

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯ ЗРИТЕЛЬНЫХ РЕЦЕПТОРОВ И МАТРИЦ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИЕМНИКОВ ПРИ ПРЕДЕЛЬНО НИЗКИХ ОСВЕЩЕННОСТЯХ

© 2009 г. В. К. Нестеров*, канд. техн. наук; А. С. Тибилов**, канд. физ.-мат. наук; Ю. Е. Шелепин***, доктор мед. наук

* НПП “Элар”, Санкт-Петербург

** НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

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

E-mail: editor@soi.spb.ru

На основе анализа режима темновой адаптации глаза разработана и опробована схема расчета освещенностей, соответствующих порогу восприятия изображений наблюдателем, оснащенным приборами “электронного зрения”.

Ключевые слова: зрение, приборы ночного зрения, порог восприятия, рецептивное поле, охлаждаемая ПЗС матрица, ПЗС матрица с усилителем яркости.

Коды OCIS: 040.1240, 040.3780, 330.0330

Поступила в редакцию 01.04.2009

1. Цель статьи – сравнение порогов восприятия изображения полностью адаптированным к темноте глазом и глазом, оснащенным современными оптико-электронными приборами для наблюдения в условиях низкой освещенности. Опыт таких сравнений для более раннего уровня развития электронной техники достаточно отражен в монографиях [1, 2]. Интерес авторов к пороговым по освещенности условиям работы “оснащенного” глаза в большой степени связан с известной работой [3].

2. Поскольку статья эта адресована, прежде всего, инженерам, приведем сначала основные сведения о строении и функционировании наиболее чувствительного зрительного рецептора – зрительной палочки. Палочка имеет форму цилиндра длиной порядка 60 мкм с диаметром основания 2 мкм; основание ее служит для передачи сигнала на последующие каскады обработки информации в сетчатке. В цитоплазме палочки, кроме прочих веществ, слоями (дисками) располагаются 10^9 молекул белка родопсина, в каждую из которых в виде фрагмента встроена молекула красителя ретинола. При поглощении ретинолом фотона происходит его изомеризация, т. е. изменение взаиморасположения атомов в этой молекуле. Это в свою очередь вызывает перестройку молекулы родопсина в молекулу белка метародопсин, которая как катализатор

вызывает цепочку химических превращений, захватывающих примыкающий к ней участок палочки. В конечном итоге образование одной молекулы метародопсина приводит к разрушению 10^6 молекул циклического гуанозинмонофосфата, поддерживающего ионные каналы в оболочке палочки открытыми. Переход ионного канала в закрытое состояние приводит к формированию на участке поверхности палочки вблизи места поглощения фотона изменения потенциала с амплитудой в несколько десятков милливольт, передним фронтом порядка 10^{-1} с и продолжительным, 2–3 с, временем релаксации. Эти импульсы являются выходными сигналами зрительного рецептора. Одним из последних обзоров, который можно рекомендовать для ознакомления с современным состоянием исследований зрительных рецепторов, а также с другими затронутыми в статье близкими проблемами физиологии зрения, является работа [4].

Со временем было обнаружено, что импульсы, совершенно подобные сигнальным, формируются и в отсутствие света и являются основным источником шума, ограничивающим чувствительность рецептора. Пока нет общепринятого мнения о природе этих темновых импульсов, но наиболее правдоподобной представляется гипотеза об их возникновении в результате спонтанной тепловой изомеризации молекул ретинола. Измерения

показали, что для зрительной палочки человека и приматов средняя частота этих импульсов равна $\varphi = 7 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ [5]. При этом, учитывая, что квантовая эффективность зрительной палочки в максимуме чувствительности ($\lambda = 0,5 \text{ мкм}$) – $\alpha = 0,5$, световой поток, обеспечивающий такую же частоту импульсов, составляет $1,4 \times 10^{-2}$ фотона в секунду (ф с^{-1}) на приемную площадку рецептора 3 мкм^2 и создает так называемую эквивалентную шумовую освещенность (ЕВІ), равную $R = 4,7 \times 10^5 \text{ ф с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ (1,2 мклк).

3. Из серийно производимых технических систем наиболее чувствительными в настоящее время являются глубоко охлаждаемые ($-100 \text{ }^\circ\text{C}$) ПЗС матрицы с электронным умножением (EMCCD). Камера *evolve* фирмы *PHOTOMETRICS* [6] является примером устройства, построенного на такой матрице (512×512) с размером элементарного приемника $d = 16 \text{ мкм}$ и полным темновым током на его входе $\varphi = 0,0045$ электрона в секунду при квантовой эффективности $\alpha = 0,9$ для длины волны $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$. Это соответствует эквивалентной шумовой освещенности $R = 1,9 \times 10^3 \text{ ф с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ (5×10^{-3} мклк). Из рассмотрения исключены умеренно охлаждаемые ПЗС матрицы: во-первых, шум последовательного считывания сигнала с элементарных ячеек таких матриц не имеет аналога в зрении, и сопоставление их с глазом принимает искусственный характер, во-вторых, будущее явно принадлежит приемникам с электронным умножением.

Из неохлаждаемых приемников следует рассмотреть цифровые ПЗС камеры с усилителями яркости изображения, ЭОП-ами 2-го и 3-го поколения на основе микроканальных пластин (УПЗС). Конкретный пример такого ЭОП – усилитель яркости V8070U/D фирмы *Hamamatsu*, эквивалентная шумовая освещенность для которого равна $R = 2,2 \times 10^4 \text{ ф с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ (0,06 мклк) [7].

4. Таким образом, зрительный рецептор по ЕВІ явно уступает лучшим современным фотоприемникам (табл. 1), но его объединяет с ними одно качество: из-за большой скважности потока

темновых импульсов (10^2) он, как и рассматриваемые фотоприемники, при низких освещенностях функционирует как счетчик фотонов. Для таких счетчиков при освещенностях, близких к эквивалентной шумовой освещенности, возникают специфические проблемы регистрации сигнала. Рассмотрим сначала, к чему сводятся эти проблемы для зрения.

Возьмем отдельную палочку сетчатки и зададимся целью: считая поступающие от нее импульсы, надежно разделить случай регистрации темнового тока и случай регистрации освещенности, в k раз отличающейся от эквивалентной шумовой освещенности. “Надежно” означает, что должны быть достаточно малы как вероятность ложного сигнала p_f в первом случае, так и вероятность пропуска сигнала p_l во втором.

Установим такое время регистрации кадра T , чтобы среднее число темновых импульсов, пришедших за это время от палочки, равнялось $N(T = N\varphi^{-1})$. Очевидно, что во втором случае число импульсов, “вырабатываемых” палочкой, будет равно $(k + 1)N$. Как обычно при подобных процессах предположим, что в обоих случаях вероятность P регистрации n импульсов при единичном наблюдении описывается формулой Пуассона и равна для первого и второго случая соответственно

$$P_N = \frac{N^n}{n!} \exp(-N),$$

$$P_{(k+1)N} = \frac{[(k+1)N]^n}{n!} \exp[-(k+1)N].$$

Рис. 1 дает представление о том, как могут выглядеть такие распределения (показаны два распределения со средними значениями, отличающимися в 4 раза). Очевидно, что площадь под кривой $P(n)$ справа от вертикали, проведенной от какого-нибудь значения $n = \hat{n}$, равна вероятности обнаружить в единичном наблюдении число импульсов, равное или большее \hat{n} , а слева от вертикали – равное или меньшее. Пусть значе-

Таблица 1. Сравнение чувствительности рецептора и приемников оптико-электронных устройств

Устройство	Зрительный рецептор (палочка)	Охлаждаемая ПЗС матрица с электронным умножением $t^\circ = -100 \text{ }^\circ\text{C}$ (к камере <i>evolve</i> фирма <i>PHOTOMETRICS</i>)	Усилитель яркости V8070U/D фирмы <i>Hamamatsu</i>
Эквивалентная шумовая освещенность, $\text{ф с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$4,7 \times 10^5$	$1,9 \times 10^3$	$2,2 \times 10^4$
Квантовая эффективность	0,5	0,9	0,5

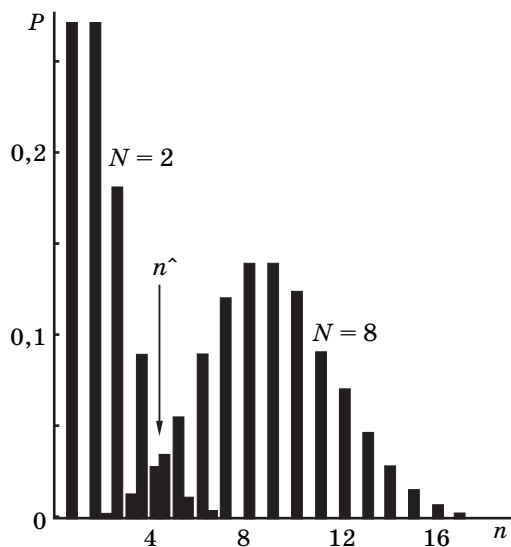


Рис. 1. К сравнению пуассоновских шумов и сигналов.

ние n^{\wedge} , выбранное между N и $(k + 1)N$ (как на рис. 1), используется как минимальное число импульсов, зарегистрированных в конкретной реализации, превышение которого считается сигналом. Тогда p_f и p_l , соответствующие выбранным k , N и уровню ограничения n^{\wedge} , равны

$$p_f = \sum_{n^{\wedge}}^{\infty} \frac{N^n}{n!} \exp(-N), \quad (1)$$

$$p_l = 1 - \sum_{n^{\wedge}}^{\infty} \frac{[(k+1)N]^n}{n!} \exp[-(k+1)N].$$

Но можно и, наоборот, численно решая эти уравнения, по заданным p_f , p_l и какой-то из величин k , N , n^{\wedge} , определять две остальные. Строго говоря, во всех случаях, когда определяется уровень ограничения n^{\wedge} (число натурального ряда) уравнения (1) не всегда имеют точные решения, и должны быть заменены системой

$$p_f \geq \sum_{n^{\wedge}}^{\infty} \frac{N^n}{n!} \exp(-N) \text{ при минимальном целом } n^{\wedge},$$

$$p_l = 1 - \sum_{n^{\wedge}}^{\infty} \frac{[(k+1)N]^n}{n!} \exp[-(k+1)N]. \quad (1a)$$

Определим, каковы N и n^{\wedge} на пороге восприятия света человеческим глазом. Величина p_l в этом режиме по определению порога восприятия равна $p_l = 0,5$. Значение p_f , определенное в правильно поставленных экспериментах с наблюдателями, на пороге восприятия для парафовеаль-

ной области глаза с наибольшей концентрацией палочек дает значение порядка $p_f = 0,01$ [8, 9]. Предположим сначала, что порог восприятия равен эквивалентной шумовой освещенности ($k = 1$). Тогда, решив при этих условиях систему (1a), получаем $N = 7,4$ и $n^{\wedge} = 15$.

Время T , необходимое для накопления N темновых импульсов, связано с их частотой φ соотношением $T = N/\varphi$ и при полученном значении N оно равно 18 мин, что значительно больше тех долей секунды, которые может позволить себе человек для формирования “кадра” изображения. То есть, даже в условиях равенства потоков импульсов, возникающих под действием тепла и света, квантовый характер светового сигнала и низкий уровень тепловых шумов зрительного рецептора не позволяют зрению за приемлемое время принять статистически обоснованное решение о наличии сигнала. Невозможно одновременно сохранить чувствительность на уровне шумов, высокое разрешение, определяемое размером рецептора, и свойственное ему в условиях высокой освещенности быстрое действие.

5. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в этой ситуации ради сохранения чувствительности зрение в режиме темновой адаптации жертвует почти 2 порядками разрешения и, в значительно меньшей степени, быстрое действие. Известно, что в этом режиме близко расположенные рецепторы объединяют свои выходы, благодаря чему на выходе такого рецептивного поля из M элементов (рецепторов) частота и темновых, и сигнальных импульсов возрастает в M раз, а время для накопления необходимого числа импульсов уменьшается до

$$T = N/(M\varphi). \quad (2)$$

По данным разных авторов [10, 11] из-за формирования рецептивных полей в условиях полной темновой адаптации для области максимальной концентрации палочек угловое разрешение уменьшается с 0,6' до 40'-50', т. е. M лежит в пределах 4,5-7 тысяч палочек; в дальнейших расчетах принято: число рецепторов $M = 6000$, а длительность кадра $T = 0,2$ с. N при этом, в соответствии с выражением (2), оказывается равным $N = 8,4$.

Вернемся теперь к системе (1a) и, сохранив для вероятностей прежние значения $p_l = 0,5$ и $p_f = 0,01$, определим n^{\wedge} и k при $N = 8,4$; получаем $n^{\wedge} = 16$, $k = 0,85$.

Полученное значение k означает, в частности, что для регистрации света с вероятностью 0,5 необходимо, чтобы за время “кадра”

на рецептивное поле приходило 14 фотонов (учитывая квантовый выход палочки), т. е. пороговая освещенность на сетине должна быть $L_D = 3,9 \times 10^5 \text{ ф с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ (1,0 мклк). Поскольку порог восприятия, определенный по количеству фотонов на одно рецептивное поле за кадр на входе в зрачок, равен приблизительно 100 фотонам, результат этот соответствует представлениям о больших световых потерях в глазе: до рецепторов доходит только седьмая часть попавшего в глаз света [4].

Полученные характеристики режима полной темновой адаптации глаза в области максимальной концентрации палочек хорошо совпадают (в том числе и по уровню ограничения n^{\wedge}) с данными, полученными в известной работе Барлоу [9] (табл. 2). Эта работа была выполнена в 50-е годы прошлого века, когда еще не существовало методики прямого измерения ϕ и необходимые данные о пороговом режиме добывались в лабораторных экспериментах с группами наблюдателей. Статистическая обработка этих экспериментов давала большую погрешность, которая, к тому же, существенно возрастала при вычислении необходимых величин: так для ключевой величины N сам Барлоу дает интервал возможных значений от 66 до 3. Приведенный расчет, можно надеяться, имеет меньшую погрешность: ни одна из используемых в нем экспериментальных величин не отличается у разных исследователей больше, чем на 30%.

6. Имеет смысл описать пороговый режим, используя более привычную для специалистов по оптико-электронным видеоустройствам характеристику γ – отношение сигнал/шум в пикселе за время кадра: создание рецептивных полей позволяет, пожертвовав разрешением, увеличить этот параметр в $M^{1/2}$ раз, с $\gamma_1 = 4 \times 10^{-2}$ (–14 дБ) для одной зрительной палочки до $\gamma_M = (1,85Np_l)^{1/2}$, т. е. до вполне приемлемого значения $\gamma_M = 3$ (5 дБ) для больших пикселей, соответствующих этим рецептивным полям. Действительно, среднее число импульсов за кадр, поступающее с одиночного рецептора, для рассматриваемого случая “пороговой” освещенности равно $i = p_l(k+1)\phi T$, среднеквадратичное отклонение этой величины

и при пуассоновском, и при гауссовом процессе равно $\delta i = [p_l(k+1)\phi T]^{0,5}$. Таким образом, отношение сигнал / шум в пикселе, равное

$$\gamma_1 \equiv \frac{i}{\delta i} = [p_l(k+1)\phi T]^{0,5}, \quad (3)$$

действительно имеет для одиночного рецептора приведенное выше значение, а в кластере из M рецепторов увеличивается до $\gamma_M = [p_l(k+1)M\phi T]^{0,5}$.

7. Повысить отношение сигнал/шум в пикселе можно было бы, не прибегая к ограничениям по n^{\wedge} , одним только формированием рецептивных полей. Но ограничения позволяют решить глазу другую проблему, возникающую при освещенностях порядка эквивалентной шумовой освещенности, – проблему снижения контраста объекта относительно неосвещенного фона. Это легко оценить, воспользовавшись определением контраста Γ

$$\Gamma = (I_O - I_N) / (I_O + I_N),$$

где I_O и I_N – сигнал от объекта и фоновый сигнал на выходе поля рецепторов соответственно (в числе импульсов на пиксел за время кадра). При рассматриваемом пороговом режиме при отсутствии ограничений по n^{\wedge} объекты с контрастом, равным 1, из-за фоновых шумов дадут изображение с контрастом $\Gamma = k/(k+2) = 0,3$ ($I_O = 1,85N$, $I_N = N$), а с ограничениями – $\Gamma = [p_l(k+1) - p_f] / [p_l(k+1) + p_f] = 0,98$ ($I_O = 0,92N$, $I_N = 0,01N$). Кроме того дискриминация позволяет избежать шумовых псевдоизображений (см. ниже).

8. Для дальнейшего важен вопрос, почему зрение остановилось при темновой адаптации на максимальном пикселе с угловой апертурой 50' (с $T = 0,2$ с – все более или менее ясно)? Рассмотрим сначала выгоды в чувствительности, которые получил бы глаз, увеличив площадь кластера на порядок, т. е. увеличив N до 84. Решив уравнение (1а), получаем $n^{\wedge} = 106$, $k = 0,27$, $\gamma_M = 7,1$. При этом пороговая освещенность существенно, в 3,2 раза понизится, не говоря уже о росте γ . Но во столько же раз снизится угловое разрешение, что является, по-видимому, неприемлемой платой за рост чувствительности. Проиллюстрируем это примером, приводящим существующие в этой области ограничения к более понятным временным ограничениям. Рассматривая точечную пиктограмму фигуры человека нетрудно убедиться, что для ее опознавания необходимо 8–9 пикселей по вертикали. Это в свою очередь означает, что при разрешении

Таблица 2. Сравнение характеристик режима полной темновой адаптации

p_f	N	n^{\wedge}	k	kN	Источник
0,01	8,9	17	0,88	7,8	Барлоу [7]
0,01	8,4	16	0,85	7,1	эта статья

50'– 60' опознание человека ростом 1,7 м произойдет на расстоянии 12 м. В этих условиях для подготовки к отражению нападения есть 2–3 с, но при ухудшении углового разрешения в 3 раза для такой подготовки остается меньше секунды, что недостаточно.

Возможно, кроме опасностей, связанных со снижением разрешения, существуют и другие причины ограничения на максимальный угловой размер “пиксела ретины”. Предполагается, что причины эти достаточно серьезные, и далее будет использоваться гипотеза о существовании фундаментального ограничения на минимальное приемлемое для глаза число пикселей в поле зрения.

Фундаментальный характер следует приписать и значению вероятности ложной тревоги $p_f \leq 0,01$. При полной темновой адаптации поле зрения состоит из 17000 больших пикселей, и даже при заданном значении p_f в каждом кадре по всему полю зрения будет наблюдаться 170 ложных вспышек, существенно, правда, “разведенных” темными пикселями. Такую помеху зрение при осмыслении кадра, по-видимому, может игнорировать, но при отмене дискриминации по n^{\wedge} или увеличении p_f число таких вспышек возрастет и из них могут возникнуть ложные псевдоизображения, с которыми зрению пришлось бы разбираться по существу.

9. Разумеется, формируя рецептивные поля, зрение борется не только с темновым шумом, но и с шумом, заложенным в квантовой структуре самого сигнала, фотонным шумом. В связи с этим полезно рассмотреть задачу о пороге чувствительности глаза при полном отсутствии темновых шумов. В этом случае первое уравнение системы (1а) автоматически удовлетворяется, сигналом считается всякое появление стандартного импульса (т. е. $n^{\wedge} = 1$). Решая второе уравнение системы (которое теперь можно интерпретировать как условие с 50% вероятностью получить на каждый пиксел в каждом кадре сигнальный импульс) при $n^{\wedge} = 1$, получаем для среднего потока фотонов на пиксел (с учетом квантовой эффективности 0,5) значение 1,4 за время кадра. Считая и для этого случая максимальным числом палочек в рецептивном поле $M = 6000$, получаем пороговую освещенность $L_D = 4 \times 10^4 \text{ ф с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ (0,1 мклк). Такой “бесшумный” глаз стал бы идеальным органом зрения при квантовой эффективности $\alpha = 1$ (пороговая освещенность при этом была бы $L_D = 2 \times 10^4 \text{ ф с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ (0,05 мклк)).

Ту же минимальную пороговую освещенность можно получить при достаточно низких темно-

вых шумах. Если в первом уравнении системы (1) положить $n^{\wedge} = 1$, для N получаем значение $N \leq 0,01$. Фиксируя максимальные допустимые значения $T = 0,2 \text{ с}$ и $M = 6000$, получаем из уравнения (2) для такой малозумящей “суперпалочки” $\phi = 8 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ и, соответственно, $R = 5 \times 10^2 \text{ ф с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ (1,5 $\times 10^{-3}$ мклк). К сожалению, такой рецептор без охлаждения не удалось создать даже природе.

Значение γ в рассматриваемых случаях уменьшилось до $\gamma = 1,2$. Но из опыта работы с изображениями следует, что как раз при $\gamma \geq 1$ из “пурги” квантовых вспышек начинает прорисовываться изображение [12].

10. Осталось показать, ценой каких потерь в разрешении достигается предельная чувствительность глаза. После построения больших рецептивных полей по 6000 элементов 100-мегапиксельное поле зрительных рецепторов (условная матрица $J \times J$ с $J = 10^4$) становится эквивалентным условной матрице с $J = 130$. Это, по-видимому, еще полезное в экстремальных условиях зрение. Но дальнейшее “сокращение” изображения, как это уже обсуждалось выше, оказалось нецелесообразным.

11. Идея обменивать в подражание зрению пространственное разрешение на повышенную чувствительность проста и широко реализуется в современных устройствах “электронного зрения” методом “бининга” (поэтапное формирование кластеров рядом расположенных приемников путем удвоения линейного размера кластера на каждом этапе). Необходимость бининга и его возможности зависят от конкретной решаемой задачи. Далее будет рассмотрен случай, когда низкоуровневое изображение после регистрации его электронным устройством предъявляется наблюдателю в реальном времени с дисплея, согласованного с глазом по полю зрения (как в бинокле). Разумеется, несмотря на нормальную яркость экрана дисплея увидеть что-либо на нем можно будет только в том случае, если будет обеспечена какая-то минимальная освещенность объекта. При дальнейшем расчете этой пороговой освещенности будет предполагаться, что наличие наблюдателя накладывает следующие фундаментальные ограничения на формируемое теперь уже оптико-электронным устройством изображение: $T \leq 0,2 \text{ с}$, $p_f \leq 0,01$, $J \geq 130$. Последнее условие эквивалентно обсуждавшемуся выше ограничению на максимальный угловой размер кластеров при использовании оптических систем с увеличением 1^{\times} . Но не исключено, что критерий $J \geq 130$ можно трактовать как более

широкое требование к минимуму информации в изображении.

Несмотря на то, что в описаниях серийно выпускаемых камер на охлаждаемых ПЗС и УПЗС авторам не удалось обнаружить признаков режима использования ограничения на уровне n^{\wedge} , в расчетах будет предполагаться применение этого приема.

Для демонстрации предлагаемого метода расчета оценим пороговую чувствительность для УПЗС на основе принятого за образец усилителя яркости V8070U/D фирмы *Hamamatsu* [7]. При принятых выше ограничениях и рабочей площади катода S (для V8070U/D $S = 1,35 \text{ см}^2$), площадь на катоде, соответствующая кластеру максимального размера, равна S/J^2 (сам кластер будет формироваться на уровне сопряженной ПЗС матрицы). Зная эквивалентную шумовую освещенность катода, квантовую эффективность и энергию кванта для $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$ ($\alpha = 0,5$ и $\varepsilon = 3,8 \times 10^{-19} \text{ Дж}$), можно определить N для максимально возможного по размеру кластера приемников

$$N = SRT\alpha/J^2\varepsilon, \quad (4)$$

полученное значение $N = 0,18$.

Порог восприятия так же, как и в опытах по определению его для зрения, определим условием $p_l = 0,5$. Подставив принятые p_l, p_f и полученное N в уравнения (1а), определяем $k = 9,8, n^{\wedge} = 2$.

Отсюда легко определить пороговую освещенность: 4 фотона на кластер за время кадра, или $L_D = 2,2 \times 10^5 \text{ ф с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ (0,6 мклк).

Если, как и в случае со зрением, описать выгоды предложенного режима темновой адаптации масштабом изменения отношения сигнал/шум в пикселе, то окажется, что при такой освещенности это отношение увеличилось с $\gamma_1 = 0,25$ до $\gamma_M = 1,4$ при переходе от стандартного разрешения (64 мм^{-1}) к разрешению, соответствующему максимальному кластеру (11 мм^{-1}).

12. Аналогичный расчет был проведен для описанной выше охлаждаемой ПЗС матрицы камеры *evolve* фирмы *PHOTOMETRICS* [6]. Его результат, как и результат расчета для V8070U/D, сведены в табл. 3, где они сравниваются с характеристиками режима полной темновой адаптации для глаза. Дополнительно к представленным в таблице результатам, чтобы четче выявить особенности каждого из приемников, были проведены расчеты для тех же катода и матрицы, но с площадью, приведенной к площади ретины (3 см^2) и соответствующим уменьшением или увеличением общего числа элементарных приемников. Из результатов этого расчета в таблице приведены только значения пороговых освещенностей L_D (в скобках) для таких виртуальных приемников.

Для интерпретации полученных результатов воспользуемся близостью при достаточно

Таблица 3. Характеристики режима “полной темновой адаптации”

Устройство	$d, \text{ мкм}$	$S, \text{ см}^2$	$H, 10^{-6}$	α	$R, 10^{-3}$ фотон $\text{с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	M	N	n^{\wedge}	k	γ_1/γ_M	$L_D, \text{ мклк}$
Ретина	2	3,1	100	0,5	470	6000	8,4	16	0,85	0,04/3	на ретине 1 (1), на зрачке 7 (7)
Усилитель яркости V7669U/D	16	1,35	0,55	0,5	22	33	0,18	2	9,8	0,25/1,4	0,6 (0,3)
Глубоко охлаждаемая ПЗС матрица с электронным умножением (<i>evolve</i>)	16	0,67	0,26	0,9	1,9	15	$1,5 \times 10^{-2}$	1	47	0,2/0,8	0,25 (0,15)

Примечание: d – диаметр элементарного приемника, S – площадь “матрицы”, H – общее количество приемников на “матрице”, α – квантовая эффективность приемников, R – эквивалентная шумовая освещенность, M – максимально возможное число приемников в кластере, N – среднее количество шумовых импульсов в кластере из M приемников за время кадра, n^{\wedge} – уровень ограничения числа шумовых импульсов на пиксел за кадр, k – превышение уровня шума сигналом на пороге восприятия, γ_1 и γ_M – отношение сигнал/шум в пикселе при пороговой освещенности для одиночного приемника и кластера из M приемников соответственно, L_D – порог восприятия по освещенности.

больших N пуассоновского распределения к нормальному. Обратимся к рис. 2. На нем, как и на рис. 1, совмещены схематические изображения распределения вероятности (ординаты) регистрации за кадр различного числа импульсов (абсциссы) в шумовом потоке со средней интенсивностью N импульсов за кадр (кривая 1) и при наличии сигнала, превышающего шум в k раз (кривая 2). Но теперь предполагается нормальное распределение этих вероятностей. Так же, как в случае пуассоновского распределения, можно произвольно выбрать на оси абсцисс между значениями N и $[(k+1)N]$ такое число n^{\wedge} , что только приходящий за кадр пакет с числом импульсов, большим n^{\wedge} , считался бы сигналом. При пороговой освещенности ($p_l = 0,5$) согласно второму уравнению (1) значение $n^{\wedge} = (k+1)N$. Согласно же первому уравнению (1), поскольку при нормальном распределении вероятности ложного шумового сигнала $p_f = 0,01$ соответствует точка $2,3$ среднеквадратичного отклонения, $n^{\wedge} = N + 2,3N^{0,5}$. Приравняв эти два выражения для n^{\wedge} , получаем для световой составляющей сигнала с пиксела за кадр

$$kN = 2,3N^{0,5}.$$

Переходя в левой части к пороговой освещенности L_D , в правой части с учетом выражения (4) для N получаем

$$L_D = 2,3J \left(\frac{\varepsilon}{ST} \right)^{0,5} \left(\frac{R}{\alpha} \right)^{0,5}. \quad (5)$$

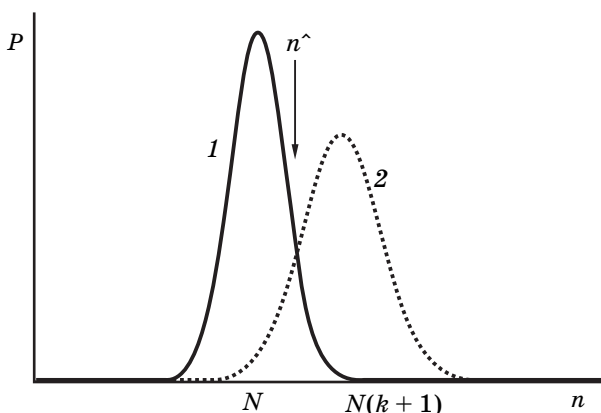


Рис. 2. К сравнению гауссовых шумов и сигналов. 1 – нормальное распределение со средним значением N (шум), 2 – со средним значением $(k+1)N$ (шум + сигнал).

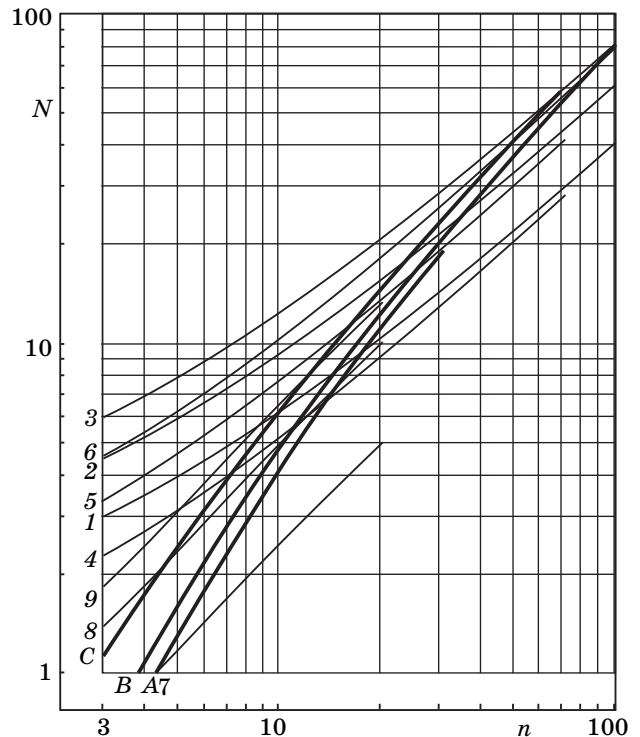


Рис. 3. Графическое решение уравнений (1). A – $p_f = 0,01$; B – $p_f = 0,05$; C – $p_f = 0,1$. 1 – $p_l = 0,05$ и $k = 2$; 2 – $p_l = 0,05$ и $k = 1$; 3 – $p_l = 0,05$ и $k = 0,5$; 4 – $p_l = 0,1$ и $k = 2$; 5 – $p_l = 0,1$ и $k = 1$; 6 – $p_l = 0,1$ и $k = 0,5$; 7 – $p_l = 0,5$ и $k = 3$; 8 – $p_l = 0,5$ и $k = 1$; 9 – $p_l = 0,5$ и $k = 0,5$.

Приняв за S площадь ретины, получаем L_D для ретины, ЭОПа и ПЗС матрицы в мклк соответственно 0,96; 0,2; 0,05, что в последних двух случаях существенно меньше значений L_D из табл. 3 (в скобках), сосчитанных для пуассоновского распределения, которое нельзя заменять для этих приборов гауссовым из-за малых значений N . В формуле (5), как и положено при правильных измерениях и гауссовых шумах пороговая освещенность уменьшается только как корень квадратный при уменьшении темнового тока. Но для более реалистичного пуассоновского распределения и при малых N уменьшение идет еще медленнее; сказывается также возрастание доли фотонного шума сигнала.

В табл. 3 обращает на себя внимание также то, что стандартный, без формирования кластеров приемников, режим использования рассмотренных приборов значительно ближе к пороговому режиму, чем у глаза, что связано с существенным (на два порядка) отставанием их матриц от ретины по числу элементарных приемников: элементарные приемники матриц – это уже “кластеры поневоле”.

13. В заключение представим номограмму (рис. 3) и формулы, облегчающие решение “вручную” уравнений (1), которые, надеемся, могут оказаться полезными для оценок и инженерам, работающим в диапазоне счета фотонов, и физиологам, исследующим темновую адаптацию. Рассмотрим, например, задачу определения оптимальных параметров N и n^{\wedge} для различных условий формирования режима пороговой освещенности. Если хотя бы одна из задаваемых вероятностей p_f и p_l меньше 0,1 или $N < 4$, следует пользоваться построенными по точным формулам (1) графиками номограммы. По p_f , p_l и k надо найти точку пересечения соответствующих кривых p_f и p_l и определить ее координаты N и n^{\wedge} . Зная N и шумовую характеристику φ для используемого приемника, с помощью формулы (2) можно определить необходимое оптимальное в этих условиях произведение TM .

Расчет несколько упрощается, если опять перейти от пуассоновского к нормальному распределению (см. рис. 2). При этом сформируются вероятности ложных сигналов и пропусков, определяемые формулами, близкими к уравнениям (1)

$$p_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{m_f}^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du,$$

$$p_l = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{m_l}^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du, \quad (6)$$

где

$$m_f = \frac{n^{\wedge} - N}{\sqrt{N}} \quad \text{и} \quad m_l = \frac{(k+1)N - n^{\wedge}}{\sqrt{(k+1)N}}. \quad (7)$$

Величины p и m могут быть легко увязаны через широко доступные таблицы интеграла (6), а затем из простых решений уравнений (7) значения N и n^{\wedge} выражаются в явном виде через m .

$$N = \left[\frac{m_f + m_l(k+1)^{1/2}}{k} \right]^2,$$

$$n^{\wedge} = \left[m_f + \frac{m_f + m_l(k+1)}{k} \right] \frac{m_f + m_l(k+1)}{k}.$$

Предлагаемый алгоритм, разумеется, может быть обращен: например, по заданным N , p_f

и p_l могут определяться n^{\wedge} и k для порогового режима.

Заключение

На основе анализа режима темновой адаптации глаза разработана схема расчета освещенностей, соответствующих порогу восприятия изображений наблюдателем, оснащенным приборами “электронного зрения”. Произведены расчеты характеристик пороговых режимов для реальных устройств “электронного зрения”: глубоко охлаждаемой ПЗС матрицы и усилителя яркости света на основе ЭОП с катодом GaAsP.

Полученные пороговые освещенности сравниваются с определяемой фотонными шумами пороговой освещенностью (0,05 мклк) “идеального”, не имеющего тепловых шумов прибора. Пороговая освещенность сетчатки больше этого предела в 20 раз, усилителя яркости – в 12 раз, глубокоохлаждаемой матрицы – в 5 раз.

Расчитанные пороговые освещенности при оснащении глаза соответствующими приборами уменьшались почти в 30 раз по сравнению с пороговой освещенностью для неоснащенного адаптированного к темноте глаза. Это связано, главным образом, с возможностью компенсировать большие оптические потери в глазу, сама же сетчатка уступила лучшему прибору (EMCCD) всего в 4 раза. После замены в расчетах реальной камеры “виртуальной” с увеличенной площадью матрицы, приведенной к площади сетчатки, это отношение увеличилось до 7 раз. Следует отметить, что этот сравнительно скромный результат получен при значительном превосходстве этого электронного приемника над зрительными рецепторами по тепловым шумам (250 раз по ЕВІ): порог обнаружения изображения, как и порог обнаружения любого сигнала, при гауссовом шуме и правильной организации измерений снижается при уменьшении темнового тока только как корень квадратный от тока, а при пуассоновском процессе и возрастании доли фотонного шума еще медленнее.

Показаны преимущества использования при пороговых освещенностях приема ограничения шумов на полученном из расчетов уровне n^{\wedge} : повышение контраста по контуру объекта и удаление шумовых псевдоизображений.

В статье не учтены некоторые особенности устройства сетчатки, например, неравномерное распределение рецепторов по полю зрения, но, авторы надеются, радикально на результаты

проведенного анализа это не повлияло. Авторы хотят выразить признательность Г.В. Папаяну за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rose A.* Vision Human and Electronics // N-Y. Plenum Press. 1973.
2. *Мирошников М.М.* Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1983. 696 с.
3. *Мирошников М.М.* Михаил Васильевич Ломоносов и современная оптика // ОМП. 1986. № 11. С. 1–14.
4. *Field G.D., Sampath A.P., Rieke F.* Retinal Processing Near Absolute Threshold: from Behavior to Mechanism // Annu. Rev. Physiol. 2005. V. 67. P. 491–514.
5. *Ala-Laurila P., Donner K., Koskelainen A.* Thermal Activation and Photoactivation of Visual Pigments // Biophysical Journal. 2004. V. 86. P. 3653–3662.
6. <http://www.photomet.com/products/emccdcams/index.php>; <http://www.photomet.com/products/ccdcams/index.php#ccds>
7. Image Intensifiers (04/2008). http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/II_TII0004E01.pdf
8. *Hartline H.K., McDonald P.R.* The Frequency of Seeing at Low Illumination // Individual Differences in Night-Vision Efficiency / Medical Research Council Special Report Series. London. 1957. № 294. P. 70–83.
9. *Barlow H. B.* Retinal Noise and Absolute Threshold // JOSA. 1956. V. 46. № 8. P. 634–639.
10. *Barlow H.B.* Temporal and Spatial Summation in Human Vision at Different Background Intensities // J. Physiol. 1958. V. 141. P. 337–350.
11. *Глезер В.Б., Подвигин Н.Ф.* Световая чувствительность зрительной системы // Физиология сенсорных систем. Ч. 1. Физиология зрения. Под ред. Гершуни Г.В. / М.: Наука, 1971. 211 с.
12. *Bosch L. A.* Image intensifier tube performance is what matters // Proc. SPIE. V. 4128. P. 65–78.