

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛИРУЕМОГО ПОДЧЕРКИВАНИЯ КОНТУРОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Е. П. Пуятин, В. Я. Сердюченко

В системах обработки оптических изображений часто необходимо подчеркивать границы объектов. Такое подчеркивание основывается на добавлении к исходному изображению в местах перепада яркостей некоторого контурного сигнала, величина которого постоянна. Однако подчеркивание таким способом часто недопустимо сильно искажает изображение, делая его либо слишком рельефным, либо размытым, т. е. недостаточно четким. Это приводит к ошибкам при анализе «обработанного» изображения человеком или распознающей системой. Чтобы избежать таких искажений, надо регулировать степень подчеркивания контура в зависимости от величины перепада яркостей: чем он больше, тем меньше должна быть степень подчеркивания, и наоборот. Особый интерес представляет изучение характера регулируемого подчеркивания контура для такой совершенной системы, как орган зрения человека.

В основе свойства органа зрения подчеркивать контуры изображений лежит явление краевого контраста. В работах [1—2] предлагается математическая модель этого явления, полученная из аксиом краевого контраста, достоверность которых доказана экспериментально. Блок-схема модели имеет вид, показанный на рис. 1. Работа блоков модели описывается уравнениями

блок 1

$$V = c \ln B; \quad (1)$$

блок 2

$$T = \int_a^b V(\xi) K(x - \xi) d\xi; \quad (2)$$

блок 3

$$R(x) = V(x) - T(x), \quad (3)$$

блок 4

$$S(x) = \varphi[R(x)]. \quad (4)$$

Входным сигналом модели является $B(x)$, пропорциональный яркости зрительной картины. В блоке 2 «размываются» контуры изображения. В блоке 3 сигнал с «размытыми» контурами вычитается из исходного. Блок 4 взаимно-однозначно преобразует R в выходной сигнал S , пропорциональный светлоте зрительного ощущения. Конкретная расшифровка этого блока не входит в задачи настоящей работы. Отметим лишь, что благодаря блокам 1 и 4 яркость может преобразовываться в светлоту в соответствии с определенным законом. Так, для диапазона входных яркостей, когда сравнительно точно выполняется закон Вебера—

Фехнера, блок 4 осуществляет просто тождественное преобразование. При другом виде взаимно-однозначного преобразования (например, потенцирования) общая зависимость между яркостью и светлотой может оказаться степенной.

При исследовании моделей выделения контуров изображения в качестве ядер интегрального преобразования (2) использовались различные функции, например, функция Гаусса [3], функции, аппроксимирующие вторую производную от δ -функции и некоторые другие [4]. В работе [2] приводятся определяющие

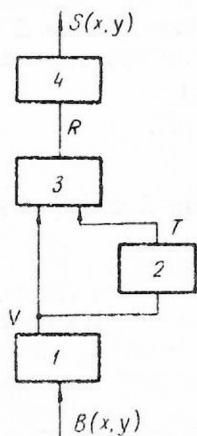


Рис. 1.

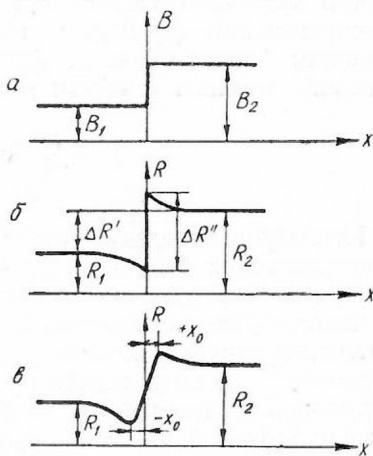


Рис. 2.

вид ядра экспериментальные данные, которые хорошо аппроксимируются выражением вида

$$K(x - \xi) = \frac{k}{2n} e^{-\frac{|x-\xi|}{n}},$$

где k — параметр степени подчеркивания контура; n — постоянная, характеризующая «размытие» контура. Экспериментально доказано, что реакция модели с таким ядром на типовые входные сигналы хорошо соответствует характеру распределения светлоты зрительного ощущения [5]. При этом диапазон изменения входных сигналов был незначительным (5—7%) и параметр подчеркивания контура k принимался постоянным. Дальнейшие эксперименты показали, что в общем случае k изменяется в зависимости от соотношения яркостей, автоматически регулируя степень подчеркивания контуров изображения. Цель настоящей работы — исследовать параметр k математической модели и психофизически интерпретировать его изменения.

Чтобы глубже рассмотреть явление краевого контраста, т. е. изучить реакции модели на входные сигналы в виде ступенек,

полосок и т. д., целесообразно перейти от преобразования в блоке 2 модели в виде (2) к более удобному аналитическому выражению. Как показали психофизические опыты, чтобы избежать влияния фона на участок изображения, где проявляется эффект подчеркивания границы, размеры полей разной яркости должны быть достаточно большими (занимать все поле зрения). Опытами, проведенными нами, установлено, что угол зрения, на котором проявляется явление краевого контраста (при расстоянии наблюдения 0,5 м до 0,9 град) на два порядка меньше угла зрения при бинокулярном восприятии. Поэтому в интегральном преобразовании (2) модели естественно перейти к бесконечным пределам. Таким образом, функционирование блока 2 модели с высокой степенью точности может быть описано выражением

$$T = \frac{k}{2n} \int_{-\infty}^{\infty} V(\xi) e^{-\frac{|\xi-x|}{n}} d\xi. \quad (5)$$

Исследуем поведение параметра модели k в широком диапазоне изменения перепадов яркости.

Прямое определение параметра k невозможно, так как нельзя непосредственно измерить светлоту зрительного ощущения, соответствующую выходному сигналу модели. Поэтому для решения поставленной задачи будем пользоваться лишь свойством зрительной системы человека фиксировать равенство или неравенство яркостей на полях сравнения.

Воспользуемся входным сигналом типа «скачок яркости»

$$B(x) = \begin{cases} B_1 & \text{при } x \leq 0, \\ B_2 & \text{при } x > 0. \end{cases} \quad (6)$$

Реакция модели на выходе блока 3 будет иметь вид

$$R(x) = \varphi^{-1}(S) = \begin{cases} (1-k)c \ln B_1 - \frac{1}{2} kc \ln \frac{B_2}{B_1} e^{\frac{x}{n}} & \text{при } x \leq 0, \\ (1-k)c \ln B_2 + \frac{1}{2} kc \ln \frac{B_2}{B_1} e^{-\frac{x}{n}} & \text{при } x > 0. \end{cases} \quad (7)$$

Входной сигнал и реакция модели показаны на рис. 2, а, б. Рассмотрим четыре крайних случая функционирования модели: $x = -\infty$; $x = +\infty$; $x = -0$; $x = +0$.

Реакции модели, определяемые из (7), запишутся в виде

$$\begin{aligned} R(-\infty) &= (1-k)c \ln B_1 = R_1; \\ R(+\infty) &= (1-k)c \ln B_2 = R_2; \\ R(-0) &= (1-k)c \ln B_1 - \frac{1}{2} kc \ln \frac{B_2}{B_1}; \\ R(+0) &= (1-k)c \ln B_2 + \frac{1}{2} kc \ln \frac{B_2}{B_1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Возьмем постороннее поле сравнения с некоторой яркостью такой, чтобы светлота этого поля равнялась светлоте в точке $x = +0$, т. е. чтобы $S'_3 = S(+0)$. В силу взаимной однозначности преобразования в блоке 4 это равносильно равенству $R'_3(\infty) = R(+0)$.

Аналогично всегда можно подобрать поле сравнения с некоторой яркостью B''_3 такое, что будет иметь место равенство $R''_3(\infty) = R(-0)$. Воспользовавшись (8), указанные равенства преобразуем к виду

$$B_2^{(1-\frac{1}{2}k)} = B_3'^{(1-k)} B_1^{\frac{1}{2}k}; \quad (9)$$

$$B_1^{(1-\frac{1}{2}k)} = B_3''^{(1-k)} B_2^{\frac{1}{2}k}. \quad (10)$$

Из (9) и (10) получим два выражения для параметра k :

$$k = \frac{\ln \frac{B_2}{B_3}}{\ln \frac{\sqrt{B_1 B_2}}{B_3}}; \quad k = \frac{\ln \frac{B_1}{B_3}}{\ln \frac{\sqrt{B_2 B_1}}{B_3''}}. \quad (11)$$

Соотношения (11) не зависят от конкретного основания логарифма, постоянной c и вида ядра преобразования (5). Кроме того, формулы для параметра k допускают непосредственную экспериментальную проверку, так как величины B_1 , B_2 , B'_3 и B''_3 — яркости и могут быть измерены объективными методами.

Для постановки опытов необходимо взять три поля сравнения с яркостями B_1 , B_2 и B'_3 (или B''_3). Смежные поля B_1 и B_2 образуют скачок яркости (рис. 2, а). Яркость поля B'_3 подбирают такой, чтобы наблюдалось равенство светлот зрительного ощущения S'_3 и $S(+0)$ вблизи границы раздела полей (справа). При проверке формулы (10) подбирают равенство светлот S''_3 и $S(-0)$ слева от границы раздела. Непосредственно на границе (при $x = 0$) производить сравнение не представляется возможным ввиду неопределенности выбора правого или левого поля сравнения и в силу явления иррадиации зрения, приводящего к некоторому размытию границы. Поэтому все измерения с целью определить параметр k необходимо проводить на некотором малом расстоянии x_0 от границы полей сравнения (рис. 2, в). При $x = x_0$ соотношения (9) и (10) запишутся следующим образом:

$$B_2^{(1-k-\frac{1}{2}kc_0)} = B_3'^{(1-k)} B_1^{\frac{1}{2}kc_0}; \quad (9a)$$

$$B_1^{(1-k+\frac{1}{2}kc_0)} = B_3''^{(1-k)} B_2^{\frac{1}{2}kc_0}. \quad (10a)$$

В этих выражениях $c_0 = e^{\frac{x_0}{n}}$. Величину c_0 легко оценить на основании того, что постоянные затухания иррадиации и краевого контраста отличаются не менее чем на порядок. Если в экспериментах ориентироваться на экстремальное значение светлоты (как показано на рис. 2, в), то решающее влияние на значение x_0 оказывает постоянная иррадиации зрения, и отношение $\frac{x_0}{n}$ с достаточной точностью может быть принято равным 0,1. Тогда $c = 1,01$. В то же время в идеализированном случае, представленном формулами (9а) и (10а), $c_0 = 1$.

В результате для определения параметра k получаем рабочие формулы

$$k = \frac{\ln \frac{B_2}{B_3}}{\ln \frac{B_1^{0,45} B_2^{0,55}}{B_3}}; \quad k = \frac{\ln \frac{B_1}{B_3}}{\ln \frac{B_1^{0,45} B_2^{0,55}}{B_3}}. \quad (12)$$

Физический смысл параметра k следует из анализа соотношений (8): при отсутствии влияния механизма подчеркивания контура перепад сигнала на выходе блока \mathcal{Z} математической модели составил бы $\Delta R' = R_2 - R_1 = (1 - k) c \ln \frac{B_2}{B_1}$ (рис. 2, в). С учетом же действия механизма краевого контраста $\Delta R = R(+0) - R(-0) = c \ln \frac{B_2}{B_1}$. Таким образом, во втором случае перепад увеличивается в $\frac{\Delta R''}{\Delta R'} = \frac{1}{1-k}$ раз.

Эксперименты

В проведенных нами экспериментах поля сравнения с яркостями B_1, B_2, B_3 (B_3'') формировались с помощью трех пар дисков Максвелла различных диаметров. На рис. 3 показаны диски до закручивания и после закручивания со сверхкритической скоростью.

Испытуемому предлагалось подобрать яркость поля сравнения B_3' такой, чтобы ощущение от этой яркости было равно ощущению от яркости B_2 в точке $+x_0$ максимального подчеркивания контура. В другой серии опытов яркость B_3'' выбиралась испытуемым такой, чтобы получить равенство по светлоте с полем яркости B_1 (в точке $-x_0$). Каждое из полей сравнения образовывалось двумя дисками с известными коэффициентами отражения. Ввиду однозначной зависимости яркости B от коэффициента отражения ρ при вычислении параметра k яркости B_1, B_2, B_3', B_3'' могут быть заменены соответствующими коэффициентами отражения $\rho_1, \rho_2, \rho_3', \rho_3''$, каждый из которых, в свою очередь, однозначно зависит от величины угла черного сектора $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3', \alpha_3''$.

Для опытов на дисках Максвелла входной сигнал можно считать одномерным, так как размеры точки фиксации меньше, чем у полей сравнения. В наших экспериментах использовались диски следующих размеров: для формирования яркости B_1 — $\varnothing 12$ см, для B_2 — $\varnothing 20$ см, для яркости B_3 применялся отдельный диск $\varnothing 20$ см. Во время опытов освещенность составляла 300 лк. Возрастание интенсивности освещенности от 100 до 1000 лк не вносило заметных изменений в измерениях.

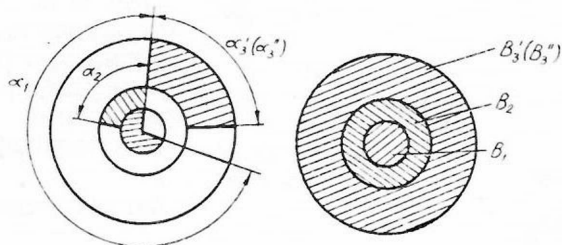


Рис. 3.

Эксперименты проведены для фиксированных значений углов α_1 и различных значений α_2 . Наблюдатель должен был выбрать угол α_3 такой, чтобы отмечалось равенство светлот при сравнении со стороны «темного» поля B_1 (в точке $-x_0$) или со стороны «светлого» поля с яркостью B_2 (в точке $+x_0$).

В опытах принимали участие семь испытуемых. Некоторыми из них каждое измерение повторялось по пять раз. В табл. 1 приведены усредненные результаты экспериментов и вычисленных по формулам (12) значений параметра k .

Таблица 1

Сравнение по «темному» полю ($\rho_1 = 58,4\%$)

$\rho_2, \%$	55	54	51,8	49,4	47,1	44,9	41,5	40,5	38,4	30,4	18	9
$\rho_3, \%$	48	46,85	46	42,4	40	39,7	36,2	35,2	34	25,5	15	7,5
k	0,78	0,756	0,66	0,59	0,54	0,48	0,445	0,433	0,39	0,319	0,21	0,115

Сравнение по «светлому» полю ($\rho_1 = 58,4\%$)

$\rho_2, \%$	55,1	53,9	52,8	51,8	48,4	47,2	44,9	38,2	36,0	33,6	31,5	29	22,5
$\rho_3, \%$	63,8	63,6	63,4	63,1	62,7	62,2	62,0	61,8	61,1	60,7	60,0	59	58
k	0,74	0,69	0,62	0,59	0,435	0,374	0,322	0,202	0,144	0,140	0,08	0,06	0,03

На рис. 4 изображены экспериментальные точки, характеризующие изменения параметра k в зависимости от $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$ при сравнении с «темным» (b) и «светлым» (a) участками перепада яркости. Для других значений ρ_1 параметр k изменяется аналогично. Все испытуемые отмечали, что со стороны «темного»

поля сравнивать легче; при этом и разброс показаний отдельных испытуемых меньше. Исправленное среднее квадратическое отклонение при сравнении по «темному» полю составляет приблизительно $2,03 \text{ град}$, при сравнении по «светлому» — $3,29 \text{ град}$. В процессе увеличения числа измерений при одних и тех же α_1 и α_2 (например, до десяти) средние для различных испытуемых значения гораздо ближе располагаются к общей средней точке всех испытуемых. Подобные опыты убеждают о том, что оценки

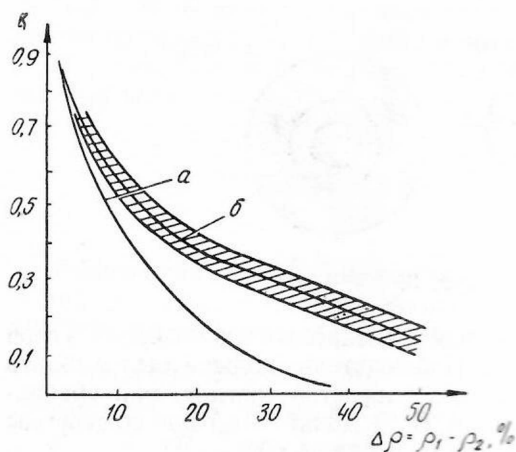


Рис. 4.

параметр k и тем слабее подчеркивается контур. Наоборот, активнее всего механизмы подчеркивания работают на малоконтрастных и «зашумленных» участках изображения. Этот вывод кажется нам весьма важным для синтетического конструирования технических устройств, снабженных механизмами подчеркивания контуров изображения.

Второй вывод касается различия в степени подчеркивания контура для более темного и светлого участков перепада яркости. Как видно из рис. 4, оно возрастает с увеличением перепада яркостей, но для малых перепадов подчеркивание практически одинаково. На рис. 2, в изображен качественный график неравномерного подчеркивания контура. Таким образом, параметр k для скачкообразного входного сигнала зависит как от величины скачка яркости $\Delta B = |B_2 - B_1|$, так и от значения яркости в точке измерения ($+x_0$ или $-x_0$), т. е. $k = f(|\Delta B|, B)$.

Можно предложить множество выражений, аппроксимирующих экспериментальные данные. Хорошую аппроксимацию дает выражение вида $k = 8,2e^{-(3,8\rho + 8|\Delta\rho|)}$. При небольших приращениях параметр k , очевидно, будет функцией дифференциала

$$k = f(\text{dB}) = f\left(\frac{\text{dB}}{\text{dx}} \text{dx}\right).$$

испытуемых являются статистически несмещенными, а результаты измерений, проведенных различными испытуемыми, можно усреднять.

Анализ экспериментов

Результаты экспериментов позволяют сделать некоторые выводы. Первый из них заключается в том, что параметр k изменяется в зависимости от величины перепада яркости на границе. Чем он больше, тем меньше пара-

Чтобы определить, зависит ли параметр подчеркивания контура от градиента $\frac{dB}{dx}$ функции, исследовалось явление краевого контраста при входных сигналах, показанных на рис. 5, а. На левой половине поля яркость постоянна и равна B_1 . Угол φ линейного изменения яркости правой половины поля зрения выбирался различным в каждом опыте. Как и ранее, поля формировались с помощью двух пар дисков Максвелла, вид на которые до закручивания показан на рис. 5, в.

Реакции математической модели на входные сигналы, представленные на рис. 5, а, хорошо согласуются с фактическим изменением светлоты, наблюдаемым человеком. Реакция модели показана на рис. 5, б. В процессе эксперимента испытуемый выбирает яркость третьего поля сравнения B_0 такой, чтобы имело место равенство светлоты этого поля и светлоты в точке максимального подчеркивания контура ($-x_0$).

Реакцию модели на выходе блока 3 для входного сигнала, изображенного на рис. 5, а, можно записать следующим образом:

$$R(x) = \begin{cases} (1-k)V_1 - \frac{kn}{2} \operatorname{tg} \varphi e^{\frac{x}{n}} & \text{при } x \leq 0, \\ (1-k)V_1 + (1-k) \operatorname{tg} \varphi x - \frac{kn}{2} \operatorname{tg} \varphi e^{-\frac{x}{n}} & \text{при } x > 0. \end{cases} \quad (13)$$

При этом в точке $x = -0$ величина $R(-0) = (1-k)c \ln B_1 - \frac{kn}{2} \operatorname{tg} \varphi$, а для точки $x = -\infty$ значение $R(-\infty) = (1-k)c \ln B_0$.

Приравнявая последние соотношения по условиям опыта и учитывая, что $S = \varphi(R)$ — взаимно-однозначная функция, получим выражение для параметра k :

$$k = \frac{c \ln \frac{B_1}{B_0}}{c \ln \frac{B_1}{B_0} + \frac{n}{2} \operatorname{tg} \varphi}. \quad (14)$$

В табл. 2 приведены результаты экспериментов и вычисленных по формуле (14) величин k для различных значений углов φ линейного изменения яркости. По данным, указанным в работе [4], $n = 0,33 \text{ град}$. Поскольку нас интересует лишь изменение k , то постоянная c принята равной единице, а логарифмическая

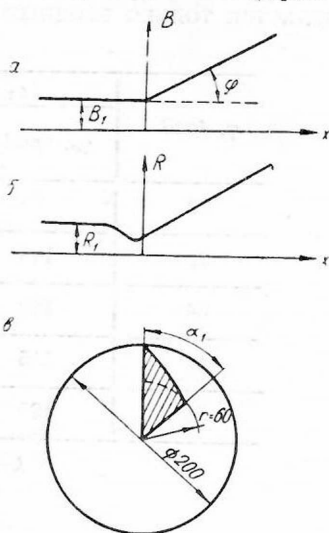


Рис. 5.

функция соответствует натуральному логарифму. Как видно из табл. 2, параметр k несколько меняется случайным образом. Эти изменения можно объяснить погрешностями измерений, вытекающими из сложности проведения психофизического эксперимента. Таким образом, для входного сигнала типа «излом» параметр подчеркивания контура не зависит от градиента изменения функции яркости, а характер подчеркивания контура определяется только входным сигналом.

Таблица 2

φ , град	$\rho_1 = 63\%$		$\rho_1 = 30\%$	
	φ_0 , град	k	φ_0 , град	k
22	99	0,382	240	0,312
27	103	0,396	247	0,390
34	109	0,40	250	0,483
44	115	0,378	256	0,5
56	125	0,386	262	0,48
		$k = 0,389$	$k = 0,433$	

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. П. Путятин, В. Я. Сердюченко. Вопросы теории краевого контраста зрения. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6. Изд-во Харьковск. ун-та, 1971.
2. Е. П. Путятин, В. Я. Сердюченко. Экспериментальное исследование модели краевого контраста зрения. Сб. «Проблемы бионики», вып. 7. Изд-во Харьковск. ун-та, 1971.
3. Д. Грэхэм. Передача изображений посредством кодирования двумерных контуров. ТИИЭР, 55, 3 (1967).
4. Ю. П. Бугай. Исследование нейроподобных элементов и систем как устройств первичной переработки информации. Автореф. канд. дисс., Харьков, 1969.
5. Ю. П. Шабанов-Кушнарченко, В. Я. Сердюченко. К вопросу моделирования явлений краевого контраста. Сб. «Проблемы бионики», вып. 2. Изд-во Харьковск. ун-та, 1970.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ НОРМАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ. СООБЩЕНИЕ I

Е. П. Путятин

Пусть имеется некоторое множество M изображений, заданных функциями распределения яркости $B(x, y)$ в поле зрения. Предположим, что задано разбиение множества M , т. е. совокупность подмножеств $\{m_\alpha\}$ множества M такая, что 1) $m_\alpha \neq \emptyset$;