

БИОНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И КОНТРОЛЯ

УДК 51 : 681.14 : 155

Я. И. КУЛИКОВСКИЙ
(Варшава, ПНР)

МОДЕЛЬ МЕХАНИЗМА ОБНАРУЖЕНИЯ ПРОСТЫХ ДЕТАЛЕЙ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ*

Первичное изображение, которое в плоскости x_0, y_0 описывается функцией $i(x_0, y_0)$, трансформируется системой, описываемой следующим уравнением:

$$u(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} i(x_0, y_0) a(x_0, x; y_0, y) dx_0 dy_0 \quad (1)$$

где $u(x, y)$ является распределением оптических сигналов в плоскости вторичного изображения; $a(x_0, x; y_0, y)$ — весовая функция.

В простейшем случае, когда первичное изображение является точкой (т. е. первичное изображение описывается δ -функцией), вторичное изображение есть отражение весовой функции. Трансформация изображения называется изотропной, если она не зависит от сдвига и поворота системы координат x, y [1]. Зрительная система человека не осуществляет изотропной трансформации; разрешающая способность зрения является самой лучшей в определенном районе (fovea) сетчатки, в вертикальном и горизонтальном направлениях она лучше, чем в косом.

Результирующая характеристика трансформации представляет собой совокупную характеристику работы оптики глаза и нервной системы, т. е. трансформация является многократной.

Исследование такой системы позволяет, во-первых, проследить процесс отбора существенных данных из плоского изображения, выполняемый нервной системой, и, во-вторых, сделать выводы по отношению к наблюдательным способностям человека-оператора. При этом процесс опознавания является здесь наиболее важным вопросом [2].

циента модуляции.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для того чтобы по возможности общим способом определить процедуру различения мелких деталей, необходимо ввести характеристики пространственной частоты системы. Они показывают, при какой

* Материал доложен на VIII Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений в сентябре 1966 года в Новосибирске.

плотности деталей изображения (например, прямых линий) имеется возможность их различения. На практике в качестве входного сигнала удобно ввести изображение, модулированное по одной из координат пространства, например изображение, яркость которого вдоль горизонтальной оси x описывается выражением

$$L = L(1 + m \sin \omega_x x); \quad (2)$$

$$\omega_x = 2\pi f_x, \quad (3)$$

где L — средняя яркость;

m — коэффициент пространственной модуляции;

f_x — пространственная частота (количество период/град).

Определение пространственно-частотной характеристики заключается в измерении реакции системы на модулированное изображение. Такая характеристика называется модуляционной функцией перехода одномерной $A(\omega_x)$, либо двумерной $A(\omega_x, \omega_y)$ и представляется изображением Фурье весовой функции $a(x_0)$ или соответственно весовой функции $a(x_0, y_0)$, т. е.

$$A(\omega_x) = \int_{-\infty}^{\infty} a(x_0) \exp(-j\omega_x x_0) dx_0; \quad (4)$$

$$a(x_0) = \int_{-\infty}^{\infty} a(x_0, y_0) dy_0. \quad (5)$$

Частотные характеристики можно сравнительно легко определять, используя следующую зависимость:

$$A(\omega_x) = \frac{U(\omega_x)}{I(\omega_x)},$$

где $U(\omega_x)$ и $I(\omega_x)$ — одномерные изображения Фурье функции распределения соответственно вторичного и первичного изображений (u, i).

Необходимо заметить, что эти характеристики нашли применение в физической оптике и фототехнике [3]. В области физиологической оптики при помощи указанного метода, введенного Schade [4], удалось отделить функцию перехода оптики глаза от функции перехода, которая описывает нервную систему [5]. Определение модуляционной переходной функции только нервной системы затрудняется тем, что выход является недоступным для измерений. Однако имеется возможность определять для отдельных пространственных частот пороговые значения коэффициента модуляции, т. е. минимальные значения коэффициента модуляции. Величина, обратная пороговому значению коэффициента модуляции,

$$S = \frac{1}{m_p} \quad (6)$$

называется модуляционной чувствительностью. Модуляционная чувствительность в функции частоты может интерпретироваться как функция перехода системы для пороговых значений. Благоприятным обстоятельством является тот факт, что при исследовании пороговых значе-

ний можно применять линейный анализ, так как амплитуды сигналов весьма малы.

Проведение измерений пороговых значений целесообразно не только из-за удобства анализа, но и из-за их полезности, так как с их помощью можно определить пределы различения деталей (в свете проблемы человек-оператор.— *Прим. ред.*). Второй метод определения переходных функций основывается на сравнительных сверхпороговых измерениях [6] (в этом случае система является заметно нелинейной).

Основным недостатком обоих методов является то, что во время измерений определяются характеристики всей системы, вследствие чего невозможен анализ отдельных ее ступеней. Поэтому при построении модели необходимо использовать некоторые электрофизиологические данные, а затем проверить, соответствуют ли характеристики принятой модели характеристикам отдельных элементов системы — рецепторной области, из которой возможно возбудить ганглиозную клетку, называется рецептивным полем. Функция возбуждения может принимать положительные и отрицательные значения.

Из ряда работ [7, 8] известно, что сетчатка высокоорганизованных млекопитающих (кошек, обезьян) имеет концентрические рецептивные поля (рис. 1). Это означает, что одни и те же весовые коэффициенты размещены на одинаковых расстояниях от центра рецептивного поля (см. рис. 1, а). Следующая ступень трансформации изображения морфологически связана с латеральным колленчатом телом, которое также имеет концентрические поля (конвергентные зоны нейронов в отличие от рецептивных полей сетчатки.— *Прим. ред.*). Существенное различие форм этих полей можно вскрыть, исследуя только рецептивные поля следующей преобразующей ступени — зрительного центра коры головного мозга [9]. Линии одинаковых весовых коэффициентов для некоторых полей зрительной коры имеют эллиптическую форму. Таким образом, получается, что после ступеней, имеющих концентрические поля, появляются удлиненные поля.

Рассмотренный выше процесс многократной трансформации в зрительном анализаторе позволяет в дальнейшем принять двухступенчатую функциональную модель (см. рис. 1, в). Выходной сигнал (реакция) первой ступени $u(x, y)$ появляется тогда, когда сумма входных сигналов $i(x_0, y_0)$ внутри рецептивного поля R превзойдет некоторое пороговое значение P_1 :

$$u_1 = \max \left[0; \iint_{R_1} i(x_0, y_0) a_1(x_0 - x_1, y_0 - y_1) dx_0 dy_0 - P_1 \right]. \quad (7)$$

Такую же зависимость можно записать для второй ступени:

$$u_2 = \max \left[0; \iint_{R_2} u_1(x_1, y_1) a_2(x_1 - x_2, y_1 - y_2) dx_1 dy_1 - P_2 \right]. \quad (8)$$

Согласно электрофизиологическим исследованиям, область R_2 является удлиненной вследствие суммирования областей R_1 вдоль прямой

линии [9]. Влияние пороговых значений P_1, P_2 на суммарный порог различения может быть определено экспериментальным путем, когда исследуется критическая частота мельканий, в психофизическом эксперименте.

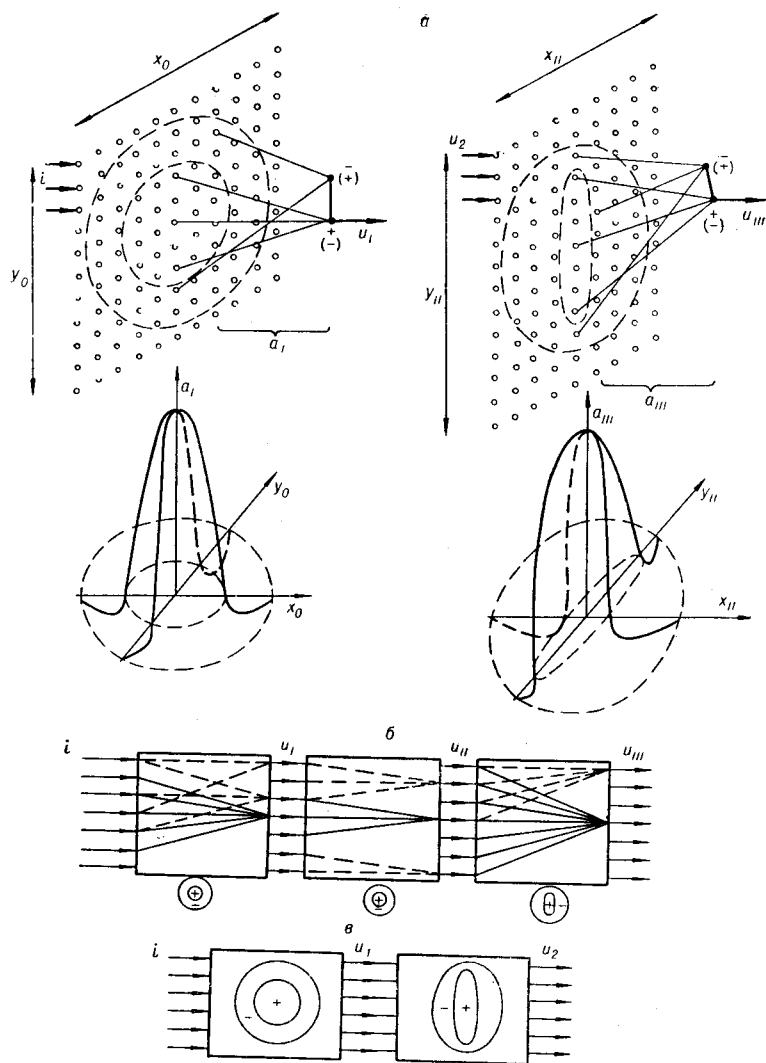


Рис. 1. Эскиз рецептивных полей — концентрического и удлиненного — и их весовые функции (а); структурная схема трех ступеней зрительной системы: сетчатки, латерального колена и зрительной коры (б); структурная схема функциональной модели части зрительной системы (в).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Наблюдатель помещается на расстоянии 100 см от диска, видимого под углом 10° и равномерно освещенного (75 св/м^2). В центре диска находится отверстие, размеры которого можно регулировать так, что оно видно под углом в пределах от $3'$ до 2° . За отверстием

находится экран осциллоскопа, на котором с помощью телевизионной техники [4] генерируется пространственно модулированное изображение (2). Средняя яркость экрана постоянна и равна яркости диска. Экспериментатор меняет частоту пространственной модуляции, ширину и высоту отверстия, вид модуляции (синусоидальная, квадратная и импульсная) и другие параметры. Каждый раз наблюдатель непременно определяет величину порогового коэффициента модуляции.

В первой серии экспериментов были определены пороговые значения модуляции для каждой пространственной частоты. На основе полученных данных построена характеристика модуляционной чувствительности $1/m_p$, показанная в логарифмическом масштабе на рис. 2.

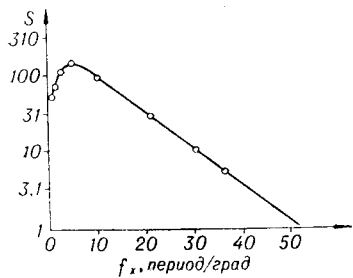


Рис. 2. Модуляционная чувствительность (т. е. величина, обратная коэффициенту пороговой модуляции) в функции пространственной частоты.

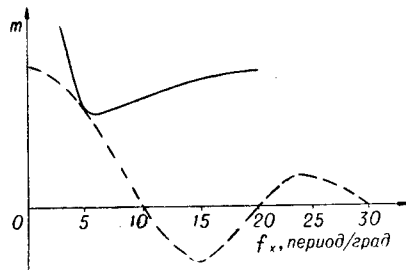


Рис. 3. Спектр пространственной частоты для линии шириной 6' (штриховая линия) и характеристика пороговой модуляции (сплошная линия).

Эта характеристика при частоте 5—6 период/град имеет четко выраженный максимум, а ее предельная частота составляет приблизительно 60 период/град. Интересно отметить, что результаты измерений удается приблизительно описать выражением [10]

$$S = A_+ \exp(-a_x f_x) - A_- \exp(-b_x f_x). \quad (9)$$

Второе слагаемое этой формулы описывает действие тормозящих рецептивных полей.

Во втором эксперименте были определены области суммации периодов. Модулированное изображение с частотой 5 период/град (соответствующее максимальной чувствительности) наблюдалось через прямоугольное отверстие с переменной шириной; скачок изменения был равен одному периоду. Можно сделать вывод, что модуляционная чувствительность растет пропорционально квадратному корню из ширины отверстия до величины, соответствующей приблизительно 60' (т. е. пять периодов). Приблизительно такая же зависимость получена в случае изменения высоты отверстия в пределах от 6 до 60'. В этом случае модуляционная чувствительность возрастала пропорционально квадратному корню из длины линии. Когда высота и ширина отверстия увеличивались одновременно так, что форма отверстия оставалась квадратной, модуляционная чувствительность возрастала пропорционально стороне этого квадрата. Из этого следует, что суммация происходит внутри квадратной области 60×60'. Следует подчеркнуть, что область суммации является различной для различных частот (например, для частот 20 период/град она имеет размеры 33×33').

В третьей серии экспериментов наблюдатель должен был определить пороговые значения модуляции двух наложенных изображений: одно изображение с модуляцией в горизонтальном направлении (вертикальные линии, как прежде), второе — с модуляцией в вертикальном направлении (горизонтальные линии). Так как эти два изображения имеют одинаковые пространственные частоты, а коэффициенты модуляции изменяются одновременно, то разница между максимальной и минимальной яркостью получается вдвое больше, чем в случае одиночного изображения. Однако, несмотря на это, пороговое значение модуляции уменьшается не вдвое, а лишь незначительно; это может свидетельствовать о том, что существуют отдельные «каналы» для вертикальных и горизонтальных линий. Значит, в модели, представленной на рис. 1, в, пороговое значение второй ступени P_2 значительно больше, чем P_1 . Аналогичные выводы следуют также из результатов исследований, проводимых другим методом (маскировки) [11].

В четвертой серии экспериментов установлена связь между частотными характеристиками изображений, модулированных по одному размеру, и способностью к обнаружению линий. Эти эксперименты связаны с опытом из второй серии, в котором имеется только один период. Если вместо одного периода синусоидальной модуляции будет введена линия шириной $6'$, тогда ее пространственный спектр будет спектром квадратного импульса (рис. 3). Значение модуляции такого импульса (т. е. линии) определяется точкой пересечения спектральной характеристики и характеристики пороговой модуляции.

Это пересечение находится вблизи от минимума характеристики пороговой модуляции (т. е. вблизи максимума характеристики модуляционной чувствительности). Так как спектр пространственной частоты для линий более узких, чем $2'$, становится плоским в пределах от 0 до 5 период/град, то модуляционная чувствительность для этих линий пропорциональна их ширине [12]. Самая узкая линия, которую удается обнаружить, имела ширину $1,2''$, что вообще совпадает с итогами, полученными другими методами исследования.

Из сказанного выше следует, что существует физическая разница между способностью к обнаружению одиночной линии и серии линий, т. е. зависит от физической разницы в пространственном спектре. Благодаря этому результату лишними становятся гипотезы о существовании особых механизмов, обнаруживающих одиночные линии шириной порядка $0,5-1''$, т. е. линии во много раз уже ширины фоторецепторов.

В итоге проведения пятой серии экспериментов определена модуляционная чувствительность обнаружения линий переменной длины. Так, для линий шириной 6 и $0,6'$, длина которых первоначально увеличивалась, начиная с $6'$, обнаружено, что модуляционная чувствительность растет (пороговое значение модуляции соответственно уменьшается) пропорционально квадратному корню из длины линии до тех пор, пока длина линии не достигнет $60'$ (рис. 4). Это очень похоже на явление, имеющее место во второй серии экспериментов, когда изменялась высота отверстия, через которое наблюдалась пространственная модуляция с частотой 5 период/град; следовательно, один и тот же механизм обнаруживает узкие линии и модуляцию 5 период/град. Кроме того, обнаружено, что уменьшение длины линии шириной $0,6'$ ниже $6'$ ведет к более быстрому, чем с квадратным корнем, уменьшению модуляционной чувствительности. При длине линии менее $2'$ модуляционная чувствительность становится пропорциональной этой длине.

Необходимо подчеркнуть, что различие двухразмерных предметов одинаковой площади, максимальный размер которых не превышает $2'$, становится невозможным. Различать прямоугольник и квадрат, имеющие одинаковые поверхности, становится возможным только при длине прямоугольника порядка $4'$ (ширина прямоугольника должна быть меньше $2'$).

Заметим, что различие (оно косвенно связано со способностью определять расположение прямоугольника) возможно только тогда, когда модуляционная чувствительность перестает быть пропорциональной длине линии и становится пропорциональной квадратному корню из этой длины.

Это говорит о том, что в случае линии длиной больше $4'$ происходит суммирование сигналов со входов с независимыми шумами, что соответствует модели, показанной на рис. 1, в. Если линия является достаточно короткой, то она обнаруживается одиночным концентрическим рецептивным полем. В этом случае имеет место полная пропорциональность модуляционной чувствительности к поверхности. Как только длина линии превзойдет критическое значение, она не помещается внутри одного концентрического поля, поэтому возбуждается следующее концентрическое поле, а это означает суммирование сигналов с независимыми шумами. Возбуждается «вторая точка» на плоскости, что уже определяет ориентировку отрезка.

Большинство описанных выше экспериментов было проведено автором в физиологической лаборатории университета в Кебридже.

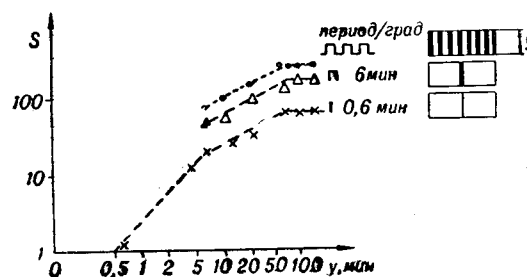


Рис. 4. Модуляционная чувствительность в функции высоты отверстия y (отверстие расположено перпендикулярно горизонтальному направлению пространственной модуляции) для случая квадратной модуляции 5 период/град и для одинарных импульсов, т. е. линии шириной 6 и $0,6'$.

ВЫВОДЫ

Предложенная модель преобразования в зрительной системе обоснована данными электрофизиологических исследований и не противоречит исследованиям пространственно-частотных характеристик всей системы. В частности, показано, что

1) вторая ступень преобразования, содержащая удлиненные в одном направлении рецептивные поля, характеризуется более высоким пороговым значением, чем первая ступень, имеющая концентрические поля;

2) суммирование сигналов внутри концентрического рецептивного поля является пропорциональной поверхности и энергии этих сигналов, а суммирование сигналов из нескольких рецептивных полей является пропорциональной квадратному корню из длины линий;

3) способность к обнаружению прямых линий имеет прямую связь с характеристикой пространственной частоты человеческого зрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. Kovasznaу. Image Processing. Proc. IRE, 43, 560—570 [6.r.].
2. В. Глезер, И. Цукерман. Информация и зрение. М., Изд-во АН СССР, 1961.
3. E. Linfoot. Fourier methods in optical image evaluation Focal Press. London, 1964.
4. O. Schade. Optical and Photoelectric Analog of the Eye. Journ. Opt. Soc. Am., 46, 721—739 [6.r.].
5. F. W. Campbell, D. G. Green. Optical and retinal factors affecting visual resolution. Journ. Phys. (London), 181, 576—593 [6.r.].
6. E. H. Lowry. S. S. de Pelma Sone-wave Response of the Visual System. Journ. Opt. Soc. Am., 51, 740—746 [6.r.].
7. S. Kuffler. Discharge Patterns and Functional Organization of Mammalian Retina. Sour. Neurophysiol., 16, 37—68 [6.r.].
8. T. N. Viesel. Receptive Fields of Ganglion Cells in the Cat's Retina. Journ. Physiol. (London), 153, 583—594 [6.r.].
9. D. Hubel. Transformation of information in the Cat's visual system. Information Processing in the nervous system. XXII. Intern. Congress. Leiden, 1962. Excerpta Medica.
10. J. J. Kulikowski, F. W. Campbell, J. G. Robson. Spatial and temporal frequency characteristics of human photopic vision, 2nd International Biophysics Congress, Vienna, September, 1966.
11. F. W. Campbell, J. J. Kulikowski. Orientational selectivity of the human visual system (in press).
12. F. W. Campbell, D. G. Green, J. J. Kulikowski, S. G. Robson. The detectability of thin lines (in preparation).

*Поступила в редакцию
19 сентября 1966 г.*