

8. Международный отраслевой стандарт «Внедрение системы управления безопасностью полетов в организациях-разработчиках, производственных организациях и организациях по техническому обслуживанию», SM-0001_издание А, Ассоциация аэрокосмической промышленности Америки (AIA), Ассоциация аэрокосмической промышленности Бразилии (AIA-B), Ассоциация аэрокосмической промышленности Канады (AIA-C), Европейская ассоциация аэрокосмической и оборонной промышленности (ASD), Ассоциация фирм производителей авиации общего назначения (GAMA), 2018. – 94 с.

Фуругян М.Г.

Планирование работ в системе автоматизации проектирования вычислительных систем реального времени

Аннотация: В работе рассматриваются некоторые задачи составления расписаний в системе автоматизации проектирования вычислительных системах реального времени. Представлены полиномиальные алгоритмы построения допустимого расписания с прерываниями в задаче с директивными интервалами для однопроцессорной системы с отношениями предшествования и для многопроцессорной системы без отношений предшествования со смещенным набором ресурсов. Даны оценки вычислительной сложности описанных алгоритмов.

Ключевые слова: система реального времени, допустимое расписание с прерываниями, директивные интервалы, возобновляемые и невозобновляемые ресурсы, потоковая сеть

Введение

Вычислительные системы реального времени имеют чрезвычайно широкую область применения. Они используются там, где на обработку информации накладываются временные ограничения. В некоторых случаях такие ограничения могут составлять доли секунды. Например, подобная ситуация возникает

при проведении испытаний летательных аппаратов (самолеты, ракеты, беспилотники), при работе ядерных реакторов, других сложных технических объектов. В ряде случаев на проведение вычислений может быть отведено более продолжительное время. В качестве примеров можно указать проведение строительных работ, обработку информации экологического и экономического характера. От того, насколько своевременно была проведена обработка поступившей информации зависит безопасность функционирования того или иного объекта.

В [1] приводится описание инструментальной системы автоматизации проектирования вычислительных систем реального времени для обработки циклически поступающей информации. На вход данной системы поступает программа пользователя, в которой указаны прикладные модули, с использованием которых должны проводиться вычисления, их входные и выходные параметры, периоды времени, с которыми они должны выполняться. На выходе инструментальной системы строится сетевая модель выполнения прикладных модулей. С использованием этой модели один из основных блоков инструментальной системы – генератор расписаний, строит расписание выполнения прикладных модулей, показывающее, в какие моменты времени этим модулям должны быть выделены те или иные ресурсы вычислительной системы.

Задачи планирования работ и построения расписаний широко освещены в литературе. Так, в [2-3] исследованы классические постановки теории расписаний и даны алгоритмы их решения. В этих публикациях рассмотрены однопроцессорные и многопроцессорные системы, задачи построения расписаний с прерываниями и переключениями и без прерываний, задачи с директивными сроками и задачи на быстроедействие. Большое внимание уделено оценке сложности задач и алгоритмов. В [4] вводится понятие расстояния между заданиями, на основе которого предложена методика нахождения приближенных решений в задачах минимизации максимального запаздывания. В [5] исследованы задачи построения расписаний для многоядерных систем реального времени. При этом используется методика построения временных диаграмм и аппарат обобщенных сетей Петри с остановкой таймера. В [6] рассмотрены задачи построения расписаний для комплексов работ с нефиксированными

параметрами, такими, как длительности выполнения заданий и используемые ими ресурсы. Методика основана на использовании метода ветвей и границ.

В указанных выше публикациях рассмотрены задачи с возобновляемыми ресурсами (процессоры, приборы, механизмы), т.е. такими ресурсами, которые могут использоваться многократно. В отличие от них, невозобновляемые ресурсы (электроэнергия, финансы, горюче-смазочные материалы) повторно использоваться не могут. Задачам распределения невозобновляемых ресурсов посвящены работы [7-8]. В [9] рассмотрены задачи построения расписаний в системах со смешанным набором ресурсов (возобновляемых и невозобновляемых).

В настоящей работе рассмотрены некоторые математические задачи, возникающие при проектировании вычислительных систем реального времени, и кратко описаны алгоритмы их решения. Даны оценки вычислительной сложности этих алгоритмов.

1. Построение однопроцессорного допустимого расписания с прерываниями в задаче с директивными сроками и отношениями предшествования

В [10] приведен алгоритм построения допустимого расписания с прерываниями в задаче с директивными сроками и независимыми работами. Пусть $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ – комплекс работ, который требуется выполнить. Каждая работа $w_i \in W$ характеризуется длительностью t_i и директивным интервалом $[b_i; f_i]$. При выполнении работ допускаются прерывания, которые по предположению не требуют временных затрат. Требуется выяснить, существует ли допустимое ли допустимое расписание (т.е. такое расписание, при котором каждая работа выполняется в своем директивном интервале), и построить его в случае положительного ответа. В [10] предложен следующий алгоритм решения этой задачи. Сначала работы упорядочиваются по не убыванию директивных сроков f_i . Работа с наименьшим директивным сроком имеет наивысший приоритет. Затем из числа активных работ (т.е. не завершенных работ, время готовности b_i у которых не превосходит текущего момента времени τ) выбирается работа с наивысшим приоритетом, и ей отдается процессор. Эта работа выполняется до тех пор, пока она не завершится, либо пока активной не станет

другая работа с более высоким приоритетом. Вычислительная сложность описанного алгоритма составляет $O(n \log n)$, а число прерываний составляет не более n .

Замечание. Как показано в [10], описанный алгоритм является точным в том смысле, что если он не находит допустимого расписания, то его не существует. Существенным здесь является то, что система однопроцессорная. Для многопроцессорной системы это не так, т.е. если алгоритм не находит допустимого расписания, то, на самом деле, оно может существовать. Однако, как показали многочисленные машинные эксперименты [11-12], число таких случаев не более 5 процентов от общего числа примеров. При этом время работы такого алгоритма в сотни и даже в тысячи раз меньше времени работы точного алгоритма, основанного на сведении исходной задачи к потоковой [2].

Рассмотрим задачу, в которой дополнительно предполагается, что на множестве работ W задано отношение частичного порядка в виде ориентированного графа без циклов $G = (W, A)$, где W – вершины, A – ориентированные дуги. Если дуга $(w_i, w_j) \in A$, то работа w_j может быть начата только после окончания работы w_i . Для построения допустимого расписания предлагается следующий алгоритм. Сначала выполняется процедура коррекции директивных интервалов.

Процедура коррекции директивных интервалов

Шаг 1. Разбить множество W на слои. Нулевой слой W_0 – это вершины, не имеющие непосредственных предшественников. Вершины слоя W_1 имеют непосредственных предшественников только из W_0 . Вершины k -го слоя W_k имеют непосредственных предшественников только из W_0, W_1, \dots, W_{k-1} .

Шаг 2. Провести коррекцию директивных интервалов работ, начиная с W_0 , далее W_1, W_2 , и т.д. по следующим формулам:

если $(w_i, w_j) \in A$, то положить $b_j = \max(b_i + t_i, b_j)$, $f_i = \max(f_i, f_j - t_j)$.

Отметим, что после такой коррекции директивных интервалов будет выполнено следующее условие: если $(w_i, w_j) \in A$, то $b_i < b_j$, $f_i < f_j$. Поэтому можно применить алгоритм [10]. Вычислительная сложность процедуры коррекции директивных интервалов составляет $O(n^2)$.

2. Построение многопроцессорного допустимого расписания с прерываниями в задаче с директивными сроками, смешанным набором ресурсов, без отношений предшествования

В отличие от постановки, рассмотренной в разделе 1, будем предполагать, что имеется m идентичных процессоров (возобновляемые ресурсы), работы являются независимыми и, кроме того, имеется K типов невозобновляемых ресурсов, объемы которых составляют $R_k, k = \overline{1, K}$. Не допускается параллельное выполнение одного задания несколькими процессорами и одновременное выполнение нескольких заданий одним процессором. Если процессор выполняет некоторое задание в течение интервала δ , то это обеспечивает объем работы. Если на выполнение некоторого задания выделено невозобновляемых ресурсов в количестве $r_k, k = \overline{1, K}$, то это обеспечивает объем работы $\sum_{k=1}^K r_k$. Для построения допустимого расписания предлагается следующий алгоритм.

Пусть $y_0 < y_1 < \dots < y_p$ – все различные величины $b_i, f_i, i = \overline{1, n}$, $I_l = [y_{l-1}; y_l], l = \overline{1, p}$, $\delta_l = y_l - y_{l-1}$. По аналогии с [2] построим потоковую сеть $H = (N, B)$, где N – узлы s, t, w_i, I_l, z_k, s – источник, t – сток, а B – дуги $(s, I_l), (s, z_k), (I_l, w_i), (z_k, w_i), (w_i, t), \overline{1, n}, l = \overline{1, p}, k = \overline{1, K}$. Дуги (I_l, w_i) вводятся в сеть H в том случае, если $I_l \subseteq [b_i; f_i]$. Пропускные способности U дуг сети H определяются следующим образом: $U(s, I_l) = m\delta_l$, $U(s, z_k) = R_k$, $U(I_l, w_i) = \delta_l$, $U(z_k, w_i) = r_k$, $U(w_i, t) = t_i$. В [9] показано, что допустимое расписание в рассматриваемой задаче существует в том и только том случае, когда в сети H существует поток, насыщающий все дуги (w_i, t) . В [9] показано, как по найденному потоку строится допустимое расписание и распределение невозобновляемого ресурса. Вычислительная сложность алгоритма составляет $O((n + K)^3)$.

Литература:

1. Теория и реализация систем реального времени / Сб. статей под ред. Антимонова С.Г. – М.: ВЦ АН СССР, 1984. – 104 с.
2. Танаев В.С., Гордон В.С., Шафранский Я.М. Теория расписаний. Одностадийные системы. – М.: Наука, 1984. – 384 с.

3. *Brucker P.* Scheduling Algorithms. – Heidelberg: Springer, 2007 – 371 p.
 4. *Лазарев А.А.* Теория расписаний. Методы и алгоритмы. – М.: ИПУ РАН, 2019. – 407 с.
 5. *Глоница А.Б.* Инструментальная система проверки выполнения ограничений реального времени для конфигураций модульных вычислительных систем // Вестник МГУ. Сер. 15. Вычислительная математика и кибернетика. – 2020. – № 3. – С. 16-29.
 6. *Горский М.А., Мищенко А.В., Нестерович Л.Г., Халиков М.А.* Некоторые модификации целочисленных оптимизационных задач с учетом неопределенности и риска // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2022. – № 5. – С. 106-117.
 7. *Филлипс Д., Гарсиа-Диас А.* Методы анализа сетей. – М.: Мир, 1984. – 496 с.
 8. *Давыдов Э.Г.* Исследование операций. – М.: Высшая школа, 1990. – 384 с.
 9. *Кононов Д.А., Фуругян М.Г.* Оптимизация использования неоднородного комплекса ресурсов при региональном планировании / Труды четырнадцатой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2021). – М.: ИПУ РАН, 2021. – С. 1231-1237.
 10. Теория расписаний и вычислительные машины. Сб. статей под ред. Коффмана Э.Г. – М.: Наука, 1984. – 335 с.
 11. *Гуз Д.С., Фуругян М.Г.* Планирование вычислений в многопроцессорных АСУ реального времени с ограничениями на память процессоров // Автоматика и телемеханика. – 2005. – №2. – С. 138-147.
 12. *Фуругян М.Г.* Некоторые алгоритмы анализа и синтеза многопроцессорных вычислительных систем реального времени // Программирование. – 2014. – №1. – С. 36-44.
-