

Ю. И. ПЕТУНИН, В. С. САВЧУК, В. И. СКОК

КОМПОНЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОГРАММЫ ПЕРИФЕРИЧЕСКОГО НЕРВА

(Представлено академиком В. М. Глушковым 28 IX 1973)

Электрограмма, отводимая от тонически активных периферических нервов, представляет собой суперпозицию ряда последовательностей нервных импульсов. Каждая такая последовательность нервных импульсов поступает от отдельного источника — группы нейронов, генерирующих импульсы, которые распространяются примерно с одинаковой скоростью. Для нейрофизиологии представляет интерес определение числа составляющих компонент суммарной электрограммы, вычисление интенсивности и скорости распространения каждой отдельной компоненты. Целью данной работы является проведение такого компонентного анализа электрограммы с помощью различных методик. Одна из них, позволяющая оценить указанные характеристики составляющих потоков, была предложена Коксом и Льюисом ⁽¹⁾; при этом предполагается, что компоненты являются независимыми между собой одинаковыми процессами восстановления, отличающимися от пуассоновских потоков.

Пусть N_t — число импульсов исследуемого потока за период времени $[0, t]$; обозначим через $V(t)$ дисперсию этой случайной величины. В работе ⁽¹⁾ показано, что при больших значениях t

$$V(t) \approx \frac{p\sigma^2 t}{3} + p \left(\frac{1}{6} + \frac{\sigma^4}{2\mu^4} - \frac{\mu_3}{3\mu^3} \right) = \bar{b}t + \bar{a},$$

где p — число компонент потока, μ — средняя величина межимпульсного интервала x одной компоненты, σ^2 и μ_3 — соответственно дисперсия и третий момент x . Предполагая затем, что каждая компонента имеет γ -распределение, в ⁽¹⁾ получены следующие формулы для оценок μ и p :

$$\bar{\mu} = \bar{p}/\bar{m}^{(p)}, \quad \bar{p} = 6a\bar{\chi}^2/(\bar{\chi}^2 - 1);$$

здесь $\bar{m}^{(p)}$ — оценка интенсивности суммарного потока, $\bar{\chi} = \bar{m}^{(p)}/\bar{b}$ — оценка параметра χ γ -распределения. Если $a < 0$, то $\chi < 1$; поскольку при этом γ -распределение $f(u)$ резко изменяет свой вид и стремится к бесконечности при $u \rightarrow 0$, нам кажется более предпочтительным использовать в качестве гипотезы о типе распределений межимпульсных интервалов компоненты логнормальное распределение ⁽²⁾, которое при изменении параметров изменяется регулярным образом. Можно показать, что в этом случае

$$\bar{p} = \frac{6\bar{a}(\bar{m}^{(p)})^3}{(\bar{m}^{(p)})^3 - 3\bar{b}^2\bar{m}^{(p)} - 2\bar{b}^3},$$

причем оценки параметров логнормального распределения имеют вид

$$\bar{\omega} = (1 + \bar{b}/\bar{m}^{(p)})^{1/2}, \quad \bar{p} = \bar{b}/\bar{m}^{(p)}.$$

Следует отметить, что сама методика Кокса и Льюиса и ее модификация, связанная с использованием логнормального распределения, довольно редко приводит к удовлетворительным результатам при компонентном ана-

лизе электрограммы периферического нерва. Проведенные нами эксперименты по компонентному анализу депрессорного и шейного симпатического нерва кошки показывают, что только в двух случаях из шести получаются результаты, приемлемые для физиологии. Один из таких «удачных» экспериментов представлен на рис. 1. Расчеты, основанные на этих экспериментальных данных, показывают, что для симпатического нерва $\bar{p}=32$, $\bar{\mu}=47$ мсек. в случае γ -распределения и $\bar{p}=31$, $\bar{\mu}=47$ мсек. для логнормального распределения.

Заметим, что в качестве примера, иллюстрирующего применение этой методики, Кокс и Льюис анализируют данные, взятые из работы Фэтта и Катца ⁽³⁾. По их мнению, имеющаяся в цитируемой статье ⁽³⁾ последовательность межимпульсных интервалов относится к потоку нервных импульсов, распространяющихся вдоль нерва; на самом деле эта последовательность представляет собой случайную последовательность миниатюрных потенциалов концевой пластинки ⁽⁴⁾, которые не имеют отношения к распространяющимся потенциалам действия.

В связи с вышеизложенными недостатками методики Кокса и Льюиса, нами был проведен компонентный анализ с помощью более точной методики, описанной в статье ⁽⁵⁾; исследуемая импульсация, полученная при отведении от шейного симпатического ствола кошки, представлена на рис. 2. Обозначим через $N(t)$ число совпадений импульсов в единицу времени при условии, что время задержки равно t (в нашем опыте единица времени составляла 100 сек.). Функция $N(t)$ вычислялась через каждые 15 мсек. в пределах от 80 до 900 мсек. и через каждые 30 мсек. в пределах от 900 до 2165 мсек. Кривая $N(t)$ приведена на рис. 3.

Перейдем теперь к задаче определения интенсивности каждой компоненты в предлагаемой методике. Предположим вначале, что на оба входа схемы совпадений поступает один пуассоновский поток импульсов с неизвестной интенсивностью λ . Обозначим через Δt время, в течение которого регистрируется совпадение импульсов ($\Delta t=40$ мсек.). Пусть X — случайная величина, равная числу случайных совпадений в единицу времени (в этом случае время задержки t выбрано так, что в блоке совпадений нет «истинных» совпадений). Найдем математическое ожидание $m(X)$; для этого обозначим через x_1, x_2, \dots, x_n моменты появления импульсов в течение единичного интервала времени. Положим

$$U_i = \begin{cases} 1, & \text{если в интервале } (x_i + t - \Delta t, x_i + t + \Delta t) \text{ содержится импульс} \\ & \text{данного потока;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Очевидно, случайная величина $X = U_1 + U_2 + \dots + U_n$ представляет сумму случайного числа величин, поэтому производящая функция $P_X(s)$ случайной величины X равна суперпозиции производящих функций $P_N(s)$ и $P_{U_i}(s)$ случайных величин $N=n$ и U_i :

$$P_X(s) = P_N[P_{U_i}(s)]$$

((⁶), гл. XII, §1). Так как $P_N(s) = e^{\lambda(s-1)}$,

$$P_{U_i}(s) = e^{-2\Delta t\lambda} + s(1 - e^{-2\Delta t\lambda}),$$

то

$$P_X(s) = \exp\{\lambda[e^{-2\Delta t\lambda} + s(1 - e^{-2\Delta t\lambda}) - 1]\}.$$

Как известно ((⁶), гл. XI, §1), $m(X) = P_X'(1)$, поэтому

$$m(X) = \lambda(1 - e^{-2\Delta t\lambda}).$$

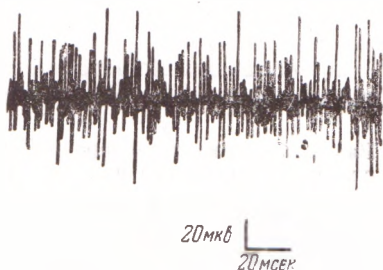


Рис. 1. Электрограмма, отводимая от симпатического ствола кошки

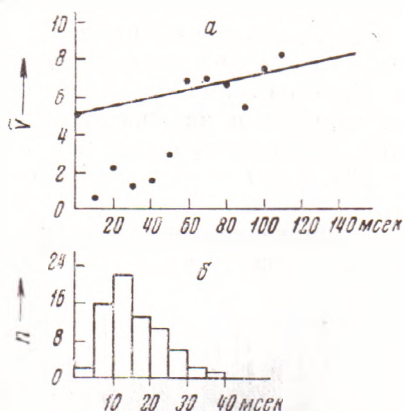


Рис. 2. а — кривая дисперсии $V(t)$; б — гистограмма распределения межимпульсных интервалов суммарного потока

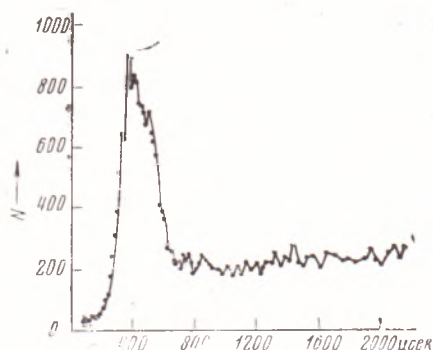


Рис. 3. Функция $N(t)$, объяснения в тексте

Пусть Y — случайная величина, равная числу истинных совпадений импульсов в единицу времени после соответствующей задержки. Очевидно, $m(Y) = \lambda > m(X)$, поэтому для времени задержки t_1 мы получаем максимальное значение $N(t)$: $N(t_1) > N(t)$. Далее $\alpha = m(Y) - m(X) = \lambda e^{-2\Delta t_1}$.

Предположим теперь, что мы имеем суперпозицию p независимых пуассоновских потоков с интенсивностями $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$. Обозначим через t_i ($i=1, 2, \dots, p$) время задержки, соответствующее истинному совпадению импульсов для i -го потока, а через Y_i — число истинных совпадений импульсов в единицу времени i -го потока с учетом случайных совпадений импульсов для остальных потоков; X , по-прежнему, означает число случайных совпадений в единицу времени для всего составного потока. Можно показать, что функция $N(t)$ в точке t_i имеет локальный максимум, причем

$$\alpha_i = m(Y_i) - m(X) = \lambda_i e^{-2\Delta t_i}. \quad (1)$$

Заменяя в уравнении (1) величину α_i на ее оценку $\bar{\alpha}_i$, вычисленную в результате эксперимента, и решая это уравнение относительно неизвестного λ_i , мы найдем приближенное значение интенсивности каждой компоненты составного потока. Из формулы (1) следует, что при малых значениях Δt и при небольших значениях α_i можно считать, что $\lambda_i \approx \alpha_i$.

Анализ кривой $N(t)$ показывает, что для исследованного интервала задержки $p=16$ (в этих случаях величина горба $N(t)$ значительно превышает колебания $N(t)$ для случайных совпадений). Интенсивности λ_i этих компонент соответственно равны: $\lambda_1=920$; $\lambda_2=840$; $\lambda_3=695$; $\lambda_4=213$; $\lambda_5=213$; $\lambda_6=210$; $\lambda_7=172$; $\lambda_8=173$; $\lambda_9=183$; $\lambda_{10}=211$; $\lambda_{11}=243$; $\lambda_{12}=200$; $\lambda_{13}=210$; $\lambda_{14}=216$; $\lambda_{15}=227$; $\lambda_{16}=226$ (импульсов за 100 сек.), а их скорости (в м/сек): $v_1=32,4$; $v_2=28,9$; $v_3=23,8$; $v_4=16,3$; $v_5=15,7$; $v_6=14$; $v_7=11,7$; $v_8=11,1$; $v_9=10,5$; $v_{10}=9$; $v_{11}=8,2$; $v_{12}=7,6$; $v_{13}=7,2$; $v_{14}=6,2$; $v_{15}=5,7$; $v_{16}=5,5$.

В заключение отметим, что для изложенной выше методики определения интенсивностей λ_i гипотеза о независимости компонент и о типе распределения межимпульсных интервалов не играет существенной роли.

Киевский государственный университет
им. Т. Г. Шевченко
Институт физиологии им. А. А. Богомольца
Академии наук СССР
Киев

Поступило
28 IX 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Д. Кокс, П. Льюис, Статистический анализ последовательностей событий, М., 1969. ² М. Дж. Кендалл, А. Стьюарт, Теория распределений, «Наука», 1966. ³ P. Fatt, B. Katz, J. Physiol., 117, 109 (1952). ⁴ Б. Катц, Нерв, мышца и синапс, М., 1968. ⁵ В. И. Скок, В. С. Савчук, И. Н. Ремизов, Физиол. журн. СССР, 57, 10, 1638 (1971). ⁶ В. Феллер, Введение в теорию вероятностей и ее приложения, 1, М., 1964.