

УДК 519.1(075.8)+510.6(075:8)

С.Ф. ТЮРИН, А.Ю. ГОРОДИЛОВ, И.С. ПОНУРОВСКИЙ

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ FPGA ПУТЕМ РЕКОНФИГУРАЦИИ РАБОТОСПОСОБНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В статье рассматривается задача поиска наиболее компактно расположенного множества работоспособных элементов FPGA (field-programmable gate array). Эта задача возникает при реконфигурации схемы после возникновения отказов логических элементов. Компактность множества определяется суммарной длиной связей между элементами этого множества. Поскольку структура доступных соединений между логическими элементами может быть сложной и нерегулярной, поставленная задача не имеет точного эффективного алгоритма решения. В статье построена графовая модель задачи и предложено решение на основе генетического алгоритма. Для подбора оптимальных параметров генетического алгоритма предлагается построение дополнительного уровня метаэволюции.

Ключевые слова: реконфигурация, отказы, программируемая пользователем вентиляционная матрица, логический элемент, генетический алгоритм.

Введение

Повышение отказоустойчивости возможно за счет обнаружения и исправления отказов. Последнее, в свою очередь, может быть достигнуто исключением из схемы отказавших элементов и реализации необходимых функций на оставшихся логических элементах. Это требует эффективного алгоритма поиска достаточного количества работоспособных элементов с учетом минимизации расстояний между ними.

1. Постановка задачи

Основными составляющими FPGA являются ячейки конфигурационной памяти, программируемые межсоединения и конфигурируемые логические блоки (КЛБ) (рис. 1).

Наиболее уязвимым звеном можно считать ячейки памяти [1], однако также в процессе функционирования из строя могут выйти и логические элементы, входящие в состав конфигурируемых логических блоков. В данной статье рассматривается именно такой вариант отказов. Выход из строя логического элемента может привести к различным последствиям. Если логический элемент реализовывал функционально-полную толерантную функцию [2], то при некоторых видах отказов такой элемент сохраняет функциональную полноту и может быть по-прежнему задействован в схеме. В иных случаях данный логический элемент становится полностью неработоспособным. Так или иначе, при выходе из строя логического элемента, который был задейство-

ван в реализации некоторой функции, для сохранения функциональности схемы требуется переконфигурировать связи в локальных и глобальных матрицах межсоединений. При этом нужно учитывать следующие особенности. Традиционная архитектура обычно содержит систему локальных соединений нижнего уровня и глобальные линии связи, которые в совокупности обеспечивают возможность установления связи между любой парой логических элементов. Однако для снижения затрат конфигурационной памяти в FPGA может быть реализована трехуровневая структура, в которой прямая связь между некоторыми удаленными элементами может быть недоступна [1]. Кроме того, в любом случае соединение между логическими элементами имеет характеристики (например, задержки сигнала, пропорциональные длине соединения), значение которой нужно стремиться минимизировать. При этом рассматриваемая характеристика может зависеть не только от физического расстояния между элементами на плате, но также от структуры FPGA. Например, на рис. 2 представлена схема ПЛИС FLEX10KE, в которой помимо традиционной коммутации присутствуют прямые соединения КЛБ через соседний КЛБ [3].

Предположим, в результате диагностики ПЛИС, мы получили список отказавших логических блоков. Будем считать также, что логический элемент, в котором произошел отказ, не может быть использован в новой конфигурации. Тогда, с учетом вышесказанного, задача может быть сформулирована как задача поиска нужного числа работоспособных логических элементов при условии минимизации длины соединений между ними.

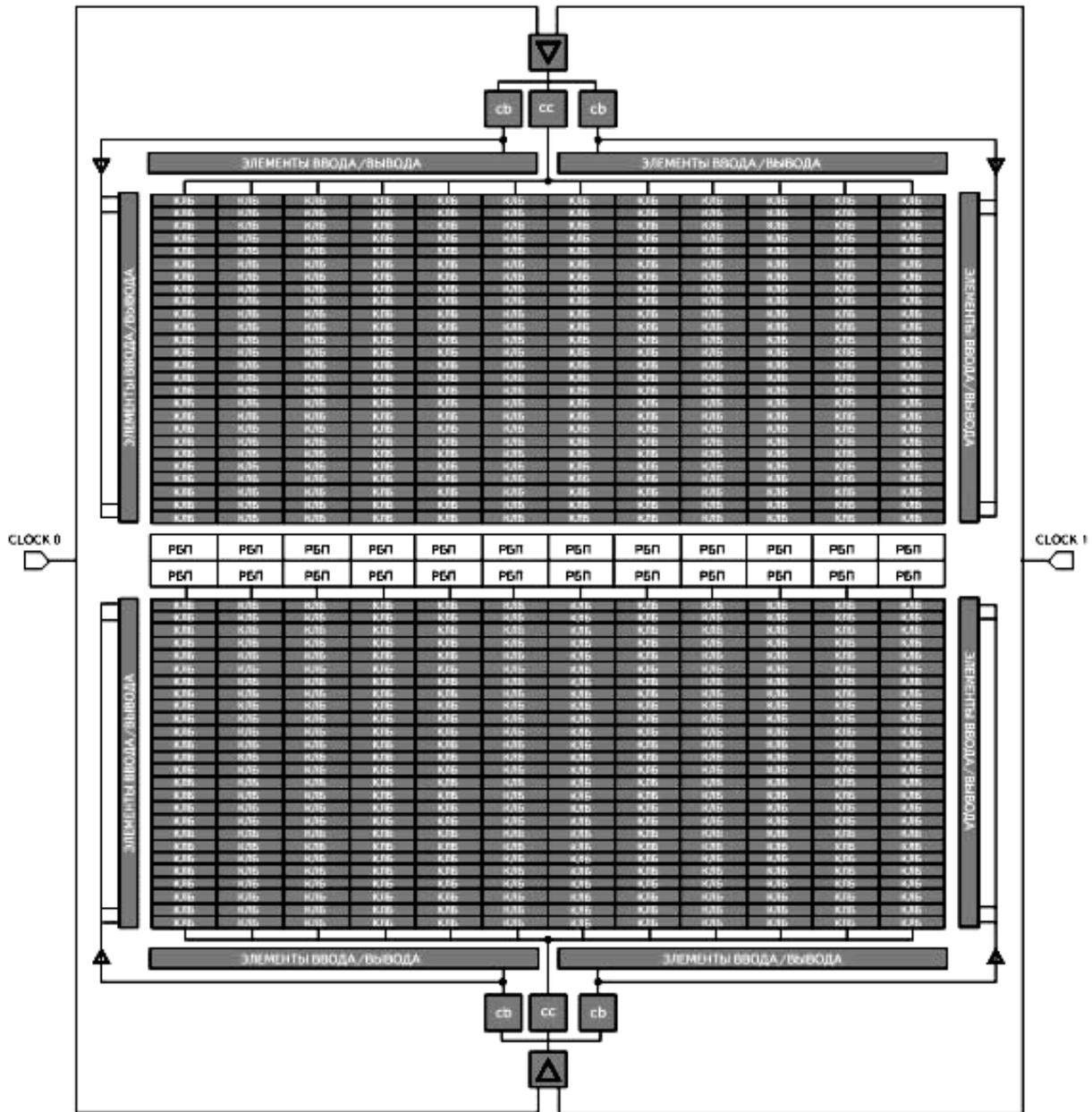


Рис. 1. Архитектура FPGA

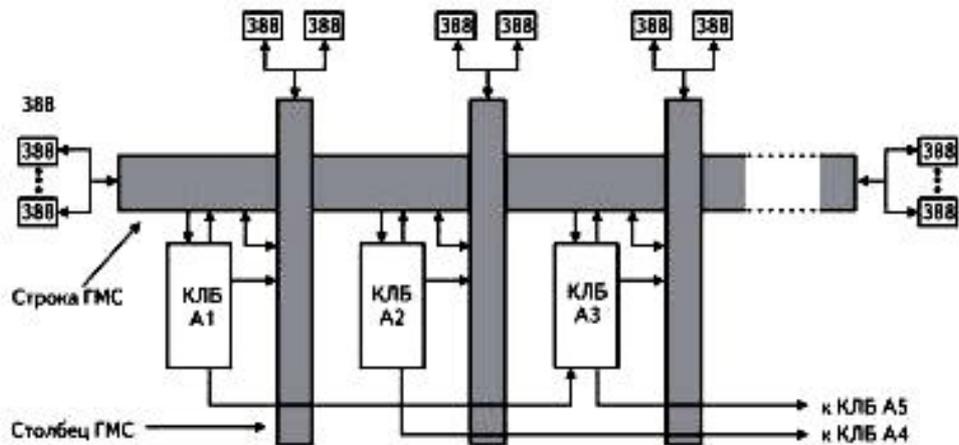


Рис. 2. Программируемая коммутация сигналов в ПЛИС FLEX10KE фирмы Altera

2. Алгоритмы поиска компактного подмножества

Построим граф $G=(V,E)$, множеством вершин которого будет множество работоспособных логических элементов, а ребро $e=(v_i,v_j)$ будет соответствовать наличию доступной связи между элементами v_i и v_j . Вес ребра $c(e)=c(v_i,v_j)$ будет соответствовать характеристике соединения (величине задержки сигнала, длине соединения). Пусть для реализации схемы необходимо $K < N$ логических элементов, где $N = |V|$ — общее количество работоспособных элементов.

Тогда задача сводится к поиску во взвешенном графе подмножества вершин мощности K , расположенных наиболее компактно, то есть к поиску такого подграфа G' мощности K , сумма весов ребер в котором минимальна. Такая задача является NP-полной (к ней может быть сведена задача о клике), эффективных алгоритмов ее точного решения не известно.

Однако, для рассматриваемой задачи допустимо найти приближенное решение, близкое к оптимальному. Для этого можно использовать различные эвристические алгоритмы, в том числе и генетические алгоритмы, хорошо зарекомендовавшие себя в решении различных практических задач, в том числе задач на графах [4].

Для разработки генетического алгоритма необходимо определить способ кодирования возможных решений в виде хромосом. В поставленной задаче решением является искомым подграф G' . Используем тривиальный способ кодирования, и будем считать хромосомой массив длины K , содержащий целые числа в диапазоне от 1 до N — номера вершин, образующих подграф G' . Приспособленность особи P_t вычисляется естественным образом на основе суммы весов всех ребер графа G' :

$$S_t = \sum_{v_i \in P_t, v_j \in P_t} c(v_i, v_j).$$

С учетом нормализации (лучшим решениям должна соответствовать большая приспособленность), окончательно получаем выражение для приспособленности

$$\text{fit}(P_t) = \frac{1}{S_t}.$$

При выбранном способе кодирования стандартные генетические операторы скрещивания неприменимы, поскольку на хромосому накладывается одно очевидное ограничение: все числа в массиве должны быть различны. Построим модифицированный одноточечный оператор скрещивания. Пусть выбраны две родительские особи P_1 и P_2 . Сформируем 3 множества:

$$V_0 = \{v | v \in P_1 \ \& \ v \in P_2\}$$

$$V_1 = \{v | v \in P_1 \ \& \ v \notin P_2\}$$

$$V_2 = \{v | v \notin P_1 \ \& \ v \in P_2\}$$

Очевидно, что $|V_1| = |V_2| = K - |V_0|$. Выберем случайное число $r: 0 \leq r \leq |V_1|$. Потомок Q_1 составим из вершин множества V_0 , r первых вершин из V_1 и $(|V_1|-r)$ последних вершин из V_2 . Потомок Q_2 составим из вершин множества V_0 , $(|V_1|-r)$ последних вершин из V_1 и r первых вершин из V_2 .

Оператор мутации можно использовать стандартный: с определенной вероятностью элемент массива в хромосоме заменяется случайным значением из тех, которые отсутствуют в особи.

Общая схема работы генетического алгоритма показана на рис. 3.



Рис. 3. Схема работы генетического алгоритма

Будем использовать пропорциональный отбор. Условием выхода является достижение приемлемого результата либо достижение определенного поколения. Существенной проблемой построения генетического алгоритма является подбор параметров (количество особей в популяции, процент особей, участвующих в скрещивании, вероятность мутации), обеспечивающих хорошую точность приближенного решения и высокую скорость работы. В общем виде, для произвольной задачи, указать оптимальные параметры генетического алгоритма проблематично.

Эту проблему можно решить с помощью построения дополнительного уровня над стандартным

генетическим алгоритмом (основным уровнем). Дополнительный уровень (который можно назвать уровнем метаэволюции) предназначен для отслеживания текущего состояния популяции и динамики его изменения, а так же корректировки функционирования основного уровня на основе получаемых данных.

Уровень метаэволюции может быть реализован в виде набора продукционных правил, позволяющих на каждом шаге эволюции на основе наблюдаемых параметров принимать решение о необходимости применения того или иного управляющего воздействия. Правила будут нацелены на преодоление локального максимума функции приспособленности и увеличение скорости сходимости генетического алгоритма к оптимальному решению. Наблюдаемыми параметрами состояния текущей популяции будут являться следующие характеристики.

1. Изменение средней приспособленности популяции.

2. Изменение приспособленности лучшей особи.

3. Разнообразие особей в популяции.

Возможными вариантами влияния будут являться следующие воздействия.

1. Изменение вероятности скрещивания.

2. Изменение вероятности мутации.

3. Изменение количества особей в популяции.

4. «Глобальная катастрофа» (удаление всех особей, за исключением нескольких самых приспособленных и повторная генерация популяции).

С учетом дополнительного уровня, схема работы изменяется, как это показано на рис. 4.

В принципе, дополнительный уровень имеет смысл запускать не на каждом шаге работы основного уровня, а лишь с определенным интервалом. В целом дополнительный уровень увеличивает время работы алгоритма не существенно, но может повысить качество получаемого решения, и, кроме того, облегчает процесс разработки генетического алгоритма.

Заключение

В статье рассмотрены способы повышения отказоустойчивости FPGA путем разработки алгоритмов реконфигурации схемы после отказа одного или нескольких элементов и реализации необходимых функций на оставшихся работоспособных элементах. Предложены подходы к поиску наиболее компактного множества работоспособных элементов на основе генетических алгоритмов.



Рис. 4. Схема работы двухуровневого генетического алгоритма

Литература

1. Цыбин, С.А. Архитектура отказоустойчивой ПЛИС емкостью свыше 100 тыс. вентилей [Текст] / С.А. Цыбин, А.В. Быстрицкий, С.Н. Скуратович. // Всероссийская научно-техническая конференция "Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)". Сб. трудов. – 2006. – № 1. – С. 376 – 381.

2. Тюрин, С.Ф. Функционально-полные толерантные булевы функции [Текст] / С.Ф. Тюрин // Наука и технология в России. – 1998 – № 4. – С. 7 – 10.

3. Цыбин, С. Программируемая коммутация ПЛИС: взгляд изнутри. [Электронный ресурс] / С. Цыбин. – Режим доступа: http://www.kit-e.ru/articles/plis/2010_11_56.php. – 12.11.2012 г.

4. Гладков, Л.А. Генетические алгоритмы [Текст] / Л.А. Гладков, В.В.Курейчик, В.М. Курейчик. Под ред. В.М. Курейчика. – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 255 с.

Поступила в редакцію 15.02.2013, рассмотрена на редколлегии 13.03.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. каф. компьютерных систем и сетей В.В. Складар, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

ПІДВИЩЕННЯ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ FPGA ШЛЯХОМ РЕКОНФІГУРАЦІЇ ПРАЦЕЗДАТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

С.Ф. Тюрін, О.Ю. Городілов, І.С. Понуровський

У статті розглядається задача пошуку найбільш компактно розташованої множини працездатних елементів FPGA (field-programmable gate array). Ця задача виникає при реконфігурації схеми після виникнення відмов логічних елементів. Компактність множини визначається сумарною довжиною зв'язків між елементами цієї множини. Оскільки структура доступних з'єднань між логічними елементами може бути складною і нерегулярною, поставлене завдання не має точного ефективного алгоритму рішення. У статті побудована графова модель задачі та запропоновано рішення на основі генетичного алгоритму. Для підбору оптимальних параметрів генетичного алгоритму пропонується побудова додаткового рівня метаеволюції.

Ключові слова: реконфігурація, відмови, яка програмується користувачем вентильна матриця, логічний елемент, генетичний алгоритм.

IMPROVING FAULT TOLERANCE OF FPGA BY RECONFIGURATION OF OPERABLE ELEMENTS

S.F. Tyurin, A. Yu. Gorodilov, I. S. Ponurovskiy

The article considers the problem of search of the set of the most densely located operable elements of FPGA (field-programmable gate array). This problem occurs when the reconfiguration of the scheme after the occurrence of failures of logic elements. Density of the set is determined by the total length of relations between the elements of this set. Because of the structure of available connections between logical elements can be complex and irregular, the task does not have the exact effective solution algorithms. The article describes graph model of the problem and a solution based on a genetic algorithm. For the selection of optimal parameters of genetic algorithm construction of an additional layer of metaevolution is proposed .

Key words: reconfiguration, failures, field-programmable gate array, logical element, genetic algorithm.

Тюрін Сергей Феофентович – Заслуженный изобретатель РФ, доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, Россия, e-mail: tyurinsergfeo@rambler.ru.

Городілов Алексей Юрьевич – старший преподаватель кафедры «Математическое обеспечение вычислительных систем» Пермского государственного национального исследовательского университета, Пермь, Россия, e-mail: gora830@yandex.ru.

Понуровский Иван Сергеевич – аспирант кафедры «Математическое обеспечение вычислительных систем» Пермского государственного национального исследовательского университета, Пермь, Россия, e-mail: iponurovskiy@gmail.com.