

УДК 621.396.96

П.Е. Баранов, д-р техн. наук, проф.,
 А.Н. Шейк-Сейкин, инженер,
 Одес. нац. политехн. ун-т

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТР СЖАТИЯ С АССОЦИАТИВНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ

П.Ю. Баранов, А.М. Шейк-Сейкин. Багатоканальний цифровий фільтр стиску з асоціативною архітектурою. На базі використання апарату теорії графів проведено розробку та дослідження ефективності архітектури багатоканальних цифрових фільтрів стиснення складних сигналів, працюючих в умовах обмежень на сумарну енергію зондуючого сигналу.

П.Е. Баранов, А.Н. Шейк-Сейкин. Многоканальный цифровой фильтр сжатия с ассоциативной архитектурой. На базе использования аппарата теории графов проведена разработка и исследование эффективности архитектуры многоканальных цифровых фильтров сжатия сложных сигналов, работающих в условиях ограничений на суммарную энергию зондирующего сигнала.

P.E. Baranov, A.N. Sheik-Seikin. Multi-channel digital compressions filter with the associative architecture. On the basis of graph theory, the design of the architecture of multi-channel digital filters for the compression of complex signals, working within the constraints of the total energy of the probing signal is carried out, as well as the study of its effectiveness.

Современный этап развития информационных технологий характеризуется массовым внедрением методов и средств цифровой обработки информации. Достижения в области технологии изготовления современных цифровых устройств — сигнальных процессоров, ПЛИС, памяти и др. — приводят к тому, что разрабатываются все более и более сложные системы обработки информации, в т.ч. сигналов в реальном времени, обладающие высокой производительностью (10^{12} и более операций в секунду) и возможностью решения меняющихся в процессе эксплуатации задач [1...3].

Последние достижения в области разработки прикладных высокопроизводительных вычислительных систем (ВС), обеспечивающих многоканальную обработку сигналов в реальном времени, сводятся к следующему.

Разработан ряд ВС с перестраиваемой архитектурой распределенного типа [2] и архитектурой кластерного типа [3], отличающиеся друг от друга способом организации вычислений и внутренних обменов сигналами. Объединяет эти системы универсальность, т.е. они могут быть запрограммированы на решение широкого круга прикладных задач, следовательно, по определению обладают избыточностью аппаратного ресурса. В то же время задача выбора конкретного способа реализации той или иной системы цифровой обработки сигналов, обеспечивающего ее приемлемые габаритно-стоимостные характеристики, по-прежнему сохраняет свою актуальность.

Предлагаются результаты разработки и исследования эффективности архитектуры многоканальных цифровых фильтров сжатия сложных сигналов, работающих в условиях ограничений на суммарную энергию e_0 зондирующего сигнала.

Синтез алгоритмов многоканального обнаружения сигналов в условиях ограничений на их суммарную энергию e_0 и время T_0 обзора контролируемой зоны показывает, что для максимизации среднего числа обнаруженных сигналов необходимо перераспределять энергию зондирующего сигнала между каналами адекватно помеховой обстановке [4, 5].

В соответствии с этим, входной сигнал каждого из L каналов системы представляет собой в общем случае пачку из N_j импульсов с коэффициентом сжатия n_j , причем

$$\sum_{i=1}^L n_i = n_0, \quad i \in \overline{1, L}; \quad \sum_{j=1}^J N_j = N_0, \quad j \in \overline{1, J}; \quad J = K / L, \quad (1)$$

где n_0 — суммарный коэффициент сжатия зондирующего сигнала;

N_0 — число импульсов, соответствующее временному ресурсу T_0 ;

K — общее число каналов контролируемой зоны.

Из (1) следует, что при параллельном обзоре происходит перераспределение n_0 между каналами, поскольку энергия импульса пропорциональна коэффициенту сжатия сигнала, а следовательно, порядку (числу ступеней) фильтра, характеризующему его вычислительный ресурс. Если энергия импульса в парциальном канале изменяется, то изменяется и коэффициент сжатия фильтра в нем. Соответственно, если происходит перераспределение энергии между каналами, то и многоканальный фильтр сжатия (МКФС) должен иметь возможность перераспределять свой вычислительный ресурс между каналами, т.к. традиционное построение, рассчитанное на максимальное значение параметра $n_i \approx n_0$ в каждом канале, приводит к неоправданно большим аппаратным затратам.

В соответствии с этим необходимо разработать архитектуру МКФС, обеспечивающую перераспределение ресурса между его каналами и имеющую при этом минимальные аппаратные затраты.

Для решения поставленной задачи используется аппарат теории графов, в частности, представление реализуемого алгоритма в виде графа информационных связей (ГИС).

Наиболее простой и в то же время наиболее наглядной является графическая форма отображения графа: выполняемые операции отображаются в виде вершин ГИС, а связи между ними — в виде дуг или ребер [6, 7]. При этом одним из необходимых условий для успешного анализа ГИС является представление его в виде регулярного графа (РГ) [8].

В связи с этим предлагается методика синтеза архитектуры МКФС в виде совокупности КИХ-фильтров. Алгоритм работы КИХ-фильтра, определяемый его передаточной функцией, имеет вид

$$F_i = \sum_{k=0}^{n_i} w_k z^{-k}, \quad i \in \overline{1, L},$$

где n_i — порядок фильтра;

w_k — коэффициенты фильтра;

z^{-k} — задержка входного сигнала на k отсчетов [9].

В этом случае алгоритм F_i может быть представлен в виде РГ, высота которого $h_i = n_i$ [10]. Кроме того, предлагаемая методика учитывает линейную зависимость “параметр — ресурс”, т.е. коэффициент сжатия сигнала — число ступеней (порядок) фильтра, в связи с чем суммарное число задействованных ступеней фильтра — величина постоянная, равная n_0 .

Пусть задано L идентичных алгоритмов F_i , $i \in \overline{1, L}$, отличающихся друг от друга только конкретными значениями своих параметров n_i . Каждый из этих алгоритмов отображается в виде РГ $G_i(p_i)$ с базовыми векторами $\mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_r$, где p_i — изменяющийся параметр графа, $p_i : n_i; r$ — число базовых векторов. Построим бесконечный РГ G^∞ , имеющий те же базовые векторы. В этом случае подграфы $G_i(p_i)$ могут быть получены расщеплением G^∞ на L несвязанных между собой подграфов и параллельным их перемещением по структуре G^∞ .

То есть в бесконечном РГ выделяется подграф $G_1(p_1)$, затем аналогично — $G_2(p_2)$, который перемещается параллельно $G_1(p_1)$ до тех пор, пока они не перестанут пересекаться, затем — $G_3(p_3)$, ... и т.д. до $G_L(p_L)$. Полученная совокупность подграфов $G_i(p_i)$ однозначно отображает структуру ВС, реализующую совокупность алгоритмов F_i для заданного вектора параметров \mathbf{p}_1 , и образует РГ $G_0^{(1)}$, имеющий те же базовые векторы, что и исходные (парциальные) подграфы $G_i(p_i)$.

После выполнения аналогичной процедуры для других значений вектора параметров \mathbf{p}_m , $m \in \overline{1, M}$, где M — число вариантов вектора параметров, в итоге формируется совокупность графов $\{G_0^{(m)}\}$, отображающая изменения суммарного графа G_0 в заданном диапазоне изменения множества параметров $\{P\} = \{\mathbf{p}_m\}$, $m \in \overline{1, M}$. Если у такого графа в результате изменения $\{P\}$ изменяются ширина b , или высота h , либо одновременно и прямо пропорционально — b и h , то его структура может быть получена путем суммирования всех вариантов графов $\{G_0^{(m)}\}$, что эквивалентно объединению их по «ИЛИ», а в графической интерпретации — наложению друг на друга одноименными вершинами, т.е.

$$G_0 = \sum_{m=1}^M G_0^{(m)}. \tag{2}$$

В данном случае изменения $\{P\}$ приводят к изменению у подграфов G_i только высоты h_i — числа вершин, равного n_i , что позволяет представить их в виде линейных РГ. При этом суммарная высота графов $\{G_0^{(m)}\}$ остается постоянной, равной h_0 .

В качестве примера приведен синтез G_0 при $L = 3$, $h_0 = 9$, $h_{i \min} = 1$. В результате получено семейство линейных РГ $\{G_0^{(m)}\}$, каждый из которых состоит из $L = 3$ несвязанных между собой линейных подграфов $\{G_i^{(m)}\}$ (рис. 1). Источники и приемники соответственно входной и выходной информации отображены в виде вершин $\{V_i\}$, $\{W_i\}$, $i \in \overline{1, L}$, соединенных дугами с соответствующими начальными и конечными вершинами подграфов $\{G_i^{(m)}\}$.

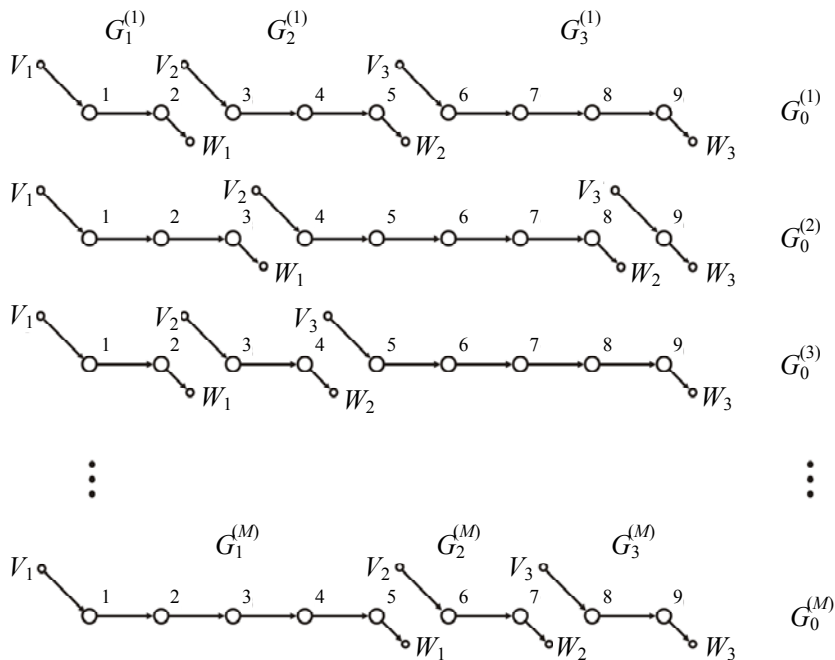


Рис. 1. Семейство линейных регулярных графов $\{G_0^{(m)}\}$ при $L=3$, $h_0 = 9$, $h_{i \min} = 1$

Применяя (2) к сформированному множеству графов $\{G_0^{(m)}\}$, получим структуру суммарного графа G_0 , отображающего структуру L -канальной ВС с заданным свойством $h_i = n_i$, $h_0 = N_0$ (рис. 2).

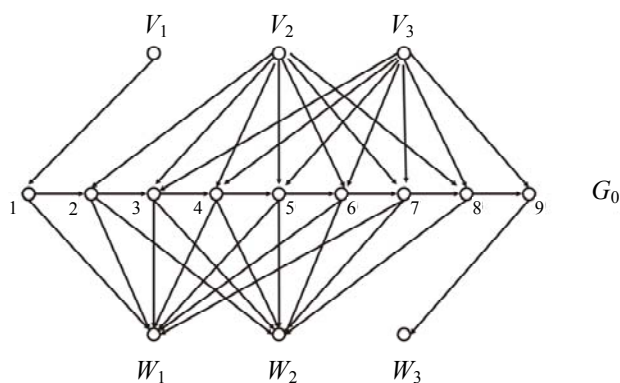


Рис. 2. Структура суммарного графа G_0 , $h_0 = 9$

Поскольку в каждую из вершин анализируемого линейного графа G_0 может входить и выходить из нее только одна дуга, то структуру G_0 необходимо дополнить системой коммутации, обеспечивающей его реконфигурацию. В результате введения системы коммутации формируется структурная схема L -канальной ВС, содержащая, при $h_{i \min} = 1$, $h_{i \max} = h_0 - (L - 1) = h_0 - 1$ коммутационных элементов (КЭ) K_j типа 2/2 (2 входа/2 выхода), $L - 1$ входных КЭ $1K_i$ типа $1/h_{\max}$ и $L - 1$ выходных КЭ $2K_i$ типа $h_{\max} / 1$ (рис.3). Приведены варианты состояния КЭ K_j типа 2/2 (рис. 4).

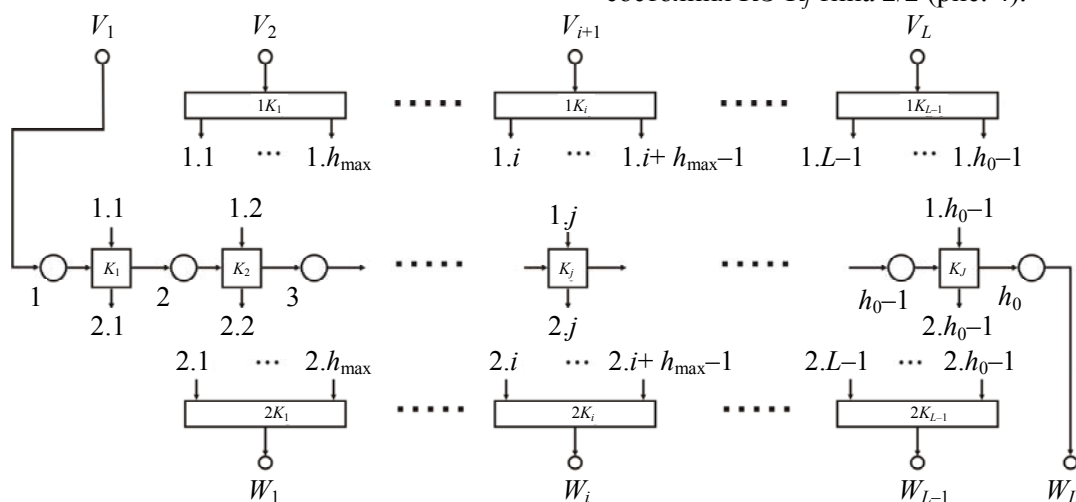


Рис. 3. Структурная схема L -канальной вычислительной системы на основе графа G_0 ; $1K_i$ — входные КЭ, $2K_i$ — выходные КЭ; K_j — КЭ типа 2/2; $J = h_0 - 1$

Разработанную архитектуру ВС предлагается назвать “ассоциативной” из-за свойства образовывать “ассоциации” (изолированные группы) элементов, связанных между собой.

Проведен сравнительный анализ ассоциативной и неперестраиваемой архитектур по затратам аппаратного ресурса (АР) — Q_0 , определяемого в основном как сумма вычислительного ресурса (ВР) — Q_B , коммутационного ресурса (КР) — Q_K и ресурса системы управления (УР) — Q_U .

К ВР относится часть АР, непосредственно обеспечивающая выполнение арифметических операций, операций задержки и др., связанных с преобразованием потока данных; в данном случае ВР определяется числом вершин суммарного графа G_0 ; к КР относится та часть АР, которая обеспечивает изменение структуры системы в целом и перераспределение ВР между реализуемыми системой алгоритмами.

УР, определяющий вектор состояния элементов ВР и КР и обеспечивающий выбор конкретной структуры ВС и взаимную синхронизацию ее элементов, вносит несущественный вклад в АР и в данном анализе не учитывается [2, 3, 8].

Таким образом, суммарные затраты АР

$$Q_0 = Q_B + Q_K.$$

Величина суммарных затрат АР системы с

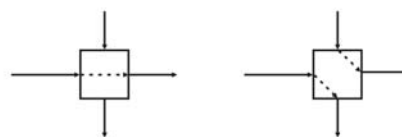


Рис. 4. Варианты состояния КЭ K_j типа 2/2

традиционным построением (неперестраиваемой архитектурой) при линейной зависимости “параметр — ресурс” и изменении h_i от $h_{i \min} = 1$ до $h_{i \max} = h_0 - (L - 1)$

$$Q_{01} = Q_B = L (h_0 - L + 1), \quad (3)$$

а для системы с предлагаемой ассоциативной архитектурой при тех же условиях

$$Q_{02} = Q_B + Q_K = h_0 + Q_K. \quad (4)$$

Если указанные разнотипные КЭ (см. рисунок 3) привести к элементарным КЭ типа 1/1 (1 вход/1 выход), то общий КР

$$Q_K : 4h_0 + 2(L-1)h_{i \max} \approx 2\gamma[2h_0 + (L-1)(h_0 - L + 1)], \quad (5)$$

где γ — коэффициент, показывающий относительную сложность реализации элементарного КЭ по отношению к реализации элементарного вычислительного узла (ВУ), отображаемого вершиной G_0 . После подстановки (5) в (4), суммарные затраты АР для ассоциативной архитектуры

$$Q_{02} = h_0 + 2\gamma[2h_0 + (L-1)(h_0 - L + 1)]. \quad (6)$$

Сравнивая (3) и (6) между собой, получим условие предпочтения ассоциативной архитектуры перед традиционной в виде требований к коэффициенту сложности КЭ, используемых в ВС,

$$\gamma < 0,5(h_0 - L)(L-1)/[h_0(L+1) - (L-1)^2]. \quad (7)$$

Из (7) следует, что требования к относительной сложности реализации КЭ в системе зависят не только от числа каналов L , но и от соотношения h_0 и L . Так, в наихудшем случае — при $h_0 = L + 1$ — применение ассоциативной архитектуры будет эффективно, если γ не превышает 0,08...0,12, т.е. сложность КЭ должна быть не более 8...12% от сложности ВУ. При $h_0 \approx 2L$ требования к γ минимальны и составляют от 0,16 при малых L до 0,4 ... 0,5 при $L \gg 1$.

Поскольку в проектируемом МКФС элементарный ВУ представляет собой комплексный умножитель с сумматором-аккумулятором и звеном задержки, а элементарный КЭ представляет собой два звена задержки, то в данном случае сложность ВУ более чем на порядок выше сложности КЭ, т.е. фактически $\gamma \leq 0,1$. Следовательно, условие (7) будет соблюдаться в широком диапазоне значений h_0 и L , что говорит об эффективности применения разработанной архитектуры.

Так, например, если при $\gamma = 0,1$ и $h_0 = L + 1$, выражения (3) и (4) дают практически идентичные результаты — $Q_{01} \approx Q_{02}$, то при $\gamma = 0,1$, $h_0 \approx 2L$ и $L = 10$ $Q_{02} \approx 0,5Q_{01}$, а при $L = 50$ $Q_{02} \approx 0,25Q_{01}$.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

— разработана архитектура многоканальных цифровых фильтров сжатия прямой формы (КИХ-фильтров), обеспечивающая эффективное перераспределение вычислительного ресурса между каналами;

— получены оценки затрат суммарного АР, позволяющие определить условия эффективного применения ассоциативной архитектуры в зависимости от начальных условий — соотношения h_0 и L , числа каналов L — в виде требований к относительной сложности реализации системы коммутации γ ;

— показано, что при реализации МКФС в виде ВС с ассоциативной архитектурой может быть обеспечен существенный выигрыш в аппаратных затратах по сравнению с неперестраиваемой архитектурой — до двух раз при $L = 10$ и до четырех раз при $L = 50$.

Литература

1. Митропольский, Ю.И. Мультиархитектура — новая парадигма для суперкомпьютеров / Ю.И. Митропольский // Электроника: НТБ. — 2005. — № 3. — С. 42 — 47.
2. Семейство многопроцессорных вычислительных систем на основе ПЛИС / А.И.Дордопуло, И.А.Каляев, И.И. Левин, Е.А. Семерников // Материалы второй междунар. науч. конф. “Суперкомпьютерные системы и их применение” (SSA'2008), 27 — 29 октяб. 2008. — Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2008. — С. 44 — 49.
3. Севбо, В. Многопроцессорный вычислительный комплекс для задач ”жесткого” реального времени / В. Севбо, А. Орлов, А. Лошаков // Современ. технологии автоматизации. — 2007. — № 3. — С. 32 — 38.

4. Баранов, П.Е. Оптимальное совместное управление временным и энергетическим ресурсами в задачах обнаружения сигналов многолучевыми системами / П.Е. Баранов, А.С. Муранов, А.Н. Шейк-Сейкин // Радиотехника. — 1991. — № 9. — С. 65 — 67.
5. Баранов, П.Е. Совместное распределение числа и энергии импульсов при обнаружении сигналов в однолучевых многоканальных системах / П.Е. Баранов, А.С. Муранов, А.Н. Шейк-Сейкин // Изв. вузов. Радиоэлектроника. — 1991. — № 9. — С. 73 — 76.
6. Воеводин, В.В. Математические модели и методы в параллельных процессах / В.В. Воеводин. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — 296с.
7. Оре, О. Теория графов: пер. с англ. / О. Оре. — М.: Наука, Гл.ред. физ.-мат.лит., 1980. — 336с.
8. Каляев, А.В. Многопроцессорные системы с программируемой архитектурой / А.В. Каляев. — М.: Радио и связь, 1984. — 240 с.
9. Рабинер, Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов: пер. с англ. / Л. Рабинер, Б. Голд. — М.: Мир, 1978. — 848 с.
10. Алгоритмы построения экономичных многоканальных устройств цифровой когерентной обработки сигналов / П.Е. Баранов, Ю.С. Боровков, Д.К. Гринь, А.Н. Шейк-Сейкин // Судостроительная промышленность. Сер. Радиолокация. — 1987. — Вып. 2. — С. 7 — 12.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Ситников В.С.

Поступила в редакцию 12 января 2010 г.