

УДК 612.843

Острота зрения и контрастная чувствительность зрительной системы человека

© 2017 г. С. И. Ляпунов

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва

E-mail: lyapunov@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 18.04.2017

Проведен анализ массива данных остроты зрения с позиций модели контрастной чувствительности зрительной системы, основанной на треморном модуляционном сигнале. Получены уравнения, устанавливающие однозначную связь между контрастной чувствительностью зрительной системы и остротой зрения. Результаты моделирования позволяют утверждать, что именно контрастная чувствительность зрительной системы определяет минимально необходимый размер поля суммации, исходя из условия нейронного возбуждения больше порогового значения. При этом пятно рассеяния, характеризующее качество оптической системы глаза, является лишь согласованным показателем. Полученные зависимости дают возможность сопоставить и взаимодополнить имеющиеся массивы данных контрастной чувствительности зрительной системы и остроты зрения.

Ключевые слова: зрение, острота зрения, контрастная чувствительность.

Коды OCIS: 330.1070, 330.1800, 330.4060, 330.5310, 330.5370

ВВЕДЕНИЕ

Предметом исследования является зависимость остроты зрения от внешних условий с позиций модели пороговых характеристик зрительной системы, основанной на треморном модуляционном сигнале (ТМС) [1, 2], и сопоставление результатов моделирования с имеющимися массивами данных. Модель ТМС построена на результатах фундаментальных экспериментов А.Л. Ярбуса [3], которые утверждают, что при остановке изображения на сетчатке и полной световой нагрузке фоторецепторов, а также работе всех отделов зрительного пути, начиная с ретины, восприятие изображения пропадает и устанавливается черное поле. В качестве микродвижений глаза, определяющих формирование сигнала в зрительной системе, выбраны тремор и дрейф, направления которых ортогональны. В качестве сигнала принимается разность концентрации фотореагента в фоторецепторе в крайних точках тремора. При наличии тремора ТМС на фоторецепторе постоянен и может существовать сколь угодно долго. По отношению к яркости изображения модель ТМС является нелинейной. Наряду с широко используемой в офтальмологии зависимостью остроты зрения от качества изображения в плоскости сетчатки представляет интерес установить ее взаимосвязь с контрастной чувствительностью зрительной системы.

Острота зрения является важной характеристикой зрительной системы, имеющей большое прикладное значение в повседневной и профессиональной деятельности человека. С давних времен по настоящее время по остроте зрения проводился отбор наблюдателей сначала по точечным предметам живой природы (звездам), затем по общепринятым оптическим тестам (кольцам Ландольта, мирам Фуко). Для исследования остроты зрения у населения разработаны буквенные тесты, например, таблицы Головина–Сивцева.

Проведены многочисленные измерения остроты зрения, которые обобщены и представлены на русском языке в работах [например 4–6]. Установлена зависимость остроты зрения от яркости адаптации, контраста стимула, места локализации стимула на сетчатке, возраста наблюдателя. Основной объем исследований проведен по тесту с кольцами Ландольта (рис. 1).

Измерение остроты зрения состоит в определении наблюдателем направления разрыва кольца Ландольта, которое может занимать одно из четырех положений, что позволяет использовать статистические методы для обработки измерений. Общепринятыми считаются данные измерений, полученные для темного стимула на светлом равномерном фоне заданной яркости адаптации,

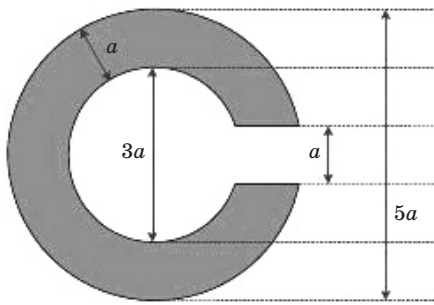


Рис. 1. Изображение и размеры кольца Ландольта.

соответствующие вероятности правильного решения задачи, равной 0,75. Полагается, что разрешаемый элемент соответствует размеру разрыва кольца. Острота зрения обратно пропорциональна разрешаемому элементу, выраженному в угловых минутах. Острота зрения связана с размером структурного элемента сетчатки [7], который у фoveальных колбочек составляет порядка 2 мкм,

$$V = 1/d_v, \quad (1)$$

где V — острота зрения, d_v — разрешаемый угол, определяемый как

$$d_v = d_{v0} + 0,68L_a^{-0,42}, \quad (2)$$

где L_a — яркость адаптации (кд/м²), d_{v0} — угловой размер структурного элемента сетчатки (0,45').

Знание зависимости остроты зрения от внешних условий позволяет рекомендовать наилучшие условия освещенности рабочего поля в зависимости от видов человеческой деятельности. Измерения остроты зрения позволяют так же выявлять нарушения оптики глаза и механизма аккомодации зрительной системы.

ОСТРОТА ЗРЕНИЯ И ОПТИКА ГЛАЗА

В качестве показателя качества оптической системы глаза будем использовать диаметр пятна рассеяния D_r , измеренный объективным способом в плоскости сетчатки, в зависимости от диаметра зрачка глаза D_e [8]. Данные приведены на рис. 2.

Для привязки диаметра зрачка к яркости адаптации используется формула Крауфорда

$$D_e = 5 - 3\text{th}(0,41L_a). \quad (3)$$

Сопоставление данных будем проводить для разрешаемого угла. Следуя логике критерия Рэлея, полагаем, что разрешаемый угол равен половине диаметра пятна рассеяния. Для пересчета размеров пятна рассеяния из линейной меры в угловую используем фокусное расстояние, равное 17 мм, соответствующее стандартной схеме глаза в воздухе [9].

Вторым основанием для пересчета является размер разрешаемого угла. Зрительная система

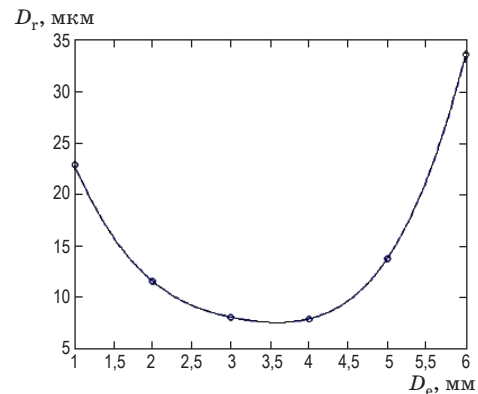


Рис. 2. Зависимость диаметра дифракционно-абберационного пятна рассеяния по данным работы [8] от диаметра зрачка глаза.

проводит решение различных информационных задач (обнаружения, определения ориентации, распознавания и идентификации объекта) на едином поле первичных сигналов. Формально все задачи можно свести к единой задаче обнаружения, проводимой на различных пространственных выборках. Согласно критерию Джонсона [10], полученного для сложных реальных объектов, для процедуры обнаружения достаточно 2 выборки, для определения ориентации — 3 выборки, для распознавания — 8 на критический размер объекта. Для приведения экспериментальных данных и данных моделирования к единым условиям необходимо учитывать соотношение количества выборок на габарит. При измерениях остроты зрения разрешаемый элемент полагают равным размеру разрыва кольца Ландольта, что составляет 5 выборок на габарит. Сопоставление критерия определения разрыва кольца Ландольта и определения ориентации объекта критерия Джонсона показывает, что размеры разрешаемого угла при измерении остроты зрения следует увеличить в 5/3 раза. Возможно, данные пропорции будут справедливы в определенном диапазоне условий наблюдения, поскольку пространственное различие стимулов имеет специфическую для каждого стимула особенность формирования зон раздражения и суммации сигнала. Формула (2) примет вид

$$d_v = 1,67(d_{v0} + 0,68L_a^{-0,42}). \quad (4)$$

Результаты расчетов разрешаемого угла приведены на рис. 3.

Зависимость разрешаемого угла от яркости адаптации при измерении остроты зрения совпадает с аналогичным показателем, рассчитанным исходя из диаметра дифракционно-абберационного пятна рассеяния, практически во всем диапазоне яркости адаптации. Можно даже предположить, что острота зрения определяется диаметром

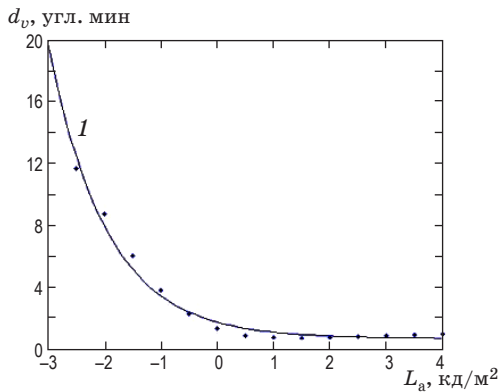


Рис. 3. Зависимость разрешаемого угла от яркости адаптации. 1 — результаты расчета по формуле (4), точки — результаты перерасчета данных работы [8].

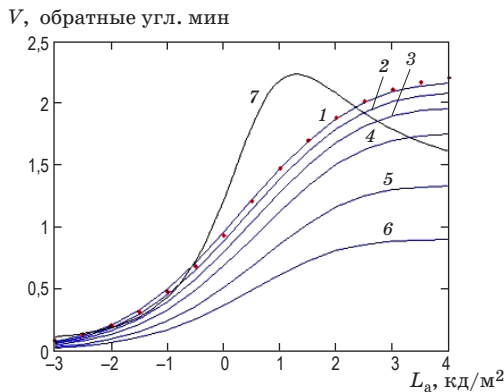


Рис. 4. Зависимости остроты зрения от яркости адаптации. 1–6 — результаты моделирования при контрасте стимула 1, 0,8, 0,6, 0,4, 0,2, 0,1, соответственно, 7 — результаты расчета по данным работы [8], точки — результаты расчета по формуле (2).

пятна рассеяния, но данное предположение было бы слишком поспешным и поверхностным, что будет показано ниже. Здесь же можно лишь обратить внимание только на то, что диаметр пятна рассеяния имеет свой локальный минимум при диаметре зрачка 3,5 мм, в то время как зависимость остроты зрения от яркости адаптации является монотонной функцией, т.е. измерения остроты зрения не фиксируют локального минимума пятна рассеяния. Если вычислить остроту зрения по данным диаметра пятна рассеяния, то можно наблюдать несвойственный максимум на его линейном участке (рис. 4, кривая 7).

ОСТРОТА ЗРЕНИЯ И КОНТРАСТНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Согласно модели пороговых характеристик зрительной системы, основанной на ТМС [1, 2], пороговый контраст определяется выражением

$$C_{th} = (F/N)[1 + K_2/(K_1EN)] / \{1 - \exp[-(K_2 + K_1E)t]\}. \quad (5)$$

Здесь E — освещенность в плоскости сетчатки, K_2 и K_1 — коэффициенты фотохимического уравнения, F — порог нейронного возбуждения, N — поле суммации, t — время предъявления стимула,

$$C_{th} = (L_o - L_a)/L_a, \quad (6)$$

где L_o — яркость стимула,

$$E = \pi\tau L_a D_e^2 / 4f^2, \quad (7)$$

где f — фокусное расстояние глаза, τ — коэффициент пропускания глаза.

В общем случае параметр N определяется как отношение размера функционального элемента к его минимальному значению. Поскольку минимальный размер функционального элемента зрительной системы равен одной угловой минуте, то можно принимать, что параметр N соответствует угловому размеру стимула.

Если в формуле (5) не учитывать временной множитель, то получим простое уравнение, связывающее яркость адаптации, контраст и угловые размеры стимула.

$$C_{th}K_1EN^2 - FK_1EN - FK_2 = 0. \quad (8)$$

В случаях порогового контраста, равного единице, физически имеем, что все яркости изображения стимула, лежащие между $L_o = 0$ и L_a при отрицательном контрасте и между L_a и $L_o = 2L_a$ при положительном, находятся ниже порога восприятия и не различаются глазом. Применительно к разрыву кольца Ландольта это условие означает его неразличение. Решение уравнения (8) является убывающей функцией от яркости адаптации и не имеет локальных минимумов (рис. 5).

Полное совпадение данных во всем диапазоне яркостей адаптации дает приведение решения уравнения (8) по формуле

$$N_1 = N/1,5 + 0,65. \quad (9)$$

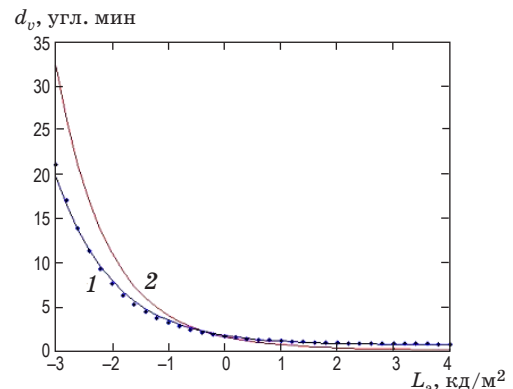


Рис. 5. Зависимости разрешаемого угла от яркости адаптации. 1 — результаты расчета по формуле (4), 2 — решение уравнения (8), точки — скорректированное решение по формуле (9).

Наличие в формуле (9) аддитивного члена может быть связано с проблемой определения значения поля суммации при N , близких к единице. Это может быть вызвано тем, что амплитуда тремора превосходит в два раза размер фовеальной колбочки, т.е. проекция фоторецептора в процессе тремора накрывает не один, а два элемента. Данный вопрос требует дополнительного исследования.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты моделирования позволяют утверждать, что именно контрастная чувствительность зрительной системы определяет минимальный размер поля суммации (размер функционального элемента), необходимый для решения заданной информационной задачи исходя из условия нейронного возбуждения больше порогового значения, в то время как качество изображения оптической системы глаза является лишь согласованным показателем. В любом случае, наблюдается двухпараметрическая оптимизация механизма работы зрительной системы.

Уравнения (5) и (8) порогового контраста зрительной системы получены при условии превышения нормированного сигнала некоторого порога нейронного возбуждения, т.е. решение данного уравнения носит пороговый характер. Обобщая сказанное, можно считать, что в уравнениях (5) и (8) любая пара параметров из набора — контраст, размер поля суммации и освещенность в плоскости сетчатки могут быть заданы как исходные значения, а третий параметр отразит пороговые условия наблюдения. Зная освещенность в плоскости сетчатки и угловой размер стимула, можно определить значение порогового контраста. Зная освещенность в плоскости сетчатки и контраст, можно определить минимальный угловой размер стимула, обнаруживаемого зрительной системой. Наконец, зная контраст и угловой размер стимула, можно определить минимальную освещенность в плоскости сетчатки, обеспечивающую пороговое восприятие стимула. Напомним, что освещенность в плоскости сетчатки связана с яркостью адаптации уравнением (3).

Проведем расчет остроты зрения согласно формулам (8) и (9) при условии, что контраст стимула меньше единицы. На рис. 4 представлены результаты расчета в привычном для читателя масштабе согласно формуле (2). На этом же рисунке для сравнения приведен график остроты зрения, рассчитанной исходя из диаметра дифракционно-абerrационного пятна рассеяния. Следует отметить высокую сходимость модельных и экспериментальных данных в случае стимула единичного контраста и характерное нелинейное уменьшение остроты зрения в зависимости от контраста стимула. Особый интерес представляет острота зрения,

рассчитанная исходя из диаметра дифракционно-абerrационного пятна рассеяния с не характерным для экспериментальных зависимостей локальным максимумом. Но интерес представляет не сам максимум, а тот факт, что определяющим остроту зрения фактором при яркости адаптации более 100 кд/м^2 продолжает оставаться размер поля суммации N (размер функционального элемента), а не растущий диаметр дифракционно-абerrационного пятна рассеяния. Это еще раз подчеркивает определяющее значение контрастной чувствительности в формировании такого показателя зрительной системы, как острота зрения.

Полученные зависимости позволяют сопоставить и взаимодополнить имеющиеся массивы данных контрастной чувствительности зрительной системы и остроты зрения. При измерении контрастной чувствительности статистическая обработка строится либо на неопределенности места предъявления стимула, либо на неопределенности временного интервала предъявления стимула. Если проанализировать данные Блэкуэлла, то можно констатировать большие различия по уровню пороговых контрастов. Это обусловлено тем, что зона неопределенности предъявления стимула в первом случае составляла порядка 10° , внутри которой существенным образом меняются размеры и состав фоторецепторов. В случае использования методики временных интервалов стимул находится в центральной области, но его размеры достигают 2° . При измерении остроты зрения статистическая неопределенность вносится расположением разрыва, рассматриваемого зоной фовеа, при этом угловой размер разрыва не превышает $30'$. Кроме того, при использовании методики фиксации взора на заданную точку отсняты подробные карты остроты зрения практически по всему полю зрения для стимулов различного контраста и при различном времени предъявления стимула. По сути, это дает возможность рассчитать по уравнениям (8) и (9) карту распределения контрастной чувствительности зрительной системы по всему полю зрения и соотнести ее с топологией зрительного нерва и последующих разделов зрительной системы, что имеет большое прикладное значение, в частности, при разработке ретинальных имплантов для протезирования зрения.

ВЫВОДЫ

Анализ массива данных остроты зрения с позиций модели контрастной чувствительности зрительной системы, основанной на треморном модуляционном сигнале, позволил установить взаимосвязь контрастной чувствительности и остроты зрения. Результаты моделирования позволяют утверждать, что именно контрастная чувствительность зрительной системы определяет минимальный

размер поля суммации (размер функционального элемента), необходимый для решения заданной информационной задачи, исходя из условия нейронного возбуждения больше порогового значения, в то время как качество изображения оптической системы глаза является лишь согласованным

показателем. В любом случае, наблюдается двухпараметрическая оптимизация механизма работы зрительной системы. Полученные зависимости позволяют сопоставить и взаимодополнить имеющиеся массивы данных по контрастной чувствительности зрительной системы и остроте зрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ляпунов С.И.* Пороговый контраст зрительной системы в зависимости от внешних условий для различных тестовых стимулов // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 6. С. 63–71.
2. *Ляпунов С.И.* Глубина резкости зрительного восприятия в зависимости от внешних условий // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 1. С. 24–31.
3. *Ярбус А.Л.* Роль движений глаз в процессе зрения. М.: Наука, 1965. 166 с.
4. *Мешков В.В., Матвеев А.Б.* Основы светотехники. Часть 2. Физиологическая оптика и колориметрия. М.: Энергоатомиздат, 1989. 432 с.
5. *Волков В.В., Луизов А.В., Овчинников Б.В., Травникова Н.П.* Эргономика зрительной деятельности человека. Л.: Машиностроение, 1989. 111 с.
6. *Шелепин Ю.Е., Колесникова Л.Н., Левкович Ю.И.* Визоконтрастометрия: измерение пространственных передаточных функций зрительной системы. Л.: Наука, 1985. 103 с.
7. *Шелепин Ю.Е.* Пространственно-частотные характеристики и острота зрения человека // Биофизика сенсорных систем / Под ред. Самойлова В.О. СПб.: ИнформМед, 2007. С. 60–101.
8. Human Eye // Handbook of Optical Systems / Ed. by Gross H. V. 4. D. 36. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. P. 1–87.
9. *Герман И.* Физика организма человека. Долгопрудный: ИД Интеллект, 2011. 991 с.
10. *Ллойд Дж.* Основы тепловидения. М.: Мир, 1978. 414 с.