

Использование системы остаточных классов для маломощных приложений цифровой обработки сигналов

Н.С. Эрдниева

Введение

Решение широкого круга вычислительных задач цифровой обработки сигналов (ЦОС) требует колоссальных объемов математических расчетов. Анализ известных подходов [1] показывает, что при разработке высокоскоростных вычислений требуется применение тех или иных форм параллельной обработки. В последнее время применяют систему остаточных классов (СОК), которая обеспечивает параллелизм на уровне выполнения элементарных операций [2].

Одной из основных проблем цифровой фильтрации является энергопотребление. Известны различные методы для решения проблемы. В работе [3] авторы предложили использовать представление числа СОК как метод снижения энергии в реализации ЦОС архитектуры. Для проверки подхода были разработаны различные эксперименты реализации КИХ-фильтрации, которые представляются с помощью дополнительного двоичного кода (ДДК) и СОК. Эксперименты показали значительное снижение энергии для представления СОК. Целью статьи является объяснение причин снижения энергии.

Основы СОК

Целое представление числа на основе СОК определяется множеством P взаимно простых чисел $\{m_1, m_2, \dots, m_p\}$, называемый основанием СОК. Динамический диапазон основания P - $M = m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_p$.

Целое $X \in \{0, 1, 2, \dots, M - 1\}$ имеет единственное представление СОК:

$$X \xrightarrow{RNS} (\langle X \rangle_{m_1}, \langle X \rangle_{m_2}, \dots, \langle X \rangle_{m_p})$$

где $\langle X \rangle_{m_i}$ означает $X \bmod m_i$.

Если *op* представляет общие арифметические операции (сложение, разность, произведение, модульное деление), то наиболее интересным свойством СОК [4, 5] является возможность перевода этой операции среди целых чисел в набор модульных операций на различных модулях m_i :

$$Z = X \text{ op } Y \xrightarrow{RNS} \begin{cases} Z_{m_1} = \langle X_{m_1} \text{ op } Y_{m_1} \rangle_{m_1} \\ Z_{m_2} = \langle X_{m_2} \text{ op } Y_{m_2} \rangle_{m_2} \\ \dots \\ Z_{m_p} = \langle X_{m_p} \text{ op } Y_{m_p} \rangle_{m_p} \end{cases} \quad (1)$$

Снижение энергопотребления

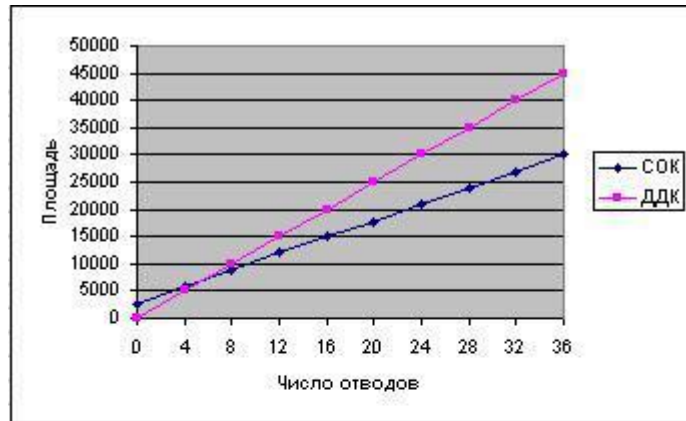
В цифровой фильтрации [6, 7] возможны различные уровни оптимизации энергопотребления: 1) алгоритмический уровень; 2) архитектурный уровень; 3) арифметический уровень; 4) осуществленный уровень; 5) технологический уровень.

В данной статье рассмотрена оптимизация уровня арифметики с использованием представления СОК. Также проанализирована эффективность ЦОС алгоритмов, реализованных с помощью двух технологий: 1) специализированные интегральные схемы стандартные ячейки (СПИС-СЯ); 2) программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). СПИС-СЯ характеризуются изменчивой логикой и соединительными структурами. ПЛИС имеют фиксированную структуру конфигурируемых логических блоков (КЛБ), тактирования и соединений. Для СПИС-СЯ общая оценка расхода энергии является более сложной.

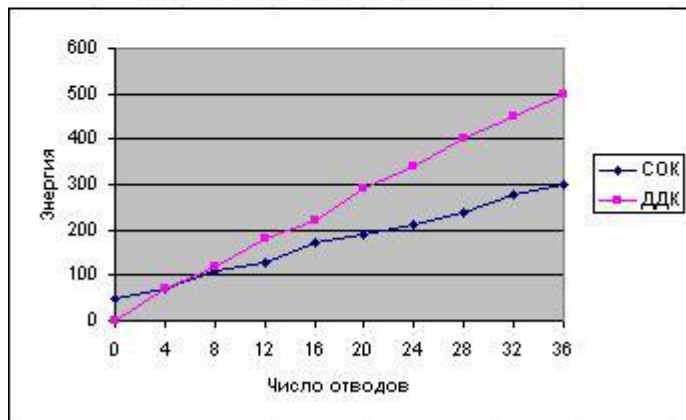
В данном анализе, A_x и P_x представляют собой площадь и энергопотребление фильтра, а x - представление системы счисления, может принимать два значения СОК или ДДК. В общем, A_x и P_x растут линейно с числом отводов (N_{TAP}), в соответствии с законами (2).

$$\begin{aligned}
 A_x &= k_1^{A_x} + k_2^{A_x} N_{TAP} \\
 P_x &= k_1^{P_x} + k_2^{P_x} N_{TAP}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Константы k_1 представляют смещения графиков площади и энергии, а k_2 являются ростом значения скорости. Пример показан на рис. 1.



а) СОК-ДДК: сравнение площади



б) СОК-ДДК: сравнение энергии

Рис. 1. – Сравнения ДДК и СОК реализаций КИХ-фильтров

Из этих графиков, видно, что СОК имеет большие значения смещения. Это связано с наличием входного и выходного преобразователей. С другой стороны, склоны СОК менее крутые, чем склоны ДДК.

СПИС-СЯ: расходы энергопотребления

Расходы энергопотребления делятся на локальные и глобальные соединения. В то время как сигналы маршрута локальных соединений осуществляются внутри функциональных блоков, сигналы маршрута глобальных соединений - между различными блоками [8].

На рис. 2 изображено распределение по выбранным системам. Рис. 2.а показывает, что локальные соединения играют фундаментальную роль в энергопотреблении. Распределение локального энергопотребления соединений показано на рис. 2.б. Расходы делятся на три группы:



Рис. 2. – СПИС-СЯ расходы энергии

1) энергия для заряда вентиля (50%); 2) энергия для соединений логической емкости заряда (30%); 3) энергия для заряда диффузии логической емкости (20%).

В технологии СПИС-СЯ распространение переноса свойств СОК потенциально дают следующие преимущества площади-энергии: 1) уменьшение сложности (количество вентиля - площади); 2) восстановление соединения логической емкости.

В данной модели выразим площадь СПИС А с точки зрения числа (NAND2) эквивалентных вентиля. Термин N_L - это число узлов. Логическая емкость $C(i)$ связана в каждом узле i . Учитывая постоянный коэффициент активности переключения α , расход энергии выражается

$$P_{tot} = \sum_{i=1}^{N_L} \alpha(i)C(i)FV_{DD}^2 = \alpha C_{tot} FV_{DD}^2 \quad (3)$$

Если α , F , и V_{DD}^2 можно считать константами, то получим, суммарная энергия P_{tot} пропорциональна суммарной логической емкости C_{tot} . Выше

изложенные соображения позволяют получить модель для изучения свойств СОК.

Для логической емкости можно получить следующее выражение

$$C_{node} = C_{line} + C_{FO} = \alpha_C L_{line} + \beta_C FO_{node} \quad (4)$$

где C_{node} представляет узел логической емкости, полученный сочетанием длины линии L_{line} и узла разветвления FO_{node} с двумя коэффициентами (α_C и β_C). Среднее значение этой логической емкости

$$C_{mean} = \alpha_C L_{mean} + \beta_C FO_{mean} \quad (5)$$

Таким образом, общая логическая емкость

$$C_{tot} = N_L C_{mean} \quad (6)$$

где N_L - число узлов схемы. Из приведенных выражений получим следующие значения энергопотребления

$$P_{tot} = \alpha N_L C_{mean} FV_{DD}^2 \quad (7)$$

Если число вентилях увеличивается, логическая емкость глобальных соединений изменяется по двум причинам: 1) увеличение числа узлов (количество выходов); 2) увеличение длины провода (увеличение сигнала глобальности).

Черновая модель значения логической емкости может предположить:

1) N_L пропорциональна сложности схем (число вентилях или площади): $N_L = \gamma A$; 2) L_{mean} & FO_{mean} связаны с сигналом локальности (через Индекс Глобальности или GI)

$$L_{mean} = \phi_1 GI; FO_{mean} = \phi_2 GI$$

Следовательно, мы получаем

$$C_{tot} = N_L C_{mean} = \gamma A (\alpha_C \phi_1 + \beta_C \phi_2) GI = K \cdot A \cdot GI \text{ с } K = \gamma (\alpha_C \phi_1 + \beta_C \phi_2) \text{ и наконец,}$$

$$P_{tot} = \alpha C_{tot} FV_{DD}^2 = \alpha \cdot K \cdot A \cdot GI \cdot F \cdot V_{DD}^2 \quad (8)$$

выражает зависимость рассеиваемой энергии по индексу глобальности GI.

Приведем сравнение результатов, полученных для реализации СОК и ДДК КИХ-фильтров на основе технологии СПИС-СЯ. Из выражения (8), получаем коэффициент энергии

$$\frac{P_{RNS}}{P_{TCS}} = \frac{\alpha K F V_{DD}^2 A_{RNS} G I_{RNS}}{\alpha K F V_{DD}^2 A_{TCS} G I_{TCS}} \quad (9)$$

В эксперименте измеряются соотношения площади (A_R) и энергии (P_R). Из этих соотношений можно вывести соотношение GI ($G I_R$):

$$G I_R = \frac{G I_{RNS}}{G I_{TCS}} = \frac{P_{RNS}}{P_{TCS}} \bigg/ \frac{A_{RNS}}{A_{TCS}} = \frac{P_R}{A_R} \quad (10)$$

Используя данные из [2] и уравнения (10) получаем соотношения, представленные в Таблице 1. Результаты показывают, что локальность (GI) не играет существенной роли в экономии энергии для СПИС-СЯ реализации (близка к 1), кроме фильтра 3. Для комплексного КИХ-фильтра разница связана с коэффициентом активности, который значительно меньше для Квадратичной СОК (КСОК), как освещено в [9].

Таблица №1

Соотношения площади, энергии и глобальности для СПИС-СЯ

	Фильтр	A_R	P_R	$G I_R$
1	64-отвод. КИХ	0.630	0.560	0.890
2	8-отвод. прямой КИХ	0.994	0.990	0.995
3	64-отвод. Комплекс. КИХ	0.578	0.340	0.589
4	Полифазный фильтр	0.747	0.624	0.850

ПЛИС: Расходы энергопотребления

В реализации ПЛИС коэффициенты веса совершенно разные. Анализ энергопотребления ПЛИС выделяет три основных достижения [10]: 1) энергопотребление в логике и элементах ввода-вывода (ЭВВ); 2) энергопотребление в синхронизации структуры; 3) энергопотребление в соединениях. Распределение этих достижений в общей реализации ПЛИС

показано на рис. 3, из которого видно, что для данной технологии энергопотребление соединений играет фундаментальную роль.

В технологии ПЛИС предпочтение отдается локальности СОК. Для анализа потребления ПЛИС используется та же модель, что и для СПИС-СЯ. В этом случае площадь соответствует числу долей. Влияние локальности СОК очевидно в Таблице 2. Для технологии ПЛИС отношение GI (GI_R) составляет около 0,5.

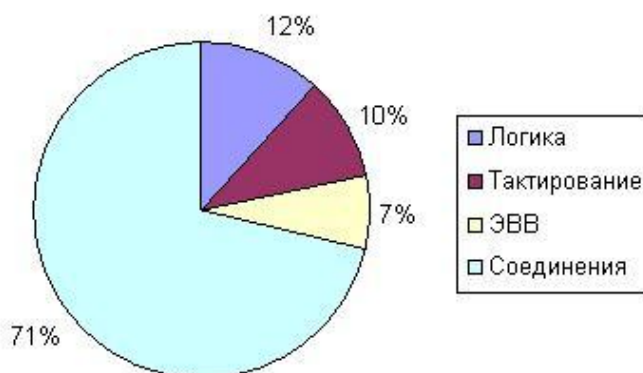


Рис. 3. – Распределение энергопотребления для реализации ПЛИС

Таблица №2

Соотношения площади, энергии и глобальности для ПЛИС

	Описание	$\frac{A_{RNS}}{A_{TCS}}$	$\frac{P_{RNS}}{P_{TCS}}$	$\frac{GI_{RNS}}{GI_{TCS}}$
1	8-отвод. КИХ	1.1.	0.612	0.554
2	16- отвод. КИХ	0.947	0.51	0.539
3	8- отвод. комплекс. КИХ	1.095	0.533	0.487
4	16- отвод. комплекс. КИХ	0.93	0.416	0.447

Заключение

В данной статье описано сравнение энергопотребления СОК и ДДК для приложений ЦОС. Анализ проведен на СПИС-СЯ и ПЛИС реализациях. Были проанализированы различные материалы с использованием соотношений площади (A), энергии (P) и глобального индекса (GI). Анализ дал следующие результаты: 1) СОК позволяет

снизить энергию как в СПИС-СЯ, так и в ПЛИС реализации; 2) реализация ПЛИС используется как уменьшение сложности и локальности представления СОК. Эти свойства СОК позволят расширить использование технологии ПЛИС к ограничению энергопотребления ЦОС системы.

Литература:

1. Червяков Н.И. Реализация высокоэффективной модулярной цифровой обработки сигналов на основе программируемых логических интегральных схем // Нейрокомпьютеры: разработка, применение, 2006. - №10. – с. 24-35.

2. Бабенко М.Г., Вершкова Н.Н., Кучеров Н.Н., Кучуков В.А. Разработка генератора псевдослучайных чисел на точках эллиптической кривой [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, №4 (2). – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1408> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

3. Cardarilli G.C., Nannarelli A. and Re M. Residue Nuber System for Low-Power DSP Applications // Proceedings of 2007 IEEE International. Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2007. – p. 1412-1416.

4. Червяков Н.И. и др. Применение искусственных нейронных сетей и системы остаточных классов в криптографии. – М.: Физматлит, 2012. – 280 с.

5. Червяков Н.И., Сахнюк П.А., Шапошников А.В., Макоха А.Н. Нейрокомпьютеры в системе остаточных классов. Кн. 11: Учебное пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2003. – 272 с.

6. Червяков Н.И. и др. Модулярные параллельные вычислительные структуры нейропроцессорных систем. – М.: Физматлит, 2003. – 288 с.

7. Синельщиков П.В., Чернов А.В. Использование непрерывного вейвлет преобразования для анализа токового сигнала при диагностировании дефектов в червячной передаче [Электронный ресурс] //

«Инженерный вестник Дона», 2011, №3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2011/500> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

8. Magen N., Kolodny A., Weiser U. and Shamir N. Interconnect-power Dissipation in a Microprocessor // Proceedings of SLIP'04, Paris, France, February 2004.

9. Stouraitis T. and Paliouras V. Considering the alternatives in Low-Power Design // in IEEE Circuits and Devices, July 2001.

10. Shang L., Kaviani A.S. and Bathala K. Dynamic Power Consumption in Virtex-II FPGA Family // Proceedings of FPGA'02, Monterey, California, USA. February, 2002.