

УДК 007:004.02

ГИПЕРВЕКТОРНОЕ РАНЖИРОВАНИЕ В МУЛЬТИПРОЕКТНОМ ПЛАНИРОВАНИИ

Клеванский Н.Н., Ткачев С.И., Красников А.А.

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова»,
Саратов, e-mail: nklevansky@yandex.ru

Представлены методы решения второй задачи мультипроектного планирования – формирования календарных графиков. Две схемы формирования расписания реализованы в среде СУБД и включают формирование начального календарного графика по первой схеме и его последующую оптимизацию с помощью второй схемы. Каждая схема циклична, так как содержит две «жадные» эвристики в виде правил приоритетов. В каждом цикле результат работы первого правила схемы используется вторым правилом. В каждом правиле осуществляется выбор наиболее приемлемого критерия загрузки или равномерности с принятием некоторых решений. В операциях выбора используются различные методы ранжирования теории принятия решений. В формировании календарных графиков использованы «жадная» идеология и концепции равномерности и загрузки. Рассмотрены численные результаты применения гипервекторного ранжирования критериев загрузки проектов в мультипроектном планировании.

Ключевые слова: мультипроектное планирование, заявка, действие, распределение ресурсов, правила приоритетов, схема формирования расписания, многокритериальное ранжирование, гипервекторное ранжирование

HYPERVECTOR RANKING IN MULTI-PROJECT SCHEDULING

Klevanskiy N.N., Tkachev S.I., Krasnikov A.A.

Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov, Saratov, e-mail: nklevansky@yandex.ru

This paper is demonstrate how resource-constrained multi-project scheduling problems can be solved efficiently by two schedule generation schemes. The first, in the multi-project scheduling problem, multiple projects, each having a number of activities, must be scheduled in an initial solution. The second, in the multi-project scheduling problem, the initial solution must be optimized. A set of local and global resources are available for carrying out the activities of the projects. The basic criteria for priority rules are demanded – criterion of activity/project workload and criterion of resource equability. The solutions obtained by the first schedule generation scheme with the best resource allocation rule are used as a baseline to compare those obtained by the latter. Each schedule generation scheme consists of two priority rules – heuristic solution-finding procedures based on greedy ideology. The priority rules use multi-criteria ranking of decision support theory. The algorithm introduces the concept of an adjustable resource allocation factor which can be used to produce schedules. A numerical example of hyper-vector ranking for project workload criteria in multi-project scheduling is given.

Keywords: multi-project scheduling, demand, activity, resource allocation, priority rules, schedule generation scheme, multi-criteria ranking, hyper-vector ranking

Мультипроектное планирование (RCMPSP – resource-constrained multi-project scheduling problem) решает взаимосвязанные проблемы – формирование календарного графика и распределение ресурсов. В большинстве исследований установлена NP-трудность задач мультипроектного планирования и, как следствие, необходимость нахождения эвристик, понижающих порядок операций полного перебора. Основой эвристических подходов является использование схем формирования расписаний (SGS – schedule generation scheme) и правил приоритетов (PR – priority rules) [5, 10]. Приоритетами в этом контексте выступают критерии для определения очередности выполнения (включения в календарный график) конкурирующих по ресурсам работ (проектов). Критерии являются скалярными величинами разных характеристик заявок/работ и проектов, включая выделяемые и требуемые ресурсы. Под правилами приоритетов понимаются опре-

деленные последовательности приемов и методов определения очередности выполнения (включения в календарный график) конкурирующих по ресурсам работ (проектов). Правила приоритетов используют однокритериальное ранжирование скалярных величин приоритетов, что обусловлено потребностями «ручного» планирования, по крайней мере на предварительном этапе. Большое количество критериев, используемых в качестве приоритетов [5, 6, 7, 9, 10], свидетельствует о многокритериальном характере проблемы и отсутствии нужных решений. В одной из немногих работ [9] представлено более сложное ранжирование характеристик проектов с помощью метода анализа иерархий.

Целью статьи является представление подходов к использованию методов ранжирования в программном формировании календарного графика для произвольного количества проектов в системе с ограниченными ресурсами.

По способу применения приоритеты разделяются на приоритеты для планирования одного проекта (RCPSP – resource-constrained project scheduling problem) и приоритеты мультипроектного планирования [5].

К приоритетам RCPSP относятся:

– **FCFS** – First Come First Served – работа с минимальным номером обслуживается (включается в календарный график) первой;

– **LCFS** – Last Come First Served – работа с максимальным номером обслуживается первой;

– **SOF** – Shortest Operation First – кратчайшая операция обслуживается первой;

– **MOF** – Maximum (longest) Operation First – наиболее продолжительная операция обслуживается первой;

– **RAN** – Random – случайный выбор операции проекта;

– **EDDF** – Earliest Due Date First – первой обслуживается операция с самым ранним началом;

– **MAXSP** – Maximum Schedule Pressure – первой обслуживается операция с максимальным давлением;

– **MINLFT** – Minimum Late Finish time – первой обслуживается операция с минимальным временем окончания;

– **MINWCS** – Minimum Worst Case Slack – минимальный худший резерв;

– **WACRU** – Weighted Activity Criticality & Resource Utilization – взвешенная критичность операции и использования ресурсов;

– **MS** – Maximum Total Successors – максимальное число последователей;

– **MCS** – Maximum Critical Successors – максимальное число критичных последователей.

К приоритетам RCMPSP относятся:

– **MINSLK** – Minimum Slack – минимальный резерв;

– **MAXSLK** – Maximum Slack – максимальный резерв;

– **SASP** – Shortest Activity from Shortest Project – кратчайшая операция из кратчайшего проекта обслуживается первой;

– **LALP** – Longest Activity from Longest Project – самая длительная операция из самого длительного проекта обслуживается первой;

– **MINTWK** – Minimum Total Work content – выбор операции, дающей минимальный объем потребления ресурсов;

– **MAXTWK** – Maximum Total Work content – выбор операции, дающей максимальный объем потребления ресурсов;

– **TWK-LST** – MAXTWK & earliest Late Start time (2-phase rule) – первоначальная приоритизация по MAXTWK, затем по наиболее раннему позднему началу операции (двухфазное правило);

– **TWK-EST** – MAXTWK & earliest Early Start time (2-phase rule) – первоначаль-

ная приоритизация по MAXTWK, затем по наиболее раннему раннему началу операции (двухфазное правило).

На предварительном этапе планирования правила приоритетов используются для формирования начальных решений (календарных графиков проектов или мультипроектов) [1, 5, 10], к которым применяются оптимизирующие эвристики. На этапе оптимизации календарных графиков правила приоритетов встраиваются в соответствующие эвристики [6, 7, 9]. Различные исследования не дали однозначного предпочтения какому-либо критерию применительно к мультипроектному планированию [5, 7, 9].

При исследовании систем различного рода используются критерии с векторными и многовекторными компонентами. Задачи принятия решений в этом случае сводятся к задачам многокритериального, многовекторного и гипервекторного ранжирования.

Для однозначного понимания терминологии введем следующие определения [4]:

– многокритериальным ранжированием является ранжирование векторных критериев, представляющих собой упорядоченные множества скалярных компонент (рис. 1). По мнению авторов данной статьи, наиболее адекватным многокритериальным ранжированием является «жесткое» ранжирование [4]. Будут различаться прямое (по «возрастанию») и обратное (по «убыванию») многокритериальное ранжирование;

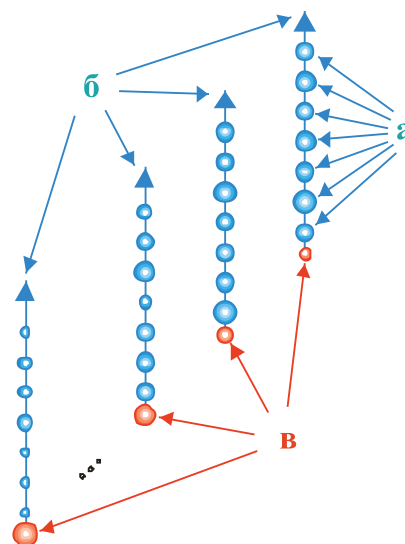


Рис. 1. Многокритериальное ранжирование:
а – скалярные компоненты вектора;
б – ранжируемые векторы; в – ранги векторов

– многовекторным ранжированием является ранжирование критериев, представляющих собой упорядоченные множества векторных компонент, а каждая векторная

компонента – упорядоченное множество скалярных компонент (рис. 2). Многoveктное ранжирование n критериев с k векторными компонентами (рис. 2, а) осуществляется следующим образом: первоначально производится k «жестких» ранжирований соответствующих векторных компонент (рис. 2, б) с формированием рангов (рис. 2, в); затем «жестко» ранжируются n векторов рангов (рис. 2, г) с формированием рангов (рис. 2, д);

– гипервекторное ранжирование является ранжированием критериев, представляющих собой упорядоченные множества многoveктрных компонент, каждая многoveктрная компонента – упорядоченное множество векторных компонент, а каждая векторная компо-

нента – упорядоченное множество скалярных компонент (рис. 3). Гипервекторное ранжирование m гипервекторных критериев, каждый из которых содержит n многoveктрных критериев с k векторными компонентами, осуществляется следующим образом: первоначально производится k «жестких» ранжирований соответствующих векторных компонент (рис. 3, б) с формированием рангов (рис. 3, в); затем производится n «жестких» ранжирований соответствующих векторов рангов многoveктрных компонент (рис. 3, г) с формированием рангов (рис. 3, д); затем «жестко» ранжируются m векторов рангов гипервекторных компонент (рис. 3, е) с формированием рангов (рис. 3, ж).

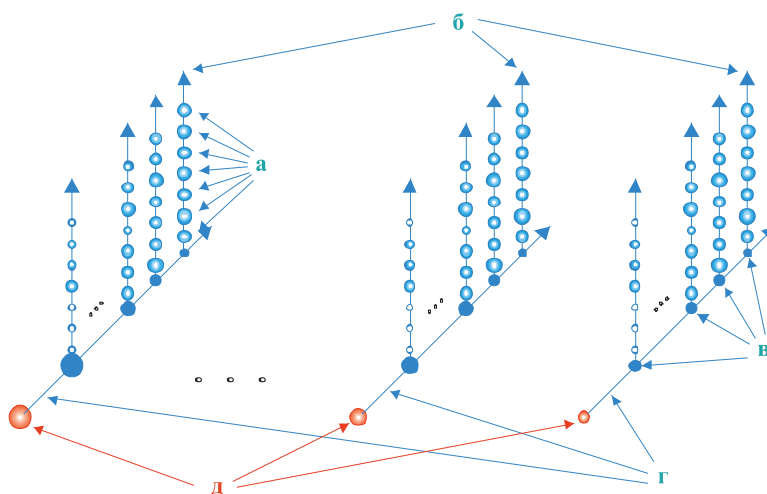


Рис. 2. Многовекторное ранжирование: а – скалярные компоненты вектора; б – ранжируемые векторы; в – ранги векторов; г – ранжируемые многoveктрные компоненты; д – ранги многoveктрных компонент

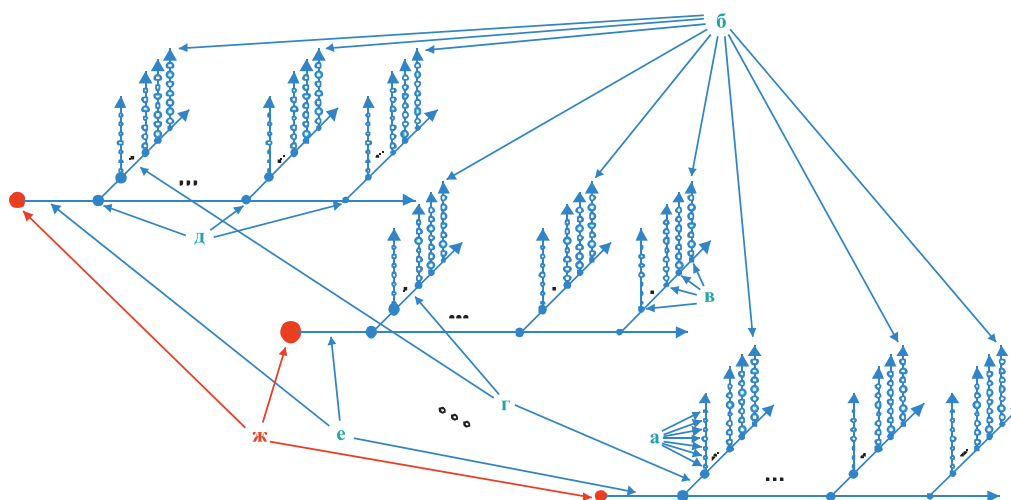


Рис. 3. Гипервекторное ранжирование: а – скалярные компоненты вектора; б – ранжируемые векторы; в – ранги векторов; г – ранжируемые многoveктрные компоненты; д – ранги многoveктрных компонент; е – ранжируемые гипервекторные компоненты; ж – ранги гипервекторных компонент

Для мультипроектного планирования предложены две последовательно применяемые схемы: SGS_1 – формирование начального календарного графика; SGS_2 – его последующая оптимизация [2].

В каждом цикле SGS_1 используются два взаимосвязанных правила приоритетов PR_{11} и PR_{12} . Стратегия PR_{11} связана с выбором наиболее загруженного по требуемым ресурсам проекта среди не включенных в начальный календарный график. Для проекта выбранного правилом PR_{11} в правиле PR_{12} определяется время начала выполнения в начальном календарном графике с обеспечением наибольшей равномерности потребления ресурсов.

В каждом цикле SGS_2 также используются два взаимосвязанных правила приоритетов PR_{21} и PR_{22} . Стратегия PR_{11} свя-

зана с выбором наиболее неравномерного по потреблению ресурсов в календарном графике проекта. Для проекта выбранного правилом PR_{21} в правиле PR_{22} определяется время начала выполнения в интервале расписания по крайней мере не ухудшающее интегральную оценку равномерности (критерий равномерности) всего графика.

Для численных экспериментов использовалось тестовое задание, включающее 15 проектов, случайно выбранных из библиотеки тестовых задач PSPLib [8]. Проекты включают по 30 заявок работ, каждой из которых требуется до 4 типов ресурсов в течение их выполнения. Иницируемая заявкой работа характеризуется своей длительностью в тактах планирования. Внутри проекта заявки связаны отношениями предшествования/следования.

Таблица 1

Характеристики проектов тестового задания

№ проекта	Обозначение проекта	Код генератора	Выделяемые проекту ресурсы на такт планирования				Критический путь, такты планирования
			R1	R2	R3	R4	
1	j30_28.bas	1350739460	42	39	51	44	47
2	j30_28.bas	1001619525	28	40	43	39	63
3	j30_29.bas	1768635613	19	17	20	19	44
4	j30_29.bas	1037926147	17	15	17	17	51
5	j30_29.bas	401731488	15	14	16	16	48
6	j30_30.bas	677072906	30	28	26	33	34
7	j30_30.bas	712413196	23	23	22	20	44
8	j30_28.bas	890933679	28	25	34	42	46
9	j30_31.bas	1335687044	32	26	25	32	48
10	j30_31.bas	2012720068	23	25	28	30	46
11	j30_31.bas	1594625014	34	41	46	37	48
12	j30_31.bas	670867861	24	30	25	25	56
13	j30_32.bas	1264544214	29	39	51	43	48
14	j30_41.bas	377662011	18	13	16	14	45
15	j30_41.bas	1980474781	13	14	12	13	48

Таблица 2

Результаты ранжирования для 10 наиболее загруженных путей графов проектов

№ проекта	Путь ID	Отсортированные по возрастанию ранги заявок путей графов проектов									Ранг пути
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
9	162	2	6	21	94	176	263	273	296	318	1
9	161	2	6	21	86	179	263	273	296	318	1
5	84	8	12	26	43	103	115	1000	1000	1000	2
11	204	40	44	63	78	88	177	261	1000	1000	3
13	248	14	35	77	82	168	234	254	1000	1000	4
5	86	8	25	26	115	148	274	322	358	1000	5
13	251	14	35	36	77	204	283	1000	1000	1000	6
13	250	48	60	82	106	234	237	254	333	1000	7
13	249	48	60	89	106	225	237	254	333	1000	8
13	252	14	35	77	204	234	254	283	1000	1000	9
10	182	3	59	62	121	185	297	306	1000	1000	10

Рассмотрим использование правила приоритетов PR_{11} для ситуации, в которой проекты 12 и 7 уже включены в начальный календарный график. Критерии загруженности проектов формируются на основе скалярных оценок загруженности заявок по каждому из четырех ресурсов. Оценка загруженности определяется произведением тактовой потребности заявки в ресурсе на длительность выполнения работы заявки [2, 3], что позволяет представить каждую заявку вектором из четырех скалярных оценок, упорядоченных по ресурсам. Обратное многокритериальное ранжирование векторов загруженности заявок формируют ранги заявок, определяющие критерии (векторы) загруженности путей графов проектов. Прямое многокритериальное ранжирование векторов загруженности путей графов проектов определяет их ранги, которые формируют критерии (векторы) загруженности проектов. Прямое многокритериальное ранжирование векторов загруженности проектов определяет доминирующий проект, который и будет самым загруженным. Таким образом, правило PR_{11} реализует гипервекторное ранжирование приоритетов, представленных критериями загруженности проектов.

В табл. 2 представлены выборочные результаты ранжирования векторов загруженности путей графов проектов в очередном цикле формирования начального календарного графика. Так как эти векторы имеют разную размерность, то для их многокритериального ранжирования значениям недостающих скалярных компонент необходимо присвоение фиктивных значений. В зависимости от решаемой задачи в качестве таких значений присваиваются:

- минимально возможное значение при обратном ранжировании;
- максимально возможное значение при прямом ранжировании.

Графы проектов тестового задания имеют суммарно 356 векторов путей, поэтому значениям недостающих скалярных компонент (табл. 2) присвоено значение 1000.

Реализация правила PR_{11} (гипервекторное ранжирование критериев загруженности проектов) определила проект 5 (табл. 1) в рассматриваемой ситуации наиболее загруженным проектом. С помощью правила

PR_{12} (многовекторное ранжирование критериев равномерности проектов) проект 5 включается в начальный календарный график, после чего осуществляется переход к следующему циклу схемы SGS_1 .

Таким образом, получены следующие результаты:

- для решения задач формирования календарных графиков мультипроектного планирования представлены две схемы генерации расписаний с использованием правил приоритетов, реализующих методы ранжирования теории принятия решений;
- показаны результаты гипервекторного ранжирования критериев загруженности проектов.

Список литературы

1. Гончаров Е.Н. Стохастический жадный алгоритм для задачи календарного планирования с ограниченными ресурсами // Дискретный анализ и исследование операций. – 2014. – Т. 21, № 3. – С. 11–24.
2. Клеванский Н.Н., Красников А.А. Формирование календарных графиков мультипроектного планирования // Образовательные ресурсы и технологии. – 2015. – № 3(11). – С. 39–60.
3. Клеванский Н.Н., Красников А.А. Алгоритмы формирования расписаний для сетевых структур заявок/работ // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 4–3. – С. 495–500.
4. Сафронов В.В. Основы системного анализа: методы многовекторной оптимизации и многовекторного ранжирования: монография. – Саратов: Научная книга, 2009. – 329 с.
5. Browning T.R., Yassine A.A. Resource-Constrained Multi-Project Scheduling: Priority Rule Performance Revisited // International Journal of Production Economics. – 2010. – № 126 (2). – P. 212–228.
6. Chakraborty R.K., Sarker R.A., Essam D.L. Resource Constrained Multi-project Scheduling: A Priority Rule Based Evolutionary Local Search Approach. In: Leu G., Singh H., Elsayed S. (eds) Intelligent and Evolutionary Systems. Proceedings in Adaptation, Learning and Optimization. – Springer, Cham. – 2017. – Vol 8. – P. 75–86.
7. Dalfard V.M., Ranjbar V. Multi-Projects Scheduling with Resource Constraints & Priority Rules by the Use of Simulated Annealing Algorithm // Tehnički vjesnik. – 2012. – № 19(3). – P. 493–499.
8. Kolish R., Sprecher A. PSPLIB – A project scheduling library // European Journal of Operational Research. – 1996. – Vol. 96. – P. 205–216.
9. Singh A. Resource Constrained Multi-Project Scheduling with Priority Rules & Analytic Hierarchy Process // Proc. of 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2013, Procedia Engineering. – 2014. – № 69. – P. 725–734.
10. Vanhoucke M. Integrated Project Management Sourcebook: A Technical Guide to Project Scheduling, Risk and Control. Springer. – 2016. – 286 p.