

УДК 004.272.2

DOI: 10.17223/19988605/52/14

О.В. Климова

ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ДВУМЕРНЫХ ДАННЫХ

Рассматривается путь построения параллельных алгоритмов для обработки двумерных данных (двумерных свертки и корреляции, двумерного дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и других структурно подобных им операций). Предлагаемый путь характеризуется использованием декомпозиционного подхода и формированием композиционных форм, предназначенных для описания параллельных вычислений. Представляются новые возможности, открывающиеся при использовании этих форм для реализации вычислений двумерных операций и позволяющие повысить эффективность параллельной обработки.

Ключевые слова: декомпозиционный подход; параллельные алгоритмы; композиционные формы; модельное описание.

Использование параллельного принципа обработки информации позволяет значительно повысить производительность вычислений и открывает путь для решения задач больших размеров. Базой для внедрения параллельного принципа обработки данных стали архитектурные решения, формирующие пространственно-временные вычислительные среды, позволяющие выполнять вычислительные действия параллельно, но требующие внесения изменений в отношения между алгоритмом и архитектурами. Действительно, при последовательной обработке алгоритм и архитектура – это всего лишь отдельные компоненты вычислительной системы, а при использовании параллельной обработки они должны быть взаимосвязанными частями параметризованной пространственно-временной среды. Только совместное изучение алгоритмов и архитектур позволит сделать выбор варианта организации вычислений обоснованным, а параллельную обработку эффективной.

Решение проблемы обоснованного выбора, впервые сформулированной в работе [1], может дать ключ к разработке эффективных реализаций параллельных вычислений. Однако упомянутая проблема в большинстве своем и по сей день ожидает требуемых формальных решений, сложность поиска которых подчеркивалась во многих исследованиях [2–5]. Поэтому для современных параллельных вычислений проблема повышения их эффективности является актуальной. Путь же решения этой проблемы характеризуется введением в процесс выбора варианта организации вычислений этапа совместных исследований алгоритмов и архитектур [6–8], для реализации которого необходимы формальные инструменты, позволяющие связать воедино алгоритмические и архитектурные параметры. Для разработки таких инструментов нужно изучать внутреннюю пространственно-временную структуру вычислительных алгоритмов. Создаваемые при этом новые формы описания организации вычислений должны быть архитектурно независимыми, тогда на их основе можно анализировать различные сценарии отношений между алгоритмом и архитектурой. Эти сценарии можно представить следующим образом: алгоритм задан – требуется установить наилучшую архитектуру для его реализации; архитектура задана – требуется определить для нее наилучший вариант организации вычислений (алгоритм); наилучший вариант отношений между значениями алгоритмических и архитектурных параметров устанавливается в процессе их взаимонастройки, который характеризуется изменениями значений как одних, так и других параметров. Последний сценарий отличается наибольшей гибкостью выбора вариантов организации вычислений, поэтому его реализация позволит достичь наибольшего эффекта от использования параллельного принципа обработки.

На сегодняшний день можно выделить два пути, по которым идет разработка формальных инструментов, позволяющих выявить внутренний параллелизм последовательных алгоритмов и пред-

ставить их в виде, обеспечивающем проведение совместных исследований алгоритмов и архитектур. Эти пути отличаются формами представления алгоритмов (графовыми и аналитическими), изначально положенными в основу процессов указанной разработки. Результаты [8], связанные с использованием исходных графовых форм (графов потоков данных), характеризуются их анализом, в процессе которого с помощью аппарата линейной алгебры выявляется внутренний параллелизм алгоритмов и образуются эквивалентные им модели параллельных вычислений, позволяющие выполнять совместные исследования алгоритмов и архитектур. Представленная в работе [8] методика такого анализа характеризуется достаточно высокой сложностью реализации. В данной работе будет рассмотрен результат разработки формальных инструментов, полученный на пути, связанном с изучением аналитических выражений, представляющих алгоритмы, с целью поиска эквивалентных им композиционных форм. По-видимому, получить требуемые формальные описания организации параллельных вычислений можно лишь для алгоритмов определенного класса, изучив их внутреннюю пространственно-временную структуру. В работе [6] представлен общий путь формирования таких решений для операций цифровой обработки сигналов (ЦОС), основанный на предложенном декомпозиционном подходе. В данной статье показывается, как изучение с помощью этого подхода внутренней структуры вычислительных операций обработки двумерных данных (двумерных свертки и корреляции, двумерного дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и других структурно подобных им операций) привело к построению их композиционных форм и открыло новые возможности для обработки данных больших размеров и размерностей.

1. Параллельная обработка и теоретико-групповой декомпозиционный подход

Представим общие характеристики подхода, позволившего изменить отношения между алгоритмом и архитектурами и получить композиционные формы различных операций, характеризующиеся параметризованными пространственно-временными структурами. В работе [5] отмечается важность поиска путей создания таких форм для разработки эффективных способов реализации параллельных вычислений. Интерес к построению композиционных форм связан с тем, что на их основе формируются описания организации вычислений, не только эквивалентные исходным аналитическим описаниям последовательных алгоритмов, но и изначально ориентированные на представление параллельных вычислений и установление отношений между алгоритмическими и архитектурными параметрами. Таким образом, необходимость изменения отношений между алгоритмом и архитектурами привела к необходимости изменения форм для описания организации вычислений на композиционные формы, позволяющие исследовать различные варианты организации параллельных вычислений. На основе предложенного декомпозиционного подхода [9], нацеленного на изучение внутренней структуры операций и данных, были получены параметризованные композиционные формы для представления операций цифровой обработки сигналов (ЦОС). Эти формы позволяют описывать разнообразие вариантов организации параллельных вычислений, синтезировать их различные пространственно-временные структуры и гибко управлять их изменениями. Общность предложенного подхода к построению композиционных форм для различных операций, а также его характер позволили расширить применение подхода на область обработки многомерных данных. В статье будет в общем виде представлена схема его использования при построении композиционных форм для операций обработки двумерных данных. Указанная схема характеризуется следующими действиями:

- изучением с помощью подхода внутренней структуры двумерных данных;
- образованием композиционных форм данных (КФД);
- изучением с помощью подхода внутренней структуры двумерных операций;
- образованием композиционных форм операций (КФО).

На основе этих действий можно также выполнить расширение подхода на область обработки многомерных данных с целью построения соответствующих им композиционных форм.

Прежде чем перейти к представлению результатов использования подхода при изучении внутренней структуры двумерных данных и операций, приведем описание его характера. Это позволит выделить существенные особенности подхода, обеспечивающие возможность перехода к композиционным формам для различных операций и различных размерностей.

Итак, предложенный подход к формированию композиционных форм носит, как и было указано выше, декомпозиционный характер, проявляющийся в способности выделения инвариантных компонентов рассматриваемой операции и установления правил их композиции в исходную операцию. Такие способности были установлены на основе использования аппарата теории групп, поэтому подход был назван теоретико-групповым. Основой подхода является декомпозиция данных, приводящая к построению их композиционных форм, обеспечивающих построение композиционных форм для различных операций. Важной чертой предложенного теоретико-группового декомпозиционного подхода является его эволюционный характер, с одной стороны, обеспечивающий преемственность форм (алгоритм и параметризованная композиционная форма) описания организации вычислений для последовательного и параллельного способов обработки данных, а с другой – способствующий его развитию путем расширения на большие размерности операций, а также на иные классы операций.

Теперь, выявив эволюционный и теоретико-групповой характер предложенного декомпозиционного подхода, приведем результат его применения для установления и изучения внутренних структур одномерных операций вышеозначенного класса. Исходные структуры этих операций, действующих на входные данные длины N , можно представить с помощью операции умножения матрицы размера $N \times N$ на вектор $x(t)$. Использование подхода позволило на основе выполненных эквивалентных преобразований соответствующих аналитических выражений перейти от матрицы, действующей во временной области на вектор $x(t)$, к параметризованной пространственно-временной структуре, порождающей координационно-вычислительную среду. Эта двумерная среда состоит из L^2 матриц размера $h_1 \times h_1$ и характеризуется соответствующей исследуемому классу операций координацией результатов вычислений, полученных при умножении этих матриц на векторы $x_j(t_1)$ длины h_1 , образованные в результате теоретико-групповой декомпозиции входных данных $x(t)$, где

$$N = h_1 L, \quad t = j + t_1 L, \quad t = 0, \dots, N-1 \quad \text{и} \quad j = 0, \dots, L-1, \quad t_1 = 0, \dots, h_1-1.$$

Установленная с помощью использования предложенного подхода внутренняя структура рассматриваемого класса одномерных операций представлена на рис. 1.

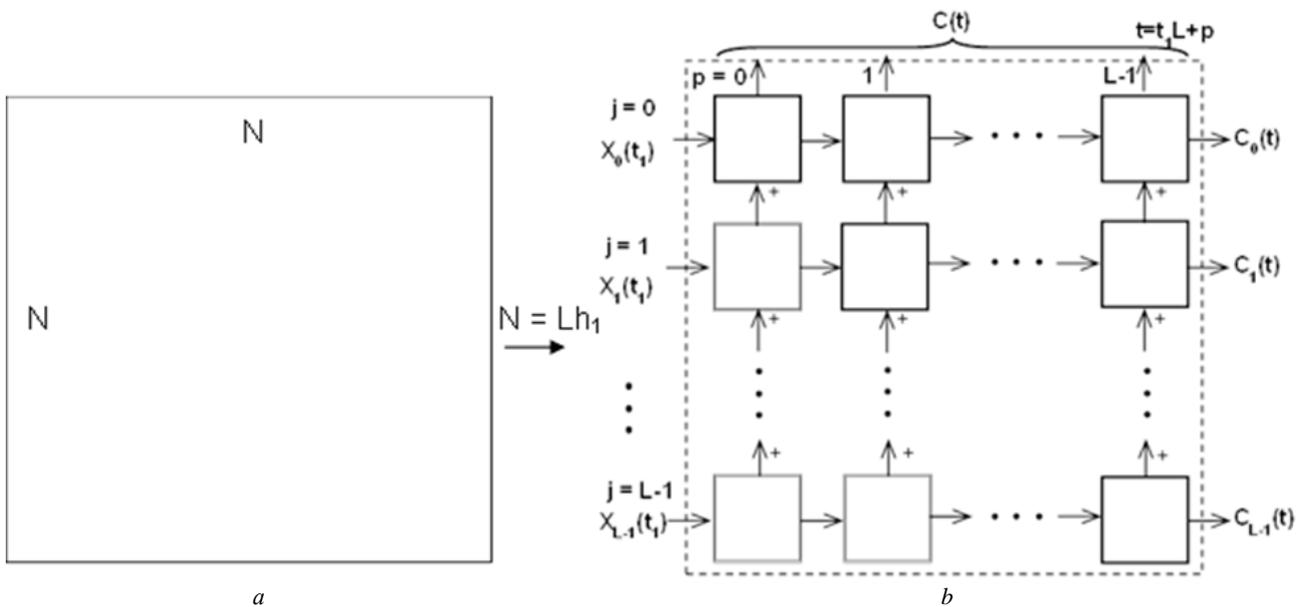


Рис. 1. Иллюстрация двух структур для вычислительных операций – временной (a) и пространственно-временной (b)
 Fig. 1. Illustration of two structures for computational operations – time (a) and space-time (b)

Полученная структура может быть охарактеризована как параметризованная однородная вычислительная среда, представляемая с помощью двумерной решетки. В ее L^2 узлах расположены вычислительные блоки, реализующие исследуемую операцию, сжатую до размера h_1 и представляемую с помощью полученной параметризованной среды, описываемой параметрами j, p . С помощью

этих параметров можно работать с установленной внутренней структурой операций как с целью выявления наиболее эффективных вариантов организации их параллельных вычислений, так и с целью выполнения более тонкого и гибкого анализа формируемых результатов вычислений.

Представив в общем виде предложенный декомпозиционный подход и результат его использования при изучении внутренних структур операций – параметризованную пространственно-временную структуру, предназначенную для описания параллельной обработки одномерных данных, расширим применение подхода на область обработки двумерных данных с целью ее перевода в параметризованную координационно-вычислительную среду.

2. Декомпозиционный подход к обработке двумерных данных

Для получения композиционных форм операций вышеуказанного класса, предназначенных для обработки двумерных данных и характеризующихся единой матричной структурой вычислений, необходимо в рамках представленного подхода выполнить ряд следующих действий:

- формирование композиционных форм (КФ) двумерных данных;
- использование этих форм в исходных аналитических выражениях, описывающих рассматриваемые операции, и образование их исходных КФ;
- выполнение необходимых эквивалентных преобразований над этими формами;
- формирование и анализ композиционных форм для представления изучаемых операций.

Эти действия были выполнены с помощью предложенного декомпозиционного подхода и привели к формированию параметризованного описания пространственно-временных структур изучаемых операций. Так как нас интересуют структурные изменения, произошедшие при этом и являющиеся общими для операций этого класса, то для их иллюстрации можно без потери общности использовать аналитические выражения для любой операции из рассматриваемого класса. Приведем описание выполненных структурных преобразований для операции двумерной циклической свертки, определенной на некоторой абелевой группе $H = Z_{N_1} \times Z_{N_2}$:

$$C_{N_1 N_2}(t) = C_{N_1 N_2}(t_1, t_2) = \sum_{q_2=0}^{N_2-1} \sum_{q_1=0}^{N_1-1} x(t_1 -_{N_1} q_1, t_2 -_{N_2} q_2) \cdot y(q_1, q_2),$$

где индексы $-_{N_1}$ и $-_{N_2}$ обозначают операции вычитания на группах Z_{N_1} и Z_{N_2} порядков N_1 и N_2 соответственно, $t_1, q_1 = 0, \dots, N_1 - 1, t_2, q_2 = 0, \dots, N_2 - 1$. Используем для этого композиционную форму двумерных данных, представленную в работе [6] и полученную в результате теоретико-групповой декомпозиции функции $x(t) = x(t_1, t_2)$ на группе $H = Z_{N_1} \times Z_{N_2}$:

$$x(t) = \sum_{j_1=0}^{L_1-1} \sum_{j_2=0}^{L_2-1} x_{j_1 j_2}^*(t - j_1 N_2 -_{N_2} j_2) = \sum_{j_1=0}^{L_1-1} \sum_{j_2=0}^{L_2-1} x_{j_1 j_2}^*((t_2 -_{N_2} j_2) + (t_1 - j_1) N_2).$$

В процессе декомпозиции выполняется разложение порядков $N_1 = h_{11} L_1, N_2 = h_{21} L_2$, числа t_1 и t_2 представляются в виде: $t_1 = j_1 + t_{11} \cdot L_1, t_2 = j_2 +_{N_2} t_{21} \cdot L_2$, где

$$t_{11} = 0, \dots, h_{11} - 1, j_1 = 0, \dots, L_1 - 1, t_{21} = 0, \dots, h_{21} - 1, j_2 = 0, \dots, L_2 - 1,$$

число t задается с помощью выражения $t = j_2 +_{N_2} t_{21} L_2 + j_1 N_2 + t_{11} L_1 N_2$ и вводятся специальные функции $x_{j_1 j_2}^*(t)$, описанные в работе [6] и характеризующиеся свойствами композиции и эквивалентности сдвигов на группах разной структуры, но одного порядка. Формирование представленной композиционной формы данных соответствует реализации первого из перечисленных выше действий. Выполнение этих действий в полном объеме позволило получить композиционные формы для указанного класса вычислительных операций. Описать произведенные при этом структурные преобразования можно, представив полученное выражение для композиционной формы циклической свертки

$$C_{N_1 N_2}(t) = C_{P_1 +_{N_2} P_2}(t_{11}, t_{21}) = \sum_{j_1=0}^{L_1-1} \sum_{j_2=0}^{L_2-1} \sum_{q \in H} x_{j_1 N_2, j_2}^*((t_{21} -_{h_{21}} q_{21}) L_2 +$$

$$+(t_{11} - h_{11} \cdot q_{11}) \cdot L_1 \cdot N_2) y_{-j_1 - N_2, j_2, p_1 + N_2, p_2} (q_{21} \cdot L_2 + q_{11} \cdot L_1 \cdot N_2) = \sum_{j_1=0}^{L_1-1} \sum_{j_2=0}^{L_2-1} C_{j_1, j_2, p_1, p_2} (t_{11}, t_{21})$$

и сравнив его с приведенным выше исходным выражением, определяющим эту операцию. Переход к композиционным формам данных и операций позволил выявить их внутреннюю вычислительную структуру и изменить форму представления организации вычислений при обработке двумерных данных с алгоритмической на модельную.

Проиллюстрируем сказанное с помощью приведенного выше выражения для композиционной формы операции (КФО) циклической свертки, перейдем от частного к общему, основываясь на выявленном структурном единстве полученных композиционных форм для различных операций рассматриваемого класса и представим их общее параметризованное описание КФО($A_i^{jp}(t_{11}, t_{21})$, $KBC_i(j, p)$), имеющее модельный характер. Действительно, его компонентами являются алгоритмы $A_i^{jp}(t_{11}, t_{21})$, полученные в результате декомпозиции, погружения в пространственную среду и сжатия во времени последовательных алгоритмов $A_i(t)$, а также параметризованные координационно-вычислительные среды $KBC_i(j, p)$, при этом значение индекса i определяет вид операции, а параметры (j, p) описываются следующими выражениями:

$$p = p_2 + p_1 N_2, j = j_2 + j_1 N_2.$$

Иллюстрация полученного параметризованного описания для операции двумерной свертки представлена на рис. 2, свертка представлена суммой $L^2 = (L_1 L_2)^2$ независимых сверток $C_{jp}(t_{11}, t_{21})$, заданных на группе $H'' = Z_{h_{11}} \times Z_{h_{21}}$.

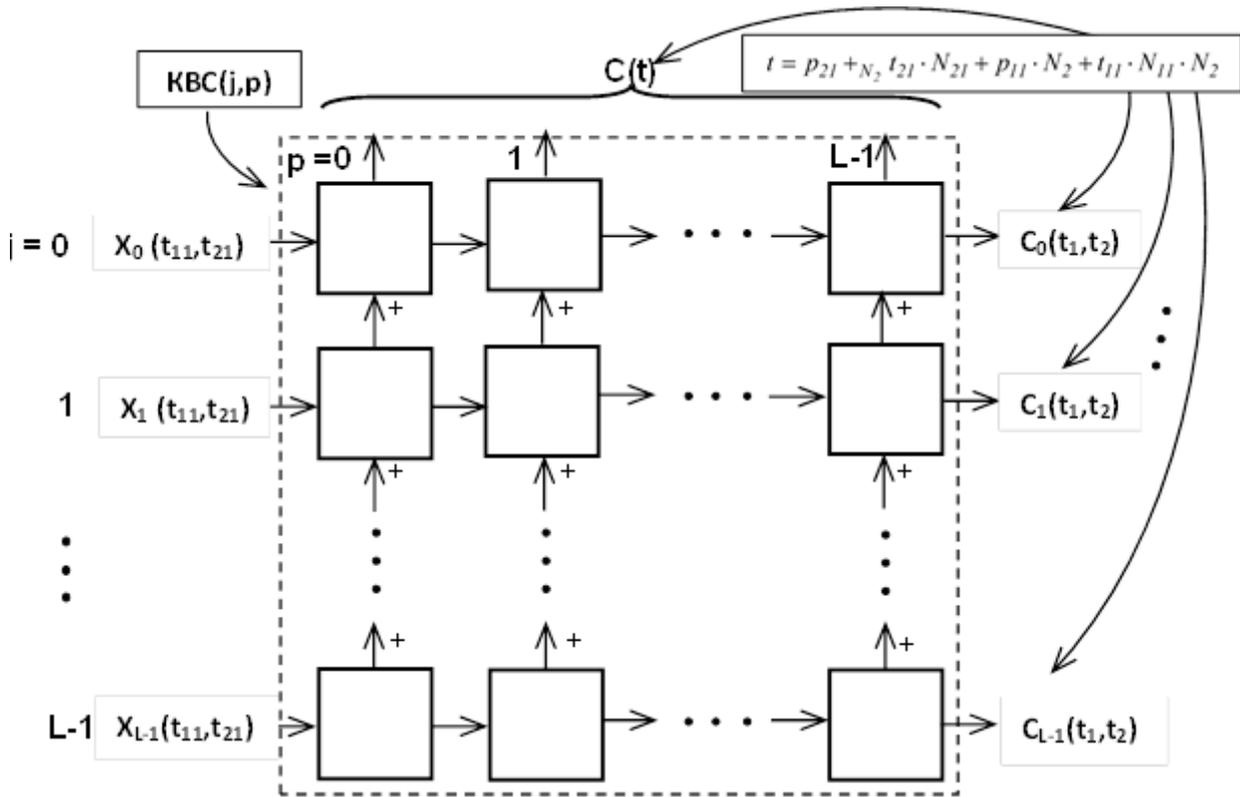


Рис. 2. Параметризованное пространственно-временное описание внутренней вычислительной структуры для операции двумерной свертки

Fig. 2. Parametrized space-time description of the internal computational structure for two-dimensional convolution operation

Перейдя от алгоритмической формы представления двумерных операций вышеуказанного класса к модельной форме, мы не только увидели их внутреннюю пространственную структуру, но и получили возможность ее настройки по параметрам h_{11} , L_1 , $N_1 = h_{11} L_1$ и h_{21} , L_2 , $N_2 = h_{21} L_2$, обеспечив гибкость такой настройки вследствие отсутствия ограничений на их значения. Разработанная мо-

дельная форма описывает разнообразие вариантов организации вычислений, является формальной основой для синтеза параллельных алгоритмов и предлагает формальный инструмент для управления изменениями структур вычислений. Такие характеристики полученной формы описания организации вычислений двумерных данных открывают новые вычислительные возможности, краткому представлению которых посвящен следующий параграф.

3. Декомпозиционный подход и новые вычислительные возможности

Анализируя созданную в рамках предложенного декомпозиционного подхода модель, можно увидеть вычислительные возможности, потенциально заложенные в ее параметризованное описание. Чтобы показать эти возможности, выделим три класса актуальных задач, решить которые можно путем их реализации. Представим эти задачи, а затем покажем, как с помощью полученной модели они могут быть решены. Прежде всего это задача обеспечения реализации этапа совместных исследований алгоритмов и архитектур, присущего современному проектированию вычислительных устройств и позволяющего выполнять по формальным правилам синтез, оценку и выбор наилучших в заданных условиях вариантов организации вычислений на высоком уровне абстракции. Решение этой задачи направлено на обеспечение эффективности параллельной обработки. Следующей из вышеуказанных задач является задача совершенствования формального инструмента, предназначенного для анализа двумерных данных. Решение этой задачи позволит реализовать гибкий и точный доступ к различным участкам обрабатываемой информации и выполнять оценку внутренней структуры проводимых вычислений и получаемых при этом результатов. И наконец, реализация полученных возможностей представленного модельного описания позволяет решить задачу управляемой по параметрам реструктуризации вычислений. Решение этой задачи дает ключ к сокращению сложности и повышению надежности вычислений. Теперь рассмотрим более подробно полученные возможности в свете решения вышеуказанных задач.

Возможность решения задачи реализации совместных исследований алгоритмов и архитектур базируется на создании формального инструмента – модельного описания организации вычислений, характеристики которого позволяют выполнять такие исследования. Представим эти характеристики. Прежде всего это способность порождать разнообразие алгоритмов и их структур, а также способность управления их изменениями, основанные на полученном параметризованном описании. Следующей характеристикой полученного описания $KFO(A_i^{jp}(t_{11}, t_{21}), KBC_i(j, p))$ является наличие в его составе в качестве компоненты параметризованной координационно-вычислительной среды $KBC_i(j, p)$, определяемой параметрами (j, p) . Эта характеристика наделяет рассматриваемое описание способностью организации параллельно-конвейерной обработки за счет погружения вычислений в параметризованную пространственную среду и расширения самого описания путем введения в его состав архитектурных параметров. Следует отметить, что изначально полученное описание не зависит от архитектуры вычислительных устройств, но предполагает возможность внедрения в свой состав архитектурных параметров при выполнении совместных исследований алгоритмов и архитектур. Все вышесказанное свидетельствует о гибкости и адаптивности рассматриваемого описания.

Таким образом, создание представленного модельного описания позволяет проектировать многопроцессорные вычислительные системы в едином пространстве, определяемом алгоритмическими и архитектурными параметрами, на основе алгоритмических оценок сложности реализации синтезируемых вариантов организации вычислений. Предлагаемый подход к проектированию отвечает современным тенденциям его развития [7, 8], при таком подходе поиск и выбор варианта осуществляются на этапе синтеза, оценки и анализа разнообразия вариантов на алгоритмическом уровне с учетом заданных ограничений на аппаратурно-временные затраты. Реализация возможности решения задачи проведения совместных исследований алгоритмов и архитектур наделяет процесс проектирования свойством адаптивности, позволяющим на основе формальных правил устанавливать наилучшие варианты организации вычислений. Обоснованный выбор таких вариантов на исследовательском этапе проектирования приводит к повышению эффективности параллельной обработки.

Рассмотренное описание организации вычислений также предоставляет возможность решения вышеуказанной задачи совершенствования формального инструмента, предназначенного для анализа двумерных данных. Эта возможность формируется благодаря установлению на основе декомпозиционного подхода закона описания внутренней структуры для операций рассматриваемого класса. Можно сказать, что этот закон представляется с помощью полученного параметризованного описания композиционных форм операций $KFO(A_i^{jp}(t_{11}, t_{21}), KBC_i(j, p))$, позволяющего реализовать гибкий доступ по параметрам к внутренней структуре вычислительного процесса, анализ композиционных форм, конструирование данных и корректировку результатов вычислений. Короче говоря, этот закон позволяет работать с элементами внутренней структуры вычислительных процессов и тем самым расширяет возможности для анализа двумерных данных.

Решение последней задачи управляемой по параметрам реструктуризации вычислений, нацеленной на сокращение сложности и повышение надежности вычислений, также базируется на законе описания внутренней структуры операций и полученной при этом возможности управления изменениями этой структуры. Именно благодаря такой возможности мы можем сокращать сложность вычислений операции путем перехода к композиционной форме ее представления, описывающей длинную операцию с помощью композиции коротких операций. Также благодаря данной возможности мы получаем потенциальную способность предложенного описания организации вычислений к повышению надежности вычислений. Эта способность базируется на его готовности к управляемым по параметрам изменениям структуры вычислений. Таким образом, возможность перехода от одного структурного варианта к другому создает алгоритмический потенциал для повышения надежности вычислений.

Заключение

Представлено расширение теоретико-группового декомпозиционного подхода на область обработки двумерных данных. Подход был изначально разработан для построения композиционных форм базовых операций цифровой обработки сигналов. Его расширение выполнено с целью перевода обработки двумерных данных в параметризованную координационно-вычислительную среду, предназначенную для описания параллельных вычислений. В результате выполненного расширения сформирована система действий, порождаемых и реализуемых в рамках предложенного подхода и направленных на изучение внутренней структуры вычислительных операций обработки двумерных данных (двумерных свертки и корреляции, двумерного дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и других структурно подобных им операций) с целью образования их композиционных форм. Проведен анализ структур полученных форм, в ходе которого выявлен их модельный характер. Таким образом, переход к композиционным формам позволил изменить форму представления организации вычислений при обработке двумерных данных с алгоритмической на модельную. Приведено общее модельное описание организации вычислений для различных операций рассматриваемого класса, отличительной особенностью которого является погружение вычислений в параметризованную координационно-вычислительную среду. Показано, что полученное модельное описание открывает новые вычислительные возможности, позволяющие решать актуальные задачи, нацеленные на повышение эффективности параллельной обработки, сокращение ее сложности, а также на повышение гибкости анализа обрабатываемых данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марчук Г.И., Котов В.Е. Проблемы вычислительной техники и фундаментальные исследования // Автоматика и вычислительная техника. 1979. № 2. С. 3–14.
2. Воеводин В.В. Вычислительная математика и структура алгоритмов. М. : Изд-во МГУ, 2006. 112 с.
3. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. СПб. : БХВ Петербург, 2002. 608 с.
4. Kung S.Y. VLSY Array Processors. Prentice Hall, 1987. 667 p.
5. Lee E.A. The problem with threads // IEEE Computer. 2006. V. 39, No. 5. P. 33–42.
6. Климова О.В. Методология декомпозиции данных и единое описание последовательных и параллельных алгоритмов вычисления операций цифровой обработки сигналов // Вестник Томского Государственного Университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. Т. 23., № 2. С. 112–120.

7. Lee G.G., Chen Y.K., Mattavelli M., Jang E.S. Algorithm / Architecture co-exploration of visual computing: Overview and future perspectives // *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*. 2009. V. 19, No. 11. P. 1576–1587.
8. Gwo Giun (Chris) Lee, He-Yuan Lin, Chun-Fu Chen, Tsung-Yuan Huang. Quantifying intrinsic parallelism using linear algebra for algorithm/architecture coexploration // *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*. 2012. V. 23, No. 5. P. 944–957.
9. Климова О.В. Параллельные вычисления и закон построения модельного описания для алгоритмов цифровой обработки сигналов // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2016. № 2. С. 11–22.

Поступила в редакцию 23 ноября 2019 г.

Klimova O.V. (2020) DECOMPOSITION APPROACH TO THE CONSTRUCTION OF PARALLEL ALGORITHMS FOR PROCESSING OF TWO-DIMENSIONAL DATA. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika* [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science]. 52. pp. 114–122

DOI: 10.17223/19988605/52/14

The formal tool for synthesizing a variety of parallel algorithms for processing of two-dimensional data is presented in this paper. The tool is intended to represent a variety of variants of computation organization for two-dimensional convolution and correlation, two-dimensional discrete Fourier transform (DFT), and other operations structurally similar to them. The creation way of such a tool, characterized by the use of the group-theoretical decomposition approach, is shown. The tool obtained is a parameterized, space-time description of parallel computation organization and provides a basis for combining algorithmic and architectural parameters in a single formal description. The tool is also architecturally independent and allows us to implement a stage of concurrent exploration of algorithms and architectures. This research stage is an integral part of the process of designing advanced computation systems and its implementation leads to improving the efficiency of parallel computing. The development of the formal tool presented in the article is based on the study of the internal space-time structure of algorithms using the proposed decomposition approach. Using this approach, which was originally developed for constructing compositional forms of the basic operations of digital signal processing, became possible due to its extension to the field of processing of two-dimensional data. The paper presents such an extension that made it possible to transfer the processing of two-dimensional data into a parameterized coordination-computing environment (CCE) intended to describe parallel computations. As a result of the extension realized, a system of an actions aimed at studying the internal structure of the computational operations of processing of two-dimensional data in order to detect their compositional forms is formed. These actions are developed and implemented within the scope of the approach proposed. The analysis of the structures of the obtained forms is carried out as a result their model nature is discovered. Thus, the transition to compositional forms of operations (CFO) made it possible to change the form of representation of computation organization in the processing of two-dimensional data from algorithmic to model one. A general model description of computation organization $CFO(A_i^{jp}(t_{11}, t_{21}), CCE_i(j, p))$ for various operations of the class in question is given, the distinguishing feature of which is immersion of computations in a parametrized coordination-computing environment. The components of the description presented are the algorithms $A_i^{jp}(t_{11}, t_{21})$ obtained as a result of decomposition, immersion into the spatial environment, and time compression of the sequential algorithms $A_i(t)$, as well as the parameterized coordination-computational environments $CCE_i(j, p)$. The parameters describing the processing of two-dimensional data $x(t_1, t_2)$ given on a group H of order $N = N_1 \times N_2$ are presented as follows: $t = t_2 + t_1 N_2$, $N_1 = h_{11} L_1$, $N_2 = h_{21} L_2$, $t_1 = 0, \dots, N_1 - 1$, $t_{11} = 0, \dots, h_{11} - 1$, $j_1 = 0, \dots, L_1 - 1$, $t_2 = 0, \dots, N_2 - 1$, $t_{21} = 0, \dots, h_{21} - 1$, $j_2 = 0, \dots, L_2 - 1$. Having moved from the algorithmic form of representing two-dimensional operations to their model form, we not only saw the internal spatial structure of the operations, but also got the opportunity to configure it by parameters h_{11}, L_1 and h_{21}, L_2 synthesizing various variants of computation organization. Such an opportunity allows one to solve urgent problems aimed at increasing the efficiency of parallel processing, reducing its complexity, as well as increasing the flexibility of analysis of the data processed.

Keywords: decomposition approach; parallel algorithms; composition forms; model description.

KLIMOVA Olga Vitalievna (Candidate of Technical Sciences, Senior Research Scientist, Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation).
E-mail: ovk31@mail.ru

REFERENCES

1. Marchuk, G.I. & Kotov, V.E. (1979) Problems of computers and fundamental research. *Avtomatika i vychislitel'naya tekhnika – Automatic Control and Computer Sciences*. 2. pp. 3–14.
2. Voevodin, V.V. (2006) *Vychislitel'naya matematika i struktura algoritmov* [Computational Mathematics and Algorithm Structure]. Moscow: Moscow State University.
3. Voevodin, V.V. & Voevodin, V.I. (2002) *Parallel'nye vychisleniya* [Parallel Computing]. St. EPtersburg: BKhV Peterburg.
4. Kung, S.Y. (1987) *VLSY Array Processors*. Prentice Hall.
5. Lee, E.A. (2006) The Problem with Threads. *IEEE Computer*. 39(5). pp. 33–42.

6. Klimova, O.V. (2013) Methodology of data decomposition and general description of sequential and parallel algorithms for digital signal processing operations. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 23(2). pp. 112–120.
7. Lee, G.G., Chen, Y.K., Mattavelli, M. & Jang, E.S. (2009) Algorithm/Architecture co-exploration of visual computing: Overview and future perspectives. *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*. 19(11). pp. 1576–1587. DOI: 10.1109/TCSVT.2009.2031376
8. Gwo Giun (Chris) Lee, He-Yuan Lin, Chun-Fu Chen & Tsung-Yuan Huang (2012) Quantifying Intrinsic Parallelism Using Linear Algebra for Algorithm/Architecture Coexploration. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*. 23(5). pp. 944–957.
9. Klimova, O.V. (2016) Parallel computations and construction law of model description for digital signal processing algorithms. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy – Journal of Information Technologies and Computing Systems*. 2. pp. 11–22.