

К. т. н. В. С. СИТНИКОВ, П. В. СТУПЕНЬ, И. Л. КУЦАК

Украина, Одесский нац. политехнический университет
E-mail: sitnv@promel.ospu.odessa.ua

Дата поступления в редакцию
11.07.2001 г.

Оппоненты
П. А. МЕРЖВИНСКИЙ (НИИ МП, г. Киев),
А. А. ВОРОНЬКО (ИК НАНУ, г. Киев)

АВТОМАТИЗАЦИЯ СТРУКТУРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ СХЕМЫ ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА

Рассмотрен алгоритм вычисления коэффициентов структуры цифрового фильтра в пространстве состояний по заданной структуре реализации.

В работе [1] описана методика поиска наилучшей структуры реализации цифрового фильтра (ЦФ) по критерию минимума уровня выходного шума округления из числа наиболее используемых структур. Для улучшения этого критерия структуры реализации ЦФ рекомендуется использовать методику в пространстве состояний [2—6].

Описание в пространстве состояний представляет собой мощный метод, позволяющий с единых позиций рассматривать многие принципы теории систем. Цифровая система в пространстве состояний описывается системой уравнений [2]

$$\begin{aligned} x(n+1) &= A \cdot x(n) + b \cdot u(n); \\ y(n) &= c \cdot x(n) + d \cdot u(n), \end{aligned} \quad (1)$$

где размеры матриц A , b , c и d равны соответственно $N \times N$, $N \times 1$, $1 \times N$, 1×1 , $x(n) = [x_1(n) \dots x_N(n)]^T$ представляет собой вектор состояний (N — порядок фильтра), $u(n)$ и $y(n)$ — соответственно входная и выходная последовательности.

При этом передаточная функция системы определяется из соотношения

$$H(z) = c(zI - A)^{-1}b + d, \quad (2)$$

где z — комплексная переменная Z -преобразования;

I — единичная матрица, размер которой равен размеру матрицы A .

Задав произвольной не сингулярной $N \times N$ -матрицей T , можно осуществить преобразование подобия, заменив элементы множества $\{A, b, c\}$ таким образом:

$$A_1 = T^{-1} \cdot A \cdot T, \quad b_1 = T^{-1} \cdot b, \quad c_1 = c \cdot T^{-1}.$$

Такое преобразование не приводит к изменению передаточной функции $H(z)$, поэтому выбирая различные матрицы T можно получить неограниченное число различных вариантов реализации заданной передаточной функции; при этом такие характеристики системы как коэффициенты масштабирования во внутренних узлах, условия возникновения переполнения, шум округления могут изменяться от реализации к реализации.

В связи с этим возникает задача автоматического определения параметров описания ЦФ в пространстве

состояний, т. е. элементов матриц A , b , c и d , на основе исходной структуры ЦФ.

Целью данной работы является разработка автоматического перехода от исходной структуры реализации ЦФ к структуре ЦФ, описанной в пространстве состояний, и определение элементов новых матриц системы (2), что должно позволить сократить время подготовки и решения задачи улучшения качественных показателей проектируемых схем реализации ЦФ при любой их сложности и размерности.

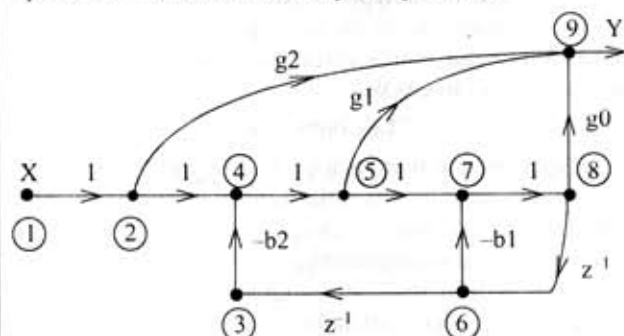


Рис. 1. Граф канонической структуры реализации ЦФ: b_i, g_i — коэффициенты передач ветвей; z^{-1} — элемент задержки на один такт; X, Y — соответственно входная и выходная величина ЦФ

Пусть задана исходная структура реализации ЦФ второго порядка (рис. 1). В любом графе, описывающем структуру ЦФ, можно выделить характерные узлы: входной (1) и выходной (9) узлы фильтра, входной (8) и выходной (6) узлы первой задержки, входной (6) и выходной (3) узлы второй задержки. Для расчета элементов матриц описания $\{A, b, c, d\}$ необходимо поставить в соответствие характерные узлы исходной структуры и структуры, описываемой в пространстве состояний (рис. 2), пронумеровав ус-

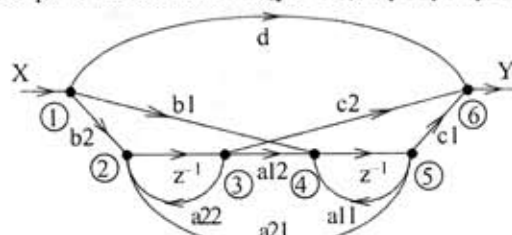


Рис. 2. Обобщенный граф структуры ЦФ второго порядка в пространстве состояний: a_i, b_i, c_i, d — коэффициенты передач ветвей

ловно задержки в структуре реализации ЦФ и определив все возможные пути между характерными узлами в соответствии с обобщенной структурой ЦФ в пространстве состояний. Этот трудоемкий расчет путей от i -го узла к j -му, естественно, требует автоматизации.

Особенностью матрицы описания структуры реализации ЦФ является то, что элемент i -й строки и j -го столбца равен передаче от j -го узла к i -му, взятой с противоположным знаком, а элементы главной диагонали матрицы принимаются равными 1. Тогда при нахождении пути от узла i к узлу j , исключая поочередно из графа все узлы (кроме i и j) и преобразуя его оставшуюся часть, можно прийти к графу с двумя узлами и одной передачей t .

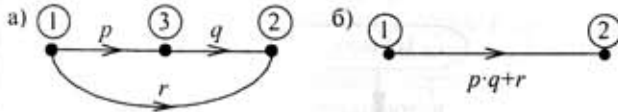


Рис. 3. Граф и преобразованный граф:
 p, q, r — коэффициенты передач ветвей

Рассмотрим на примере простого графа влияние исключения узла из графа на его матрицу описания (рис. 3, а). Составим матрицу M для этого графа:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ r & 1 & q \\ p & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Определим путь t от узла 1 к узлу 2. Для этого за счет элементарных преобразований графа оставим в нем два узла — начальный (1) и конечный (2). Это достигается за счет исключения узла 3, тогда передача t_{12} от узла 1 к узлу 2 будет равна $t_{12} = (p \cdot q + r)$ (рис. 3, б):

$$M^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ p \cdot q + r & 1 \end{bmatrix}$$

В матрице M такое преобразование приводит к вычеркиванию 3-й строки и 3-го столбца, а оставшиеся элементы новой матрицы M^* будут определяться как сумма старого p_{ij}^c и нового элемента p_{ij}^n , равного произведению элементов старой матрицы p_{i3}^c и p_{3j}^c .

Тогда, обобщая, можно записать, что исключение N -го узла приводит к преобразованию старой матрицы M в новую матрицу M^* , элементы которой определяются как

$$p_{ij}^* = p_{ij}^c + p_{iN}^c \cdot p_{Nj}^c, \quad (3)$$

где p_{ij}^c и p_{ij}^* — соответственно элементы старой матрицы M и новой M^* , находящиеся на пересечении строки i и столбца j .

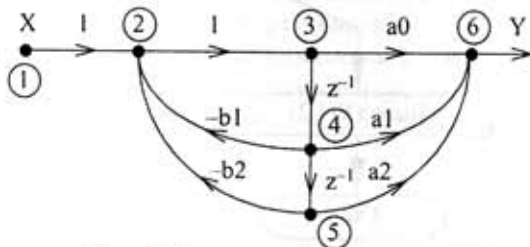


Рис. 4. Пример графа структуры ЦФ:
 a, b — коэффициенты передач ветвей

Удобно, если исключаемый узел — последний, а начальный и конечный узлы структуры соответственно 1 и 2.

Воспользуемся формулой (3) для расчета пути от узла 5 к выходному узлу 6 в графе структуры ЦФ, представленному на рис. 4.

Составим матрицу M для данной структуры фильтра:

	1	2	3	4	5	6
1	1					
2	1	1		-b1	-b2	
3		1	1			
4				1		
5					1	
6			a0	a1	a2	1

За счет элементарных преобразований изменим матрицу так, чтобы начальный узел был первым, а конечный — вторым. Тогда

	5	6	3	4	1	2
5	1					
6	a2	1	a0	a1		
3			1			1
4				1		
1					1	
2	-b2			-b1	1	1

Вычеркивая последнюю строку и столбец, преобразуем данную матрицу к матрице размерностью 2×2 , т. е. пока в графе не останется два узла — начальный и конечный (рис. 5). Оставшиеся узлы в графе — 5-й и 6-й (соответственно 1-й и 2-й в матрице), а путь от 5-го узла к 6-му равен передаче $t = (a2 - a0 \cdot b2)$.

	5	6	3	4	1
5	1				
6	a2	1	a0	a1	
3	-b2		1	-b1	1
4				1	
1					1

	5	6	3	4
5	1			
6	a2	1	a0	a1
3	-b2		1	-b1
4				1

	5	6	3
5	1		
6	a2	1	a0
3	-b2		1

	5(1)	6(2)
5(1)	1	
6(2)	a2-a0·b2	1

Рис. 5. Этапы преобразования матрицы структуры ЦФ:

a, b — коэффициенты матрицы описания (соответствующие коэффициентам передач ветвей)

На основании данных положений и элементарных преобразований графа и матрицы можно предложить алгоритм программы расчета элементов матрицы опи-



Рис. 6. Общий алгоритм программы преобразований. Целесообразно разбить его на две части: общий алгоритм программы, показывающий основные этапы работы программы, (рис. 6) и алгоритм подпрограммы расчета элементов матрицы описания структуры в пространстве состояний (рис. 7).

Проверим работу алгоритма на примере структуры ЦФ. Проверку будем проводить сравнением передаточных функций, полученных:

— из исходной матрицы по формуле

$$H(z) = \frac{(-1)^{M+N} \cdot \Delta_{M,N}}{\Delta}$$

где M и N — соответственно входной и выходной узлы структуры ЦФ;

— из коэффициентов рассчитанных в программе по формуле (2).

Пусть дана каноническая структура реализации ЦФ, показанная на рис. 1. Составим матрицу для данного графа:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1								
2	-1	1							
3			1			$-z^{-1}$			
4		-1	b_2	1					
5				-1	1				
6						1		$-z^{-1}$	
7					-1	b_1	1		
8							-1	1	
9		$-g_2$			$-g_1$			$-g_0$	1

Определители матрицы равны соответственно

$$\Delta = \frac{z^2 + b_1 \cdot z + b_2}{z^2}$$

$$\Delta_{1,9} = \frac{(g_0 + g_1 + g_2) \cdot z^2 + (g_2 \cdot b_1 + g_1 \cdot b_1) \cdot z + g_2 \cdot b_2}{z^2}$$

а передаточная функция после преобразований имеет следующий вид:

$$H(z) = \frac{g_0 + g_1 + g_2 + (g_2 \cdot b_1 + g_1 \cdot b_1) \cdot z^{-1} + g_2 \cdot b_2 \cdot z^{-2}}{1 + b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2}}$$

В алгоритме программы рассчитываются элементы матриц $\{A, b, c, d\}$ структуры в пространстве состояний:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -b_2 & -b_1 \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$c = [-b_2 \cdot g_0 + g_1 - b_1 \cdot g_0]; \quad d = g_0 + g_1 + g_2.$$

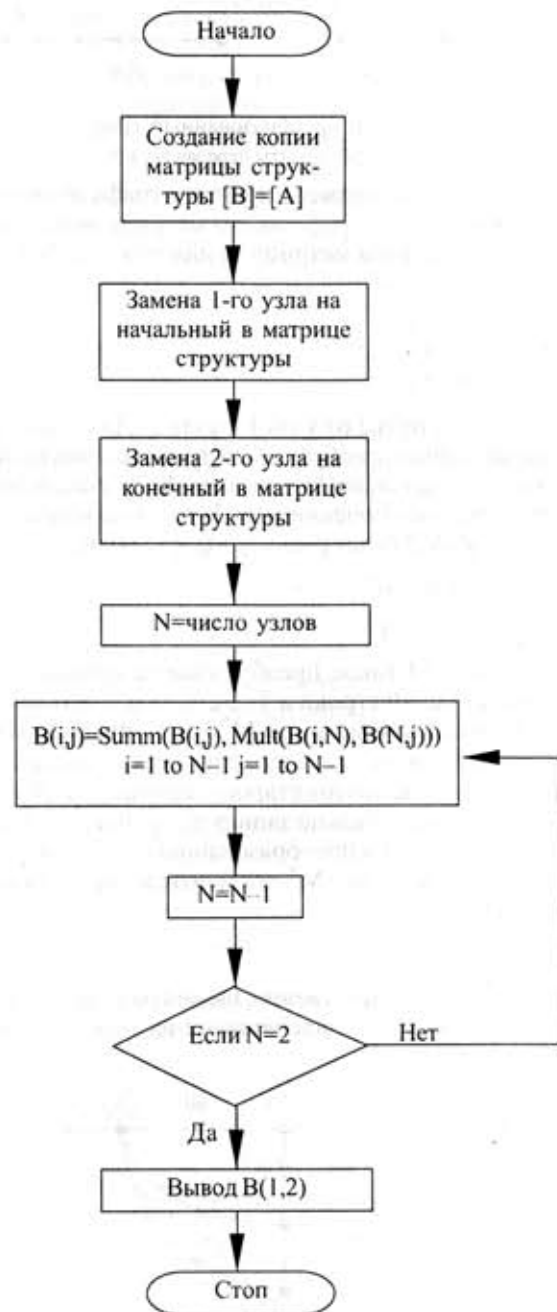


Рис. 7. Алгоритм подпрограммы расчета элементов матрицы описания структуры в пространстве состояний

Определим передаточную функцию по полученным элементам матриц:

$$H(z) = [-b_2 \cdot g_0 + g_1 - b_1 \cdot g_0] \cdot \begin{bmatrix} z & 0 \\ 0 & z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -b_2 & -b_1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + g_0 + g_1 + g_2.$$

Тогда

$$H(z) = \frac{g_0 + g_1 + g_2 + (g_2 \cdot b_1 + g_1 \cdot b_1) \cdot z^{-1} + g_2 \cdot b_2 \cdot z^{-2}}{1 + b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2}}.$$

Сравнивая полученные передаточные функции по рис. 1 и 2, следует отметить, что передаточные функции полностью совпадают при расчете их по матрице и по элементам матрицы структуры в пространстве состояний, полученным с помощью разработанного алгоритма автоматического перехода. При этом затраты времени резко уменьшаются.

Предложенный подход является перспективным в условиях дефицита времени и делает возможным решение данной задачи при высокой сложности и размерности исходной структуры реализации ЦФ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Малахов В. П., Ситников В. С., Ступень П. В., Ульяшин С. В. Выбор структуры цифрового фильтра по уровню выходного шума округления // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 2.— С. 17—22.
2. Mullis C. T., Roberts R. A. Synthesis of minimum roundoff noise fixed-point digital filters // IEEE Transaction on Circuits and Systems.— 1976.— Vol. CAS-23, Sept.— P. 551—561.
3. Jackson L. B., Lingren A. G., Kim Y. Optimal synthesis of second-order state-space structures for digital filters // Ibid.— 1979.— Vol. CAS-26, Mar.— P. 149—153.
4. Barnes C. W. Computationally efficient second-order digital filter section with low roundoff noise gain // Ibid.— 1984.— Vol. CAS-31, N 10, Oct.— P. 841—847.
5. Bomar B. W. On the design of second-order state-space digital filters sections // Ibid.— 1989.— Vol. CAS-36, N 4, April.— P. 542—552.
6. Rao B. V. D. Floating point arithmetic and digital filters // IEEE Trans. Signal Processing.— 1992.— Vol. 40, N 1, Jan.— P. 85—95.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ

«МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОРМАТИКА—2002»

9-я Всероссийская
межвузовская научно-техническая
конференция студентов и аспирантов
17—18 апреля 2002 г.
Россия Москва

Адрес Оргкомитета:

103498, Москва К-498, Московский государственный институт электронной техники (МИЭТ), ОНТИ.
Тел. (095) 532-98-30, факс (095) 530-54-29,
e-mail: id@rmd.micee.ru

Научные направления работы конференции

- Физика и технология изделий микро- и нанозлектроники.
- Материалы и компоненты электронной техники.
- Проектирование систем и электронных компонентов.
- Биомедицинская электроника.
- Математические модели и алгоритмы в информатике.
- Информационно-управляющие системы и приборы.
- Автоматизированные информационные системы.
- Телекоммуникационные системы и связь.
- Технологическое оборудование микроэлектроники.
- Менеджмент и маркетинг наукоемких производств.
- Гуманитарные проблемы информатизации.

ГОТОВИТСЯ К ПЕЧАТИ

Годлевский Л. С., Кресюн В. И., Садлий А. В. и др. Медицинская аппаратура. Принципы действия и применения.— Одесса: Нептун-Технология, 2002.— 392 с.

Рассмотрено состояние современной медицинской техники в следующих направлениях: основы метрологии и метрологическое обеспечение медицинской аппаратуры, медицинская электронная аппаратура для регистрации биопотенциалов, магнитодиагностика и магнитотерапия.

Книга рекомендуется студентам медицинских ВУЗов, а также медицинским работникам лечебно-профилактических учреждений органов практического здравоохранения.

Цена 5 дол. США.

Заказы-заявки направлять по e-mail: tkea@odessa.net

Справки по тел. +38 (048) 733-72-83, 733-67-91.

НОВЫЕ КНИГИ

