УДК 510.62

З. Ю. МАЛЕНЧЕНКО, Ю. П. ШАБАНОВ-КУШНАРЕНКО, д-р техн. наук

О БИОНИЧЕСКИХ ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНЫХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЯХ

В радиотехнике широко используется метод частотно-импульсного кодирования функций времени. Согласно этому методу, положительной функции времени $f(t)$, заданной на интервале времени $0 \leqslant t \leqslant T$, ставится в соответствие последовательность $\varphi(t)$ стандартных импульсов. Импульс вырабатывается в тот момент, когда под участком кривой $f(t)$ накопляется площадь некоторой достаточно малой заранее заданной величины $\delta > 0$. Чем меньше выбрана площадь δ, тем точнее кодируется функция f. Эта площадь отсчитывается от момента времени t_{i-1} возникновения предыдущего импульса. Момент времени t_i, в который вырабатывается последующий импульс, определяется равенством

$$\int\limits_{t_{i-1}}^{t_i} f(t)\,dt = \delta, \quad i = 1, 2, 3, \ldots \tag{1}$$

Полагаем $t_0 = 0$. Если значение δ достаточно мало, то уравнение (1) можно с требуемой точностью заменить уравнением $(t_i - t_{i-1}) f(t_{i-1}) = \delta$ (2), откуда находим

$$t_i = t_{i-1} + \frac{\delta}{[f(t_{i-1})]}. \tag{3}$$

Таким образом, частота следования импульсов в последовательности $\varphi(t)$ прямо пропорциональна значению функции $f(t)$.

Можно предположить, что нервные клетки рецепторов человека преобразуют изменяющийся во времени непрерывный физический стимул $f(t)$ в его частотно-импульсный код $\varphi(t)$. В самом деле, клетка рецептора реагирует на физический стимул импульсным ответом (закон «все или ничего»), причем сигнал вырабатывается в момент накопления некоторого порогового значения импульса δ стимула в соответствии с формулой (1) (закон полной суммации). В связи с этим выглядит естественной следующая гипотеза: мозг человека обрабатывает информацию о физических процессах, воспринимаемых рецепторами, посредством преобразования частотно-импульсных кодов этих процессов. Сформулированная гипотеза приводит к следующей бионической идее: мы предлагаем при электронном моделировании непрерывных физических процессов обрабатывать с помощью цифровых моделей не сами функции, соответствующие этим процессам, а лишь их частотно-импульсные коды. Быть может, эта идея позволит увеличить быстродействие цифровых моделей и снизить их массу и стоимость. Чтобы моделировать процессы, описываемые линейными дифференциальными и интегральными уравнениями, достаточно научиться складывать частотно-импульсные коды функций, интегрировать их и умножать на числовые коэффициенты. Ниже описывается способ реализации этих трех операций.

Будем считать, что каждая функция времени $F(t)$, фигурирующая в моделируемом процессе, при любом t из интервала $0 \leqslant t \leqslant T$ ограничена по абсолютному значению единицей: $-1 < F(t)$ (4). Такому ограничению всегда можно удовлетворить соответствующим выбором масштаба для моделируемого процесса. Поставим во взаимно однозначное соответствие каждой функции $F(t)$ некоторую функцию $f(t)$, определяемую формулой

$$f(t) = \frac{1}{2} F(t) + \frac{1}{2}. \tag{5}$$

Значения так выбранной функции $f(t)$ при любом t находятся в пределах $0 < f(t) < 1$ (6), а нулевому значению функции $F(t)$ теперь соответствует значение $\frac{1}{2}$ функции $f(t)$. Обратный переход от функции f к функции F может быть совершен по формуле $F(t) = 2f(t) - 1$ (7).

Преобразование (5) дает возможность избавиться от отрицательных (точнее — от неположительных) значений моделируемой функции. Для функции f можно сформировать частотно-импульсный код в соответствии с формулами (1)—(3). Функция же F для этой цели непригодна. Таким образом, моделируемая функция F заменяется ее непрерывным портретом f, который, в свою очередь, преобразуется в дискретный портрет φ. Дискретный портрет φ функции F обрабатывается цифровой моделью. Полученный результат затем переводится в аналоговый портрет f моделируемой функции F. Для этого достаточно пропустить соответствующий дискретный портрет φ через высокочастотный фильтр. Переход от функции f к функции F производится в соответствии с формулой (7).

Потребуем, чтобы функции $f(t) \equiv 1$ соответствовал частотно-импульсный код $1(t) = 1111...$, представляющий собой серию импульсов тактовой частоты. В этом случае временной интервал между соседними моментами дискретного времени, равный тактовому периоду, должен быть равен значению δ. Полагаем, что дискретное время принимает натуральные значения $t=1$, 2, 3, ... Функции $f(t)=1/2$ соответствует дискретный портрет

$$\frac{1}{2}(t)=\begin{cases}0, & \text{если } t\text{— нечетно,}\\ 1, & \text{если } t \quad \text{четно.}\end{cases} \tag{8}$$

Таким образом, код $1/2(t)$ представляет собой последовательность чередующихся нулей и единиц $1/2(t)=0101...$

Рассмотрим случай, когда требуется сложить две функции $F_1(t)$, $F_2(t)$ и получить их сумму $F(t)=F_1(t)+F_2(t)$. Это возможно лишь в том случае, когда при любом t из интервала $0\leqslant t\leqslant T$ $\quad -1<F_1(t)+F_2(t)<1$ **(9)**. Пусть функциям $F_1(t)$, $F_2(t)$, $F(t)$ соответствуют их дискретные портреты $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$, $\varphi(t)$. Нетрудно показать, что код $\varphi(t)$ можно выразить с достаточной точностью через коды $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$ с помощью следующего преобразования:

$$p(t)=\varphi_1(t)\,\varphi_2(t);\quad q(t)=\frac{1}{2}(t);\ \varphi_1(t);\ r(t)=\frac{1}{2}(t)\,\varphi_2(t);$$

$$v(t)=p(t)\vee q(t)\vee r(t);\quad \varphi(t)=\frac{1}{2}(t)\,p(t)\vee v(t)w(t-1);$$

$$w(0)=0;\quad w(t)=v(t)\vee(\varphi_1(t)\vee\varphi_2(t)\vee\frac{1}{2}(t))w(t-1). \tag{10}$$

Операцию, представленную формулами (10), запишем в виде $\varphi(t)=\varphi_1(t)+\varphi_2(t)$ **(11)** и назовем сложением кодов $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$, код $\varphi(t)$ — суммой кодов $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$.

Рассмотрим случай, когда требуется функцию $F_1(t)$ умножить на —1. Результат этой операции обозначим в виде функции $F_2(t)$: $F_2(t)=-F_1(t)$. Пусть функции $F_1(t)$ соответствует дискретный портрет $\varphi_1(t)$, а функции $F_2(t)$ — портрет $\varphi_2(t)$. Тогда $\varphi_2(t)=\overline{\varphi_1(t)}$ **(12)**. Операцию, представленную формулой (12), запишем в виде $\varphi_2(t)=-\varphi_1(t)$ **(13)** и назовем умножением кода $\varphi_1(t)$ на число —1.

Рассмотрим случай, когда требуется функцию $F_1(t)$ умножить на число $\alpha(t)$, заключенное в пределах $0<\alpha(t)<1$ **(14)** при любом t из интервала $0\leqslant t\leqslant T$. В результате этого умножения получаем функцию $F_2(t)=\alpha(t)F_1(t)$. По-прежнему считаем, что функции $F_1(t)$ соответствует код $\varphi_1(t)$, а функции $F_2(t)$ — код $\varphi_2(t)$. Можем записать

$$\varphi_2(t)=\alpha(t)\times\varphi_1(t)+\frac{1}{2}(1-\alpha(t))\times 1(t). \tag{15}$$

В формуле (15) фигурирует операция $\alpha\times\varphi$, первым аргументом которой служит число α, заключенное в пределах $0<\alpha<1$, вторым — код φ. Операцию $\times$ задаем следующими формулами:

$$\alpha(t)\times\varphi(t)=[\beta(t-1)+\gamma(t)];\quad \beta(0)=0;\quad \beta(t)=\{\beta(t-1)+\gamma(t)\};$$

$$\gamma(t)=\begin{cases}\alpha(t), & \text{если } \varphi(t)=1;\\ 0, & \text{если } \varphi(t)=0.\end{cases} \tag{16}$$

В формулах (16) квадратными скобками обозначена целая часть числа, фигурными — дробная часть числа. Операцию, представленную формулами (15), (16), запишем в виде $\varphi_2(t) = \alpha(t)\varphi_1(t)$ **(17)** и назовем умножением кода $\varphi_1(t)$ на число $\alpha(t)$. Код $\varphi_2(t)$ назовем произведением кода $\varphi_1(t)$ на число $\alpha(t)$.

Наконец, рассмотрим случай, когда требуется функцию $F_1(t)$ проинтегрировать по времени t. В результате интегрирования получаем функцию

$$F_2(t) = \lambda \int_0^t F_1(t)\, dt. \tag{18}$$

Интегрирование считаем возможным только в том случае, если в формуле (18) значение функции $F\ (t)$ заключено в пределах $-1 < F_2(t) < 1$ **(19)** при любом t из интервала $0 \leqslant t \leqslant T$. Последнее условие всегда можно выполнить при соответствующем выборе масштаба $\lambda > 0$. Пусть функции соответствует дискретный портрет $\varphi_1(t)$, а функции $F_2(t)$ — портрет $\varphi_2(t)$. Можем записать

$$\varphi_2(t) = \alpha(t) \times 1(t); \ \alpha(0) = \frac{1}{2};$$

$$\alpha(t) = \begin{cases} \alpha(t-1) + \mu, & \text{если } \varphi(t) = 1, \\ \alpha(t-1) - \mu, & \text{если } \varphi(t) = 0. \end{cases} \tag{20}$$

Символом μ обозначено некоторое положительное число, во много раз меньшее единицы. Значение μ выбирают с таким расчетом, чтобы выполнилось условие (14). Его выбор определяет масштаб λ.

Поступила в редколлегию 20.12.82.

УДК 510.62