

В.В. Топорков<sup>1</sup>, А.С. Топоркова<sup>2</sup>, А.В. Бобченков<sup>1</sup>,  
Д.М. Емельянов<sup>1</sup>, А.С. Целищев<sup>1</sup>

## ОРГАНИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ\*

### Введение

Экономические модели выделения ресурсов и планирования являются весьма эффективными в распределенных вычислениях с *неотчуждаемыми ресурсами*, включая грид, мультиагентные системы и облачные вычисления [Garg et al., 2009; Bredin et al., 1999; Ailamaki et al., 2009].

При этом возникает серьезная проблема ценообразования в зависимости от уровня качества обслуживания [Ailamaki et al., 2009]. В работе [Vuuya et al., 2002] дается хороший обзор различных подходов к ее решению, а также к формированию различных стратегий планирования при наличии ограничений на время и бюджет выполнения задания.

В [Ernmann et al., 2002] рассматриваются эвристические алгоритмы подбора слотов на основе задаваемых пользователем функций полезности.

При реализации той или иной экономической политики брокерами ресурсов [Vuuya et al., 2002; Ernmann et al., 2002], как правило, проводится оптимизация выполнения конкретного приложения [Toporkov, 2009]. При образовании виртуальных организаций [Kurowski et al., 2003] осуществляется оптимизация планирования на уровне потоков заданий. Соответствующие функции реализуются иерархической структурой, состоящей из метапланировщика и подчиненных ему менеджеров ресурсов [Toporkov, 2009; Kurowski et al., 2003].

*Новизна подхода*, предлагаемого в настоящей работе, состоит в том, что экономические механизмы применяются для планирования пакета заданий в рамках виртуальной организации, причем планирование заданий выполняется циклично на наборах предварительно отобранных слотов.

<sup>1</sup> 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14, МЭИ (ТУ), ToporkovVV@mpei.ru.

<sup>2</sup> 109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер., д. 1-3/12, стр. 8, МГИЭМ(ТУ).

\* Работа выполнена при содействии Совета по грантам Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (НШ-7239.2010.9), РФФИ (проект № 09-01-00095), Минобрнауки в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект № 2.1.2/6718) и федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт № П12227).

## 2. Критерии эффективности планирования

В рамках рассматриваемой модели, в основу которой заложена иерархическая схема управления потоками заданий [Торогков, 2009; Kurgowski et al., 2003], фигурируют пользователи, запускающие задания, и собственники вычислительных ресурсов. Интересы пользователей и собственников зачастую противоречивы. Каждый из независимых пользователей заинтересован в наискорейшем запуске своих заданий с наименьшими издержками (например, платой за использование ресурса), а собственники, наоборот, стремятся получить наибольший доход от предоставления ресурсов. Для распределенных сред с неотчуждаемыми ресурсами характерна конкуренция независимых пользователей за их использование, а также конкуренция глобальных и локальных потоков заданий. Эти факторы существенно усложняют решение задачи коаллокации. Планирование выполнения совокупности (пакета) независимых заданий осуществляется циклично, на основе динамично обновляемых расписаний выполнения заданий в локальных процессорных узлах. В каждом цикле планирования запуска пакета заданий требуется решение двух задач. Во-первых, отбор подходящих (по ресурсу, времени, цене) слотов для каждого задания пакета. Во-вторых, необходим выбор комбинации слотов, являющейся эффективной или оптимальной с точки зрения прохождения всего пакета заданий в текущем цикле планирования. Пользователь, запускающий  $i$ -е задание, должен иметь возможность управлять временем старта задания  $j_i$ , оперируя платой  $c_i$ , которую он вносит за его выполнение. Цена  $c_i$  устанавливается собственником соответствующего вычислительного ресурса на основе соображений балансирования глобальных и локальных потоков заданий, получения соответствующего дохода и т.п. Плата  $c_i(s_i)$  за ресурс в  $k$ -м наборе слотов ( $s_i = k$ ) определяется исходя из удельной стоимости единицы времени использования соответствующего процессорного узла и времени  $t_i(s_i)$ , отведенного для выполнения задания  $j_i$ .

Пример числовых характеристик слотов для пакета из трех заданий приведен в табл. 1.

Таблица 1

Набор слотов	Задание 1		Задание 2		Задание 3	
	$c_1$	$t_1$	$c_2$	$t_2$	$c_3$	$t_3$
1	7	7	3	3	5	5
2	10	5	2	1	8	4
3	9	3	-	-	6	2
4	-	-	-	-	4	1

Мы рассматриваем два типа критериев в рамках нашей модели. Это *стоимостные* и *временные показатели* эффективности прохождения пакета  $J$  заданий на допустимом наборе  $\bar{s} = (s_1, \dots, s_n)$  подходящих слотов.

К первой группе критериев относится суммарная стоимость выполнения пакета заданий

$$C(\bar{s}) = \sum_{i=1}^n c_i(s_i). \quad (1)$$

Для того чтобы не допустить монополизации использования того или иного ресурса отдельными пользователями, вводится ограничение  $B^*$  на бюджет  $B(\bar{s})$  виртуальной организации – максимальное значение суммарной стоимости использования ресурсов в текущем цикле планирования.

Интересы собственников могут быть отражены в таком критерии, как потери от недоиспользования бюджета виртуальной организации:

$$D(\bar{s}) = B^* - C(\bar{s}). \quad (2)$$

Политика администрирования в виртуальной организации и, отчасти интересы пользователей, отражаются во времени выполнения пакета заданий:

$$T(\bar{s}) = \sum_{i=1}^n t_i(s_i). \quad (3)$$

Ограничение на суммарное время  $T^*$  занятия слотов выражает стремление собственников ресурсов сбалансировать доли глобальных (внешних) и локальных (внутренних) заданий. Упомянутые аспекты можно представить в таком показателе, как простой ресурсов:

$$I(\bar{s}) = T^* - T(\bar{s}), \quad (4)$$

где  $T(\bar{s})$  определяется (3).

Если рассматривать задачи однокритериальной оптимизации выполнения пакета заданий, то в интересах той или иной стороны (пользователь, собственник, администратор виртуальной организации) каждый из упомянутых критериев (1-4) необходимо минимизировать при заданных ограничениях. Например, минимизировать стоимость при ограничении на суммарное время занятия слотов, либо минимизировать время прохождения пакета заданий при фиксированном бюджете виртуальной организации. С позиций собственников ресурсов целесообразно минимизировать потери доходов или простой ресурсов при ограничении на время использования слотов внешними заданиями.

Однако, в общем случае, в рассматриваемой модели управления прохождением заданий на основе экономических механизмов необходимо использовать *вектор критериев стоимостного и временного типов*, формирующий бинарное отношение сравнительной эффективности наборов подходящих слотов. В этом случае мы будем использовать понятие модели выбора, и говорить об оптимальной стратегии планирования пакета заданий.

### 3. Отбор слотов для выполнения заданий

В каждом цикле динамично обновляются наборы доступных слотов на основе информации, поступающей от локальных менеджеров ресурсов, и оптимизируется план выполнения пакета заданий по совокупности критериев в соответствии с политикой предоставления и потребления ресурсов, принятой в виртуальной организации. Каждый из слотов соответствует временному отрезку, который может быть использован для выполнения задачи, входящей в состав многопроцессорного задания, на том или ином типе ресурса. Требования задания к ресурсам оформляются в виде *ресурсного запроса*, содержащего тип, количество и характеристики узлов (тактовую частоту процессора, емкость оперативной памяти, дисковое пространство, операционную систему и т.д.), а также время  $t$  их использования. Для запуска многопроцессорного задания необходимо согласованное выделение требуемого для его выполнения количества  $l$  слотов. *План выполнения задания* представляет собой набор временных слотов. Проблема заключается в том, что слоты, ассоциированные с разными процессорными узлами, начинаются и заканчиваются в произвольные и не совпадающие моменты времени. В свою очередь, процессы параллельного задания должны стартовать синхронно. Как правило, функция синхронизации возлагается на главный процесс задания, запустившийся раньше остальных на некотором процессорном узле. Главный процесс может ожидать запуска всех остальных процессов не более заранее определенного времени. Если необходимое число  $l$  слотов с требуемыми, согласно ресурсному запросу, атрибутами не будет накоплено до этого времени, то задание не будет запущено. Таким образом, в случае однородных узлов совокупность слотов для выполнения задания представляет собой прямоугольное «окно» размером  $l \times t$ , а для процессоров с разной производительностью это – «окно» с неровным правым краем, где  $t$  – время выполнения составной части задания на наименее производительном процессоре (рис. 1).

Рассмотрим общую схему алгоритма выбора слотов для одного задания (будем полагать, что процессорные узлы не являются идентичными).

- 1.° Слоты упорядочиваются по *неубыванию* времени старта.
- 2.° Из полученного списка выбирается *подходящий* слот  $s$ .

3.° К длительности выполнения задания на ранее рассмотренных подходящих слотах добавляется смещение  $\delta_i$  времени старта  $s$ -го слота относительно  $(s-1)$ -го.

4.° Из списка просмотренных подходящих слотов (от 1 до  $s-1$ ) удаляются те, время действия которых с учетом сдвига  $\delta_i$  по времени истекло.

5.° Переход к слоту  $s+1$  и повторение шагов 3°, 4° до тех пор, пока не наберется заданное число  $l$  слотов.

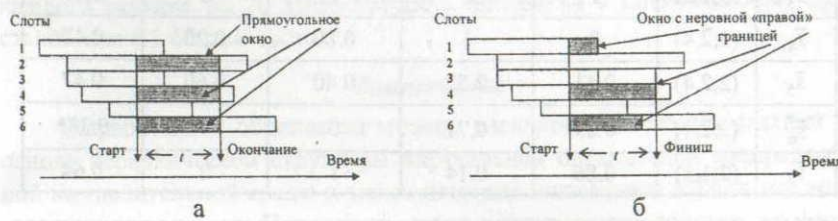


Рис. 1. Отбор слотов на идентичных узлах (а) и процессорах с разной производительностью (б)

После просмотра слотов для всех  $n$  заданий пакета отыскиваются альтернативные наборы подходящих слотов, поскольку при отборе слотов для  $i$ -го задания не весь исходный список может быть просмотрен. Эта процедура итеративно реализуется для всех заданий, планирование которых не перенесено в следующий цикл.

В таблице (см. табл. 1) в столбце, соответствующем каждому из заданий, представлены параметры *альтернативных наборов* подходящих слотов.

#### 4. Результаты моделирования планирования пакетов заданий

Генерация планов для альтернативных наборов отобранных слотов выполняется методом, предложенным и обоснованным в [Торожков, 2009; Торожков et al., 2010], и сводится к решению нелинейной задаче о рюкзаке на основе динамического программирования.

В табл. 2 представлены относительные (нормированные) значения критериев  $C(\bar{s})$ ,  $D(\bar{s})$ ,  $T(\bar{s})$ ,  $I(\bar{s})$  в соответствии с (1-4) и значения функции  $U(\bar{s})$  полезности при заданных весах критериев.

Таблица 2

Вариант	Набор слотов	Критерий/вес				Функция полезности $U(\bar{s})$
		$\bar{C}(\bar{s})/2$	$\bar{D}(\bar{s})/1$	$\bar{T}(\bar{s})/2$	$\bar{I}(\bar{s})/1$	
$\bar{s}_1$	(1,2,3)	0.29	0.71	1	0	0.55
$\bar{s}_2$	(2,2,2)	1	0	1	0	0.67
$\bar{s}_3$	(3,1,2)	1	0	1	0	0.67
$\bar{s}_4$	(1,2,4)	0	1	0.80	0.20	0.47
$\bar{s}_5$	(2,2,4)	0.43	0.57	0.40	0.60	0.47
$\bar{s}_6^*$	(3,2,4)	0.29	0.71	0	1	0.38*
$\bar{s}_7$	(2,1,3)	0.86	0.14	1	0	0.64

Рассмотренный подход отличается от известных тем, что для каждого из заданий пакета отыскивается не один подходящий слот, а совокупность альтернативных наборов слотов. Планирование заданий, для которых не существует подходящих слотов, переносится в следующий цикл.

На основе разработанной авторами среды моделирования [Топорков и др., 2009] проведено экспериментальное исследование различных алгоритмов и стратегий планирования по экономическим принципам. Для каждого эксперимента генерируется набор заданий и слотов с заданными параметрами, после чего производится либо *случайный выбор* подходящего набора слотов, либо *альтернативный выбор* в соответствии алгоритмом оптимизации плана. Параметры заданий и слотов (стоимостные и временные требования) имеют равномерное распределение в заданном диапазоне.

Проведено экспериментальное исследование различных алгоритмов планирования при решении ряда модельных задач, имеющих важное практическое значение в организации распределенных вычислений на неотчуждаемых ресурсах:

- ◆ минимизация суммарного времени завершения пакета заданий при ограничении на бюджет виртуальной организации;
- ◆ максимизация доходов собственников ресурсов при ограничении на суммарное время использования слотов;
- ◆ минимизация суммарной стоимости выполнения пакета заданий при ограничении на суммарное время использования слотов.

При применении алгоритма альтернативного отбора среднее время выполнения задания в пакете уменьшается *вдвое*. При увеличении максимального числа слотов, генерируемых случайно для каждого задания с 7

до 20, эффективность применения алгоритма альтернативного выбора становится ещё выше: среднее время выполнения задания меньше в 4.45 раза по сравнению со случайным выбором подходящих слотов. Доходы собственников ресурсов с использованием алгоритма оптимизации в среднем почти вдвое больше, чем при случайном выборе слотов (23.48 против 12.84 условных единиц). Средняя стоимость выполнения задания при случайном выборе слотов в 1.7 раз больше, чем использовании алгоритма альтернативного выбора. При увеличении максимального числа слотов для каждого задания до 20 эффективность алгоритма с оптимизацией плана становится в 3.65 раза выше.

#### Заключение

Разработана и обоснована модель управления потоками заданий на основе иерархической структуры виртуальной организации распределенной вычислительной среды и экономических механизмов выделения неотчуждаемых ресурсов. Предложен метод планирования потоков независимых заданий на основе экономических принципов администрирования вычислительных ресурсов. Обоснованы механизмы динамического перераспределения заданий с помощью обновляемых локальных расписаний вычислительных узлов виртуальной организации – списков слотов.

#### Библиографический список

14. [Garg et al., 2009] Garg S.K., Buyya R., Siegel H.J. Scheduling parallel applications on utility Grids: time and cost trade-off management, Proceedings of the 32nd Australasian computer science conference (ACSC 2009), Wellington, New Zealand.
15. [Bredin et al., 1999] Bredin J., Kotz D., Rus D. Economic markets as a means of open mobile-agent systems, Proceedings of the workshop “Mobile agents in the context of competition and cooperation (mac3)”, 1999.
16. [Ailamaki et al., 2009] Ailamaki A., Dash D., Kantere V. Economic aspects of cloud computing, Flash Informatique, Special HPC, 27 October 2009.
17. [Buyya et al., 2002] Buyya R., Abramson D., Giddy J. Economic models for resource management and scheduling in grid computing, J. of concurrency and computation: practice and experience, vol. 14, no. 5, 2002.
18. [Ernemann et al., 2002] Ernemann C., Hamscher V., Yahyapour R. Economic scheduling in grid computing. In: Proceedings of the 8th job scheduling strategies for parallel processing, D.G. Feitelson, L. Rudolph, U. Schwiegelshohn (eds.), Springer, Heidelberg, LNCS, vol. 2537, 2002.
19. [Toporkov, 2009] Toporkov V. Application-level and job-flow scheduling: an approach for achieving quality of service in distributed computing, Proceedings of the 10th international conference on parallel computing technologies, Springer, Heidelberg, LNCS, vol. 5698, 2009.

20. [Kurowski, 2003] Kurowski K., Nabrzyski J., Oleksiak A. et al. Multicriteria Aspects of Grid Resource Management // In: J. Nabrzyski, J.M. Schopf, and J. Weglarz (eds.), Grid resource management. State of the art and future trends. - Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.
21. [Топорков et al., 2010] Toporkov V.V., Tselishchev A.S. Safety scheduling strategies in distributed computing, Int. J. Critical Computer-Based Systems, vol. 1, nos. 1/2/3, 2010.
22. [Топорков и др., 2009] Топорков В.В., Топоркова А.С., Целищев А.С., Бобченко А.В., Емельянов Д.М. Масштабируемые модели планирования и управления потоками заданий в распределенных вычислениях // Научный сервис в сети Интернет: масштабируемость, параллельность, эффективность: Труды Всероссийской суперкомпьютерной конференции. – М.: Изд-во МГУ, 2009.