

Е. С. РАТНЕР, Ю. З. МАЦКОВСКАЯ

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ ПОРОГОВЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СУМЕРЕЧНОГО ЗРЕНИЯ

(Представлено академиком И. К. Кикоиным 3 III 1972)

Идея А. А. Лебедева о флуктуационной природе закономерностей зрительного восприятия, основанная на визуальном наблюдении С. И. Вавиловым и его сотрудниками квантовых флуктуаций света ^(1, 2), оказалась весьма плодотворной для развития физической теории зрения. Так, Роуз ⁽³⁾ и Луизов ⁽⁴⁾ впервые дали, исходя из постоянства порогового отношения сигнал/шум, физическое объяснение увеличению контрастной чувствительности глаза с ростом яркости. Учет собственных флуктуаций

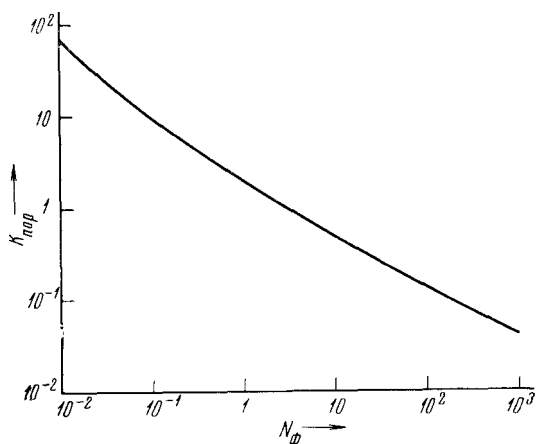


Рис. 1

сигнала позволил объяснить природу законов Рикко и Пипера и зависимость порога от знака контраста ⁽⁵⁾. Однако как в этих работах, так и в других, более поздних, публикациях, например ^(6, 7), задача обнаружения рассматривалась без учета специфики двумерности. Задача решалась поэтому только с точностью до некоторого постоянного множителя, что позволяло описать лишь ход закономерностей зрительного восприятия без получения абсолютных значений пороговых величин.

Попытаемся получить решение задачи с помощью простейшей двумерной модели обнаружения объекта на равномерном флуктуирующем фоне, считая глаз в условиях сумеречного зрения идеальным приемником, фиксирующим каждый эффективно поглощенный квант и не имеющим собственных шумов.

Пусть наблюдателю предъявляется объект — пятно, отличающееся по яркости от окружающего фона. Можно ожидать, что объект будет обнаруживаться при условии, если число квантов $N_{об}$, эффективно поглощенных в его изображении на сетчатке, будет больше соответствующего числа квантов $N_{ф}$ в изображении каждого из окружающих его фоновых элементов равного углового размера. Из условий симметрии и сплошного заполнения пространства объекту и каждому элементу фона можно приписать форму правильного шестиугольника.

Вероятность обнаружения объекта для такой «сотовой» модели описывается выражением

$$P_{обн} = \sum_{i=1}^{\infty} P_{N_{об}=i} = P_{N_{ф} \leq i-1}^6, \quad (1)$$

где i — последовательные числа натурального ряда; $P_{N_{об}}$ — вероятность случайного значения i для величины $N_{об}$; $P_{N_{ф} \leq i-1}$ — вероятность того, что случайное значение величины $N_{ф}$ будет меньше числа i ⁽¹³⁾.

С помощью выражения (1) можно получить для заданной вероятности обнаружения зависимость порогового контраста $K_{пор}$ от среднего числа квантов $\bar{N}_{ф}$. На рис. 1 показана такая зависимость для вероятности обнаружения 50%.

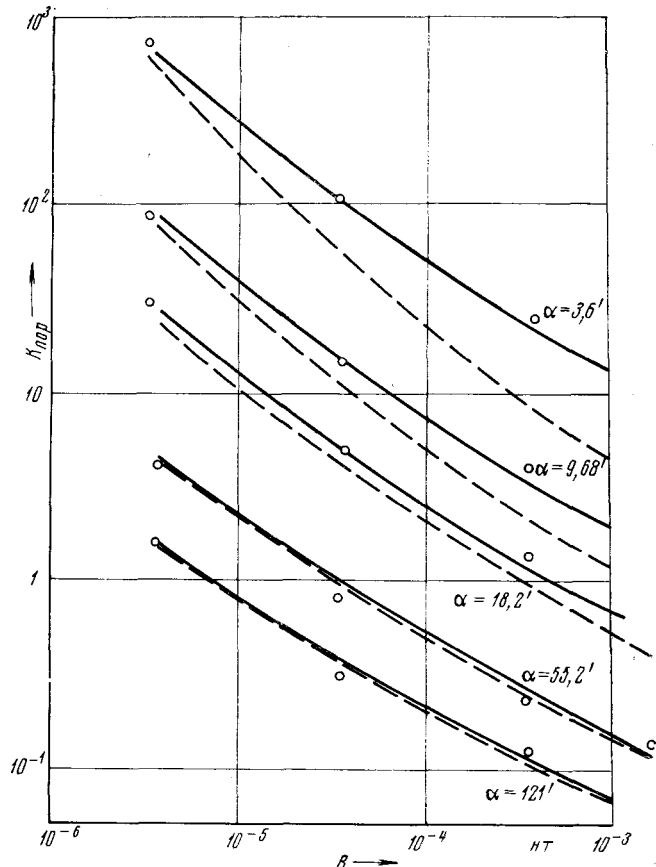


Рис. 2

Число квантов $\bar{N}_{ф}$, эффективно поглощенных светочувствительным веществом сетчатки, равно:

$$\bar{N}_{ф} = 6,65 \cdot 10^{-8} \cdot B \alpha^2 S_{зр} \theta n \tau \epsilon, \quad (2)$$

где B — яркость фона (в нитах); α — угловой размер объекта (в мин.); $S_{зр}$ — эффективная (с учетом эффекта Стайлса — Крауфорда) площадь зрачка (в м^2); θ — время инерции глаза (в сек.); n — число квантов (в сек.) с длиной волны $\lambda = 0,51 \mu$ (максимум сумеречной чувствительности глаза), эквивалентное по воздействию на глаз одному люмену светового потока; τ — коэффициент пропускания глазных сред до сетчатки (с учетом потерь на отражение); ϵ — квантовый выход сетчатки в максимуме чувствительности.

Для сумеречного зрения ($B \leq 10^{-3}$ нт) $S_{зр} = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ ⁽⁸⁾, $\theta = 0,2$ сек. ⁽⁸⁾. Для стандартного источника A , используемого при измерениях характеристик зрения, $n = 2,16 \cdot 10^{15}$ квант/лм·сек ⁽⁸⁾; $\tau = 48\%$, $\epsilon = 4\%$ ⁽⁹⁾.

На рис. 2 пунктиром показаны расчетные зависимости $K_{пор} = f(B)$, полученные для указанных значений величин с помощью рис. 1, точками

ми — экспериментальные результаты известной работы Блеквелла (¹⁰). Расчеты выполнены в соответствии с условиями опыта: наблюдение двумя глазами, порог соответствует 50% вероятности обнаружения объекта.

Результаты расчета хорошо согласуются с опытными данными, за исключением области малых угловых размеров объекта, где его изображение на сетчатке должно заметно увеличиваться из-за несовершенства оптической системы глаза. Эффективный угловой размер $\alpha_{эф}$ изображения объекта углового размера α может быть приближенно определен из выражения: $\alpha_{эф} = \sqrt{\alpha^2 + \delta^2}$, где δ — эффективный угловой размер кружка рассеяния оптической системы глаза. Принятое здесь квадратичное суммирование кружков, строго говоря, справедливо только для гауссовского закона распределения яркости объекта и гауссовской формы функции рассеяния оптической системы.

Для сумеречного зрения эффективный размер кружка рассеяния можно принять равным $10' \div 15'$ (данные (¹¹) с поправкой из (¹²) на периферическое наблюдение при низких уровнях яркости). На рис. 2 сплошными кривыми показана зависимость $K_{пор} = f(B)$, рассчитанная с учетом несовершенства глаза. Совпадение расчетных и экспериментальных данных не только по ходу закономерностей, но и по абсолютным значениям порогового контраста подтверждает приемлемость принятой простейшей модели обнаружения и правомерность использованных в ходе расчета предположений о практической неизменности адаптации в области сумеречного зрения до $B = 10^{-3}$ нт и о возникновении одного импульса в зрительном анализаторе при эффективном поглощении одного кванта.

Поступило
3 III 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ С. И. Вавилов, Микроструктура света, Изд. АН СССР, 1950. ² Е. Брумберг, С. Вавилов, Изв. АН СССР, ОМЕН, 919 (1933). ³ A. Rose, J. Opt. Soc. Am., 38, № 2, 196 (1948). ⁴ А. В. Луизов, Природа, 40, № 7, 12 (1951). ⁵ Е. С. Ратнер, ДАН, 105, № 1 (1955). ⁶ A. Rose, Image Technology, June/july, 1970, p. 13. ⁷ А. М. Якобсон, Биол. журн., Армения, 22, № 1 (1969). ⁸ В. В. Мешков, Основы светотехники, ч. 2, 1961. ⁹ S. Hecht, J. Opt. Soc. Am., 32, № 1 (1942). ¹⁰ H. R. Blackwell, J. Opt. Soc. Am., 36, № 11, 624 (1946). ¹¹ Д. Д. Максотов, Астрономическая оптика, М.—Л., 1946. ¹² В. В. Мешков, Осветительные установки, М.—Л., 1947. ¹³ Е. С. Ратнер, Ю. З. Мацковская, Оптико-механическая промышленность, № 2 (1972).