



УДК 681.2.084

Н. В. Романцова, А. В. Царева

Составление расписания работы измерительной системы методом направленного поиска

Рассмотрены условия нахождения оптимального с точки зрения погрешности датирования расписания работы измерительной системы алгоритмом неполного перебора для сокращения времени подготовки измерительного эксперимента.

Измерительный эксперимент, измерительная система, расписание работы измерительной системы, функция штрафов, вычислительная сложность

Задача составления расписания в различных постановках считается NP -полной [1]. Тем не менее, практика показывает, что в ряде случаев алгоритмы направленного поиска (неполного перебора) находят оптимальное или близкое к оптимальному решение. Цель состоит в том, чтобы найти постановку задачи составления расписания работы измерительных модулей многоканальной информационно-измерительной системы (ИИС) (далее – задача), при которой в силу наложенных ограничений методом направленного поиска может быть найдено оптимальное или квазиоптимальное решение и рассчитано отклонение этого решения от оптимального. Сходство с данной задачей имеет задача составления учебного расписания [1], анализ которой проведен в [2]. Ранее рассматривались оптимизационные задачи для ИИС по критериям минимизации аппаратных затрат, освобождения такта синхронизации для обработки результатов и достижения максимальной статической точности [2]–[4].

В задачах оптимизации ИИС существуют различные способы построения матрицы потенциальных возможностей A . Их организация зависит от выбранного критерия эффективности. Для случаев критерия минимума аппаратных затрат [2]–[4] или освобождения такта синхронизации для предобработки результатов матрица представляла собой двумерный массив, по столбцам которого располагались сигналы, по строкам – измерительные каналы (ИК) или модули (ИМ). В рамках данной задачи, когда необходимо обеспе-

чить минимизацию погрешности датирования [5], по строкам матрицы предлагается разместить ИК (ИМ), а по столбцам – такты синхронизации измерительной части системы. Предполагается, что частота синхронизации процессора многократно превосходит частоту синхронизации измерительной части системы:

$$P = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{j=2}^J \left(p_{j-1, l} + p_{j, l} \frac{f_j}{f_{\max}} \right)}{l_{\max} \sum_{j=1}^J (j-1)}, \quad (1)$$

$$p_{j, l} = \begin{cases} 1, & \tau_{j, l} = \tau_{j-1, l}; \\ 0, & \tau_{j, l} \neq \tau_{j-1, l}, \end{cases} \quad p_{1, l} = 0,$$

где j – номер сигнала в задании на измерительный эксперимент S ; J – количество сигналов в задании; l_{\max} – количество запусков на измерение самого высокочастотного сигнала; f_{\max} – частота сигнала с наиболее жесткой привязкой ко времени; $\tau_{j, l}$ – признак, определяющий факт измерения j -го сигнала на такте синхронизации l .

Расписание работы измерительной системы составляется для ИИС, структура которой приведена на рис. 1, где обозначены: АИ – аналоговый вход; АК – аналоговый коммутатор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ВУ – вычислительное устройство; СИ – системный интерфейс; ВИ – внешний интерфейс с подсистемой верхнего уровня или оператором.

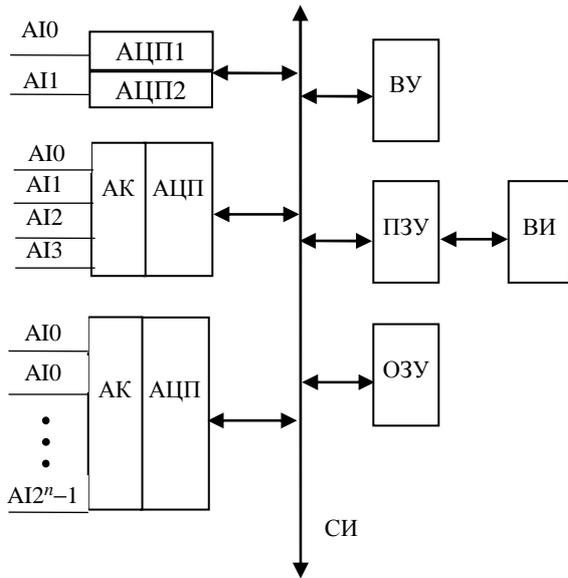


Рис. 1

Множество возможных решений R образовано элементами b , которые представляют собой одномерные битовые массивы, образованные множеством занятых и свободных тактов синхронизации в расписании работы одного измерительного канала. Предположим, что задача в принципе разрешима, т. е. количество занятых тактов в массивах $b_{11} \dots b_{mk}$ не превышает суммы

$$N_t = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k L,$$

где m – количество модулей в итоговой конфигурации системы; k – количество каналов в каждом модуле.

Элементом множества занятости является битовый массив b_S размерности L , элементы которого принимают значение «0» в том случае, если на данном такте синхронизации системы модуль i по каналу j на измерение не запускается, и «1» – если запускается. При f сигнала, равной максимальной частоте сигналов из множества S , канал и модуль заняты полностью, количество единиц в массиве равно L (рис. 2).

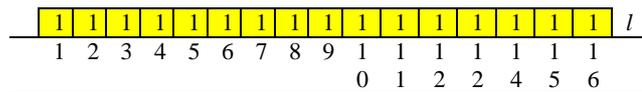


Рис. 2

При f сигнала, вдвое меньшей максимальной частоты сигналов из множества S , канал имеет 50 % свободных тактов ($L/2$) (рис. 3).

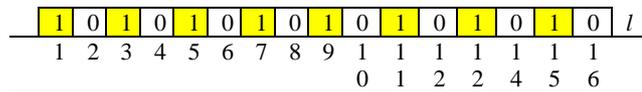


Рис. 3

И так далее, до сигнала в множестве S с наименьшей частотой. В качестве примера приведем фрагмент таблицы занятости тактов (рис. 4).

Предположим, что в случае, если частоты всех сигналов, количество сигналов с одинаковой частотой и количество входов измерительных модулей кратны степени 2, при условии упорядочения задания по частоте сигналов, а множества

Модуль/ канал	Номер такта															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
M1/K0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
M2/K0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
M2/K1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
M3/K0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
M3/K1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
M3/K2	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
M3/K3	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
M4/K0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
M4/K1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
M4/K2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
M4/K3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
M4/K4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
M4/K5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
M4/K6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
M4/K7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1

Рис. 4

возможных решений по возрастанию количества входов модулей, алгоритм направленного поиска находит решение, оптимальное с точки зрения критерия (1) за полиномиальное время.

Для того чтобы алгоритм направленного поиска нашел оптимальное решение, необходимо, чтобы пара множеств A и R образовывали матроид [6].

Рассмотрим семейство подмножеств $R \subseteq A$ и функцию, вычисляющую штраф за увеличение погрешности датирования, – нормированная функция штрафов $P(1)$ с коэффициентом уменьшения штрафа за задержку измерения сигнала с меньшей частотой опроса [6], [7]. Очевидно, что для минимизации значения данного критерия в первую очередь должны быть введены в расписание наиболее высокочастотные сигналы. Для того чтобы не исчерпать аппаратный ресурс (множество M), следует выдвинуть требование упорядочения модулей по возрастанию количества входов. Таким образом, высокочастотные сигналы, которые «расходуют измерительный ресурс», занимая все время работы модуля, будут назначены на модули с меньшим количеством входов и для сигналов с количеством занятых тактов $L/2, L/4, L/8, \dots$ останутся ИМ с большим количеством входов. Собственно говоря, это не противоречит «физическим принципам»: наиболее быстродействующие ИМ, как правило, 1–2-канальные, с аппаратным дублированием АЦП. На них следует назначать сигналы с $f = F_{\max}$ и $f = F_{\max}/2$.

Сигналы множества S упорядочиваются по уменьшению частоты опроса (уменьшению количества запусков за $T_{\text{и}}$). Действительно, аппаратный ресурс в виде большого количества мультиплексируемых каналов удастся использовать только при измерении сигналов с $f \ll f_{\max}$.

Введем следующие обозначения [3]: $T_{\text{и}} = 1/f_{\min}$, где $T_{\text{и}}$ – период эксперимента; f_{\min} – минимальная частота сигнала из множества S (в случае постоянного сигнала частота его опроса принимается f_{\min} и он измеряется один раз за период эксперимента); $T_{\min} = 1/f_{\max}$, где f_{\max} – максимальная частота сигнала из множества S ; $N_{\text{и}} = T_{\text{и}}/T_{\min}$ – количество тактов в эксперименте. Для того чтобы выполнить требование кратности $N_{\text{и}}$ степени «2», возможно, следует завязать f_{\max} по сравнению с $f_{\max 3}$ из задания на измерительный эксперимент. В случае если $f_{j 3} > f_{\max}/2^n$, f_j в множестве S должна быть завязана до ближайшей большей частоты, кратной степени 2:

$$f_j = f_{\max}/2^{n-1}.$$

Таким образом, модифицируются в сторону увеличения частоты опроса из задания на измерительный эксперимент и строится множество S .

Обозначим сочетанием td дискретную единицу времени эксперимента, а tb – номер начального такта серии измерений. При минимальной частоте опроса $tb \in \{1 \dots N_{\text{и}}\}$. Множество занятых тактов (единиц в битовом массиве b_{mk}^1). При максимальной частоте опроса количество единиц в битовом массиве занятости канала n^1 (и модуля) равно $N_{\text{и}}$. При отличии частоты от максимальной $n_j^1 = (N_{\text{и}} f_j)/f_{\max}$. Номер начального такта в этом случае может принимать значения $tb \in \{1 \dots td_j\}$. $td_j = f_{\max}/f_j$. Номера последующих тактов примут значения $tb + l \cdot td_j$, где l – номер измерения j -го сигнала, $l \in \{0 \dots n_j^1 - 1\}$, т. е. для сигнала с частотой f_j в два раза меньше f_{\max} это будет последовательность тактов 1, 3, 5, 7, ... или 2, 4, 6, 8, Битовый массив занятости канала k модуля m при измерении сигнала j заполняется следующим образом:

$$b_{mkj}^1 = \bigcup_{l=0}^{n_j^1-1} \text{sign}(tb + l \cdot td_j)$$

или

$$b_{mkj}^1 = \bigcup_{l=0}^{n_j^1-1} \text{sign}\left(tb + l \cdot \frac{f_{\max}}{f_j}\right).$$

Битовый массив занятости модуля m образуется объединением множеств занятых тактов при измерении сигналов, назначенных на этот модуль:

$$b_m^1 = \bigcup_{j \in m} \left(\bigcup_{l=0}^{n_j^1-1} \text{sign}\left(tb_j + l \cdot \frac{f_{\max}}{f_j}\right) \right).$$

Для того чтобы доказать возможность применения жадного алгоритма, необходимо проверить выполнение следующих правил [6]:

M1: $\emptyset \in R$ и если $C \in R$ и $D \subseteq C$, то $D \in R$;

M2: $\forall C, D \in R$, таких что $|D| = |C| + 1$, \exists элемент $b \in D \setminus C$, такой что $C \cup \{b\} \in R$.

Правило M1 введено, чтобы исключить случай $R = \emptyset$. Для того чтобы выполнялось правило M2, необходимо выполнение следующих условий:

У1: модуль i типа m имеет K входов, причем $K = 2^n$;

У2: число сигналов g из S , имеющих $f = f_{\max}/K$, должно быть меньше или равно $n \times K$, причем ко-

личество доступных модулей данного типа должно быть не менее $[g/(n \cdot K)]$;

У3: множество S упорядочивается по невозрастающую частот опроса f_j ;

У4: строки матрицы A упорядочиваются по убыванию количества входов ИМ.

Выполнение перечисленных условий обеспечивает выполнение правила М2, что достаточно для того, чтобы A и R образовали матроид и жадный алгоритм [6] нашел оптимальное решение. Фактически, выполнение этих требований обеспечивает достаточное количество входов системы для измерения всех сигналов из S , а также неухудшение пространства поиска при расходовании аппаратного ресурса, т. е. назначение сигнала на канал k модуля m не снижает потенциальных возможностей A . Жадный алгоритм находит оптимальное решение, если множество S содержит только сигналы без жесткой привязки ко времени ($\tau = 0$ [3]). Наличие в множестве S сигналов с $\tau \neq 0$, т. е. таких, которые распределяются по ИК раньше, чем сигналы, запуск на измерение которых может быть сдвинут на $1...tb$ тактов, приводит к отклонению решения от оптимального. Оценка сверху этого отклонения вычисляется следующим образом:

$$P = \frac{\sum_{j=1}^J \left(\frac{N_{И} f_j^2}{f_{\max}^2} p_j \right)}{l_{\max} \sum_{j=1}^J (j-1)}, \quad (2)$$

$$p_j = \begin{cases} 1, & \tau_j \neq 0; \\ 0, & \tau_j = 0. \end{cases}$$

В выражении (2) вторая степень при значениях частот получилась из-за того, что учитывается количество измерений за $T_{И}$ и снижение штрафа за задержку запуска низкочастотных сигналов.

Таким образом, предложен метод решения задачи составления расписания работы измерительных модулей многоканальной ИИС, доказано, что при этом алгоритмом направленного поиска [7] находится оптимальное или квазиоптимальное решение и рассчитано отклонение этого решения от оптимального.

Результаты были получены при выполнении научно-исследовательской работы ПЧС-1 «Разработка теоретических основ моделирования динамики развития технических, природных и природно-техногенных чрезвычайных ситуаций», проводимой в СПбГЭТУ (регистр. № 7.1111.2011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. М.: Мир, 1982. 466 с.
2. Королев П. Г. Применение задач теории расписаний для проектирования измерительных систем // Изв. ГЭТУ. СПб., 1994. Вып. 469. С. 36–40.
3. Алексеев В. В., Королев П. Г. Оптимизация режимов и составление расписания работы модулей измерительной системы / СПбГЭТУ. 1993. 25 с. Деп. в Информприбор 10.08.93, № 5132-пр.93.
4. Основы структурного проектирования измерительно-вычислительных систем / В. В. Алексеев, П. Г. Королев, Н. С. Овчинников, Е. А. Чернявский. СПб.: Энергоатомиздат, 1999. 110 с.
5. Задача составления расписания многоканальных средств измерений с автоматической коррекцией. Критерии эффективности / В. В. Алексеев, А. М. Боронахин, Е. Ю. Закемовская, П. Г. Королёв, Н. В. Романцова // Приборы. 2011. № 7. С. 45–49.
6. Липский В. Комбинаторика для программистов. М.: Мир, 1988. 213 с.
7. Алгоритм неполного перебора составления расписания работы измерительной системы / Е. О. Грубо, П. Г. Королев, Н. В. Романцова, А. В. Утушкина // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2013. Вып. 2. С. 66–71.

N. V. Romantsova, A. V. Tsareva

TIMETABLE ASSEMBLING FOR MEASURING SYSTEMS BY METHOD DIRECTED SEARCH.

The conditions for finding the optimal from the point of view of the dating error of the measurement system schedules in complete enumeration algorithm to reduce the preparation time measuring experiment.

Measuring experiment, measuring system, timetable measuring system, penalty function, the computational complexit