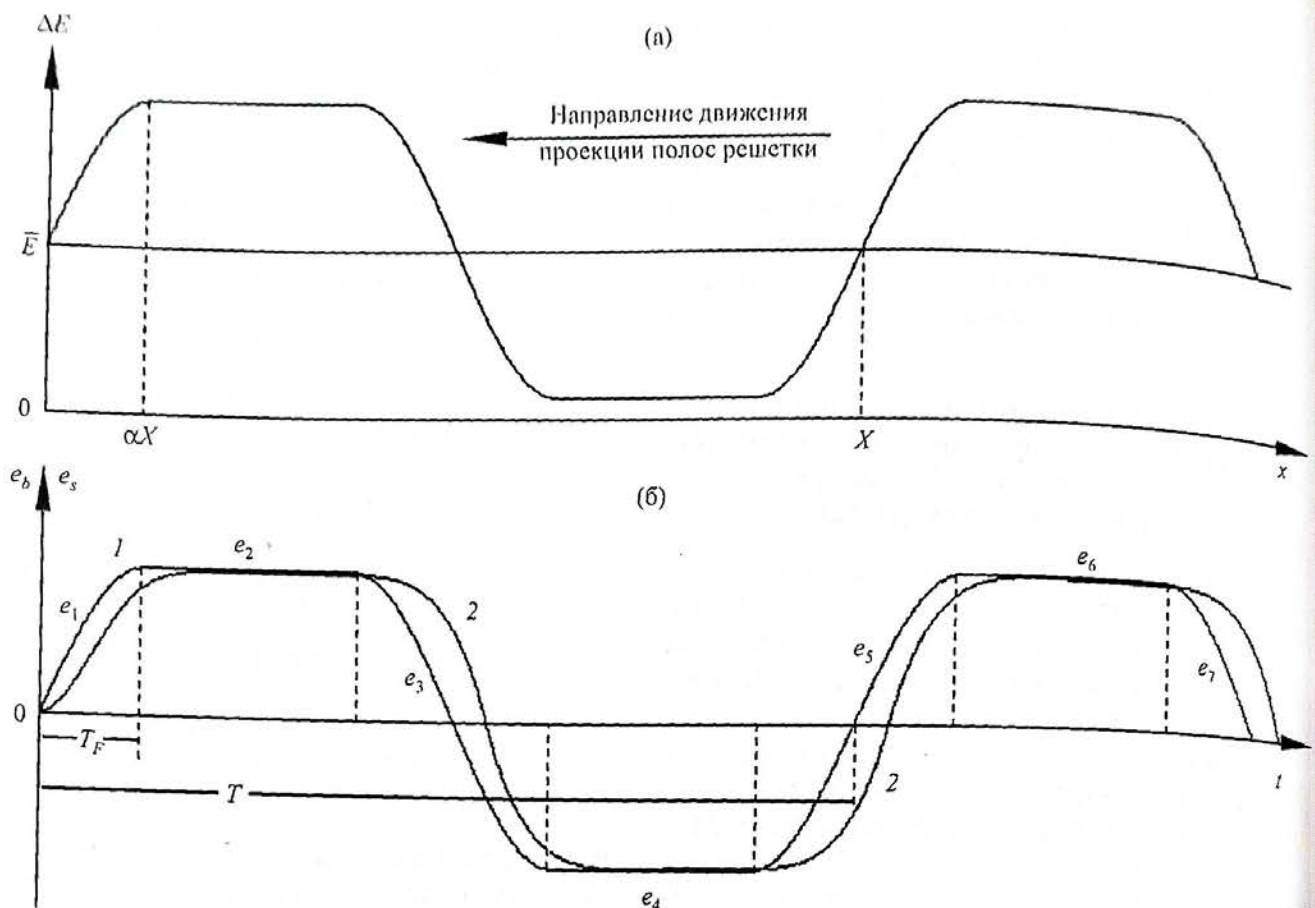


Рис. 2. а – распределение освещенности на сетчатке, создаваемое проекцией движущейся решетки; б – профили возникающих в сетчатке сигналов e_b и e_s , вызванных проекцией движущейся решетки. Графики приведены для случая, когда период решетки $X = 0,5$ пер/град, относительные зоны изначального размытия $\alpha = 0,5$, угловая скорость движения $V = 8$ град/с, контраст Майкельсона $K = 0,3$. Вертикальными штриховыми линиями разграничены интервалы времени, характеризующиеся различными законами изменения сигнала e_b .

той, которая имеет место в действительности. В справедливости этого утверждения легко убедиться, анализируя рис. 2.

Зависимость степени воспринимаемого обострения (размытия) движущейся размытой границы от угловой скорости движения

Конечной целью проведенного математического анализа процессов, протекающих в зрительной системе, является количественная проверка выдвинутой нами гипотезы, объясняющей феномен увеличения воспринимаемого обострения (размытия) движущейся размытой границы путем сравнения расчетных данных с экспериментальными данными. При сопоставлении результатов, полученных расчетным путем на основе разработанной нами модели, с экспериментальными данными, заимствованными из [6], мы встретились с проблемой высокой погрешности измерений, проведенных в этой работе.

При расчетах зон размытия границ неподвижного Δ_0 и движущегося Δ_v объектов, воспринимае-

мых зрителем, мы исходили из очевидного соотношения

$$\Delta_v / \Delta_0 = e'_{s0} / e'_{sv}. \quad (14)$$

В этой формуле через e'_{sv} и e'_{s0} обозначены соответственно первые производные по времени сигналов от движущейся и неподвижной границ при пересечении ими оси абсцисс. По формулам, приведенным ранее, были рассчитаны зависимости Δ_v / Δ_0 от скорости движения размытой границы V . Результаты расчета в виде кривых приведены на рис. 3. На этом же рисунке показаны экспериментальные точки, заимствованные из работы [6]. Параметры модели были выбраны таким образом, чтобы среднеквадратичное расхождение между расчетными значениями и экспериментальными точками было бы минимальным. При этом оказалось, что $T_b = 75$ мс, $\tau = 23,4$ мс, $a = 0,734$, $s_0 = 47,82$, $c_s = 224,5$. Из рисунка видно, что теоретические кривые хорошо согласуются с экспериментальными точками. При выполнении теоретических исследований мы провели сравнение наших результатов со всеми экспериментальными данными, которые приводят авторы

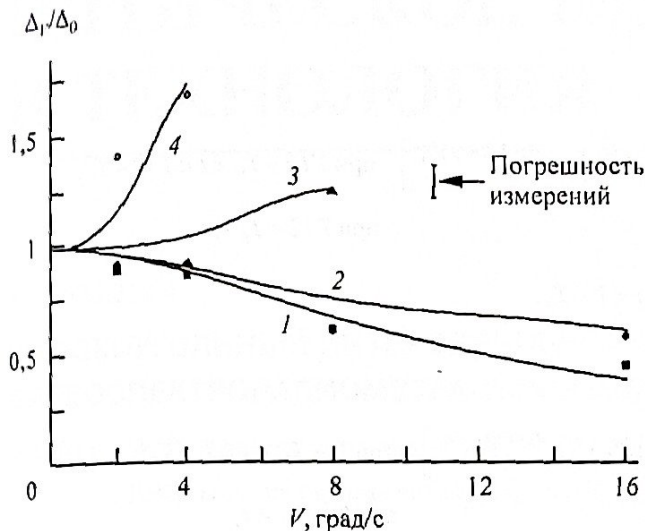


Рис. 3. Семейство теоретически полученных зависимостей относительного изменения визуально воспринимаемых зон размытия движущихся полос от угловой скорости V и экспериментальные точки, заимствованные из [6]. $X = 0,25$ (1), $0,5$ (2), 1 (3), 2 пер/град (4). $\alpha = 0,25$.

цитируемой работы [6], и получили также хорошее совпадение.

Проводя анализ полученных результатов, обратим внимание на то, что из формул (1)–(8) следует, что воспринимаемое наблюдателем распределение яркости в движущихся полосах сохраняется практически неизменным, если неизменным сохраняется отношение их контраста K к параметру s_0 , т. е. если $K/s_0 = \text{const}$. Аналогичное соотношение было отмечено авторами работы [6]. Однако этого нельзя сказать об инвариантности отношения Δ_V/Δ_0 к изменению контраста при выполнении соотношения $KV = \text{const}$, наличие которой утверждается авторами цитируемой статьи [6]. Проведенные нами расчеты показали, что при изменении угловой скорости движения объекта от 7,2 до 1,8 град/с величина Δ_V/Δ_0 изменяется приблизительно на 18%, что также подтверждается экспериментальными данными, приведенными в цитируемой статье [6].

Заключение

В заключение отметим, что представленная здесь модель (рис. 1), являющаяся развитием модели, опи-

санной нами ранее в [9], и проведенный на ее основе анализ эффекта воспринимаемого обострения размытых границ изображения движущегося объекта принципиально отличаются от ранее известных моделей и, в частности, от модели, предложенной в работе [6]. В основу нашей модели положены процессы, реально протекающие в сетчатке зрительной системы, а именно в рецепторах, биполярных, амакриновых и ганглиозных клетках, в то время как ранее известные модели представляли собой системы более или менее удачных аппроксимирующих формул. Так, в отличие от модели, предложенной в [6], в которой для объяснения феномена уменьшения воспринимаемых зон размытия изначально размытых границ при их движении постулируется зависимость величины насыщения сигналов от скорости движения границ, при разработке настоящей модели мы исходили только из ее реальных, хорошо изученных свойств. При этом было показано, что для объяснения рассматриваемого феномена необходимо учесть запаздывание сигналов торможения относительно сигналов возбуждения при движении объекта, а также возрастающую роль насыщения (ограничения) сигналов по мере увеличения размытости границ за счет включения в работу все большего количества магно-путей. Другими словами, настоящая модель в отличие от модели, предложенной в работе [6], основана на реальных процессах, протекающих в сетчатках глаз. Такой подход к решению проблемы позволил предсказать ряд новых эффектов. В частности, были предсказаны эффект увеличения кажущейся яркости при наблюдении светлых движущихся полос в широком интервале скоростей в случае, когда ось зрения фиксирована, и эффект уменьшения кажущейся яркости мелькающего темного пятна на светлом фоне, которые затем были обнаружены нами экспериментально, однако их рассмотрение выходит за рамки данной статьи.

Отметим, что свойство зрительной системы воспринимать движущиеся слегка размытые изображения как более резкие можно использовать при разработке новых методов их сжатия для получения более высоких степеней компрессии видеопоследовательностей, которыми они представляются.

ПРИЛОЖЕНИЕ

$$e_{\text{exl}}(t) = e_{\text{exl1}}(t) + e_{\text{exl2}}(t) + e_{\text{exl3}}(t) + e_{\text{exl4}}(t) + e_{\text{exl5}}(t) + e_{\text{exl6}}(t) + e_{\text{exl7}}(t),$$

где

$$e_{\text{exl1}}(t) = \begin{cases} c_e BK [\sin(At/T_b) - A \cos(At/T_b) + Ae^{-t/T_b}] & \text{при } 0 < t < T_F, \\ c_e BK e^{-t/T_b} [e^{T_F/T_b} + A] & \text{при } T_F < t, \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
e_{\text{ext}2}(t) &= \begin{cases} c_c K \left[1 - e^{-(t-T_F)/T_b} \right] & \text{при } T_F < t < T/2 - T_F, \\ c_c K \left[e^{-(t-T/2+T_F)/T_b} - e^{-(t-T_F)/T_b} \right] & \text{при } T/2 - T_F < t, \end{cases} \\
e_{\text{ext}3}(t) &= \begin{cases} c_c BK \left[\cos(A(t-T/2+T_F)/T_b) + A \sin(A(t-T/2+T_F)/T_b) - e^{-(t-T/2+T_F)/T_b} \right] & \text{при } T/2 - T_F < t < T/2 + T_F, \\ -c_c BK \left[e^{-(t-T/2-T_F)/T_b} + e^{-(t-T/2+T_F)/T_b} \right] & \text{при } T/2 + T_F < t, \end{cases} \\
e_{\text{ext}4}(t) &= \begin{cases} -c_c K \left[1 - e^{-(t-T/2-T_F)/T_b} \right] & \text{при } T/2 + T_F < t < T - T_F, \\ -c_c K \left[e^{-(t-T+T_F)/T_b} + e^{-(t-T/2-T_F)/T_b} \right] & \text{при } T - T_F < t, \end{cases} \\
e_{\text{ext}5}(t) &= \begin{cases} -c_c BK \left[\cos(A(t-T+T_F)/T_b) + A \sin(A(t-T+T_F)/T_b) - e^{-(t-T+T_F)/T_b} \right] & \text{при } T - T_F < t < T + T_F, \\ c_c BK \left[e^{-(t-T-T_F)/T_b} + e^{-(t-T+T_F)/T_b} \right] & \text{при } T + T_F < t, \end{cases} \\
e_{\text{ext}6}(t) &= \begin{cases} c_c K \left[1 - e^{-(t-T-T_F)/T_b} \right] & \text{при } T + T_F < t < 3T/2 - T_F, \\ c_c K \left[e^{-(t-3T/2+T_F)/T_b} - e^{-(t-T-T_F)/T_b} \right] & \text{при } 3T/2 - T_F < t, \end{cases} \\
e_{\text{ext}7}(t) &= \begin{cases} c_c BK \left[\cos(A(t-3T/2+T_F)/T_b) + A \sin(A(t-3T/2+T_F)/T_b) - e^{-(t-3T/2+T_F)/T_b} \right] & \text{при } 3T/2 - T_F < t < 3T/2 + T_F, \\ -c_c BK \left[e^{-(t-3T/2-T_F)/T_b} + e^{-(t-3T/2+T_F)/T_b} \right] & \text{при } 3T/2 + T_F < t, \end{cases} \\
A = \frac{\pi T_b}{2T_F}, \quad B = \frac{1}{1+A^2}.
\end{aligned}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Burr D.C., Ross J., Morrone M.C. Seeing objects in motion // Proc. R. Soc. London B. Biol. Sci. 1986. V. 65. P. 227-249.
2. Anderson C.H., Van Essen C.C. Shifter circuits: a computational strategy for dynamic aspects of visual processing // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1987. V. 84. P. 6297-6301.
3. Bex P.J., Edgar G.K., Smith A.T. Sharpening of drifting, blurred images // Vis. Res. 1995. V. 35. P. 2359.
4. Hammett S.T., Bex P.J. Motion sharpening: evidence for the addition of high spatial frequencies to the effective neural image // Vis. Res. 1996. V. 36. P. 2729-2733.
5. Ramachandran V.S., Madhusudhan Rao V., Vidyasagar T.R. Sharpness constancy during movement perception // Perception. 1974. V. 3. P. 97-98.
6. Hammett S.T., Georgeson M.A., Gorea A. Motion blur and motion sharpening: temporal smear and local contrast non-linearity // Vis. Res. 1998. V. 38. P. 2099-2108.
7. Roufs J.A.J., van Stuyvenberg J.A.P. On the Broca-Sulzer effect: concerning the brightness of time-dependent stimuli // IPO Ann. Progress Rep. 1979. № 14. P. 79-87.
8. De Ridder H. Dynamic properties of human brightness perception // Dissertation. Eindhoven: Inst. of perception, 1987.
9. Красильников Н.Н., Шелепин Ю.Е., Красильникова О.И. Моделирование механизма быстрой адаптации зрительной системы к изменению освещенности наблюдаемой сцены // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 6. С. 33-38.
10. Бызов А.Л., Кузнецова Л.П. Адаптация зрительной системы // Нейрофизиология. 1969. Т. 1. № 1. С. 81-89.
11. Глезер В.Д. Зрение и мышление. Л.: Наука, 1985. 246 с.
12. Красильников Н.Н. Математическая модель темновой адаптации в зрительной системе человека // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 11. С. 38-44.