© 2012 г. А.Б. ШУБИН, ст.н.с
Е.Г. АЛЕКСАНДРОВ, вед.инж.
Г.Г. ХАРЧЕНКОВ, н.с.
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

ЗАДАЧИ РАСЧЁТА УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ ТРЕБУЮЩИЕ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Дается описание нескольких вычислительных алгоритмов, которые требуют выполнения большого объема операций. Эти алгоритмы позволяют существенно улучшить управление сложными объектами в режиме текущего времени, если ускорить их реализацию за счёт распараллеливания вычислительных процедур.

PROBLEMS O F CAL CULATION CONTROL OF O BJECTS I N RE AL TIME DE MANDING PARALLEL CALCULATIONS / A.B. Shubin, E.G. Alexsandrov, G.G. Harchenkov (E-mail: ashoo@ipu.ru, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Profsoyuznaya 65, Moscow 117342, Russia).
The description of several computing algorithms which demand performance of great volume of operations is given. These algorithms allow to improve essentially control of difficult objects in a mode of current time if to accelerate their realisation for the account parallel computing procedures.

При моделировании различных задач на ЦВМ часто не возникает особой необходимости в скорости вычислений. Другое дело при решении задач управления реальными объектами при помощи ЦВМ. Здесь время между получением информации с реального объекта и вычислением управляющего воздействия может оказаться столь значительным, что делает невозможным применение теоретически эффективных алгоритмов управления.

Вычислительная структура для выполнения параллельных расчетов должна ориентироваться на особенности конкретных задач, решение которых встречает существенные трудности при использовании обычных ЭВМ. Рассмотрим некоторые из этих задач.

Среди наиболее часто встречающихся вычислительных процедур, требующих сокращения времени, следует отметить алгоритмы поиска экстремума. Распараллеливание вычислений, связанных с оценкой градиента целевой функции могло бы существенно повысить скорость поиска экстремума. Если целевая функция многоэкстремальная, то возникает существенное увеличение времени для определения аргументов, от которых зависит функция, и которые соответствуют истинному экстремуму. Иногда вычисление целевой функции (критерия) столь громоздко, что целесообразно разделять вычисление критерия и вычисление оптимальных аргументов.

В нашей практике мы столкнулись с этой трудностью при решении задачи разложения сигнала, состоящего из суммы гармоник неизвестной частоты, амплитуды и фазы. Причем задачу надо было решать на короткой реализации сигнала, соизмеримой с периодом наименьшей частоты, и количеством гармоник 5-10. Подобная задача встречается при активном гашении колебаний гибких конструкций, например, сложных космических станций (КС), когда измеряется суммарное колебание $S(t)$ – колебание основного корпуса, на котором крепятся гибкие элементы и чувствительные датчики [1].

Управляющее воздействие для уменьшения скорости или ориентации космического аппарата вызывают колебания гибких элементов этого аппарата, таких как солнечные батареи, различные антенны и приборы, вынесенные за пределы аппарата. В целях экономии веса в условиях невесомости эти элементы и их крепление обладают большой гибкостью и малым затуханием при возмущающих воздействиях. Дело осложняется тем, что динамические характеристики, определенные на земле в присутствии атмосферы, могут сильно отличаться от характеристик в условиях космического пространства. Часто слабо затухающие колебания КС весьма нежелательны и могут быть погашены управлением, но для эффективного управления необходимо вычислить амплитуду, фазу и частоту колебаний отдельных элементов [2].

Задача заключается в минимизации критерия

$$\min_{a_i, b_i, \omega_i} Q = \int_{-T}^{0} \left[S(t) - \sum_{i=1}^{n} (a_i \sin(\omega_i t) + b_i \cos(\omega_i t)) \right]^2 dt, \text{ где } -T < t < 0,$$

T - интервал наблюдения.

Общая схема вычисления параметров отдельных гармоник приведена на рис.1. Как показали вычислительные эксперименты на ЦВМ, операция минимизации только по одной частоте приводит к частным экстремумам, и эту операцию приходится многократно повторять после минимизации по второй частоте. Этого удается избежать при минимизации сразу по двум частотам. Если гармонических колебаний больше двух, то повторяется аналогичная схема вычислений, но в качестве входной функции берется $S_2(t) = q_1(t)$.

Как показало моделирование на ЦВМ, даже при $n = 5$, число частных экстремумов может достигать сотен и тысяч и приходится применять методы поиска экстремума, включающий сканирующий многократный перебор вариантов.

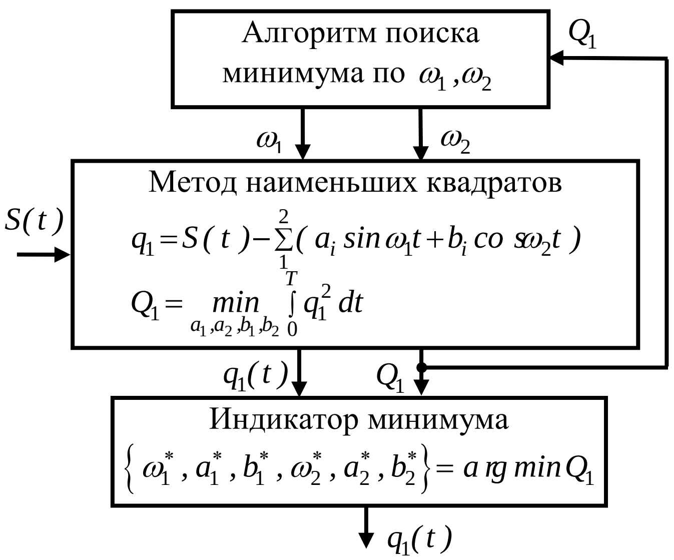

Рис. 1

В Институте проблем управления разработан принципиально новый универсальный Алгоритм Программного Управления (АПУ) [3]. Алгоритм рассчитывает полную программу управления (функцию значения управления на всем интервале управления), переводящей объект из начальной точки в заданную конечную точку фазового пространства координат. Алгоритм не требует предварительного анализа дифференциального уравнения (ДУ), описывающего поведение объекта, и может применяться для линейных и нелинейных ДУ, ДУ с переменными коэффициентами, а также неустойчивых объектов.

АПУ как бы перекладывает все сложности, связанные с расчётом управления, на вычислительную технику, роль которой существенно возрастает вместе со сложностью ДУ.

Таким образом, имеем ДУ:

$$\begin{aligned}
&x^{(n)} + D(x^{(n+1)},...,x^{(1)},x) = u(t)\\
&\dot{x}^{(n-1)} = x^{(n)}\\
&\dot{x}^{(n-2)} = x^{(n)}\\
&..................\\
&\dot{x} = x^{(1)},
\end{aligned}$$

где D – функция, описывающая объект управления.

Удобно обозначить $x_i = x^{(i-1)}, i=\overline{1,n}$. Тогда задача управления состоит в определении функции $u(t)$, $0 \le t \le T$ такой, что при начальных условиях $x_i(0) = x_i^0$ в конце процесса управления $x_i(T) = x_i^*, i=\overline{1,n}$, где x_i^* заданные конечные условия, при надлежащие к области достижимости.

Суть алгоритма заключается в следующем. В случае одного управляющего воздействия (правая часть ДУ) управляющая функция $u(t)$ определяется как кусочно-постоянная функция с n интервалами постоянства, где n – порядок ДУ. Любая такая функция может быть описана с помощью n определителей интервалов управления s_k. Таким образом, на k – ом интервале времени управления $u(\tau_k) = sign(s_k)$, при $t_{k-1} < \tau_k \le t_k$, $t_k - t_{k-1} = |s_k|$, $k=\overline{1,n}$.

При таких обозначениях $T = \sum_{i=1}^{n} |S_i|$.

Для определения s_k используется простая итеративная быстро сходящаяся процедура [4,5]. Пусть на m – ой итерации имеем некоторые значения s_k^m, $k=\overline{1,n}$. По вышеуказанному способу сформируем $u^m(t)$, подставим это управление в ДУ, вычислим решение и получим значение координат в конце решения $x_i(T^m)$. Поскольку заданная точка в конце решения x_i^*, можно вычислить ошибку $d_i^m = x_i^* - x_i(T^m)$. По этой ошибке произведём коррекцию s_i^m, т.е. управляющей функции: $s_i^{m+1} = s_i^m + \dfrac{a_i^m d_i^m}{|f_i^m|}$, $i=\overline{1,n}$. Здесь $a_i^m(d_{i+1}^m,...,d_n^m)$ – коэффициенты, определяющие порядок подстройки определителей интервалов, f_i^m – коэффициенты чувствительности координат к управлению, зависящие от $u^m(t)$. Определение их требуется на каждой итерации, поэтому параллельное их вычисление существенно уменьшит общее время определения управляющей функции.

Такой алгоритм подстройки управляющей функции обеспечивает быструю сходимость критерия $D^m = \sum_{i=1}^{n} \left| d_i^m \right|$ к требуемой малой величине.

Пример определения управления для ДУ пятого порядка приведен на рис. 2. На рисунке изображены найденная управляющая функция и изменение фазовых координат ДУ по времени.

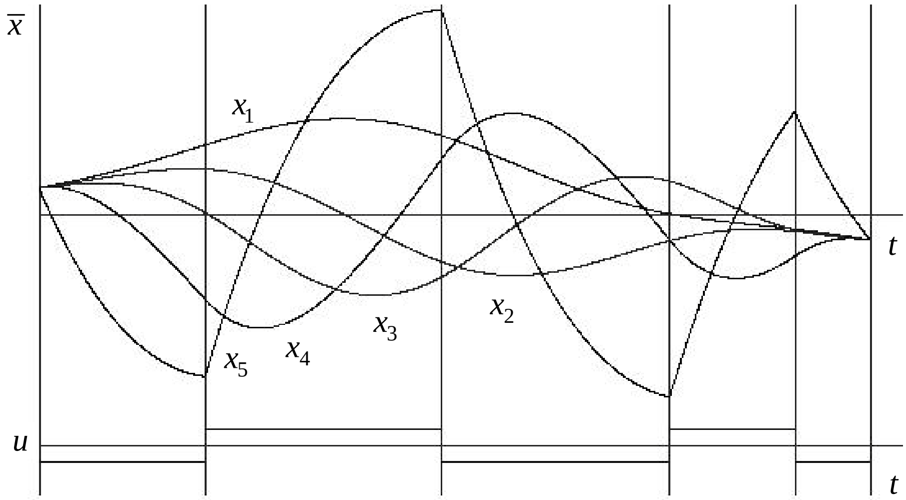

Рис. 2

Если эксперименты с алгоритмом проводятся на модели объекта, реализованной на ЦВМ, никаких проблем не возникает. При использовании АПУ на реальном объекте могут возникнуть трудности, вызванные запаздыванием определения управления. В этом случае целесообразно максимальное распараллеливание вычислений [6].

Существенные вычислительные трудности возникают при расчёте трехпозиционного управления, когда управление принимает значения $-1, 0, +1$. В этом случае весьма целесообразно распараллеливание вычислительной процедуры. Каждый интервал управления состоит из двух частей: c_k и s_k, $c_k \geq 0$, $s_i -$ аналогично выше описанному определению. Здесь $t_{k-1} \leq \tau < t_{k-1} + c_k$, $c_k \geq 0$, $u(\tau) = 0$, а при $t_{k-1} + c_k < \tau \leq t_k$, $t_k = t_{k-1} + c_k + |s_k|$ $u(\tau) = sign(s_k)$,.

Заметим, что в этом случае возникает неоднозначность управления. Если $c_k < M$, $k = \overline{1,n}$, то любому набору c_k можно найти набор s_k, обеспечивающий приход в заданную конечную точку. Появляется возможность за счёт выбора c_k дополнительно оптимизировать какой-то критерий. Например, если стоимость управления в единицу времени Z_1, а потери на траектории Z_0, то наивыгоднейшая стратегия управления соответствует минимизации критерия: $Q = \min_{\overline{c}} (Z_1 \sum_1^n |s_i| + Z_0 (\sum_1^n |s_i| + \sum_1^n c_i))$. Необходимо учитывать, что набор аргументов c_i влияет на значения определителей интервалов s_i. При этом возникает довольно громоздкая вычислительная структура, однако она позволяет существенно экономить ресурс управления.

Для управления ДУ вида $x^{(8)} = u(t)$, т.е. восемь интеграторов, соединенных последовательно, весьма целесообразно введение участков управления с нулевым значением управляющего воздействия. Для иллюстрации этого факта на рис. 3 даны графики изменения фазовых координат и управления для двухпозиционного и трёхпозиционного управления с минимизацией вышеописанного критерия. Распараллеливание вычислительных процедур при практической реализации подобных задач может сыграть решающую роль в пользу таких систем управления.

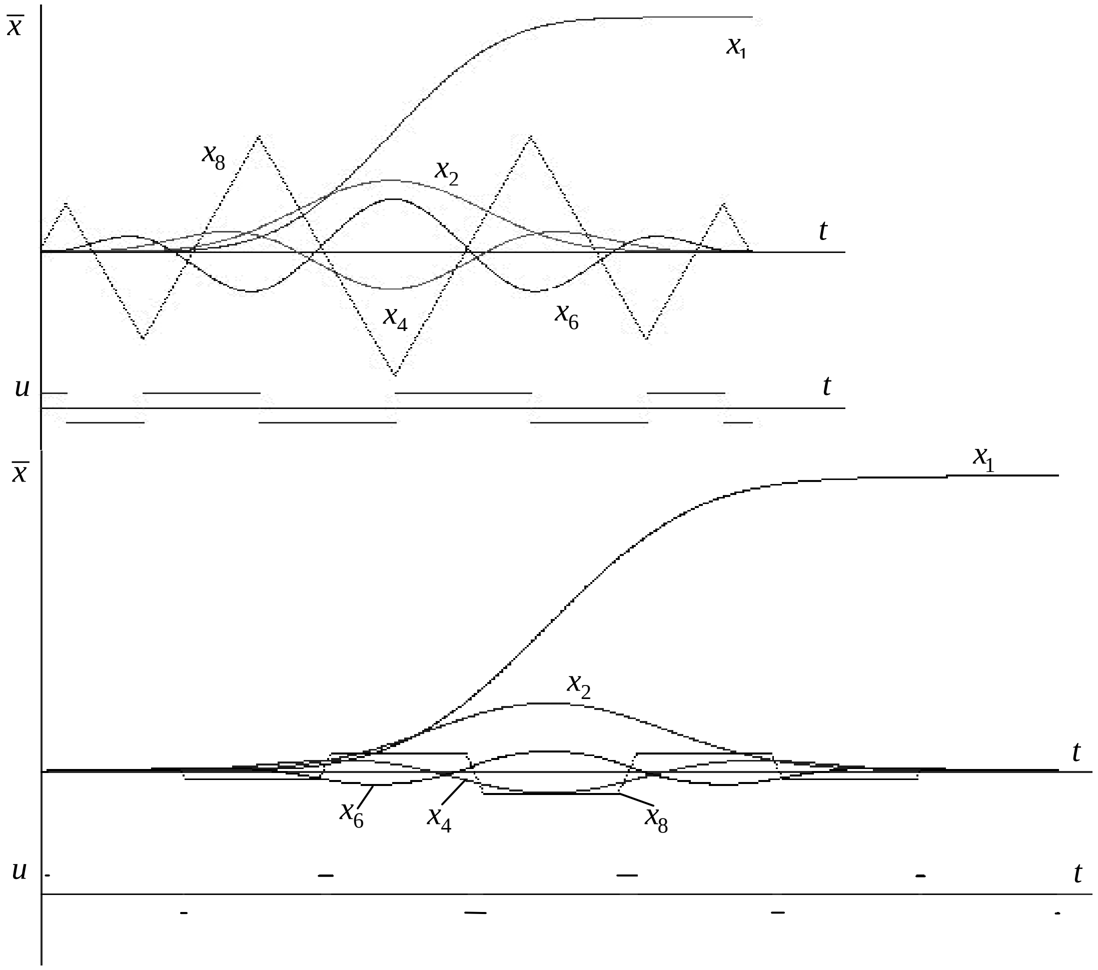

Рис. 3

Любые эффективные алгоритмы управления требуют точного знания параметров, определяющих поведение объекта. Поэтому особое значение получают алгоритмы идентификации параметров объекта и возмущений, поступающих на объект. Часто эти факторы изменяются со значительной скоростью, отследить которую возможно при использовании сложных алгоритмов, использующих в том числе и параллельные вычисления.

Разработка конкретных приёмов распараллеливания сложных вычислительных процедур может оказаться чрезвычайно актуальной, когда от разговоров о модернизации технологий производства общество перейдёт к решению практических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1.Рутковский В.Ю., Суханов В.М., Модель деформируемого космического аппарата и общие характеристики динамики конструкции.// Известия РАН. Техническая кибернетика. 1994. №1.

2.Харченков Г.Г., Шубин А.Б., Вычислительный метод определения частот и амплитуд гармоник сигнала по наблюдению короткой реализации. // Труды межд.конф. Идентификация систем и задачи управления. SICPRO 2000, М., сент. 2000 г., С. 112.

3.Шубин А.Б., Построение управления, приводящего объект в заданную точку (двухточечное программное управление). // Измерения, контроль, автоматизация. Научно-техн. сборник обзоров. М., 1989, вып.3.

4.Шубин А.В., Александров Е.Г., Харченков Г.Г., Алгоритмы программного управления для сложных динамических объектов. // XXXVI Всесоюзная конференция "Управление движением корабля и специальными аппаратами" г. Северодвинск., М.: ИПУ РАН, 2009, с. 39-50.

5. Шубин А.Б., Александров Е.Г., Харченков Г.Г., Вычисление программ управления, приводящих в заданное конечное состояние. // Тезисы докладов на XI Международной конференции “Устойчивость и колебания нелинейных систем управления”, 1-4 июня, 2010, М.: ИПУ РАН, С.439-439.

6.Шубин А.Б., Александров Е.Г., Харченков Г.Г., Близкое к оптимальному управление траекторией движения объекта.// Проблемы управления, М.,2010,№3, С. 73-78.