

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ГРАФ СИНХРОННЫХ ПОТОКОВ ДАННЫХ

В статье рассмотрена модель пространственного графа синхронных потоков данных, предложенная для задания периодических алгоритмов и их отображения в вычислительные средства. Модель позволяет одновременно выполнять как составление расписания выполнения операций, так и поиск структуры вычислительного устройства, что улучшает процесс оптимизации решения.

A space synchronous dataflow graph computational model is considered, which is useful for periodical algorithm composition and mapping into computers. This model provides to implement simultaneously both operator scheduling and structure deriving, which improves the optimization process.

### Введение

Персональные компьютеры, средства цифровой обработки сигналов (ЦОС) и другие вычислительные системы (ВС) реального времени выполняют периодические алгоритмы, обрабатывающие потоки данных и/или команд. Для реализации ЦОС чаще всего используются заказные СБИС, сигнальные микропроцессоры и программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС).

Сейчас для программирования многопроцессорных параллельных ВС применяется парадигма многопоточковой обработки (multithreading), которая поддерживается как на уровне матобеспечения, так и на аппаратном уровне современных компьютеров. Но многопоточковая модель не гарантирована от блокировок. Поэтому вместо нее в работе [1] предложено использовать модель графа синхронных потоков данных (ГСПД) и его модификации, гарантирующие безопасность реализации алгоритма.

Современные задачи ЦОС не могут быть решены без разработки методов и средств отображения алгоритмов в СБИС и ПЛИС, программирования многопроцессорных ВС. В статье предлагается модель пространственного ГСПД, которая позволяет проектировать эффективные аппаратные устройства для реализации периодических алгоритмов.

### Модели потоков данных

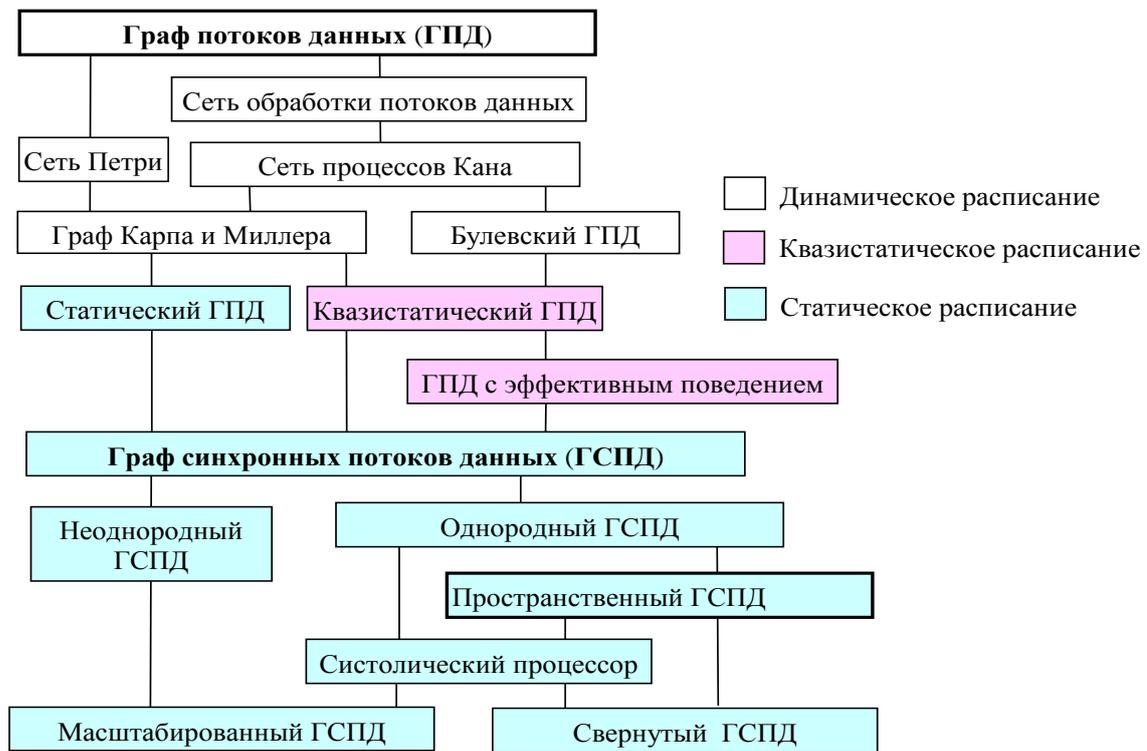
По определению Поста и Тьюринга, алгоритм – это вычислительный процесс, который выполняется моделью вычислителя, сконструированной в рамках точных математических понятий [2]. Модель вычислителя,

которая реализует функциональный алгоритм, принято представлять в виде графа. В такой модели вершины графа означают операторы или локальные процессы алгоритма, а дуги – каналы передачи данных, зависимость по данным и управлению. Реализация алгоритма на такой модели представляет собой передачу данных в направлении дуг и обход вершин в соответствии с их инцидентностью, наличием данных на их входах или по другим правилам.

На рис.1 показан граф классификации наиболее известных графовых вычислительных моделей. Анализ различных графовых моделей с точки зрения детерминизма алгоритма, возможностей и удобства задания алгоритма для обработки потоков данных и отображения его в аппаратные средства приведен в [3,4]. Далее будет рассмотрена модель ГСПД, как модель, наиболее приближенная к заданию аппаратно реализованных алгоритмов.

Вершины – акторы графа потоков данных (ГПД), как и производного от него ГСПД, представляют операции, а дуги – потоки передачи данных. Акторы потребляют со своих входов данные, называемые метками или токенами и выдают метки на свои выходы.

Корректность задания алгоритма на модели вычислителя может быть проверена или аналитически (если это возможно), или путем составления расписания выполнения вычислительного процесса на ней. Расписание также составляется при выполнении алгоритма в конкретной ВС.



**Рис.1. Классификация графов потоков данных**

Если структура ВС отвечает графу модели, то составление расписания состоит в определении порядка выполнения операторов (актеров, процессов). Если структура ВС произвольная, то дополнительно выполняют назначение операторов на процессоры этой ВС.

*Статическое расписание* составляется до выполнения алгоритма в ВС, т.е. во время компиляции, а динамическое расписание можно определить только при исполнении алгоритма в ВС при обработке конкретных данных. Согласно виду расписания, различают *статические* и *динамические модели*. Если поведение и параметры модели можно предвидеть на стадии компиляции (максимальный период вычислений, размер буферов потоков и т.п.), то такую модель называют *моделью с квазистатическим расписанием*. Следует отметить, что при отображении алгоритма в аппаратуру СБИС и ПЛИС допускаются алгоритмы только со статическим расписанием.

Таким образом, ГПД представляе собой естественную модель для задания алгоритмов обработки потоков данных. Она имеет широкие возможности выразительного задания большого множества алгоритмов на высоком уровне абстракции. Платой за это является необходимость динамического составления расписания, и в результате – недетерминированность поведения, которая угро-

жает наличием блокировок [1,3]. Из-за этого они используются, в основном, в ВС с динамическим расписанием и не приспособлены для синтеза аппаратных средств вычислительной техники.

*Поток данных* – это средство передачи упорядоченных данных между компонентами модели. Данные в потоке, упорядоченные по номерам ассоциированных с ними тегов, например, временных меток, называют *сигналом*. Сигналы и соответствующие им потоки считаются *синхронными*, если теги пар сигналов имеют взаимно-однозначное соответствие. Модель считается *синхронной*, если все сигналы в ней – синхронные, иначе – это *асинхронная модель*.

Синхронный сигнал производится *регулярным актором*, т.е. актором, который использует и производит некоторое количество меток, которое стабильно при выполнении алгоритма и может быть определено во время компиляции. В отличие от него, *динамический актер* выдает различное число меток в зависимости от данных в его входных потоках, т.е. генерирует асинхронный сигнал.

Граф Карпа и Миллера, в котором все актеры – регулярные – это *граф синхронных потоков данных* (ГСПД, synchronous data flow, SDF). Если количество меток, использованных каждым входом и сгенерированных каждой вершиной в одном цикле, одинаково и равно константе, то такой граф на-

зывают *однородным* ГСПД (homogeneous SDF). А если оно различно, то это *неоднородный* (многоскоростной) ГСПД (multirate SDF).

Неоднородный ГСПД – это удачная модель для компактного задания периодических алгоритмов. Но его сложнее анализировать в сравнении с однородным ГСПД. Кроме того, его моделирование усложняется из-за возможности блокировок. Поэтому для анализа и синтеза на его основе ВС неоднородный ГСПД часто преобразуют в эквивалентный однородный ГСПД. Модель неоднородного ГСПД получила большое распространение, например, в пакете Matlab-Simulink.

ГСПД – это статическая модель. Для неоднородного ГСПД отсутствие блокировок несложно определяется при решении системы уравнений баланса  $G\mathbf{r} = 0$ , где  $G$  – топологическая матрица графа,  $\mathbf{r}$  – вектор повторений срабатывания акторов. Однородный ГСПД никогда не блокируется при наличии меток начального состояния в буферах, входящих в циклы графа. Таким образом, среди большого разнообразия потоковых моделей алгоритмов, ГСПД является наиболее подходящей моделью для задания алгоритмов, отображаемых в аппаратные средства.

### Применение ГСПД для проектирования аппаратных средств

Однородный ГСПД взаимно однозначно отвечает сигнальному графу алгоритма ЦОС или вычислительной схеме с периодом вычислений один такт. Существуют такие его разновидности, как *масштабированный* ГСПД (scalable SDF), *многомерный* ГСПД, *цикло-статический* ГСПД (cyclo-static dataflow), *параметрический* ГСПД, *блокировый* ГСПД (Blocked Data Flow), предназначенные для задания алгоритмов решения современных задач ЦОС. В [3] дан обзор методов отображения ГСПД в многопроцессорные ВС на основе программной реализации акторов.

Согласно общепринятой методологии, отображение ГСПД в ВС выполняют в три этапа. На первом этапе выбирают множество аппаратных ресурсов вычислителя, ассортимент и количество которых отвечают набору операторов алгоритма и требуемой производительности. На втором – составляется расписание исполнения акторов на выбранных

ресурсах. И на третьем этапе – этапе назначения – акторы распределяются среди ресурсов, данным назначаются элементы памяти, определяется структура ВС, планируются пересылки данных, синтезируется управляющий автомат. Оптимизация ВС состоит в формировании множества альтернативных решений и выборе наиболее предпочтительной ВС по заданному критерию качества.

Этапы отображения преследуют противоречивые цели – выбор ресурсов минимизирует аппаратные затраты, а составление расписания – минимизирует время вычислений за счет увеличения аппаратных ресурсов. Поэтому такое отображение ГСПД часто приводит к решениям, далеким от оптимальных. Окончательная оценка аппаратных затрат выполняется на последнем этапе, когда уже готово расписание. И для оптимизации необходимо многократно повторять этапы отображения.

Составление расписания сводится к построению на основе ГСПД графа зависимости по данным (ГЗД) и отображению его топологической сортировки в пространство событий. При этом точное решение этой задачи (целочисленное линейное программирование, метод ветвей и границ) возможно только для числа вершин не более двух-трех десятков. Такой эффективный эвристический метод, как силовое планирование, также не учитывает факторы, возникающие на этапе размещения.

Таким образом, модель ГСПД, обладая выразительностью, отсутствием блокировок, имеет некоторые трудности отображения в аппаратные ресурсы. Во многом, это связано с тем, что в ВС отображается не сам ГСПД, а соответствующий ему ГЗД (составление расписания) и множество его вершин (назначение на ресурсы), а межпроцессорные связи ВС, внутренняя структура процессорных элементов (ПЭ), управляющий автомат формируются искусственно на последнем этапе.

В статье предлагается вершинам и дугам ГСПД назначить теги с многомерными векторами, благодаря которым ГСПД отображается непосредственно и одновременно как в структуру ВС, так и ее расписание.

Важно отметить, что известный граф систолического процессора, по существу, является однородным ГСПД. Причем его вершины

и дуги уже имеют теги из многомерных векторов. Однако, в отличие от отображения ГСПД, систолические процессоры синтезируются путем отображения ГЗД [5].

### Пространственный ГСПД

Любой граф алгоритма  $G_A$ , в том числе ГСПД и соответствующий ему ГЗД, задается матрицей инцидентности

$$A = \|a_{i,j}\|_{N \times M},$$

где  $a_{i,j} = 1$ , если дуга  $j$  графа  $G_A$  концом инцидентна  $i$ -й вершине или  $a_{i,j} = -1$ , если началом инцидентна  $i$ -й вершине оператора, и  $a_{i,j} = 0$  – при отсутствии инцидентности,  $N$  и  $M$  – число вершин и дуг графа  $G_A$ .

Данная матрица инцидентности – нетрадиционная – она имеет инверсные знаки  $a_{i,j}$ . Это связано с тем, что здесь разность координат дуг, умноженных на  $a_{i,j}$ , указывает на положительные задержки операндов.

В общем случае, ГСПД представим в  $n$ -мерном пространстве  $Z^n$ . Векторы  $K_i \in Z^n$  отождествляются с вершинами графа  $G_A$ , т.е. играют роль тегов. Координаты векторов  $K_i$ , могут иметь разную интерпретацию. Часть координат векторов  $K_i$  – это координаты  $K_{S_i}$  ПЭ, в котором выполняется  $i$ -й оператор, а другая часть  $K_{T_i}$  – кодирует момент времени выполнения оператора  $K_i = (K_{S_i}^T, K_{T_i}^T)^T$ . При отображении алгоритма в виде гнезда циклов вектор  $K_i$  является набором индексов переменных.

По другим координатам  $K_i$  может вестись отсчет, например, уровней иерархии алгоритма и структуры, типа оператора и ПЭ, задержки выполнения оператора, кодироваться информация об особенностях операторов и ПЭ, таких, как необходимость конвейерной реализации, заданный момент выполнения и т.п. Для простоты изложения далее будет рассматриваться размерность пространства  $n = 3$ . При изображении ГСПД алгоритма в 3-мерном целочисленном пространстве  $Z^3$   $i$ -й оператор отождествляется с радиусом-вектором  $K_i = (s, p, t)^T$ , ( $i = 1 \dots N$ ), где  $p$  – тип операции,  $s$  – пространственная координата,  $t$  – временная координата. Более подробно о семантике координат векторов будет изложено при рассмотрении отображения ГСПД.

Обычно вершины ГСПД генерируют метки, отвечающие одиночным переменным  $x_j$ . В

других случаях, когда вершина выдает различные переменные в разные дуги, следует расщепить оператор вершины на несколько операторов, которые генерируют одиночные результаты  $x_j$ .

Аналогично, каждая переменная  $x_j$  из  $M$  переменных алгоритма отождествляется с  $n$ -мерным вектором  $D_j$ ; ( $j = 1 \dots M$ )  $\in Z^3$ , причем

$$D_j = K_l - K_i, \quad (1)$$

где  $K_i$  соответствует оператору с результатом  $x_j$ , а  $K_l$  – оператор, у которого  $x_j$  – исходный операнд, т.е.  $K_i$  непосредственно предшествует  $K_l$ .

Множество векторов  $K = \{K_i\}$  и  $D = \{D_j\}$  взаимосвязаны точно так же, как множества вершин и дуг алгоритма. Таким образом, представление алгоритма в виде пространственного ГСПД означает его кодирование в виде матриц векторов  $K_i, D_j$ , а также матрицы инцидентности алгоритма. Для того, чтобы задать ГСПД с помощью этих множеств векторов, необходимы следующие определения:

*Конфигурацией алгоритма* (КА) является тройка  $C_A = (K, D, A)$ , где  $K = (K_1, \dots, K_N)$  – матрица координат векторов-вершин  $K_i = (s_i, p_i, t_i)^T \in Z^3$ ;  $D = (D_1, \dots, D_{M+1})$  – матрица координат векторов-дуг  $D_j = (s_j, p_j, t_j)^T \in Z^3$ ;  $A = \|a_{i,j}\|_{N \times (M+1)}$  – матрица инцидентности графа  $G_A$ , которая дополнена  $M+1$ -м столбцом с элементом  $a_{p, M+1} = 1$ , которому отвечает базисный вектор  $D_{M+1} = D_B$ , соединяющий начало системы координат пространства  $Z^3$  с некоторым произвольным вектором-вершиной  $D_B = K_p \in K$  [6].

Название „конфигурация” происходит от понятия комбинаторной конфигурации, т.е. одного из элементов множества, составленного из групп элементов другого множества. Так же, как и комбинаторная конфигурация, КА представляет собой элемент множества возможных представлений алгоритма в многомерном пространстве, т.е. элементом множества решений задачи отображения алгоритма.

Векторы  $K_i$  КА занимают в пространстве ресурсы – время (с координатами  $s, t$ ) площадь некоторой фигуры, покрываемой прямоугольником со сторонами  $S_m$  и  $T_m$ . При максимальной загруженности ПЭ структуры, площадь прямоугольника  $Q = S_m T_m$  принимает минимальное значение. При различных

вариантах отображения можно получить разное время выполнения алгоритма  $T_m$  и количество ПЭ  $S_m$ . Причем, при условии максимальной загрузки ПЭ площадь прямоугольника  $Q$  остается приблизительно постоянной, т.е. получается масштабируемая структура ВС.

**Применение пространственного ГСПД для синтеза конвейерных ВС**

Конвейерная ВС – это многоступенчатый аппаратный вычислитель, который обрабатывает потоки данных. Пространственный ГСПД дает возможность формального построения конвейерных вычислителей на основе метода его отображения, описанного ниже.

Если ГСПД представлен в пространстве  $Z^n$ , то в соответствии с условием инъективности отображения алгоритма, граф структуры ВС и моменты выполнения операторов должны быть представлены в подпространствах  $Z_S$  и  $Z_T$ , прямая сумма которых равна исходному пространству  $Z^n = Z_S \oplus Z_T$ . Для того, чтобы упростить процесс выделения этих подпространств, целесообразно выбирать их с ортонормированными базисами, которые совпадают с осями ординат, т.е.  $Z_S = Z^m$  и  $Z_T = Z^{n-m}$ .

Конфигурацией структуры (КС) является тройка  $C_S = (K_S, D_S, A)$ , где  $K_S = (K_{S1}, \dots, K_{SN})$ , и  $D_S = (D_{S1}, \dots, D_{S(M+1)})$  – матрицы координат векторов-вершин  $K_{Si} = (k_{Si,1}, \dots, k_{Si,m})^T \in Z^m$  и векторов-дуг  $D_{Sj} = (d_{Sj,1}, \dots, d_{Sj,m}) \in Z^m$ , которые равняются координатам ПЭ, в которых выполняется  $i$ -й оператор и относительным координатам линий связи структуры, по которой передается  $j$ -я переменная, соответственно;  $A$  – матрица инцидентности ГСПД.

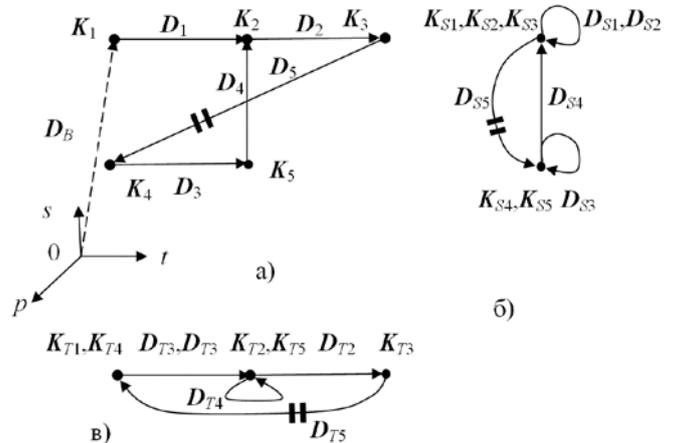
В простом случае,  $K_{Si} = (s_i, p_i)^T \in Z^2$ .

Конфигурацией предшествования (КП) является тройка  $C_T = (K_T, D_T, A)$ , где  $K_T = (K_{T1}, \dots, K_{TN})$ , и  $D_T = (D_{T1}, \dots, D_{T(M+1)})$  – матрицы векторов  $K_{Ti} = (k_{Ti,1}, \dots, k_{Ti,(n-m)})^T \in Z^{n-m}$ ,  $D_{Tj} = (d_{Tj,1}, \dots, d_{Tj,(n-m)})^T \in Z^{n-m}$ , которые отвечают моментам срабатывания  $i$ -го оператора и относительной задержке передачи  $j$ -й переменной,  $A$  – матрица инцидентности ГСПД или ГЗД.

В простейшем случае,  $K_{Ti} = (t_i) \in Z$ . Тогда матрице  $K_T$  отвечает вектор временной раз-

вертки  $T = (t_1, \dots, t_N)^T$ , который указывает, в какие моменты времени срабатывают определенные операторные вершины.

На рис.2 показаны пример КА (а) и соответствующих ей КС (б) и КП (в).



**Рис.2. Пример КА и соответствующих ей КС и КП**

КА является *корректной*, если в матрице  $K$  нет двух одинаковых векторов, т.е.

$$\forall K_i, K_j (K_i \neq K_j, i \neq j). \tag{2}$$

Если в ГСПД есть циклы, то должна быть равна нулю сумма векторов-дуг  $D_j$ , входящих в любой из циклов графа, т.е. для  $i$ -го цикла

$$\sum b_{i,j} D_j = 0, \tag{3}$$

где  $b_{i,j}$  – элемент  $i$ -й строки цикломатической матрицы ГСПД.

КП  $C_T$  для ГСПД – (*строго*) *корректна* относительно временной функции  $R$ , если

$$K_{Tr} - K_{Ti} = D_{Tj} \in D_T \Rightarrow \begin{cases} R(K_{Tr}) \geq R(K_{Ti}); & \text{– для ненагруженных дуг} \\ R(K_{Tr}) < R(K_{Ti}). & \text{– для дуг, нагруженных задержками} \end{cases} \tag{4}$$

$i, r = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M+1;$

(для строгой корректности – неравенство строгое), т.е. если вершины связаны дугой, то момент срабатывания оператора предшествующей вершины всегда меньше момента срабатывания следующей. На рис.2 дуга  $D_5$  нагружена двумя задержками, что означает что в ней операнд задерживается на 2 итерации.

*Расписание* для КА  $C_A$ , выполняемое с периодом  $L$  тактов – *корректно*, если операторы, отображаемые в один и тот же ПЭ, выполняются в различных тактах, т.е.

$$\forall \mathbf{K}_i, \mathbf{K}_j \in K^U(k_{i,r} = k_{j,r}; r=1, \dots, n-1) \Rightarrow$$

$$k_{i,n} \equiv k_{j,n} \pmod L - (\mathbf{K}_i, \mathbf{K}_j) - \text{ дуга, нагуженная задержками}$$

$$k_{i,n} \not\equiv k_{j,n} \pmod L - \text{ в остальных случаях}$$

КА линейным отображением своих компонентов может быть преобразованная в КС и КП, так что:

$$K = \begin{pmatrix} K_S \\ K_T \end{pmatrix}; D = \begin{pmatrix} D_S \\ D_T \end{pmatrix}, \quad (6)$$

если КА, КП и расписание являются корректными, т.е. удовлетворяют условиям (2) – (5), причем полученная модель ВС будет выполнять заданный алгоритм в конвейерном режиме с периодом  $L$  тактов.

Однотипные операторы следует отображать в ПЭ того же типа, т.е.

$$\mathbf{K}_i, \mathbf{K}_j \in K_{p,q}(k_i = k_j = p, s_i = s_j = q), |K_{p,q}| \leq L,$$

где  $K_{p,q}$  – множество векторов-вершин операторов  $p$ -го типа, отображаемых в  $q$ -й ПЭ  $p$ -го типа ( $q=1, 2, \dots, q_{\max}^p$ ).

Эффективную КА ищут в два этапа. На первом этапе вершины ГСПД вместе с дугами размещаются в трехмерном пространстве как множества векторов  $\mathbf{K}_i$  и  $\mathbf{D}_j$  с учетом условий, приведенных выше, т.е. формируется начальная КА. Минимизируется число ПЭ в искомой структуре путем выполнения требования  $|K_{p,q}| \rightarrow L$ , т.е. число вершин, отображаемых в один ПЭ, стремится к  $L$ . Также возможна перестановка вершин относительно оси времени  $ot$ , которая отвечает ресинхронизации ГСПД.

На втором этапе КА уравнивается. При этом рассматривается ациклический подграф ГСПД без обратных дуг  $\mathbf{D}_{vj}$ . Во все его дуги включаются промежуточные вершины операторов задержки (регистров). В уравненной КА все векторы-дуги, кроме нагруженных дуг, равны  $\mathbf{D}_j = \langle a_j, b_j, 1 \rangle$  или  $\mathbf{D}_j = \langle a_j, b_j, 0 \rangle$ . При этом вершины-операторы образуют ярусы, расстояние между которыми по координате времени  $ot$  равно 1 такт. Уравненная КА оптимизируется путем взаимных перестановок векторов-вершин, принадлежащих одному ярусу с минимизацией числа регистров и входов мультиплексоров. Применяются и другие стратегии, например, алгоритм левого края.

Структуру ВС и расписание выполнения алгоритма можно получить, расщепив КА  $K_G$  на КС  $K_S$  и КП, которые имеют ту же матрицу  $A$ , а векторы матрицы  $K_S$  координат ПЭ и матрицы моментов срабатывания  $K_T$  равны координатам векторов матрицы  $K$ , т.е.  $\langle k_i, s_i \rangle$  и  $\langle t_i \rangle$ , т.е. согласно (6). КС и КП представляют собой отображение КА в подпространства структур и времени, которое выполняется элементарным образом.

Данный метод позволяет целенаправленно выполнять поиск как структуры ВС, так и расписания выполнения алгоритма в ней. В [7] метод усовершенствован с целью минимизации аппаратных затрат ПЛИС, в которой реализуется конвейерная ВС. При этом благодаря тому, что результатом отображения выступает описание ВС на языке VHDL, метод дает возможность не строить собственно структуру ВС и расписание выполнения алгоритма, а переложить это задание на компилятор-синтезатор проекта для ПЛИС.

Генетический метод оптимизации систем характеризуется высокой эффективностью и независимостью от предметной области. Однако его использование ограничено выбором кодирования генома варианта решения. Так как в КА в компактной форме закодирован некоторый корректный вариант реализации ВС, она может эффективно использоваться как геном при синтезе структур генетическим методом.

Пространственный динамический ГПД с эффективным поведением отображается в конвейерную ВС методом, предложенным в [8]. Этот метод позволяет формально отображать алгоритмы с операторами управления в структуру конвейерных ВС с заданным периодом вычислений, которые имеют минимизированные аппаратные затраты и высокую тактовую частоту. Методы проверены при синтезе ряда конвейерных устройств ЦОС, таких как цифровые фильтры, процессоры быстрого преобразования Фурье, дискретного косинусного преобразования и многих других, которые имеют оптимизированное отношение производительность – аппаратные затраты.

Методы также эффективно использовались для программирования многопроцессорных ВС [9], а также такой SIMD-архитектуры, как Intel MMX [10].

### Выводы

Граф потоков данных (ГПД) – это естественная модель для задания алгоритмов обработки таких потоков. Динамические ГПД имеют широкие возможности для задания алгоритмов, но их анализ усложнен и они могут иметь блокировки. Из-за этого они используются, в основном, в системах с динамическим расписанием и не приспособлены для синтеза конвейерных вычислительных систем.

Конвейерные ВС следует проектировать путем отображения графов синхронных потоков данных (ГСПД) или ГПД с эффективным поведением и квазистатических ГПД, которые имеют ряд свойств, таких же, как у ГСПД.

Меньшая выразительность и большая трудоемкость представления алгоритма на модели однородного ГСПД компенсируется тем, что при представлении такого ГСПД в многомерном пространстве в виде пространственного ГСПД его отображение в конвейерную структуру выполняется формально с получением минимизированных аппаратных затрат при заданной производительности.

Пространственный ГСПД позволяет применять различные известные методы комбинаторной оптимизации ВС, начиная с метода ветвей и границ и кончая генетическими алгоритмами. При этом оптимизация становится направленной как на минимизацию аппаратных затрат, так и на повышение отношения производительность – стоимость.

### Список литературы

1. Lee E. A. The Problem with Threads // IEEE Computer. –2006. —V39. –№5. –P.33-42.
2. Котов В.Е. Введение в теорию схем программ. –Новосибирск: Наука. —1978. –258 с.
3. Bhattacharyya S.S., Leupers R. Marwedel P. Software Synthesis and Code Generation for Signal Processing Systems // IEEE Trans. on Circuits and Systems, Part II, Analog and Digital Signal Processing. –2000. –V.47. –№ 9. –p. 849–875.
4. Сергиенко А.М., Симоненко В.П. Алгоритмические модели обработки потоков данных // Электрон. моделирование.–2008. – Т.30, № 6.–С. 49–60.
5. Каневский Ю.С. Системные процессоры. –Киев:Техніка. —1991. —172 с.
6. Каневский Ю.С., Овраменко С.Г., Сергиенко А.М. Отображение регулярных алгоритмов в структуры специализированных процессоров //Электрон. моделирование.–2002.–Т.24.–№2.–С. 46–59.
7. Симоненко В.П., Сергиенко А.М. Отображение периодических алгоритмов в программируемые логические интегральные схемы //Электрон. моделирование. – 2007. – Т.29. №2. –С.49–61.
8. Сергиенко А.М. Синтез структур для выполнения периодических алгоритмов с операторами управления // Вісн. Націон. Техн. Університету України „КПІ”. Сер. Інформатика, управління і обчислювальна техніка. —2008. №47. —С.62 —68.
9. Сергиенко А.М. Отображение алгоритма QR-разложения Гивенса в многопроцессорную систему // Электрон. моделирование. – 2004. – Т.26. –№5. – С.43–53.
10. Sergiyenko A., Kaniewski J., Arefjev A., Kortshev D. A Method for Mapping DSP Algorithms into Pentium MMX™ Architecture. //Proc 3-d Int. Conf. On Parallel Processing and Applied Mathematics, PPAAM'99. –Kazimierz Dolny, Poland. –Sept. 14-17. –1999. –p.348–356.

Поступила в редакцию 14.12.2009