
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ РЕЦЕПТИВНЫХ ПОЛЕЙ НЕЙРОНОВ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

В.В. Роженцов, Т.А. Лежнина

Кафедра проектирования и производства ЭВС
Марийский государственный технический университет
пл. Ленина, 3, Йошкар-Ола, Россия, 424000

Предложен способ измерения полосы пропускания рецептивных полей нейронов зрительной системы путем измерения периода световых мельканий с последующим вычислением частоты. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтвердившие повышение точности измерений.

Ключевые слова: зрительная система, нейрон, рецептивное поле, полоса пропускания, точность измерений.

Введение. Основной структурной и функциональной единицей нервной системы является нейрон. Он способен принимать, обрабатывать, кодировать, хранить и передавать информацию, устанавливая контакты с другими нейронами. Каждый нейрон своей воспринимающей частью (дендриты) связан с несколькими нейронами нижнего уровня нервной системы или периферическими рецепторами. Та область рецепторной поверхности, с которой связан отдельный нейрон через нейроны нижнего уровня или непосредственно, называется рецептивным полем [1].

Одной из гипотез описания изображений в зрительной системе является гипотеза пространственно-частотной фильтрации, когда рецептивные поля нейронов рассматриваются как полосовые фильтры пространственных частот, имеющих определенную полосу пропускания, которая изучается с помощью тонких светлых и темных полос, а также решеток с синусоидальным распределением яркости с разной пространственной частотой, под которой понимается число периодов (циклов) распределения яркости на один градус поля зрения (цикл/град) [2].

Для измерения полосы пропускания рецептивного поля нейрона с использованием решеток с синусоидальным распределением яркости на его вход подается последовательный ряд изображений таких решеток с различной пространственной частотой. Глубина модуляции (контраст) ощущаемого изображения всегда отлична от глубины модуляции входного изображения. Значение модуля передаточной функции для каждой пространственной частоты равно отношению модуляции ощущаемой гармонической составляющей к данной гармонической составляющей во входном изображении и называется коэффициентом передачи модуляции. Совокупность коэффициентов передачи модуляции для разных пространственных частот определяет функцию передачи модуляции или пространственную модуляционную передаточную функцию. В литературе, посвященной физической и физиологической оптике, ее называют частотно-контрастной характеристикой [2]. Измерение пространственных модуляционных передаточных функций позволяет определить полосу пропускания рецептивного поля нейрона в цикл/град.

Измерение полосы пропускания рецептивных полей нейронов является актуальным в теории сенсорных систем, в нейрофизиологии и психофизиологии, однако ее определение путем измерения пространственных модуляционных передаточных функций требует специального оборудования и занимает длительное время.

Целью работы является повышение точности измерения полосы пропускания рецептивных полей нейронов зрительной системы человека, определяемой в герцах.

Метод определения полосы пропускания рецептивных полей нейронов. Зрительная система воспринимает частоты световых мельканий в среднем от 0 до 50 Гц, причем верхней граничной частотой является критическая частота световых мельканий $F_{кчсм}$, т.е. частота перехода от видимости мельканий к ощущению их субъективного слияния. Экспериментально установлено, что зрительной системой близкие частоты световых мельканий не различаются, так как они находятся внутри полосы пропускания рецептивных полей нейронов [3]. Если разность между предъявляемыми частотами будет больше полосы пропускания исследуемых рецептивных полей, т.е. когда эти частоты будут восприниматься разными рецептивными полями, эти частоты будут различаться.

Таким образом, ширину полосы пропускания рецептивных полей нейронов в герцах можно определить путем оценки порога различения двух ближайших частот как минимальной разности ΔF между «верхней» F_2 и «нижней» F_1 частотами световых мельканий (рис. 1), которая вызывает у испытуемого ощущение их различения [4]:

$$\Delta F = F_2 - F_1. \quad (1)$$

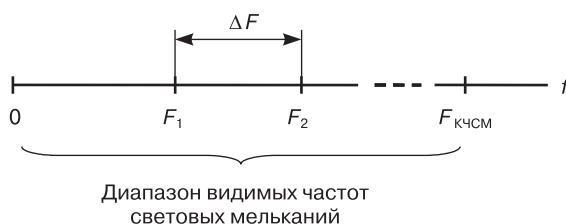


Рис. 1. Порог различения частот световых мельканий
(обозначения величин в тексте)

Точность измерения полосы пропускания рецептивных полей нейронов. При измерении полосы пропускания рецептивных полей нейронов принято верхнюю F_2 и нижнюю F_1 частоты световых мельканий предъявлять попеременно с периодом, равным 1 с [4], поэтому время измерения частоты, т.е. калиброванный интервал времени, равен 1 с. В лучшем случае, если для формирования калиброванного интервала времени использовать кварцевый генератор, предел допускаемой абсолютной погрешности измерения частоты $\Delta_{пред.част}$ равен [5]:

$$\Delta_{пред.част} = \pm \left(\delta_{кв} \cdot f_{изм} + \frac{1}{\Delta t_{к}} \right), \quad (1)$$

где $\delta_{\text{кв}}$ — общая погрешность кварцевого генератора (средняя относительная нестабильность частоты кварцевого генератора); $f_{\text{изм}}$ — максимальное значение измеряемой частоты за время $\Delta t_{\text{к}}$; $\Delta t_{\text{к}}$ — калиброванный интервал времени.

Средняя относительная нестабильность частоты кварцевого генератора $\delta_{\text{кв}}$ согласно технической документации равна $\pm 1 \cdot 10^{-6}$. Диапазон предъявляемых частот световых мельканий для определения полосы пропускания рецептивных полей нейронов зрительной системы принят от 5 до 50 Гц. Тогда предел допускаемой абсолютной погрешности при измерении частоты

$$\Delta_{\text{пред.част}} = \pm \left(\delta_{\text{кв}} \cdot f_{\text{изм}} + \frac{1}{\Delta t_{\text{к}}} \right) = \pm \left(1 \cdot 10^{-6} \cdot 60 + \frac{1}{1} \right) \approx \pm 1 \text{ Гц}. \quad (2)$$

Предел допускаемой относительной погрешности $\delta_{\text{пред.част}}$, выраженной в процентах от измеряемого значения, при измерении частоты равен [5]:

$$\delta_{\text{пред.част}} = \pm 100 \cdot \left(\delta_{\text{кв}} + \frac{1}{n} \right) \%, \quad (3)$$

где $\delta_{\text{кв}}$ — общая погрешность кварцевого генератора; n — минимальное количество импульсов, сосчитанное в течение калиброванного интервала времени.

Количество импульсов n , сосчитанное в течение калиброванного интервала времени 1 с при минимальной частоте 5 Гц, равно 5, тогда предел допускаемой относительной погрешности при измерении частоты

$$\delta_{\text{пред.част}} = \pm 100 \cdot \left(\delta_{\text{кв}} + \frac{1}{n} \right) = \pm 100 \cdot \left(1 \cdot 10^{-6} + \frac{1}{5} \right) \approx \pm 20 \%. \quad (4)$$

Обеспечить повышение точности определения полосы пропускания рецептивных полей нейронов можно путем измерения периода предъявляемых частот световых мельканий с последующим вычислением полосы пропускания по формуле [6]:

$$\Delta F = \frac{1}{T_2 \cdot 10^{-3}} - \frac{1}{T_1 \cdot 10^{-3}}, \quad (5)$$

где T_2 и T_1 — периоды световых мельканий в мс, соответствующие верхней и нижней частотам.

Предел допускаемой абсолютной погрешности при измерении периода $\Delta_{\text{пред.пер}}$, как интервала времени, равен [5]:

$$\Delta_{\text{пред.пер}} = \pm (\delta_{\text{кв}} \cdot \Delta t + \delta_{\text{зап}} \cdot \Delta t + T_{\text{сч}}), \quad (6)$$

где $\delta_{\text{кв}}$ — общая погрешность кварцевого генератора; Δt — максимальное значение измеряемого интервала времени; $\delta_{\text{зап}} = \frac{1}{\pi h}$ — погрешность преобразования (среднеквадратическая относительная погрешность запуска); h — отношение сигнал/помеха; $T_{\text{сч}}$ — период следования счетных импульсов.

Диапазон измеряемых интервалов времени Δt при измерении периода в диапазоне частот от 5 до 50 Гц составляет соответственно от 200 до 20 мс. Примем частоту кварцевого генератора равной 100 КГц, тогда период следования счетных импульсов $T_{сч}$ равен 0,01 мс. Примем отношение сигнал/помеха 40 дБ, так как незаметность помехи на визуальном изображении обеспечивается при соотношении сигнал/помеха порядка 41,5 дБ [7], тогда $h = 100$, среднеквадратическая относительная погрешность запуска

$$\delta_{зап} = \frac{1}{\pi h} = \frac{1}{3,14 \cdot 100} \approx 3 \cdot 10^{-3}, \quad (7)$$

предел допускаемой абсолютной погрешности при измерении периода

$$\begin{aligned} \Delta_{пред.пер} &= \pm(\delta_{кв} \cdot \Delta t + \delta_{зап} \cdot \Delta t + T_{сч}) = \\ &= \pm(1 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-3} \cdot 200 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-5}) \approx \pm 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ с.} \end{aligned} \quad (8)$$

Предел допускаемой относительной погрешности при измерении периода $\delta_{пред.пер}$, выраженной в процентах от измеряемого интервала времени Δt , равен [5]:

$$\delta_{пред.пер} = \pm 100 \cdot \left(\delta_{кв} + \delta_{зап} + \frac{1}{m} \right) \%, \quad (9)$$

где $\delta_{кв}$ — общая погрешность кварцевого генератора; $\delta_{зап} = \frac{1}{\pi h}$ — погрешность преобразования; h — отношение сигнал/помеха; m — минимальное число счетных импульсов, заполняющих измеряемый интервал времени Δt .

Так как диапазон измеряемых интервалов времени Δt при оценке периода составляет от 200 до 20 мс, период следования счетных импульсов $T_{сч}$ равен 0,01 мс, число счетных импульсов m , заполняющих измеряемый интервал времени Δt , равно от 20 000 до 2000. Тогда предел допускаемой относительной погрешности при измерении периода

$$\begin{aligned} \delta_{пред.пер} &= \pm 100 \cdot \left(\delta_{кв} + \delta_{зап} + \frac{1}{m} \right) = \\ &= \pm 100 \cdot \left(1 \cdot 10^{-6} + 3 \cdot 10^{-3} + \frac{1}{2000} \right) \approx \pm 0,4 \%. \end{aligned} \quad (10)$$

Результаты расчета погрешностей приборов измерения полосы пропускания рецептивных полей нейронов зрительной системы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные погрешности приборов измерения полосы пропускания рецептивных полей нейронов зрительной системы

Изменяемый параметр	Погрешности приборов	
	$\Delta_{пред}$	$\delta_{пред}, \%$
Частота, Гц	± 1	± 20
Период, с.	$\pm 0,6 \cdot 10^{-3}$	$\pm 0,4$

При определении полосы пропускания рецептивных полей нейронов зрительной системы путем измерения верхней и нижней частот световых мельканий и вычисления их разности принято измерять частоты с точностью до 0,1 Гц [8]. Предел допускаемой абсолютной погрешности приборов, в которых измеряется частота, равен ± 1 Гц, что в 10 раз больше 0,1 Гц.

При измерении периода частот световых мельканий с учетом экспериментальных данных по измерению временных характеристик зрительной системы [9], принята точность измерения 0,1 мс. Предел допускаемой абсолютной погрешности приборов для измерения периода равен $\pm 0,6$ мс, что в 6 раз больше 0,1 мс, т.е. в 1,7 раз меньше по сравнению с измерением частоты.

Предел допускаемой относительной погрешности приборов для измерения периода световых мельканий в 50 раз меньше по сравнению с приборами для измерения их частоты.

Таким образом, предлагаемый способ измерения полосы пропускания рецептивных полей нейронов зрительной системы позволяет уменьшить погрешность приборов, тем самым повысить точность измерений.

Результаты экспериментальных исследований. В обследовании приняло участие 10 предварительно обученных испытуемых в возрасте от 18 до 22 лет с нормальным или скорректированным зрением, которые выполнили две серии по 10 измерений полосы пропускания рецептивных полей нейронов зрительной системы на начальной частоте 20 Гц. В первой серии измерений для пяти испытуемых полоса пропускания рецептивных полей нейронов определялась путем измерения частот световых мельканий, во второй серии измерений — путем измерения периодов с последующим вычислением частот. Для пяти других испытуемых порядок выполнения серий измерений был обратным.

Измерения выполнялись бинокулярно в помещении, оборудованном в соответствии с требованиями СНиП 23-05-95 [10] в первой половине дня с 9 до 12 ч. с перерывами от 25 до 30 мин. на отдых между сериями измерений. Излучателями световых мельканий служили светодиоды желтого цвета диаметром 5 мм с силой света 3 мкд, размещаемые в районе ближней точки ясного видения. Формирование предъявляемых частот световых мельканий, их изменение и определение полосы пропускания выполнялось с использованием ПЭВМ уровня Pentium III.

По результатам измерений вычислялись:

— абсолютная случайная погрешность результатов измерений $\Delta_{\text{изм}}$ (доверительный интервал случайной погрешности результатов измерений) [11]:

$$\Delta_{\text{изм}} = \pm t_{P;n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}}, \quad (11)$$

где $t_{P;n}$ — коэффициент Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности P и объема выборки n ; x_i — результат i -го измерения; \bar{X} — среднеарифметическое (математическое ожидание) результатов измерений;

— относительная погрешность результатов измерений $\delta_{\text{изм}}$, выраженная в процентах от значения измеряемой величины [5]:

$$\delta_{\text{изм}} = \pm 100 \frac{\Delta_{\text{изм}}}{\bar{X}} \%, \quad (12)$$

где $\Delta_{\text{изм}}$ — абсолютная случайная погрешность результатов измерений; \bar{X} — среднеарифметическое результатов измерений;

— \tilde{M} — точечная оценка медианы распределения абсолютной случайной и относительной погрешностей по группе испытуемых [12];

— $[\mu_1; \mu_2]$ — доверительный интервал для медианы \tilde{M} , где μ_1 и μ_2 — соответственно нижняя и верхняя доверительные границы при уровне доверия 95% [12].

Результаты расчета погрешностей измерений полосы пропускания рецептивных полей нейронов приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Абсолютная случайная погрешность измерений по группе испытуемых

Измеряемый параметр	$\Delta_{\text{изм}}$	\tilde{M}	$[\mu_1; \mu_2]$
Частота, Гц	$\pm (0,21 \dots 0,67)$	$\pm 0,33$	$\pm [0,26; 0,56]$
Период, мс	$\pm (0,14 \dots 0,53)$	$\pm 0,25$	$\pm [0,18; 0,41]$

Таблица 3

Относительная погрешность измерений по группе испытуемых (%)

Измеряемый параметр	$\delta_{\text{изм}}$	\tilde{M}	$[\mu_1; \mu_2]$
Частота, Гц	$\pm (8 \dots 27)$	± 14	$\pm [10; 24]$
Период, мс	$\pm (5 \dots 21)$	± 11	$\pm [7; 18]$

Анализ результатов вычислений погрешностей измерений по группе испытуемых показал, что значение медианы распределения абсолютной случайной погрешности при измерении периода уменьшилось по сравнению с измерением частоты на 24%, значение медианы распределения относительной погрешности — на 21%.

Заключение. Предложен способ измерения полосы пропускания рецептивных полей нейронов зрительной системы человека в герцах путем измерения периода световых мельканий с последующим вычислением значения частоты. Экспериментально показано, что это позволяет повысить точность измерений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вартамян И.А. Физиология сенсорных систем: Руководство. — СПб.: Лань, 1999.
- [2] Шелепин Ю.Е., Колесникова Л.Н., Левкович Ю.И. Визоконтрастометрия: Измерение пространственных передаточных функций зрительной системы. — Л.: Наука, 1985.
- [3] Глезер В.Д. Зрение и мышление. — Изд. 2-е, исп. и доп. — СПб.: Наука, 1993.
- [4] Лежнина Т.А. Методы и устройства для измерения частотно-временных параметров зрительной системы человека: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Казань, 2004.

- [5] Справочник по радиоэлектронным устройствам. В 2 т. Т. 2. / Под ред. Д.П. Линде. — М.: Энергия, 1978.
- [6] Патент 2350256 РФ, МПК А61В 3/00. Способ определения полосы пропускания рецептивных полей нейронов зрительной системы / Роженцов В.В., Лежнина Т.А. — Оpubл. 27.03.2009, Бюл. № 9.
- [7] *Красильников Н.Н.* Обобщенная функциональная модель зрения и ее применение в системах обработки и передачи изображений // *Автометрия*. — 1990. — № 6.
- [8] *Роженцов В.В.* Дифференциальная чувствительность зрения к частоте световых мельканий // *Медицинская техника*. — 2005. — № 2.
- [9] *Роженцов В.В.* Методы и средства контроля функционального состояния человека на основе временных характеристик зрительного анализатора: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. — Казань, 2007.
- [10] СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение. — М.: Изд-во стандартов, 1995.
- [11] *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат, 1991.
- [12] ГОСТ Р ИСО 16269-7-2004. Статистическое представление данных. Медиана. Определение точечной оценки и доверительных интервалов. — М.: Изд-во стандартов, 2004.

MEASUREMENT ACCURACY ASSURANCE OF VISUAL SYSTEM NEURONS RECEPTIVE FIELDS PASS BAND

V.V. Rozhentsov, T.A. Lezhnina

Mari State Technical University
Lenin sq., 3, Yoshkar-Ola, Russia, 424000

Measurement method of visual system neurons receptive fields pass band by measuring light flickers period with subsequent frequency calculation is proposed. Results of the experimental studies that confirmed measurement accuracy increasing are presented.

Key words: visual system, neuron, receptive field, pass band, measurement accuracy.