

*Н. В. АЛИПОВ*, канд. техн. наук, *А. В. ГРИГОРЬЕВ*

### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ФОРМЫ ИНФОРМАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ТИПА

Преобразователи формы информации (ПФИ) широко применяются при создании различных радиотехнических и информационных систем. На них, кроме функций по преобразованию формы информации, возлагают ряд новых функций по обработке цифровых отсчетов смеси сигнала и помехи, по самопроверке работоспособности. Такие ПФИ называют интеллектуальными [1, 2], проектируют их с использованием микропроцессоров. Современные микропроцессоры не выполняют операции параллельной обработки смеси сигнала и помехи, поэтому не позволяют на своей основе создавать широкополосные интеллектуальные ПФИ реального времени.

Повысить быстродействие интеллектуальных ПФИ можно только путем создания и совершенствования принципов параллельной обработки цифровых отсчетов смеси сигнала и помехи.

Опишем принципы построения и основы программирования интеллектуальных ПФИ, осуществляющих операции параллельной обработки сигнала.

Методы дисперсионного, корреляционного и спектрального анализа сигнала и различные алгоритмы линейной фильтрации включают математическую операцию

$$Z_{q_i} = (N_6/N_5) \sum_{i=1}^n (x_i + a_{i+j}) (y_{q+i} + b_{q_i+i}). \quad (1)$$

Здесь  $x_i$ ,  $a_{i+j}$ ,  $y_{q+i}$ ,  $b_{q_i+i}$  — соответственно цифровые отсчеты первой, второй, третьей и четвертой функций, взятые в моменты времени  $(i-1)\Delta t$ ,  $(i+j-1)\Delta t$ ,  $(q-1)\Delta t$ ,  $(q+i-1)\Delta t$ , где  $\Delta t$  — шаг квантования по времени;  $N_6$ ,  $N_5$  — числа, устанавливающие коэффициент при интегральном преобразовании (1);

$Z_{q_1}$  — значение результата операции (1), отнесенное к моменту времени  $(q_1 - 1) \Delta t$ ;  $i, j, q, q_1, q_2 = 1, n$ ;  $n$  — количество отсчетов функций  $X(t), A(t), Y(t), B(t)$ .

Интегральное преобразование (1) как «элементарное» преобразование — преобразование, выполняемое одновременно над всеми  $n$  значениями функций  $X(t), A(t), Y(t), B(t)$ , может быть реализовано средствами вычислительных декодирующих преобразователей (ВДП) [3].

Каскадное включение таких ВДП позволяет получать аналоговый эквивалент преобразования

$$\dot{Z}_{q_1} = k (N_6/N_5) \sum_{i=1}^n (x_i + a_{i+j}) (y_{q+i} + b_{q_1+i}), \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от разрядности ВДП.

Обработывая  $\dot{Z}_{q_1}$  аналого-цифровым преобразователем (АЦП), получаем цифровой эквивалент преобразования (1)

$$\bar{Z}_{q_1} = k_1 (N_6/N_5) \sum_{i=1}^n (x_i + a_{i+j}) (y_{q+i} + b_{q_1+i}). \quad (3)$$

Здесь  $k_1$  — коэффициент пропорциональности, значение которого определяем разрядностью АЦП, ВДП и параметром  $n$  преобразования (1). Предполагается, что две скобки преобразования (1) обрабатываются одним разрядом такого комбинированного устройства (КУ). КУ содержит  $n$  разрядов, значения которых суммируются согласно соотношению (1). Каждый разряд КУ содержит четыре регистра: первый предназначен для запоминания  $x_i$ , второй — для хранения  $a_{i+j}$ , третий — для размещения  $y_{q+i}$ , четвертый — для занесения  $b_{q_1+i}$ . Предположим также, что между регистрами КУ имеются кодовые шины, с помощью которых осуществляется передача информации вдоль первых, вторых, третьих и четвертых регистров КУ, шины управления и синхронизации; кодовые шины непосредственной записи информации в регистры КУ и записи значений  $\bar{Z}_{q_1}$  в один из первых регистров КУ.

В таком КУ зададим следующие операции.

1. Операция сложения цифровых отсчетов первой и второй, третьей и четвертой функций, записанных в регистры одного разряда, умножения полученных сумм и суммирования произведений, образованных в разрядах КУ. Эту операцию задает соотношение (3). В тех случаях, когда информация обрабатывается в реальном масштабе времени, соотношение (3) для момента времени  $t$  при  $j = q = q_2 = 0$ , будем записывать в виде

$$\bar{Z}_{q_1,t} = k_1 (N_{6,t}/N_{5,t}) \sum_{i=1}^n (x_{i,t} + a_{i,t}) (y_{i,t} + b_{i,t}). \quad (4)$$

2. Операция занесения информации по синхроимпульсу в момент времени  $t$  на первый, второй, третий или четвертый регистр первого разряда КУ с одновременной передачей информации (сдвигом) соответственно с первого, второго, третьего или четвертого регистра  $(i-1)$ -го разряда КУ соответственно на первый, второй, третий или четвертый регистр  $i$ -го разряда КУ.

Условимся эту операцию обозначать таким образом:

$$\vec{R}_{i,t} = \begin{cases} R_t, & i = 1; \\ \vec{R}_{i-1,t-1}, & i > 1, \end{cases}$$

где  $i = \overline{1, n}$ ,  $\vec{R}_{i,t} \in \{\vec{x}_{i,t}; \vec{a}_{i,t}; \vec{y}_{i,t}; \vec{b}_{i,t}\}$ ;  $R_t$  — информация, поступающая на регистры первого разряда КУ. Если, к примеру,  $\vec{R}_1 = x_t$ , то КУ для момента времени  $t$  осуществляет преобразование информации в соответствии с соотношением

$$\bar{z}_{q,t} = k_1 (N_{6,t}/N_{5,t}) \sum_{i=1}^n (\vec{x}_{i,t} + a_{i,t}) (y_{i,t} + b_{i,t}). \quad (5)$$

Здесь значения  $a_{i,t}$ ,  $y_{i,t}$ ,  $b_{i,t}$  остаются постоянными, а изменяется лишь значение  $x_{i,t}$  путем передвижения информации вдоль всех первых регистров КУ с одновременной записью новой информации  $x_t$  на первый регистр первого разряда КУ.

Существует пятнадцать возможных комбинаций перемещений информации вдоль регистров КУ (четыре для случая, когда информация движется вдоль одной группы одноименных регистров КУ; шесть — при перемещении информации одновременно вдоль двух одноименных групп регистров КУ; четыре и одна — соответственно при сдвиге информации вдоль трех и четырех одноименных групп регистров КУ). Выбор той или иной конфигурации перемещения информации определяется видом интегрального преобразования.

3. Операция занесения информации по синхроимпульсу в момент времени  $t$  на все первые, вторые, третьи или четвертые регистры КУ. Эта операция описывает движение информации в регистрах одного разряда; условно обозначим ее символами

$$\uparrow R_{i,t} = R_{i,t},$$

где  $R_{i,t}$  — информация, поступающая на один из регистров  $i$ -го разряда в момент времени  $t$ ;

$$\uparrow R_{i,t} \in \{\uparrow x_{i,t}; \uparrow a_{i,t}; \uparrow y_{i,t}; \uparrow b_{i,t}\}.$$

Если, к примеру,  $R_{i,t} = x_{i,t}$ , то КУ для момента времени  $t$  осуществляет преобразование информации в соответствии с соотношением

$$\bar{z}_{q,t} = k_1 (N_{6,t}/N_{5,t}) \sum_{i=1}^n (\uparrow x_{i,t} + a_{i,t}) (y_{i,t} + b_{i,t}). \quad (6)$$

Для рассмотренного примера характерно то, что при каждом новом моменте времени изменяется только значение  $x_{i,t}$ , все другие переменные не изменяются.

Возможных комбинаций перемещений информации вдоль разрядов КУ — пятнадцать (см. перемещение информации вдоль одноименных групп регистров КУ).

4. Операция занесения информации по синхроимпульсу в момент времени  $t$  на первый, второй, третий или четвертый регистр первого разряда КУ и занесения информации  $\bar{Z}_{q,t}$  в момент времени  $t$  на один из первых регистров, например  $(n/2 + 1)$ -го разряда КУ с одновременным сдвигом информации с первого, второго, третьего или четвертого регистра  $(\rho - 1)$ -го разряда КУ соответственно на первый, второй, третий или четвертый регистр  $\rho$ -го разряда КУ  $(\rho = \overline{1, n/2})$  и сдвигом информации с первого регистра  $(j - 1)$ -го разряда КУ на первый регистр  $j$ -го разряда КУ  $(j = \overline{n/2 + 1, n})$ .

Условно эту операцию обозначим так:

$$\vec{M}_{\rho,t} = \begin{cases} M_t, \rho = 1; \\ \vec{M}_{\rho-1, t-1}, 1 < \rho \leq n/2; \end{cases}$$

$$\vec{Z}_{j,t} = \begin{cases} \bar{Z}_{q,t}, j = n/2 + 1; \\ \vec{Z}_{j-1, t-1}, n/2 + 1 < j \leq n; \end{cases}$$

$$\vec{M}_{i,t} = \{\vec{x}_{i,t}; \vec{a}_{i,t}; \vec{y}_{i,t}; \vec{b}_{i,t}\},$$

где  $M_t$  — информация, поступающая в момент времени  $t$  на один из регистров первого разряда КУ.

При выполнении этой операции КУ осуществляет преобразование информации в соответствии с таким выражением:

$$\bar{Z}_{q,t} = k_1 (N_{6,t}/N_{5,t}) \left\{ \left[ \sum_{\rho=1}^{n/2} (x_{\rho,t} + a_{\rho,t}) (y_{\rho,t} + b_{\rho,t}) \right] + \left[ \sum_{j=n/2+1}^n (\vec{x}_{j,t} + a_{j,t}) (y_{j,t} + b_{j,t}) \right] \right\}. \quad (7)$$

Здесь  ${}^0 x_{\rho,t} \in \{x_{\rho,t}; \vec{x}_{\rho,t}\}$ ;  ${}^0 a_{\rho,t} \in \{a_{\rho,t}; \vec{a}_{\rho,t}\}$ ;  ${}^0 a_{j,t} \in \{a_{j,t}; \vec{a}_{j,t}\}$ ;  ${}^0 y_{\rho,t} \in \{y_{\rho,t}; \vec{y}_{\rho,t}\}$ ;  ${}^0 y_{j,t} \in \{y_{j,t}; \vec{y}_{j,t}\}$ ;  ${}^0 b_{\rho,t} \in \{b_{\rho,t}; \vec{b}_{\rho,t}\}$ ;  ${}^0 b_{j,t} \in \{b_{j,t}; \vec{b}_{j,t}\}$ .

Посредством этих «элементарных» операций реализуем основные операции дисперсионного, корреляционного анализа и алгоритмы линейной фильтрации.

Оценка математического ожидания случайного значения  $X$ , заданного простым статистическим рядом  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , определяется путем расположения элементов  $x_i$  статистического ряда в определенных регистрах КУ так, чтобы

$$X = \underbrace{\{x_{1,t}; x_{2,t}; \dots; x_{n,t}; 0; \dots; 0\}}_n;$$

$$A = \{0, 0, \dots, 0\}; B = \{0, 0, \dots, 0\};$$

$$Y = \underbrace{\{1, 1, \dots, 1, 0, \dots, 0\}}_n$$

$N_{6,t} = 1; N_{5,t} = n_1; x_{i,t} = x_i$ , и элементарной операцией

$$\bar{Z}_{q,t} = k_1 (N_{6,t}/N_{5,t}) \sum_{i=1}^n (x_{i,t} + a_{i,t}) (y_{i,t} + b_{i,t}) = (k_1/n_1) \sum_{i=1}^{n_1} x_{i,t},$$

где символами  $X, A, Y, B$  обозначены упорядоченные множества, отображающие расположение информации соответственно во всех первых, вторых, третьих и четвертых регистрах КУ; запись  $x_{i,t}; a_{i,t}; y_{i,t}; b_{i,t}$  означает: в момент времени  $t$  в первый, второй, третий и четвертый регистры  $i$ -го разряда КУ записаны соответственно числа  $x_i, a_i, y_i, b_i$ .

Приведенное расположение в регистрах КУ элементов статистического ряда не единственное. Существуют и другие варианты, связанные с расположением элементов статистического ряда во вторых, третьих или четвертых регистрах КУ. Выбор конкретного варианта расположения элементов статистического ряда в регистрах КУ определяется удобством записи информации в те или иные регистры КУ.

Оценка дисперсии случайного значения  $X$ , заданного статистическим рядом  $x_1, x_2, \dots, x_{n_1}$ , среднее арифметическое которого равно  $m_x$ , вычисляется путем формирования следующего начального состояния КУ:

$$X = \{x_{1,t}; x_{2,t}; \dots, x_{n_1,t}; 0; \dots; 0\};$$

$$A = \underbrace{\{-m_x; -m_x; \dots, -m_x; 0; \dots; 0\}}_n$$

$$Y = X; B = A; N_{6,t} = 1; N_{5,t} = n_1 - 1; x_{i,t} = x_i$$

и использования первой операции, заданной соотношением (4); последнее для данного начального состояния запишется так:

$$\bar{Z}_{q,t} = (k_1/n_1 - 1) \sum_{i=1}^{n_1} (x_{i,t} - m_x)^2.$$

Значения корреляционной функции некоторого случайного процесса  $X(t)$ , заданного  $m$  его реализациями  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)$ , каждая из которых имеет  $n_1$  сечений:

$$\begin{matrix} x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,n_1}; \\ x_{2,1}, x_{2,2}, \dots, x_{2,n_1}; \\ \dots \end{matrix}$$

$$x_{m,1}; x_{m,2}; \dots; x_{m,n_1},$$

а каждое  $\underline{j}$ -е сечение характеризуется параметрами  $m_x(j)$ ,  $D_x(j)$ , где  $j = \overline{1, n_1}$ ;  $m_x(j)$ ,  $D_x(j)$  — соответственно оценка математического ожидания и дисперсии случайного значения, статистический ряд которого имеет вид

$$x_{1,j}; x_{2,j}; \dots, x_{m,j},$$

формируются КУ после установления в нем начального состояния

$$X = \{x_{1,1}; x_{2,1}; \dots; x_{m,1}; 0; \dots; 0\};$$

$$A = \underbrace{\{-m_x(1); -m_x(2); \dots; -m_x(m); 0; \dots; 0\}}_m;$$

$$Y = X; B = A; N_{6,t} = 1; N_{5,t} = m - 1$$

и выполнения третьей элементарной операции. В этой операции для данного случая осуществляется перемещение информации, записанной в первых и вторых регистрах КУ, вдоль его одноименных разрядов:

$$\bar{Z}_{q,t} = (k_1/m - 1) \sum_{i=1}^m (\uparrow x_{i,t} + \uparrow a_{i,t})(y_{i,t} + b_{i,t}),$$

где

$$\uparrow x_{i,0} \in \{x_{1,1}; x_{2,1}; \dots; x_{m,1}\};$$

$$\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots$$

$$\uparrow x_{i,\Delta t} \in \{x_{1,2}; x_{2,2}; \dots, x_{m,2}\};$$

$$\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots$$

$$\uparrow x_{i,(j-1)\Delta t} \in \{x_{1,j}; x_{2,j}; \dots; x_{m,j}\},$$

$\Delta t$  — длительность шага дискретизации случайного процесса  $X(t)$

$$\uparrow a_{i,0} \in \{-m_x(1), -m_x(1), \dots, -m_x(1)\};$$

$$\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots$$

$$\uparrow a_{i,\Delta t} \in \{-m_x(2), -m_x(2), \dots, -m_x(2)\};$$

$$\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots$$

$$\uparrow a_{i,(j-1)\Delta t} \in \{-m_x(j), -m_x(j), \dots, -m_x(j)\};$$

$$j = \overline{1, n_1}.$$

В результате выполнения этой операции будет сформировано значение переменной  $\bar{Z}_{q,t}$  соответственно для таких моментов времени  $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, (j-1)\Delta t, \dots, (n_1-1)\Delta t$ , которые совпадают со значениями ненормированной корреляционной функции случайного процесса  $X(t)$ .

Для того чтобы на выходе КУ формировались значения нор-

мированной корреляционной функции случайного процесса  $X(t)$ , необходимо несколько видоизменить начальное состояние: переменной  $N_{5,t}$  присвоить значение  $(m-1)D_x(1)$ .

Вычисление корреляционной функции случайного эргодического процесса  $X(t)$ , реализация которого задана цифровыми отсчетами  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , выполняется на основе второй элементарной операции путем сдвига информации вдоль первых регистров КУ:

$$\bar{Z}_{q,t} = k_1 (N_{6,t}/N_{5,t}) \sum_{i=1}^n (\vec{x}_{i,t} + a_{i,t-1})(y_{i,t-1} + b_{i,t-1}),$$

для которой  $N_{6,t} = 1$ ;  $N_{5,t} = q(\tau)$ ;  $q(\tau)$  — коэффициент, зависящий от параметра  $\tau$  корреляционной функции [4]:

$$\begin{aligned} X &= \{x_{1,t}; x_{2,t}; \dots, x_{n,t}; 0; \dots, 0\}; \\ Y &= X; A = \{0, 0, \dots, 0\}; B = A; x_t = 0. \end{aligned}$$

Цифровой нерекурсивный фильтр определяется начальным состоянием структуры:

$$\begin{aligned} X &= \{x_{1,t}; x_{2,t}; \dots; x_{L,t}; 0; \dots, 0\}; \\ A &= \{0, 0, \dots, 0\}; Y = \{0, 0, \dots, 0\}; \\ B &= \{b_{1,t}; b_{2,t}; \dots; b_{L,t}; 0; \dots; 0\}; N_{6,t} = N_{5,t}; x_t \neq 0, \end{aligned}$$

где  $x_{i,t}$  — цифровой отсчет смеси сигнала и помехи;  $b_{i,t}$  — весовой коэффициент фильтра;  $L$  — параметр фильтра [5], а также второй элементарной операцией путем сдвига информации вдоль первых регистров КУ.

Цифровой рекурсивный фильтр задают такие соотношения:

$$\begin{aligned} X &= \{x_{1,t}; x_{2,t}; \dots, x_{m,t}; 0; \dots; 0\}; A = \{0, 0, \dots, 0\}; \\ B &= \{b_{1,t}; b_{2,t}; \dots; b_{m,t}; 0; \dots; b_{(n/2+1),t}; \dots; b_{(n/2+M),t}; 0; \dots; 0\}; \\ Y &= \{0, 0, \dots, 0\}; N_{6,t} = N_{5,t}; x_t \neq 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{q,t} &= k_1 \left\{ \left[ \sum_{p=1}^{n/2} (\vec{x}_{p,t} + a_{p,t-1})(y_{p,t-1} + b_{p,t-1}) \right] + \right. \\ &\quad \left. + \left[ \sum_{j=n/2+1}^n (\vec{x}_{j,t} + a_{j,t-1})(y_{j,t-1} + b_{j,t-1}) \right] \right\}. \end{aligned}$$

Здесь  $m, M$  — параметры фильтра [5].

Описанные интеллектуальные ПФИ, обладающие высоким быстродействием, могут применяться при обработке изображений, анализе сигнала в широком диапазоне частот и т. д.

Список литературы: 1. Еремеев И. С., Кондалев А. И. О некоторых функциях и структурах интеллектуальных преобразователей формы информации // Управляющие системы и машины. — 1981. — № 4 — С. 59—63. 2. Еремеев И. С., Кондалев А. И. Интеллектуальные терминалы — К.: Техника, 1984. — 128 с. 3. Универсальные электронные преобразователи / Под ред. В. Б. Смолова. — Л.: Машиностроение, 1971. — 312 с. 4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. —