

УДК 62.506.2

Г. В. АЛЕШИН, канд. техн. наук, *В. А. ГРАБИНА*, канд. техн. наук

**МЕХАНИЗМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ С КРАЕВЫМ
КОНТРАСТОМ И НЕКОТОРЫЕ ЗРИТЕЛЬНЫЕ ИЛЛЮЗИИ**

В настоящее время твердо установлено, что зрительная информация активно обрабатывается уже на периферии зрительного анализатора, т. е. в сетчатке глаза [1—3]. Одним из важных для бионических приложений является механизм подчеркивания контуров изображений, функционирующий на основе

так называемого латерального торможения между нейронами сетчатки и имеющий место как в работе человека-оператора при наблюдении тестов и фигур, так и аппаратуры связи, телевидения, радиолокации и т. д. Анализ математических моделей, описывающих явление контрастирования контуров изображений, приводит к выводу о том, что и некоторые зрительные иллюзии могут быть обязаны своим происхождением не работе высших отделов зрительного аппарата человека, а явлениям, имеющим место уже в сетчатке глаза. Если учесть, что выделение контуров изображений является первичным актом в процессе опознавания (классификации) образов внешнего мира, очевидна практическая и теоретическая значимость понимания причин возникновения зрительных иллюзий как источника систематических ошибок в процессе идентификации.

Механизм контрастирования контуров изображений для линейного поля рецепторов описывается выражением

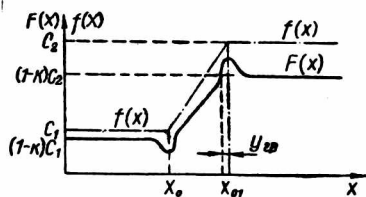


Рис. 1.

$$F(x) = f(x) - \int_{-\infty}^{\infty} f(x_1) \varphi(x - x_1) dx_1, \quad (1)$$

где $F(x)$ — выходной, $f(x)$ — входной сигналы, являющиеся функциями координаты x ; $\varphi(x)$ — весовая функция тормозных связей между нейронами сетчатки.

Пусть входной сигнал (рис. 1) описывается выражением

$$f_1(x) = \begin{cases} C_1 & x < x_0 \\ C_1 + f'(x)(x - x_{01}) & x_0 \leq x \leq x_{01} \\ C_2 & x > x_{01} \end{cases} \quad (2)$$

где $f'(x) = \frac{C_2 - C_1}{x_{01} - x_0} = \text{const}$, а функция $\varphi(x)$ имеет вид

$$\varphi_1(x) = \begin{cases} k_1 \left(1 - \frac{x^2}{\Delta x_m^2} \right) & x \in [-\Delta x_m, \Delta x_m] \\ 0 & x \notin [-\Delta x_m, \Delta x_m]. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $2\Delta x_m$ — ширина весовой функции $\varphi(x)$ «по нулям». Алгоритм обработки входного изображения (1) с учетом выражений (2) и (3) дает возможность записать выходной сигнал в виде

$$F(x) = \begin{cases} F_1 = (1 - k) f_1(x) & x \in (-\infty, x_0 - \Delta x_m) \\ F_2(x, k_1, \Delta x_m) & x \in [x_0 - \Delta x_m, x_0 + \Delta x_m] \\ F_3 = (1 - k) f_1(x) & x \in [x_0 + \Delta x_m, x_{01} - \Delta x_m] \\ F_4 = F_4(x, k, \Delta x_m) & x \in [x_{01} - \Delta x_m, x_{01} + \Delta x_m], \end{cases} \quad (4)$$

где параметр контрастирования —

$$k = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) dx = \int_{-\Delta x_m}^{\Delta x_m} k_1 \left(1 - \frac{x^2}{\Delta x_m^2}\right) dx = \frac{4}{3} k_1 \Delta x_m. \quad (5)$$

Выражения для F_i в (4) получены на основании формул (1)–(3)

$$F_1(x) = f_1(x) - \int_{x-\Delta x_m}^{x+\Delta x_m} C_2 k_2 \left(1 - \frac{(x-x_1)^2}{\Delta x_m^2}\right) dx_1 = (1-k) f_1(x) \quad (6)$$

для $x \in [x_{01} + \Delta x_m, \infty)$;

$$F_2(x) = f_1(x) - C_2 k_1 \int_{x_{01}}^{x+\Delta x_m} \left(1 - \frac{(x-x_1)^2}{\Delta x_m^2}\right) dx_1 - \int_{x-\Delta x_m}^{x_{01}} [C_2 + f'(x - x_{01})] k_1 \left(1 - \frac{(x-x_1)^2}{\Delta x_m^2}\right) dx_1 = (1-k) f_1(x) + f'(x) k_1 \left[\frac{\Delta x_m^2}{4} - \frac{(x-x_{01})^2}{2} + \frac{(x-x_{01})^4}{12\Delta x_m^2} \right] \quad (7)$$

для $x \in [x_{01} - \Delta x_m, x_{01} + \Delta x_m]$;

$$F_2(x) = f_1(x) - \int_{x-\Delta x_m}^{x+\Delta x_m} [C_2 - f'(x_1 - x_{01})] k_1 \left(1 - \frac{(x-x_1)^2}{\Delta x_m^2}\right) dx_1 = (1-k) f_1(x) \quad (8)$$

для $x \in [x_0 + \Delta x_m, x_{01} - \Delta x_m]$;

$$F_1(x) = f_1(x) - \int_{x-\Delta x_m}^{x_0} C_1 k_1 \left(1 - \frac{(x-x_1)^2}{\Delta x_m^2}\right) dx_1 - \int_{x_0}^{x+\Delta x_m} [C_1 + f'(x_1 - x_0)] k_1 \left(1 - \frac{(x-x_1)^2}{\Delta x_m^2}\right) dx_1 = (1-k) f_1(x) - f' k_1 \left[\frac{\Delta x_m^2}{4} + \frac{(x-x_0)^2}{2} - \frac{(x-x_0)^4}{12\Delta x_m^2} \right] \quad (9)$$

для $x \in [x_0 - \Delta x_m, x_0 + \Delta x_m]$.

Обсудим полученные результаты и на основании их рассмотрим механизм некоторых зрительных иллюзий.

Из выражений (4)–(9) следует, что прирост (скачок) светлоты на границе x_{01} со стороны «свет» $\Delta F(x_{01+})$ равен скачку (убыванию) светлоты на границе x_0 со стороны «тень» $\Delta F(x_{0-})$, т. е.

$$\Delta F(x_{01+}) = \Delta F(x_{0-}) = f' k_1 \frac{\Delta x_m^2}{4} = \frac{3}{32} k f' \Delta x_m^2. \quad (10)$$

При рассмотрении выражения (10) для величины прироста светлоты $\Delta F(x_{01+})$ может создаться впечатление, что при безграничном увеличении производных изображений $f'(x)$ в некоторых точках величина $\Delta F(x_{01+})$ также стремится к бесконечности. Однако это не так. Как только протяженность по координате x входного скачка (фронт $f(x)$) при увеличении производной $f'(x)$ станет укладываться в «створе» $2\Delta x_m$ весовой функции $\varphi(x)$, прирост светлоты на границе x_{01} $\Delta(x_{01+})$ перестанет возрастать при дальнейшем увеличении производной $f'(x)$. Этот факт вытекает из формул (1)—(9) и [2] для модели входного сигнала типа функции включения, когда прирост светлоты $\Delta F(x_{0+})$ со стороны «свет» пропорционален параметру контрастирования k и величине входного скачка светлоты $C_2 - C_1$:

$$\Delta F(x_{0+}) = (C_2 - C_1) \frac{k}{2}. \quad (11)$$

Условие пропорциональности прироста светлоты $\Delta F(x_{01+})$ первой производной $f'(x)$ входного сигнала (изображения) можно записать в виде

$$\Delta x_{\text{кор}} = \frac{1}{\omega_{x \text{ max}}} > 2\Delta x_m,$$

где $\omega_{x \text{ max}}$ — максимальная пространственная частота пространственного спектра входного изображения $f(x)$. Поэтому, вообще говоря, в любом случае эффект контрастирования выражен сильнее, чем согласно уравнению (10) для больших значений параметра контрастирования и прироста $2\Delta x_m f'$ входной светлоты в пределах ширины $2\Delta x_m$ весовой функции $\varphi(x)$.

Из выражения (7) для $F_2(x)$ и рис. 1 видно, что за счет прироста светлоты $F(x_{01+})$ на границе x_{01} со стороны яркой части входного изображения протяженность уровня «белого» для выходного изображения несколько больше, чем у входного изображения. Определим приращение протяженности контрастированного изображения $F_2(x)$ на уровне белого по сравнению со входным белым полем ($x \geq x_{01}$), исходя из равенства

$$F_2(x) = (1 - k) C_2. \quad (12)$$

С учетом (6) и (7) условие (12) можно упростить:

$$\frac{y^4}{12\Delta x_m^2} - \frac{y^2}{2} + \frac{1-k}{k_1} y + \frac{\Delta x_m^2}{4} = 0, \quad (13)$$

где $y_{\text{гр}} = x_{\text{гр}} - x_{01}$; $x_{\text{гр}}$ — граница белого поля контрастированного изображения. Интересующее нас решение уравнения (13) имеет вид

$$y_{\text{гр}} = -\frac{3}{32} \Delta x_m k (1 - k). \quad (14)$$

Чтобы наблюдать увеличение белого поля контрастирующей системой, целесообразно выбирать оптимальные значения $k_{\text{opt}} = 1/2$ из условий максимума $y_{\text{гр}}$ (14). В этом случае

$$k_{1 \text{ opt}} = \frac{3}{8\Delta x_m}, \quad \max |y_{\text{гр}}| = \frac{3}{2^7} \Delta x_m, \quad (15)$$

а весовую функцию целесообразно моделировать в виде

$$\varphi(x) = \frac{3}{8\Delta x_m} \left(1 - \frac{x^2}{\Delta x_m^2}\right) \approx \frac{3}{8} \cdot \frac{1}{\Delta x_m} \exp\left(-\frac{x^2}{\Delta x_m^2}\right). \quad (16)$$

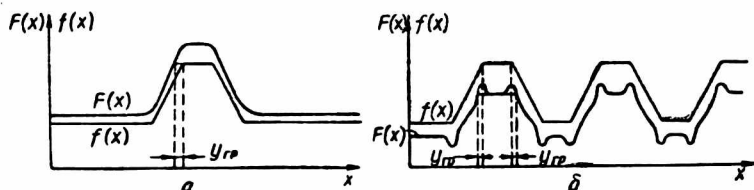
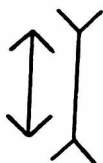


Рис. 2.

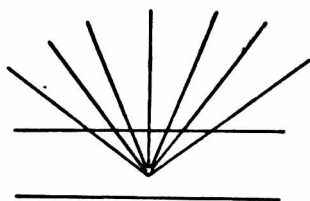
Отсюда видно, что увеличение белого поля контрастированного изображения незначительно и в лучшем случае составляет всего 2,5% Δx_m или $\sim 1\%$ ширины $2\Delta x_m$ весовой функции связи $\varphi(x)$. Аналогично этому можно показать, что увеличение белого поля на $y_{\text{гр}}$ имеет место также при сумеречном зрении, т. е. при положительных боковых связях (рис. 2).

Следовательно, эффект заметен для глаза, если ширина $2\Delta x_m$ весовой функции связи соизмерима с раскрывом, по крайней мере, сотни рецепторов. Поскольку при наблюдении, например, известной иллюзии квадрата [2, рис. 65] возникает впечатление, что белый квадрат больше черного, по-видимому, ширина весовой функции связи удовлетворяет такому условию. О большой ширине весовой функции связи говорят такие факты, как быстрые блуждания глаза и регулирование зрачка средней яркостью предъявляемых изображений. Это позволяет предположить наличие у сетчатки осредняющих свойств на протяженных участках сетчатки и по всему полю рецепторов, т. е. большой ширины весовой функции $y(x)$. Осредняющие свойства сетчатки в форме второго слагаемого (1) являются следствием наличия боковых латеральных связей в нейронной сети и предназначены для повышения информативности, т. е. оконтуривания (формулы (1) — (9); рис. 2) либо для фильтрации изображения от яркостных помех. Наличие широкой весовой функции $\varphi(x)$, связанной с функцией информативности [1], может объяснить иллюзию Мюллера—Лейера (рис. 3, а) для возбуждающих боковых связей, а также иллюзию квадрата [2, рис. 65] и иллюзию класса, показанного на рис. 6 для тормозных боковых связей.

На рис. 3, а косая штриховка прямой линии с наклоном влево создает иллюзию излома линии вверх у начала штриховки. Иллюзию усиливает опорная параллельная линия, от которой «ведется отсчет». Рассматривая заштрихованную линию на рис. 3, б, можно убедиться, что в области первой штриховочной линии из-за наклона ее влево средняя яркость ниже прямой линии (слева от точки пересечения) несколько больше, чем средняя яркость выше. Из-за достаточно широких тормозных связей, т. е. рассмотренного эффекта увеличения белого поля, белое в среднем поле на выходе сетчатки снизу «надвигается» на прямую линию и создает иллюзию излома. Движение глаз при этом производится вдоль прямой. Чем больше наклон штриховой линии, тем сильнее иллюзорный излом. Меняя наклон штриховых линий, можно создать иллюзию округлости параллельных линий (рис. 3, б). Иллюзии данного класса (рис. 3, б) и другие основаны на использовании пересечения линии наклонными штриховыми линиями.



а



б

Рис. 3.

Подобное объяснение рассмотренных иллюзий является достаточно простым и естественно следующим из самой морфологии сетчатки.

Список литературы: 1. Завалишин Н. В., Мучник И. Б. Модели зрительного восприятия и алгоритмы анализа изображений. М., «Наука», 1974. 334 с. 2. Алешин Г. В., Грабина В. А. Основные особенности системы контрастирования контуров изображений.— В кн.: Проблемы бионики. Вып. 21. Харьков, 1978, с. 55. 3. Пуятин Е. П., Сердюченко В. Я. Математические модели явления краевого контраста ахроматического зрения человека (обзор).— В кн.: Проблемы бионики. Вып. 9. Харьков, 1972, с. 219. 4. Лебедев Д. С., Цуккерман Н. Н. Телевидение и теория информации. М., «Энергия», 1965, 350 с.