ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА им. С. М. КИРОВА

Том 266 1976

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРИФЕРИИ СИСТЕМЫ ВОСПРИЯТИЯ

В. П. БОНДАРЕНКО, В. М. РАЗИН

В работе [1] моделирование периферии системы восприятия сведено к поиску последовательного ряда операторов: 1) оператора L_1, преобразующего входной сигнал в измеряемую величину, 2) оператора L_2, формирующего систему координат и приводящего к ней измеряемую величину и 3) алгоритма измерения. В данной работе будут рассмотрены операторы L_1 и L_2.

Рассмотрим задачу для случая одновременного сигнала $f(t)$, где t — время. Сигнал охарактеризуем параметрами [1]:

$$E_{\text{к}} = \frac{1}{T} \int\limits_T f_{\kappa}^2(t)\, dt \leqslant E < \infty,$$

где κ — номер реализации сигнала, E — верхняя граница энергии сигнала, и

$$\omega_{\text{в}\kappa} \leqslant \omega_{\text{в}} < \infty, \ \omega_{\text{н}\kappa} \geqslant \omega_{\text{н}} > 0,$$

где $\omega_{\text{в}}$ и $\omega_{\text{н}}$ — верхняя и нижняя частотные границы энергетического спектра сигнала.

Оператор L_1, т. е. преобразование сигнала в измеряемую величину, реализуется с помощью датчика [2]. Как правило, вход и выход датчика связаны линейной однозначной зависимостью. Следовательно, оператор L_1 преобразует входной сигнал в измеряемую величину без искажений.

Начало системы координат (отправные точки) [2] является нулем шкалы измеряемой величины, например, точка плавления льда принимается за 0°C и т. п. Обычно отправные точки являются условными, т. е. фиксируются при определенных условиях окружающей среды. Задать отправные точки аналогичным образом в нашем случае практически невозможно. Это требует дополнительных, зачастую очень больших затрат на поддержание постоянства нуля.

Примем за основу построения системы координат гипотезу относительности отправных точек [3], что равносильно следующему: система координат для измеряемой величины должна быть своя для каждого конкретного сигнала. В результате действия оператора L_2 сигнал примет вид:

$$\varphi_1(t) = f(t) - m_1(t), \qquad (1)$$

где $m_1(t)$ — уровень отсчета, $\varphi_1(t)$ — сигнал, поступающий на вход измерительного блока.

Будем определять функцию $m_1(t)$ как некоторое среднее значение входного сигнала с помощью оператора свертки

$$m_1(t) = \int_0^t f(\tau) h_1(t-\tau)\, d\tau, \tag{2}$$

где $h_1(t)$ — весовая функция, удовлетворяющая условиям [4]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} h_1(t)\, dt = 1, \quad h_1(t) \geqslant 0. \tag{3}$$

Кроме условий (3), никаких дополнительных ограничений на вид весовой функции не накладывается, поэтому для простоты анализа выберем в качестве функции $h_1(t)$ функцию вида

$$h_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_1} \exp\left[-\frac{(t-d_1)^2}{2\sigma_1^2}\right]. \tag{4}$$

Соотношение между параметрами d_1 и σ_1 определяется из условия физической реализуемости оператора (2). Достаточно хорошее приближение имеет место при

$$d_1^2 = (3 \div 5)\,\sigma_1^2.$$

Рассмотрим функцию (4) как импульсную характеристику фильтра. Коэффициент передачи фильтра будет равен

$$H_1(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\, e^{-\frac{\omega^2\sigma_1^2}{2}} e^{-j\omega d_1}.$$

Найдем частоту среза фильтра как значение $\omega_{1в}$ на уровне 0,5 от максимального значения квадрата амплитудно-частотной характеристики H_1

$$\omega_{1в} = \frac{0{,}7}{\sigma_1}.$$

Обозначим

$$\sigma_0 = \frac{0{,}7}{\omega_в}, \quad \sigma_1 = \alpha\sigma_0,$$

где $\alpha > 1$.

Величина α будет определять частотный диапазон сигнала $\varphi_1(t)$ и верхнюю границу E_1 энергии $\varphi_1(t)$. Требования к сложности измерительного блока [1] наложат некоторые ограничения на величину E_1 и ширину частотного диапазона функции $\varphi_1(t)$. Построим оператор таким образом, чтобы иметь возможность изменения указанных величин, т. е. величины α, в широких пределах. Точное значение может быть найдено только при анализе измерительного блока.

Преобразование (1) дает ошибку в представлении сигнала, равную величине [1]

$$\int_0^T m_1^2(t)\, dt = \delta_1.$$

Для уменьшения величины δ_1, при заданном α, введем функцию $m_1(t)$ в измерительный блок по параллельному каналу, приведя ее к своему уровню отсчета. Последовательным использованием такого ввода можно перекрыть весь частотный диапазон сигнала, при этом для i-го преобразования (1) функция (4) будет характеризоваться параметром

$$\sigma_i = \alpha^i \sigma_0.$$

В этом случае сигнал, поступающий на вход измерительного блока, будет представлен суммой

$$\varphi(t) = \sum_{i=1}^{l} \varphi_i(t), \tag{5}$$

где

$$l = \frac{\ln \frac{\omega_в}{\omega_н}}{\ln \alpha},$$

и будет равен входному сигналу $f(t)$. В самом деле, по построению суммы (5) можно записать

$$\varphi_i(t) = m_{i-1}(t) - m_i(t).$$

Подставляя $\varphi_i(t)$ в (5), получим

$$\varphi(t) = f(t) - m_1(t) + m_1(t) - \ldots - m_e(t) = f(t) - m_e(t),$$

где $m_e(t)$ совпадает с постоянной составляющей сигнала, которая при $\omega_н > 0$ равна нулю.

Формирование составляющих $\varphi_i(t)$ суммы (5) можно рассматривать как фильтрацию входного сигнала фильтром с импульсной характеристикой

$$y_i(t) = g_{i-1}(t) - g_i(t), \tag{6}$$

где $g_i(t)$ — последовательная свертка функций $h_к(t)$, $к = 1, 2, \ldots, i$.

Учитывая (3), (4), на основании свертки нормальных законов распределения [5], можно записать:

$$g_i(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\, b_i} \exp\left[-\frac{(t - a_i)^2}{2b_i^2}\right], \tag{7}$$

где

$$b_i^2 = \sigma_0^2 (1 + \alpha^2 + \cdots + \alpha^{2i}) = \frac{\sigma_0^2 [\alpha^{2(i+1)} - 1]}{\alpha^2 - 1},$$

$$a_i = d_0 (1 + \alpha + \cdots + \alpha^i) = \frac{d_0 [\alpha^{i+1} - 1]}{\alpha - 1}. \tag{8}$$

Выражения (7), (8) описывают искомый оператор L_2. Можно построить оператор L_2, привязываясь к частоте $\omega \gg \omega_в$. В этом случае, отбрасывая все $y_i(t)$, которые имеют полосу пропускания по частоте, не совпадающую с частным диапазоном сигнала, выражения для b_i и a_i можно приближенно записать в виде

$$b_i^2 = \frac{b_0^2\, \alpha^{2(i+1)}}{\alpha^2 - 1}, \quad a_i = \frac{a_0 \alpha^{i+1}}{\alpha - 1},$$

где b_0 — определяется частотой $\omega_в$, $a_0^2 = (3 \div 5) b_0^2$.

Оператор L_2 для $1 < \alpha < 2$ можно обобщать на случай любой весовой функции (4), но удовлетворяющей условиям (8), так как свертка таких функций, при i достаточно больших, будет сходиться к функции вида (7) [5].

Оператор L_2 легко обобщить на случай двумерного сигнала, типа изображений. В этом случае $a_0 = 0$ и выражение (6) принимает вид

$$y_i(x, y) = g_{i-1}(x, y) - g_i(x, y),$$

где

$$g_i(x, y) = \frac{1}{2\pi b_i^2} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2b_i^2}\right]. \tag{9}$$

Сравнение выражения (9) с выражением для функции связи сетчатки глаза [6] указывает на их хорошее соответствие. Аналогично характеристики фильтров с импульсными характеристиками (6) при $1<\alpha<2$ достаточно хорошо совпадают [7] с характеристиками, описывающими свойства основной мембраны органа слуха.

Соответствие литературных данных по организации структур периферии зрительной и слуховой систем восприятия человека с полученным оператором L_2 позволяет надеяться, что изложенный подход к моделированию периферии системы восприятия является достаточно общим и позволяет рассмотреть с изложенных позиций структуру систем восприятия человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Бондаренко, В. М. Разин. К вопросу моделирования систем восприятия человека. Настоящий сборник.
2. П. В. Новицкий. Основы информационной теории измерительных устройств. «Энергия», 1968.
3. Дэвид Бом. Специальная теория относительности. «Мир», 1970.
4. А. Ф. Романенко, Г. А. Сергеев. Вопросы прикладного анализа случайных процессов. «Советское радио», 1968.
5. Б. В. Гнеденко. Курс теории вероятностей. «Наука», 1965.
6. Кацухико Фудзии, Тацуя Морита. Модель зрительной системы распознавания образов. Сб. «Модели нейронных структур». «Наука», 1970.
7. В. П. Бондаренко. Один подход к описанию свойств базалярной мембраны. Доклад на II краевой научно-технической конференции, посвященной Дню радио. Красноярск, 1970.