

Д. т. н. П. Е. БАРАНОВ, А. Н. ШЕЙК-СЕЙКИН

Украина, Одесский национальный политехнический университет  
E-mail: ans@irt.opu.ua

Дата поступления в редакцию  
22.02.2010 г.

Оппонент к. т. н. А. И. ЦОПА  
(ХНУРЭ, г. Харьков)

## МНОГОКАНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С РАНЖИРОВАННОЙ АРХИТЕКТУРОЙ

*Разработана архитектура многоканальных устройств цифровой обработки сигналов, позволяющая существенно сократить затраты аппаратного ресурса на их реализацию.*

Результаты синтеза алгоритмов многоканального (МК) обнаружения сигналов на фоне комплекса разнородных помех показывают, что система обработки должна быть адаптивной, изменяющей свои параметры адекватно помеховой обстановке.

Так, например, обнаружение сигналов на фоне некоррелированных помех при ограничении, накладываемых на результирующую энергию излучения и на время обзора контролируемой зоны, требует перераспределения энергетического ресурса между каналами, а следовательно, и перераспределения между ними коэффициентов сжатия парциальных сигналов и числа посылок этих сигналов [1, 2].

Обнаружение сигналов на фоне коррелированных помех, использующее адаптивные алгоритмы компенсации помех, также требует использования разного числа импульсов (посылок) в каждом из каналов [3, 4].

Отсюда следует, что МК-система цифровой обработки сигналов (ЦОС) на фоне комплекса разнородных помех при традиционном построении, рассчитанном на максимальные значения коэффициента сжатия сигнала и числа обрабатываемых импульсов в каждом канале, будет иметь существенный избыток аппаратного ресурса (АР).

Известен ряд прикладных высокопроизводительных вычислительных систем (ВС), обеспечивающих многоканальную ЦОС в реальном времени, имеющих перестраиваемую архитектуру распределенного [5] и кластерного [6] типов. Системы являются универсальными, т. е. могут быть запрограммированы на решение широкого круга прикладных задач, а следовательно, по определению, обладают избыточностью АР. Кроме того, для таких систем не определен выбор суммарного АР применительно к данной задаче.

Целью настоящей статьи является разработка архитектуры (способа организации) МК-систем ЦОС, позволяющей перераспределять АР между каналами системы в соответствии с помеховой ситуацией и имеющей минимальную его избыточность.

Основные компоненты АР — это вычислительный ресурс (ВР)  $Q_B$ , обеспечивающий реализацию алго-

ритмов обработки; коммутационный ресурс (КР)  $Q_K$ , обеспечивающий реконфигурацию системы, и управляющий ресурс (УР)  $Q_Y$ , осуществляющий управление системой.

Поскольку основной вес имеет ВР, при синтезе структуры системы будем в первую очередь учитывать затраты на его реализацию, а при комплексной оценке результатов синтеза — еще и затраты на КР, также оказывающий заметное влияние на общий ресурс системы. В этом случае выражение для суммарных затрат имеет вид

$$Q_0 = Q_B + \gamma Q_K, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — коэффициент, учитывающий относительную сложность реализации в ВС коммутационных (КЭ) и вычислительных (ВЭ) элементов.

При необходимости учета УР (в рамках комплексного подхода к проектированию [7]), выражение (1) преобразуется к виду

$$Q_0 = Q_B + \gamma_1 Q_K + \gamma_2 Q_Y, \quad (2)$$

где  $\gamma_1, \gamma_2$  — коэффициенты относительной сложности реализации КЭ и элементов управления, соответственно.

В зависимости от того, какие используются алгоритмы внутриимпульсной и междупериодной обработки, обеспечивающие МК-обнаружение сигналов, может наблюдаться различная степень зависимости между параметрами  $P_i$  реализуемых алгоритмов (коэффициент сжатия сигнала, число обрабатываемых импульсов и т. д.) и ВР, необходимым для реализации этих алгоритмов (зависимость «параметр—ресурс»).

Например, МК-фильтр сжатия, реализованный на базе КИХ-фильтра прямой формы, характеризуется линейной зависимостью «параметр—ресурс», МК-формирователь решающей статистики, осуществляющий прямое обращение корреляционной матрицы входного процесса, — кубической зависимостью, а реализованный на базе ортогонализатора Грамм–Шмидта — квадратичной.

Таким образом, необходимо синтезировать МК-систему ЦОС, характеризующуюся неким суммарным параметром  $P_0 = \text{const}$  и имеющую в общем случае нелинейный характер зависимости «параметр—ресурс». Тогда задание на ее разработку выглядит следующим образом.

Пусть задана совокупность реализуемых алгоритмов  $\{F_{ij}\}$ ,  $i \in \overline{1, L}$ ;  $j \in \overline{1, J}$ , где  $L$  — число каналов;  $J$  —

число типов алгоритмов, реализуемых ВС в каждом канале. Данная совокупность характеризуется некоторым конечным числом состояний  $M$ , соответствующим диапазону изменения условий работы. Необходимо разработать архитектуру устройства, обеспечивающего реализацию алгоритмов  $\{F_{ij}\}$ ,  $i \in \overline{1, L}$ ;  $j \in \overline{1, J}$  для всего набора состояний  $M$  при минимальных аппаратурных затратах  $Q_0$ .

В силу возможности декомпозиции указанных выше алгоритмов [8], полагаем  $J=1$ .

**Синтез архитектуры МК-системы**

Пусть параметры  $P_i$  совокупности алгоритмов  $\{F\}$  удовлетворяют условию

$$\sum_{i=1}^L P_i \leq P_0. \tag{3}$$

Рассмотрим  $L$ -канальную систему с общим ВР  $Q_0$  (для упрощения  $Q_K$  не учитываем), достаточным для реализации на нем алгоритмов  $\{F\}$ , удовлетворяющую условию (3) при любом (самом неблагоприятном) соотношении  $P_i$ . Разобьем ресурс  $Q_0$  на  $L$  ранжированных парциальных ресурсов  $Q_i$  так, чтобы выполнялось условие

$$Q_1 \leq Q_2 \leq \dots \leq Q_L, \tag{4}$$

и закрепим эти ресурсы за соответствующими каналами.

Если теперь проранжировать парциальные алгоритмы  $F_i$  по величине  $P_i$

$$P_1 \subset P_2 \subset \dots \subset P_L \tag{5}$$

и затем реализовать их на ресурсах  $Q_i$  соответствующих рангов, то на ресурсе  $Q_0$  будет обеспечена реализация многоканального алгоритма в целом при любом соотношении  $P_i$ , удовлетворяющем условию (3).

Существенным элементом приведенного алгоритма является определение парциальных ресурсов  $Q_i$ , обеспечивающих реализацию алгоритма при минимальном общем ресурсе  $Q_0$ .

Из условий (3)—(5) максимальное значение  $P_i$  определяется по формуле

$$P_{i\max} = [P_0 - (i-1)P_{\min}] / (L-i+1), \quad i \in \overline{1, L}, \tag{6}$$

где  $P_{\min}$  — минимальное значение  $P_i$  в канале.

Отсюда ВР каждого из каналов при  $Q_i = f(P_i)$  равен

$$Q_i = f \{ [P_0 - (i-1)P_{\min}] / (L-i+1) \}, \tag{7}$$

а ресурс системы в целом

$$Q_0 = \sum_{i=1}^L f \{ [P_0 - (i-1)P_{\min}] / (L-i+1) \}. \tag{8}$$

Значения  $Q_0$  для характерных зависимостей «параметр—ресурс» при  $P_{\min}=0$  определяются выражениями:

для линейной

$$Q_{01} \leq P_0 \sum_{x=1}^L (1/x) = P_0 [c + \psi(L+1)]; \tag{9}$$

для квадратичной

$$Q_{02} \leq P_0^2 \sum_{x=1}^L (1/x)^2 = P_0^2 [\pi/6 + \psi'(L+1)]; \tag{10}$$

где  $c$  — постоянная Эйлера;

$\psi(\cdot)$  — пси-функция [9, с. 599].

Знак « $\leq$ » показывает, что полученные оценки являются предельными, т. к.  $P_0$  не делится без остатка на любое число каналов и, строго говоря, под знаком суммы должны стоять целые части от деления  $P_0$  на  $x$ .

Конкретизация результирующей структуры ВС осуществляется с использованием аппарата теории графов путем представления реализуемого алгоритма в виде графа информационных связей (ГИС). При этом выполняемые операции отображаются в виде вершин ГИС, а связи между ними — в виде дуг или ребер [10, 11].

В общем случае, отображение структуры ВС осуществляется графом  $G_0$ , представляющим собой не-

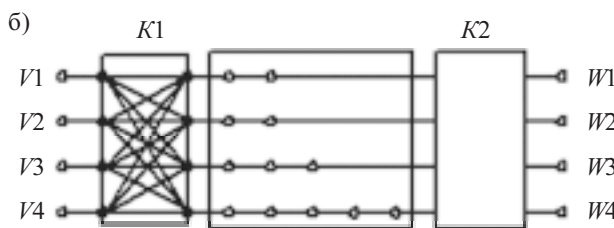
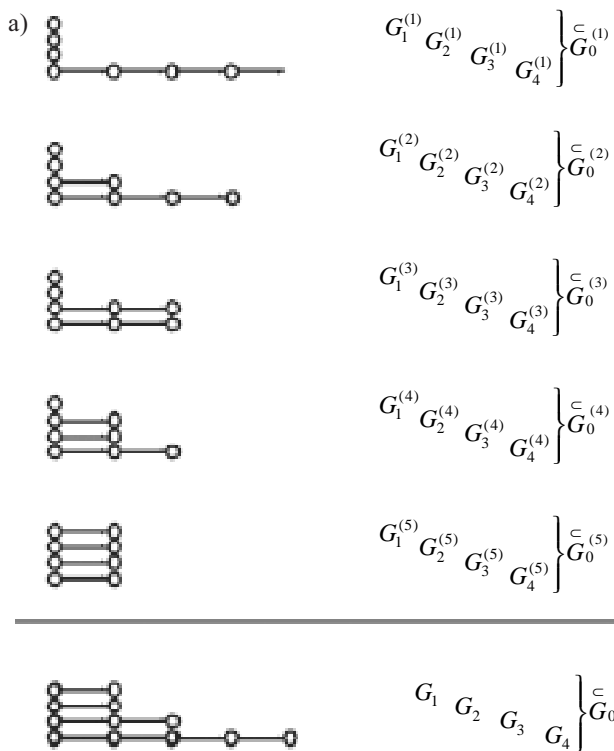


Рис. 1. Иллюстрация синтеза ранжированной архитектуры МК-системы:

$a$  — формирование результирующего графа;  $b$  — структура системы с входным ( $K1$ ) и выходным ( $K2$ ) коммутаторами каналов

пересекающиеся объединение ранжированных подграфов  $\bar{G}_i$ , каждый из которых получается путем сложения по «ИЛИ» всех  $M$  вариантов подграфа данного ранга, то есть

$$G_0 = \bigcup_{i=1}^L \bar{G}_i, \quad \bar{G}_i = \sum_{m=1}^M G_i^{(m)}, \quad (11)$$

где  $G_i^{(m)}$  —  $m$ -й вариант подграфа  $i$ -го ранга (канала);  $M$  — число вариантов состояния вектора  $\{P\}$ .

Для обеспечения физической реализуемости синтезируемой системы [12, 13] на графе  $G_0$  необходимо отобразить источники и приемники входных и выходных данных, т. е.  $\bar{G}_i = \bar{G}_i(\{V\}, \{W\})$ . В результате структура ВС дополнится системой коммутации, содержащей  $2L$  коммутаторов типа  $L/1$  ( $L$  входов/1 выход) и осуществляющей требуемое соединение каналов данных и каналов обработки. Синтезированная архитектура ВС получила название «ранжированной» и содержит  $L$  изолированных ветвей, каждая из которых отображает граф парциального алгоритма, рассчитанного на максимальное значение параметра  $P_i$  в данном канале.

Иллюстрация алгоритма синтеза ранжированной архитектуры (11) при линейной зависимости «параметр—ресурс»,  $P_0=8$ ,  $L=4$ ,  $P_{\min}=1$  приведена на рис. 1. Значения  $Q_i$ ,  $Q_0$ , полученные графически, соответствуют значениям, вычисленным согласно (7), (8) с учетом сделанного выше замечания о делении без остатка, т. е. в данном случае (при реализации одинаковых алгоритмов с различными числовыми параметрами) достаточно построить подграфы  $\bar{G}_i$  со значением ресурса, соответствующего (7), (8).

### Сравнительный анализ эффективности архитектуры

Проведем сравнительный анализ синтезированной архитектуры и традиционной по величине затрат на ВР (без учета затрат на КР) для двух видов зависимости  $Q(P)$  — линейной и квадратичной.

При изменении  $P_i$  от нуля до  $P_{i\max}=P_0$  (для получения максимальных оценок) величина суммарного АР  $Q_0$  традиционной системы для указанных зависимостей определяется соответственно выражениями

$$Q_0 = Q_B = LP_0, \quad (12)$$

$$Q_0 = Q_B = LP_0^2, \quad (13)$$

а для ранжированной архитектуры — выражениями (9) и (10).

В качестве критерия эффективности используется отношение затрат аппаратного ресурса в многоканальной системе к затратам в одноканальной при одинаковом значении  $P_0$ :

$$\delta = Q_0^{(L)} / Q_0^{(1)}.$$

Нетрудно увидеть, что для неперестраиваемой архитектуры  $\delta=L$  для любого вида зависимости  $Q(P)$ , а для ранжированной архитектуры  $\delta$  определяется с учетом (9), (10):

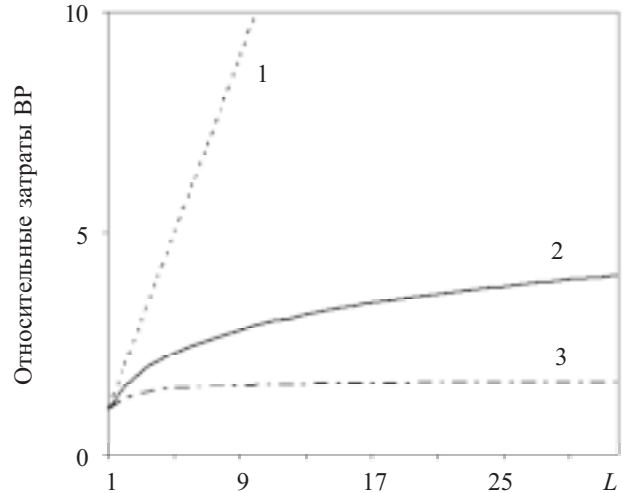


Рис. 2. Зависимость относительных затрат ВР от числа каналов для неперестраиваемой архитектуры (1) и для ранжированной при линейной (2) и квадратичной (3) зависимости  $Q(P)$

— для линейной зависимости

$$\delta = \sum_{x=1}^L (1/x) = c + \psi(L+1); \quad (14)$$

— для квадратичной зависимости

$$\delta = \sum_{x=1}^L (1/x)^2 = \pi/6 + \psi'(L+1). \quad (15)$$

Из рис. 2 видно, что затраты ВР в системе с ранжированной архитектурой в разы ниже, чем в системе с неперестраиваемой архитектурой. Кроме того, с ростом степени нелинейности зависимости  $Q(P)$  наблюдается увеличение эффективности применения синтезированной архитектуры. Так, при числе каналов, равном 32, и линейной зависимости  $Q(P)$ , затраты ВР в 4 раза больше, чем в одноканальной ВС, тогда как при квадратичной зависимости  $Q(P)$  различие в затратах  $Q_B$  не превышает 70%.

Для уточнения оценок эффективности учтем затраты на систему коммутации.

Как указывалось выше, ранжированная архитектура содержит  $2L$  коммутаторов типа  $L/1$ . Если указанные коммутаторы привести к элементарным КЭ типа  $1/1$ , то суммарные затраты (1) на реализацию ВС с ранжированной архитектурой будут равны

$$Q_0 = Q_B + 2\gamma L^2, \quad (16)$$

где  $Q_B$  — определяется выражениями (9), (10).

В качестве критерия эффективности в данном случае будем использовать граничное значение  $\gamma$ , при котором неперестраиваемая и ранжированная архитектуры будут иметь одинаковые суммарные затраты.

Подставляя (9) и (10) в (16) и сравнивая их с (12), (13), получим граничные значения  $\gamma$  для, соответственно, линейной и квадратичной зависимостей  $Q(P)$ :

$$\gamma_{\text{лин}} = P_0(L - S_L)/(2L^2), \quad (17)$$

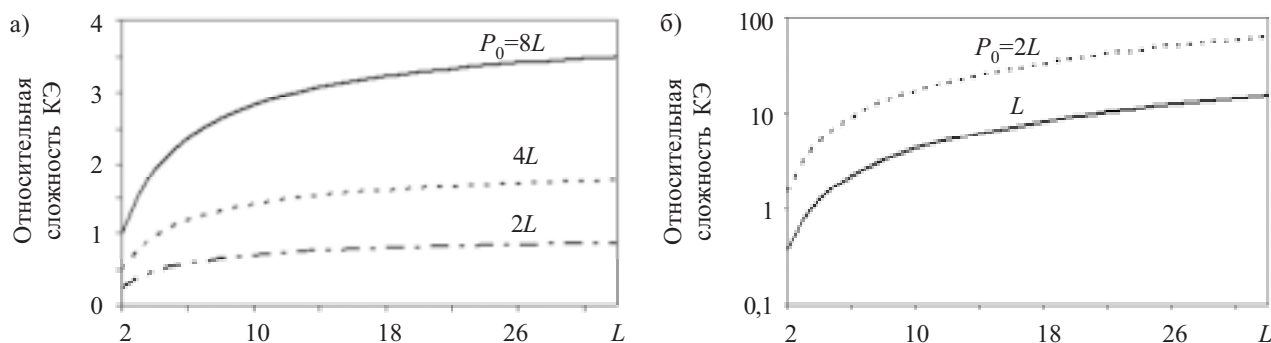


Рис. 3. Зависимость граничных значений  $\gamma$  от числа каналов  $L$  при линейной (а) и квадратичной (б) зависимостях  $Q(P)$  для различных значений  $P_0$

$$\gamma_{\text{кв}} = P_0^2 (L - T_L) / (2L^2), \quad (18)$$

$$\text{где } S_L = c + \psi(L+1); \\ T_L = \pi/6 + \psi'(L+1).$$

Результаты расчета  $\gamma$  согласно (17), (18) при различном соотношении  $P_0$  и  $L$  приведены для систем с линейной зависимостью  $Q(P)$  — на рис. 3, а, а для систем с квадратичной зависимостью — на рис. 3, б.

Из графиков видно, что даже в наихудшем случае (минимальное отношение  $P_0/L$  и минимальное число каналов) граничное значение  $\gamma$  не должно превышать 0,25, а для большинства практических ситуаций ( $L > 4$ ,  $P_0/L > 2$ ) сложность КЭ может даже превышать сложность элементарного ВЭ.

Учитывая, что на практике сложность КЭ как минимум на порядок уступает сложности ВЭ, можно сделать вывод о том, что разработанный алгоритм синтеза архитектуры МК-устройств обеспечивает существенное (в разы) сокращение аппаратных затрат ВС.

\*\*\*

Таким образом, предложенная ранжированная архитектура МК-систем цифровой обработки сигнала на фоне комплекса разнородных помех обеспечивает эффективное перераспределение аппаратного ресурса между каналами.

С ростом степени нелинейности зависимости «параметр—ресурс» эффективность применения указанной архитектуры растет, приближая суммарные затраты синтезируемой МК-системы к затратам одноканальной.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Баранов П. Е., Муранов А. С., Шейк-Сейкин А. Н. Оптимальное совместное управление временным и энергетическим ресурсами в задачах обнаружения сигналов многолучевыми системами // Радиотехника.— 1991.— № 9.— С. 65—67.

2. Баранов П. Е., Муранов А. С., Шейк-Сейкин А. Н. Совместное распределение числа и энергии импульсов при обнаружении сигналов в однолучевых многоканальных системах // Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника.— 1991.— № 9.— С. 73—76.

3. Баранов П. Е. Адаптивный рекуррентный алгоритм компенсации помех с произвольными корреляционными матрицами // Там же.— 1990.— № 4.— С. 10—14.

4. Баранов П. Е. Адаптивный рекуррентный формирователь статистики отношения правдоподобия на базе решетчатых фильтров // Там же.— 1991.— № 7.— С. 49—53.

5. Дордопуло А. И., Каляев И. А., Левин И. И., Семерников Е. А. Семейство многопроцессорных вычислительных систем на основе ПЛИС // Матер. II МНК «Суперкомпьютерные системы и их применение». — Республика Беларусь, Минск.— 2008.— С. 44—49 [Электронный ресурс].— Режим доступа к ресурсу: <http://fpga.parallel.ru/papers/dordopulo4.pdf>

6. Севбо В., Орлов А., Лошаков А. Многопроцессорный вычислительный комплекс для задач «жесткого» реального времени // Современные технологии автоматизации.— 2007.— № 3.— С. 32—38 [Электронный ресурс].— Режим доступа к статье: <http://www.cta.ru/Issues/343833.htm>

7. Аллен Д. Ж. Архитектура вычислительных устройств для цифровой обработки сигналов // ТИИЭР.— 1985.— Т. 73, № 5.— С. 4—29.

8. Кузьмин С. З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации.— М.: Радио и связь, 1986.

9. Прудников Н. П., Брычков Ю. А., Маричев О. И. Интегралы и ряды.— М.: Наука, 1981.

10. Воеводин В. В. Математические модели и методы в параллельных процессах.— М.: Наука, 1986.

11. Оре О. Теория графов / Пер. с англ.— М.: Наука, 1980.

12. Каляев А. В. Многопроцессорные системы с программируемой архитектурой.— М.: Радио и связь, 1984.

13. Шейк-Сейкин А. Н., Цыганков С. Е. Синтез перестраиваемых поточных свертывателей на базе алгоритмов БПФ / Одесский политехнический ин-т.— Одесса, 1988.