

УДК 004.274

А.В. ПАЛАГИН, В.Н. ОПАНАСЕНКО

*Институт кибернетики им. В.М. Глушкова, Украина***ПОСТРОЕНИЕ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ УСТРОЙСТВ НА БАЗЕ ПЛИС**

Предложен подход к синтезу структур контроллеров, построенных на основе ПЛИС, основанный на создании хорошо структурированной библиотеки алгоритмов управления и соответствующих структур проектируемого контроллера. Выполнена формализация задачи оптимизации структуры контроллера, критерием качества которой являются суммарные аппаратные затраты на реализацию и время выполнения всех алгоритмов.

гибкость архитектуры, программируемые логические интегральные схемы, реконфигурируемость**Введение**

Реконфигурируемые устройства применяются в современных системах, связанных с выполнением больших объемов вычислений, управления технологическими процессами, контрольно-измерительной аппаратурой, роботами–манипуляторами, других системах реального времени. Самое широкое применение находят современные средства микропроцессорной техники – микроконтроллеры, которые реализуются, как правило, либо в виде наборов модулей, встраиваемых в компьютер либо в виде автономных систем управления. Алгоритм управления представляется программой, которая хранится в памяти. Для записи алгоритма управления может использоваться как постоянная память (программа записывается при изготовлении микроконтроллера или с помощью программатора), так и оперативная память, позволяющая перезаписывать программу практически бесконечное число раз.

Быстрое развитие современных технологий в микроэлектронике и создание программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) или Programmable Logic Devices (PLD) высокой степени интеграции привело к созданию нового класса микроконтроллеров – реконфигурируемых микроконтроллеров (РМК), архитектура которых изменяется программным способом. Отличие реконфигурируемых от программируемых микроконтроллеров состоит в том, что их структура не является фиксированной и меняется в зависимости от

реализуемого алгоритма управления [1].

ПЛИС предоставляют возможность реализовать структуры устройств с динамической реконфигурацией и тем самым решать задачи эффективной настройки на заданный алгоритм.

ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема, сочетающая регулярность структуры полупроводникового запоминающего устройства с универсальностью микропроцессора, позволяющая программно формировать архитектуру внутреннего специализированного процессора.

Конфигурация – определенная совокупность аппаратных средств и соединений между ними, реализующая заданный алгоритм функционирования в течение определенного периода времени.

Реконфигурируемость – свойство системы переопределять совокупность аппаратных средств (в том числе реализуемых ими функций) и соединений между ними в соответствии с требуемым алгоритмом функционирования.

Файл конфигурации – программный файл, сформированный посредством САПР для конкретного типа кристалла, предназначенный для создания требуемой конфигурации в ПЛИС.

Реконфигурируемые микроконтроллеры

Абстрактная архитектура РМК может быть описана тройкой:

$$S = \langle P, A_i, F \rangle,$$

где $P = \{P_i\}$ – множество объектов управления ($i = 1 \div n$); $A_i = \{A_{ij}\}$ – множество алгоритмов управления, реализующих функцию отображения $A_i : X_{ij} \Rightarrow Y_{ij}$ множества входных сигналов $\{X_{ij}\}$ во множество выходных сигналов $\{Y_{ij}\}$ для i -го объекта ($j = 1 \div m$); $F = \{F_\gamma\}$ – множество файлов конфигурации ($\gamma = 1 \div k, k = n \times m$), определяющих структуры реализации алгоритмов A_{ij} объектов управления P_i .

Если при аппаратной реализации алгоритм A_{ij} не удается разместить в один кристалл FPGA, то этот алгоритм разбивается на фрагменты, выполняемые последовательно. Сложность фрагментов алгоритма при этом определяется лишь логической емкостью кристалла. Соответствующие этим фрагментам файлы конфигурации $F_{\gamma l}$ ($l = 1 \div t$, где t – число фрагментов алгоритма A_{ij}) загружаются в кристалл последовательно. Вариант ($t = 1$) определяет реализацию алгоритма A_{ij} в одном кристалле FPGA. Конфигурация кристалла ПЛИС осуществляется посредством записи файла конфигурации, сформированного с помощью системы САПР (размер файла конфигурации – величина постоянная и зависит от типа используемого кристалла FPGA).

Объем памяти, необходимый для хранения множества F файлов конфигурации, будет определяться величиной $Q = q \times t \times k$ (q) – объем памяти, необходимый для хранения одного файла конфигурации).

В реконфигурируемых устройствах (устройствах с программируемой архитектурой [1]) фиксируется обрабатываемое поле заданной размерности, сконфигурированное специально для выполнения определенного заданного алгоритма или его части, обеспечивая таким образом реализацию этого алгоритма оптимальным способом, имея в виду, как время его выполнения, так и затраты аппаратных ресурсов. Настройка структуры на выполнение требуемого алгоритма и ее реали-

зация в кристалле на вентиляльном уровне позволяют увеличить быстродействие устройства на несколько порядков по сравнению с универсальными решениями.

Постановка задачи проектирования

В известных методах формализованного проектирования вычислительных систем сам процесс представляется в виде последовательности этапов, на каждом из которых проект системы представлен совокупностью математических моделей, описывающих различные ее части [2]. Модель проектируемой вычислительной системы можно представить следующей системой:

$$S = \langle M, A, B, P \rangle,$$

где: M – множество математических методов для предметной области, лежащих в основе функционирования системы; A – множество алгоритмов реализации метода; $B = \{b\}$ – алфавит конструктивов, из которых синтезируется структура. Алфавитом будем называть набор всех компонентов $\{b\}$, на основе которых строятся допустимые описание и реализация проекта; P – процедура описания проекта (описание объекта).

Таким образом, процесс проектирования состоит в решении задачи синтеза структуры на основе конструктивов $\{b\}$ алфавита B для выполнения определенного алгоритма A , реализующего метод M , в соответствии с требованиями спецификаций. Результатом процедуры P является описание проекта во входном языке САПР.

Отметим, что (в отличие от традиционных подходов) процесс разработки метода и алгоритма решения исходной задачи носит итеративный характер. Критериями эффективности искомого метода (алгоритма) являются обобщенные характеристики производительности, аппаратных затрат, точности решения задачи, сложности алгоритма, надежности проектируемой системы либо специальные критерии, такие как работа в реальном времени, трудоемкость разработки соответствующих метода и алгоритма и др.

Сегодня представляется затруднительным предложить общую методологию оптимального решения произвольной задачи в произвольной предметной области. Более реалистичным на настоящем этапе представляется создание хорошо структурированной библиотеки методов и соответствующих архитектур проектируемой вычислительной системы, хранимых в виде программных файлов во внешней памяти базовой вычислительной подсистемы, и выбор подходящей пары (метод–архитектура) для конкретной проблемной ситуации [3].

Таким образом, задача оптимального синтеза сводится к задаче оптимального выбора на предварительно сформированном (и постоянно расширяемом) множестве решений из библиотеки файлов конфигураций (БФК). Этот процесс можно достаточно строго формализовать. Предложенный подход позволяет не только получить оптимальное решение задачи, но облегчить ее постановку и взаимодействие пользователя с компьютерной системой.

Процесс проектирования вычислительных устройств на ПЛИС полностью поддерживается инструментальными средствами САПР, которые позволяют выполнять: описание проекта, логическое моделирование, размещение и трассировку проекта, временную верификацию и формирование файла конфигурации кристалла. Процесс проектирования основан на некотором алфавите, в качестве которого могут использоваться:

набор сложных проектных решений – $B^4 = \bigcup_{\gamma} b_{\gamma}^4, (\gamma = 1 \div p)$; набор примитивов и макроэлементов стандартной библиотеки – $B^3 = \bigcup_z b_z^3, (z = 1 \div k)$; набор макроэлементов, формируемых разработчиком – $B^2 = \bigcup_j b_j^2, (j = 1 \div m)$; набор параметрических макромодулей (LogiCore) – $B^1 = \bigcup_i b_i^1, (i = 1 \div l)$.

В конечном итоге конкретный проект будет использовать алфавит конструктивов

$B = \bigcup_s B^s, (\forall s = 1 \div 4)$, где часть подмножеств B^s могут являться пустыми множествами: $B^1 = \emptyset$ ($\forall i = 0$); $B^2 = \emptyset$ ($\forall j = 0$); $B^3 = \emptyset$ ($\forall z = 0$); $B^4 = \emptyset$ ($\forall \gamma = 0$).

Задача оптимизации структуры

Рассмотрим синтез структуры, когда БФК содержит алгоритм в виде одного библиотечного элемента. Пусть метод/задача (M) представляется последовательностью алгоритмов ($A_i, \forall i = \overline{1 \div n}$) – $M = \bigcup_i A_i$.

Имеем хорошо структурированную библиотеку БФК структурных реализаций методов (алгоритмов), выполняющих отображение алгоритма в структурную реализацию ($F : A_i \Rightarrow B_i$). Каждый алгоритм имеет отображение в структурную реализацию (B_i), которая представляет собой файл конфигурации для кристалла ПЛИС.

В общем случае имеется несколько вариантов реализации алгоритма (например, последовательная, последовательно–параллельная и параллельная):

$$B_i = \bigcup_z B_{iz}, (z = 1 \div k).$$

Каждый вариант характеризуется параметрами быстройдействия (время выполнения – t_{iz}) и аппаратными затратами (q_{iz}). Причем предполагаем, что мощность множества B является достаточной для реализации широкого набора алгоритмов. В том случае, если требуемая реализация i -го алгоритма в библиотеке отсутствует ($B_i = \emptyset$), то необходимо с помощью инструментальных средств САПР ПЛИС создать этот проект и включить его в качестве стандартного элемента в библиотеку.

Таким образом, задача оптимизации сводится к упорядоченному назначению каждой i -ой вершине графа реализуемого алгоритма (B_{iz})-го элемента биб-

лиотеки для реализации задачи с целью получения экстремального значения некоторого критерия качества. Т.е. любой алгоритм отображается только одним вариантом реализации из библиотеки. В результате определяется структура, реализующая заданный граф. Тогда решение задачи может быть получено методами целочисленного математического программирования [4] и, в зависимости от требуемого критерия качества, можно предложить следующие варианты постановки задачи оптимизации, которая состоит в определении минимума целевой функции.

1. *Критерием качества является суммарные аппаратные затраты* на реализацию всех алгоритмов:

$$Q = \sum_i \sum_z q_{iz} x_{iz} = \min, (\forall i = \overline{1 \div n}, \forall z = \overline{1 \div k});$$

$$\sum_{z=1}^k x_{iz} = 1, i = \overline{1 \div n}, z = \overline{1 \div k};$$

$$it_r + \sum_i \sum_z (t_{iz} x_{iz}) \leq T_0,$$

где t_r – время реконfigurирования кристалла ПЛИС с помощью файла конфигурации ($t_r = const$) и зависит от типа кристалла ПЛИС;

T_0 – допустимое время выполнения всех алгоритмов.

2. *Критерием качества является суммарное время выполнения* всех алгоритмов:

$$T = \sum_i \sum_z t_{iz} x_{iz} = \min, (\forall i = \overline{1 \div n}, \forall z = \overline{1 \div k});$$

$$\sum_{z=1}^k x_{iz} = 1, i = \overline{1 \div n}, z = \overline{1 \div k};$$

$$\sum_i \sum_z q_{iz} x_{iz} \leq Q_0,$$

где Q_0 – допустимые аппаратные затраты.

3. *Комплексный критерий качества:*

$$\alpha \sum_i \sum_z t_{iz} x_{iz} + \beta \sum_i \sum_z q_{iz} x_{iz} = \min,$$

$$(\forall i = \overline{1 \div n}, \forall z = \overline{1 \div k}),$$

$$\sum_{z=1}^k x_{iz} = 1, i = \overline{1 \div n}, z = \overline{1 \div k}.$$

$$\sum_i \sum_z q_{iz} x_{iz} \leq Q_0,$$

$$it_r + \sum_i \sum_z (t_{iz} x_{iz}) \leq T_0,$$

где α, β – весовые коэффициенты.

Методы решения таких задач достаточно хорошо разработаны и позволяют за допустимое время их решать [4].

Выводы

Предложенный подход к постановке задачи оптимального синтеза структуры в зависимости от требуемых критериев оптимизации позволяет, в отличие от известных подходов, решать такие задачи путем выбора подходящей пары (метод–архитектура) для конкретной проблемной ситуации на предварительно сформированном (и постоянно расширяемом) множестве решений из библиотеки файлов конфигураций. Применение устройств с реконfigurируемой структурой на базе кристаллов ПЛИС для решения сложных задач позволяет динамически менять логическую структуру процессора за счет чего, в зависимости от специфики решаемой задачи, для каждого конкретного применения формируются необходимые проблемно–ориентированные конфигурации.

Литература

1. Палагин А.В., Опанасенко В.Н. Реконfigurируемые вычислительные системы. – К., 2006. – 295 с.
2. Палагин А.В., Опанасенко В.Н., Лисовый А.Н. Проектирование реконfigurируемых систем на ПЛИС // Технология и конструирование электронной аппаратуры – 2007. – 69, № 3 – С. 15-24.
3. Палагин А.В., Опанасенко В.Н. О проектировании реконfigurируемых устройств на основе программируемых логических интегральных схем // Электронное моделирование. – 2006. – 28, № 4. – С. 65-74.
4. Сергиенко И.В., Шило В.П. Задачи дискретной оптимизации. Проблемы, методы решения, исследования. – К: Наук. думка, 2003. – 261 с.

Поступила в редакцию 22.01.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.С. Харченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.