

**Бортовые мультиагентные системы обработки данных космических аппаратов  
на базе реконфигурируемых вычислительных полей**

Л.В. Савкин<sup>1</sup>, В.Г. Дмитриев<sup>2</sup>, Е.А. Федоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ПАО «Радиофизика»

<sup>2</sup>ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»

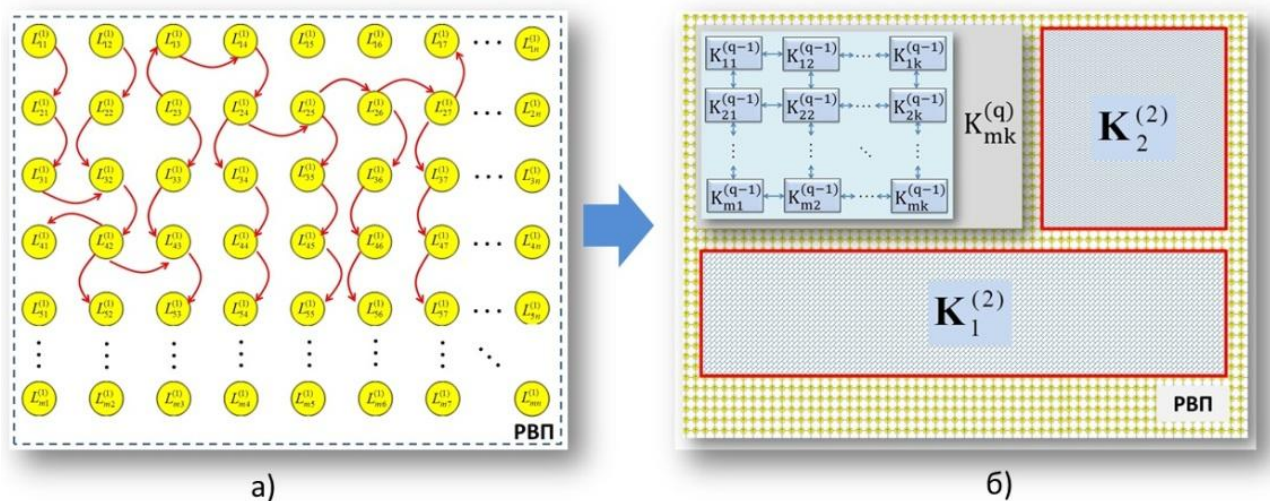
android4.1@mail.ru

Мультиагентные системы обработки данных [1], реализующие, роевые и многие другие алгоритмы обработки информации, обладают таким существенным достоинством перед рядом традиционных систем, как *децентрализация*. Последний термин, в частности, означает отсутствие в системе тех агентов (модулей обработки данных), которые управляли бы всей системой сразу. Данное обстоятельство является весьма существенным хотя бы потому, что позволяет использовать один и тот же набор средств контроля для каждого из агентов, образующих конечную систему обработки данных. При этом большинство известных на сегодняшний день мультиагентных систем обработки данных реализуются чисто программным образом.

Данная работа имеет своей ключевой целью предложить реализовывать широкий класс мультиагентных систем обработки данных космических аппаратов на базе различных концепций реконфигурируемых вычислительных систем (РВС) [2-4]. Каждый из агентов системы обработки данных строится на базе выделенного фрагмента единого реконфигурируемого вычислительного поля (РВП), построенного, в свою очередь, на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) класса FPGA или CPLD. Ввиду высокой гибкости алгоритмов на низком аппаратном уровне, РВС позволяют аппаратным образом реализовывать самые различные типы мультиагентных систем.

Первому условному аппаратному уровню РВП, реализующему мультиагентную систему обработки данных, соответствует уровень коммутируемых логических блоков (КЛБ). Повышение условных аппаратных уровней мультиагентных архитектур можно будет представить в виде орграфа, вершинами которого будут являться элементы системы второго аппаратного уровня, а дугами – связи между этими элементами в РВП.

Рассмотрим принцип формирования мультиагентных архитектур в РВП бортовой системы КА, изображенный на рис. 1.



**Рис. 1.** К пояснению принципа формирования условных аппаратных уровней мультиагентных архитектур в РВП бортовых систем КА

На рис. 2,а) в упрощенной форме показано, что вся вычислительная область РВП представляет собой матричный набор КЛБ, топологию логико-арифметических связей между элементами которого можно менять в пределах строго выделенной области под законченный функциональный элемент. Выделяя определенную группу связанных между собой КЛБ, мы получаем элемент второго аппаратного уровня ( $q = 2$ ). Формирование функциональных элементов третьего аппаратного уровня осуществляется за счет комбинации связей между функциональными элементами второго аппаратного уровня. Таким образом, любое повышение аппаратного уровня мультиагентной архитектуры  $q = n$ , заключается в образовании связей между элементами предыдущего аппаратного уровня  $q = n - 1$ .

На рис. 2,б) представлены примеры трех базовых агентов, два из которых описываются конфигурационными функциями второго аппаратного уровня ( $K_1^{(2)}, K_2^{(2)}$ ) и тем самым представляют собой законченные устройства второго аппаратного уровня, а третья описывается конфигурационной функцией по принципу вложенных матричных наборов.

В данном случае конфигурационную функцию мультиагентной архитектуры, учитывающей топологию связей между функциональными элементами всех условных аппаратных уровней, можно представить в виде следующей системы конфигурационных функций:

$$\mathbf{K}^{DM} = \begin{cases} \mathbf{K}^{(1)} = F(\mathbf{L}^{(1)}), \\ \mathbf{K}^{(2)} = F(\mathbf{L}^{(1)}, G(\mathbf{K}^{(1)})), \\ \vdots \\ \mathbf{K}^{(q-1)} = F(\mathbf{L}^{(1)}, G(\mathbf{K}^{(q-2)})), \\ \mathbf{K}^{(q)} = F(\mathbf{L}^{(1)}, G(\mathbf{K}^{(q-1)})), \end{cases}$$

где  $\mathbf{K}^{(q)}$  - конфигурационная функция  $q$ -го аппаратного уровня мультиагентной архитектуры, образованная оргграфом  $G(\mathbf{K}^{(q-1)})$  и матрицей логико-арифметических функций КЛБ  $\mathbf{L}^{(1)}$ .

Оргграф  $G(\mathbf{K}^{(q-1)})$  определяет топологию связей между функциональными элементами  $K_{ij}^{(q-1)}$  аппаратного уровня  $(q-1)$  мультиагентной архитектуры, который полностью описывается конфигурационной функцией  $\mathbf{K}^{(q-1)}$ .

Для принципа вложенных матричных наборов (архитектур РВП), конфигурационную функцию  $(q-1)$ -го условного аппаратного уровня всегда можно представить в виде матрицы

$$\mathbf{K}^{(q-1)} = \begin{pmatrix} a_{11}K_{11}^{(q-1)} & a_{12}K_{12}^{(q-1)} & \dots & a_{1k}K_{1k}^{(q-1)} \\ a_{21}K_{21}^{(q-1)} & a_{22}K_{22}^{(q-1)} & \dots & a_{2k}K_{2k}^{(q-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1}K_{m1}^{(q-1)} & a_{m2}K_{m2}^{(q-1)} & \dots & a_{mk}K_{mk}^{(q-1)} \end{pmatrix},$$

где элемент  $K_{ij}^{(q-1)}$  – логико-арифметическая функция элемента  $(q-1)$ -го аппаратного уровня мультиагентной архитектуры; коэффициент  $a_{ij}$  – функция включения функционального элемента  $(q-1)$ -го аппаратного уровня, который расположены в строке матрицы аппаратного уровня  $i = \overline{1, m}$  и в столбце матрицы аппаратного уровня  $j = \overline{1, k}$ , причем

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если функциональный элемент } K_{ij}^{(q-1)} \text{ вкл.}, \\ 0, & \text{если функциональный элемент } K_{ij}^{(q-1)} \text{ выкл.} \end{cases} \quad (1)$$

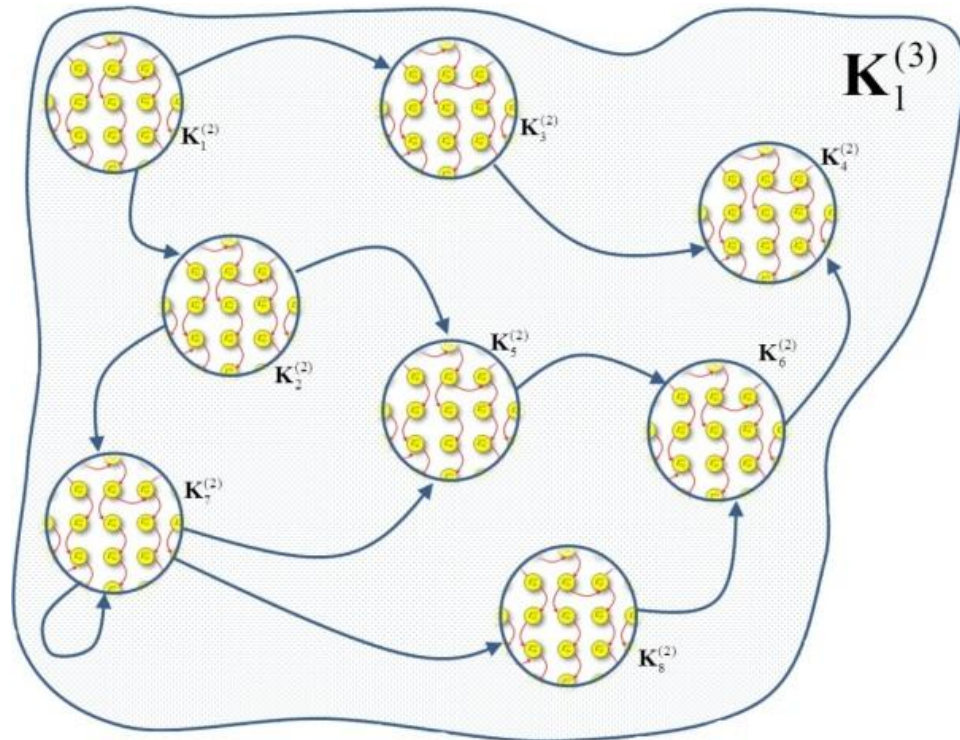
Функциональную двумерную матрицу логико-арифметических функций КЛБ, вне зависимости от числа ПЛИС, на которых будет реализовано РВП, всегда можно записать в следующем виде:

$$\mathbf{L}^{(1)} = \begin{pmatrix} \lambda_{11}L_{11}^{(1)} & \lambda_{12}L_{12}^{(1)} & \dots & \lambda_{1k}L_{1k}^{(1)} \\ \lambda_{21}L_{21}^{(1)} & \lambda_{22}L_{22}^{(1)} & \dots & \lambda_{2k}L_{2k}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{m1}L_{m1}^{(1)} & \lambda_{m2}L_{m2}^{(1)} & \dots & \lambda_{mk}L_{mk}^{(1)} \end{pmatrix},$$

где коэффициент  $\lambda_{ij}$  есть функция включения (задействования) КЛБ в образовании (выделении) элемента второго аппаратного уровня мультиагентной архитектуры, которую по аналогии с (1) можно записать как

$$\lambda_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если КЛБ } L_{ij}^{(1)} \text{ вкл.}, \\ 0, & \text{если КЛБ } L_{ij}^{(1)} \text{ выкл.} \end{cases}$$

Пример мультиагентной архитектуры, описываемой конфигурационной функцией аппаратного уровня  $q = 3$  РВП, представлен в идеализированном виде на рис. 2



*Рис. 2. Мультиагентная архитектура РВП, описываемая конфигурационной функцией аппаратного уровня  $q = 3$*

Преимуществом данного способа построения мультиагентных архитектур перед принципом вложенных матричных наборов является возможность построения функциональных элементов в пределах выделенного участка РВП, границы которого будут не строго локализованы, пока элементу не будет присвоена конкретная логическая или арифметическая операция. Кроме того, использование данного способа значительно упрощает расчеты вычислительных ресурсов функциональных элементов на всех аппаратных уровнях мультиагентной архитектуры РВП.

Функционирование бортовой мультиагентной системы обработки данных описывается конфигурационной функцией вида

$$K^{\text{РВП}}(t_k) = G^1(\mathbf{L}^{(1)}(t_k)) \cup G^2(\mathbf{L}^{(2)}(t_k)) \cup \dots \cup G^n(\mathbf{L}^{(n)}(t_k)) \quad (1)$$

где  $t_k, k = (1, 2, \dots, n)$  - дискретные моменты времени, соответствующие различным конфигурациям РВП;  $G^i(\mathbf{L}^{(i)}(t_k)), i = \overline{1, n}$  - оргграф, описывающий топологию логико-арифметических связей между элементами матричного набора коммутируемых логических блоков (КЛБ)  $\mathbf{L}^{(i)}$ , образующих выделенный  $i$ -й фрагмент РВП. Последний, в свою очередь, представляет собой аппаратную реализацию одного из  $n$  агентов обработки данных, который локализован в КЛБ-матрице РВП с предварительно присвоенным ей порядковым номером  $i$ .

Из выражения (1) также видно, что совокупность всех оргграфов  $G^i, i = \overline{1, n}$  описывает полную аппаратную архитектуру мультиагентной системы обработки данных, которая в процессе корректировки алгоритмов взаимодействия между агентами может кардинальным образом перестраиваться за счет реконфигурации РВП.

Таким образом, практическая реализация мультиагентных систем обработки данных на базе РВС будет полностью определяться теми типами ПЛИС, на основе которых будет реализовано единое РВП.

#### Литература

1. Болотова Л.С. Системы искусственного интеллекта: модели и технологии, основанные на знаниях: учебник / ФГБОУ ВПО РГУИТП; ФГАУ ГНИИ ИТТ «Информатика». – М.: Финансы и статистика, 2012. - 664 с.
2. Бровкин А.Г., Бурдыгов Б.Г., Гордийко С.В. и др. Бортовые системы управления космическими аппаратами / Под ред. проф. А.С. Сырова. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. - 304 с.
3. Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры / Под общ. ред. И.А. Каляева. 2-е изд., перераб., доп. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. - 344 с.
4. Кравец В.Г. Автоматизированные системы управления космическими полетами. М.: Машиностроение, 1995. - 256 с.