

СЕГМЕНТИРОВАННОЕ ХРАНЕНИЕ ДАННЫХ СЕТОЧНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Д.А. Назаров

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН

Россия, 690041, Владивосток, Радио 5

E-mail: nazardim@iacp.dvo.ru

Ключевые слова: проектирование, параметрический синтез, область работоспособности, структуры данных

Построение областей работоспособности является одним из этапов решения задачи выбора оптимальных значений параметров при проектировании сложных систем. В работе рассматривается способ построения таких областей на основе их представления множеством элементарных гиперпараллелепипедов. Описание такого представления требует больших объемов данных. В данной работе предлагаются алгоритмические средства использования файловых хранилищ данных.

Введение

Для решения задачи выбора оптимальных в определенном смысле значений параметров элементов (внутренних параметров) проектируемой технической системы часто возникает потребность в информации об области в пространстве параметров, в каждой точке которой выходные показатели качества функционирования этой системы соответствуют заданным требованиям. Эта область называется *областью работоспособности* (ОР).

Для большинства реальных систем зависимость выходных характеристик от значений внутренних параметров описать в аналитическом виде практически невозможно [1, 2], поэтому она задается алгоритмически и в общем случае представляет собой «черный ящик». Одним из методов исследования пространства внутренних параметров такой модели является многовариантный анализ, в основе которого лежит перебор значений параметров, вычисление показателей выходных характеристик с целью выбора наилучших в том или ином смысле значений параметров. Использование многовариантного анализа в качестве основы метода построения ОР требовательно к вычислительным ресурсам и ресурсам устройств хранения данных ввиду большого объема данных для обработки. Решение задачи построения ОР на основе многовариантного анализа связано с разработкой специальных способов наиболее компактного хранения данных и алгоритмов эффективной их обработки. В основе этих решений лежат основные положения задачи выбора оптимальных значений параметров и вытекающей из нее задачи построения ОР, которые кратко излагаются далее.

1. Задача параметрического синтеза

Задача *параметрического синтеза* (ПС) технических устройств и систем [1] состоит в выборе номинальных значений внутренних параметров исследуемой системы

$$\mathbf{x}_{nom} = (x_{1nom}, x_{2nom}, \dots, x_{n_{nom}}),$$

которые обеспечивают максимум вероятности нахождения параметров элементов в области их допустимых значений при наличии параметрических возмущений:

$$\mathbf{x}_{nom} = \arg \max P\{\mathbf{X}(\mathbf{x}_{nom}, t) \in \mathbb{D}_x, \forall t \in [0, T]\}, \quad (1)$$

где $\mathbf{X}(\mathbf{x}_{nom}, t)$ - случайный процесс изменения параметров, $\mathbb{D}_x$ - область допустимой вариации значений параметров элементов - *область работоспособности* (ОР), T - заданное время эксплуатации устройства.

Область работоспособности в пространстве внутренних параметров определяется *условиями работоспособности* (УР), которые задаются в виде допусков на выходные параметры системы $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)$:

$$\mathbf{y}_{min} \leq \mathbf{y}(\mathbf{x}(t)) \leq \mathbf{y}_{max}, \quad (2)$$

где $\mathbf{y}(\mathbf{x}(t))$ - математическая модель исследуемой системы, определяющая зависимость выходных параметров от входных в виде непрерывных зависимостей. Как уже было сказано, для большинства сложных систем описание модели в аналитическом виде практически невозможно, поэтому наиболее распространенной является его алгоритмическая форма. Учитывая сказанное, ОР в пространстве значений внутренних параметров исследуемой системы определяется как множество точек этого пространства, в которых выполняется УР (2):

$$\mathbb{D}_x = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \mid \mathbf{y}_{min} \leq \mathbf{y}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{y}_{max}\}, \quad (3)$$

Часто характеристики области $\mathbb{D}_x$ неизвестны, поэтому в выражении (1) проверка $\mathbf{X}(\mathbf{x}_{nom}, t) \in \mathbb{D}_x$ заменяется на УР: $\mathbf{y}_{min} \leq \mathbf{y}(\mathbf{X}(\mathbf{x}_{nom}, t)) \leq \mathbf{y}_{max}$, проверка которых требует значительно больше вычислительных затрат ввиду необходимости моделирования системы для каждого набора внутренних параметров. Наличие данных о конфигурации области $\mathbb{D}_x$ позволяет осуществлять назначение допусков на внутренние параметры, выбирать номинальные значения этих параметров с учетом влияния различных факторов и их оптимизацией с использованием как стохастических, так и детерминированных критериев.

Задача построения ОР состоит в выборе способа описания фигуры, аппроксимирующей неизвестную область $\mathbb{D}_x$ с помощью фигур известной конфигурации.

2. Сеточное представление ОР

Известные способы описания ОР основаны на ее приближении фигурами, такими как вписанные или описанные гиперпараллелепипеды, эллипсоиды, а

также различные их комбинации и объединения. В данной работе используется метод приближения неизвестной фигуры множеством непересекающихся гиперпараллелепипедов, которые будем называть *элементарными параллелепипедами*. Вершины этих параллелепипедов задаются узлами регулярной сетки, поэтому представление ОР с помощью элементарных параллелепипедов в данной работе называется *сеточным представлением ОР* (СПОР). Методологической основой такого представления является *метод матричных испытаний* (ММИ) [3], который изначально был разработан для физического моделирования процесса изменения значений параметров схемных элементов, однако его реализация с привлечением ЭВМ широкого распространения не получила из-за проблемы, связанной с вычислительной сложностью выполнения многовариантного анализа.

Согласно ММИ, заданный диапазон возможного изменения каждого параметра

$$a_i^x \leq x_i \leq b_i^x, \quad (4)$$

разбивается эквидистантно на q_i отрезков - квантов $k_i = 1, 2, \dots, q_i$, $i = 1, 2, \dots, n$, в центре каждого из которых выбирается «точка-представитель»:

$$c_i^{k_i} = \frac{a_i^{k_i} + b_i^{k_i}}{2}, \quad (5)$$

где $a_i^{k_i}, b_i^{k_i}$ - соответственно левая и правая границы k_i -го кванта i -го параметра.

Диапазоны (4) образуют n -мерный гиперпараллелепипед B_x в декартовой системе координат значений внутренних параметров. В качестве этого параллелепипеда может выступать гиперпараллелепипед допусков B_d , образованный допустимыми значениями каждого параметра в отдельности, либо описанным гиперпараллелепипедом B_o , ограничивающий область допустимых значений совместной вариации внутренних параметров.

В результате квантования B_x образуется сетка, узлы которой являются вершинами элементарных параллелепипедов. Множество точек-представителей с координатами (5) всех этих параллелепипедов задают множество несовместных ситуаций дискретного изменения значений параметров в области, ограниченной B_x . В каждой такой точке-представителе вычисляются выходные значения параметров и проверяются УР (2). Предполагается, что результаты расчета значений выходных параметров и проверки УР в точке представителя элементарного параллелепипеда распространяются на все его точки. Таким образом, множество элементарных параллелепипедов $\mathbb{B}_g$ разбивается на два непересекающихся подмножества $\mathbb{B}_x^g = \mathbb{B}_x^+ \cup \mathbb{B}_x^-$, при этом $\mathbb{B}_x^+ \cap \mathbb{B}_x^- = \emptyset$, где $\mathbb{B}_x^+$ является представлением искомой ОР $\mathbb{D}_x$, которое будем называть *сеточным представлением области работоспособности* (СПОР). Элементарные параллелепипеды из множества $\mathbb{B}_x^g$ будем называть *элементами* сетки.

Для задания СПОР используются наборы данных двух типов:

- Геометрические параметры сетки;
- Данные о принадлежности каждого элемента сетки подмножеству $\mathbb{B}_x^+$ или $\mathbb{B}_x^-$;

Геометрические параметры сетки позволяют вычислить координаты границ любого ее элемента и координаты его точки-представителя, по набору индексов $(k_1, k_2, \dots, k_n)$, а также индексы элемента сетки в котором находится некоторая точка с заданными координатами (внутри гиперпараллелепипеда B_x) $\mathbf{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)^T$. Геометрические параметры сетки задаются следующим набором данных:

- Размерность n пространства внутренних параметров;
- Диапазон (4) допустимых значений для каждого параметра;
- Количество квантов в разбиении диапазона значений каждого параметра;

Принадлежность элемента сетки с индексами $(k_1, k_2, \dots, k_n)$ множеству $\mathbb{B}_x^+$ или $\mathbb{B}_x^-$ задается массивом индикаторов (МИ) элементов сетки $S[R] = (s_1, s_2, \dots, s_R)$, где R - количество элементов сетки:

$$R = \prod_{i=1}^n q_i, \quad (6)$$

а элементы МИ принимают значения $s_p \in \{0, 1\}$. Элемент s_p МИ далее будет обозначаться как $S[p]$. Значение индикатора $S[p] = 0$ означает принадлежность соответствующего элемента сетки подмножеству $\mathbb{B}_x^-$, а значение $S[p] = 1$ означает принадлежность соответствующего ему элемента сетки подмножеству $\mathbb{B}_x^+$. О взаимнооднозначном соответствии каждого элемента сетки, заданного с помощью n индексов $(k_1, k_2, \dots, k_n)$, и элемента $S[p]$ МИ подробно описано в работе [4].

Модель описанного выше представления ОР задается четверкой G_R :

$$G_R = (n, \mathbb{B}, \mathbb{Q}, \mathbb{S}), \quad (7)$$

где n - размерность пространства, $\mathbb{B} = \{(a_i^x, b_i^x) \mid \forall i = 1, 2, \dots, n\}$ - множество пар, задающих ограничения (4) по всем параметрам (границы гиперпараллелепипеда B_x), $\mathbb{Q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ - набор показателей количества квантов для каждого параметра, а $\mathbb{S} = (s_1, s_2, \dots, s_R)$ - массив индикаторов всех элементов сетки.

3. Хранение данных СПОР

Как видно из описания структуры данных СПОР, наибольший объем информации содержит МИ. При программной реализации наиболее удобной структурой для хранения МИ как в плане скорости доступа, так и простоты реализации является массив байт. В этой связи важно отметить, что байт является минимальным адресуемым элементом памяти и состоит из нескольких двоичных разрядов (для большинства архитектур - из восьми). Учитывая, что индикатор имеет только два состояния (0 или 1), для хранения которого достаточно одного двоичного разряда, такая структура не является оптимальной в смысле избыточности данных: если байт состоит из восьми двоичных

разрядов, то количество разрядов во всем МИ будет в 8 раз больше, чем фактически требуется. Для уменьшения суммарного объема данных без потери информации предлагается задействовать все двоичные разряды непрерывного байт-массива [4].

Другим способом уменьшения объема данных для хранения МИ без потери информации является применение известного алгоритма кодирования длин серий RLE (Run Length Encoding), согласно которому длинные серии повторяющихся значений кодируются парой (s_i, l_i) , $i = 1, 2, \dots, R_{RLE}$, где s_i - элемент МИ, l_i - количество повторов этих элементов, R_{RLE} - количество пар (s_i, l_i) , причем $R_{RLE} \leq R$ [5]. Классическим примером является кодирование последовательности растров черно-белого изображения:

$$\begin{array}{c} WWWBWWBBWWBBBWWWWWWBBBWWWWBBBB \\ \Downarrow \\ W3B1W2B2W2B3W7B3W3B4, \end{array}$$

где W означает белый цвет, B - черный. Эффективность такого сжатия, очевидно, зависит от длин подпоследовательностей повторяющихся элементов исходного массива. Предположение, что в МИ присутствуют достаточно длинные серии повторяющихся значений основано на том, что порядок их записи соответствует последовательному расположению одномерных сечений СПОР [4].

Для считывания или записи значения p -го элемента ($p = 1, 2, \dots, R$) МИ в сжатом массиве требуется сначала вычислить индекс $i = 1, 2, \dots, R_{RLE}$ пары (s_i, l_i) , кодирующей искомый элемент. Наиболее простым, но малоэффективным решением является перебор кодирующих пар с суммированием длин подпоследовательностей:

$$L_{min} = \sum_{i=1}^{i^*} l_i, \quad L_{max} = L_{min} + l_{i^*+1},$$

где L_{min} и L_{max} такие, что

$$L_{min} < p \leq L_{max}, \quad (8)$$

а $i^* = 1, 2, \dots, R_{RLE} - 1$ является индексом пары, предшествующей искомой. Перебор пар с суммированием их длин выполняется с начала массива до тех пор, пока не будет выполнено (8). Очевидно, что скорость произвольного доступа к элементам МИ, закодированным по алгоритму RLE существенно падает из-за необходимости выполнять описанную выше процедуру перебора. Время доступа тем больше, чем ближе к концу исходного массива расположен закодированный элемент. Решением в данной ситуации может стать сегментирование хранения кодирующих пар. Главной особенностью сегментирования является указание диапазона индексов

$$[L_{min}^k, L_{max}^k] \quad (9)$$

элементов МИ, которые закодированы в k -м сегменте с целью снижения затрат времени на выполнение перебора кодирующих пар. В этом случае первым действием по локализации нужной кодирующей пары для p -го элемента

МИ будет поиск сегмента, для которого выполняется $L_{min}^{k*} \leq p \leq L_{max}^{k*}$, а далее внутри сегмента выполнить перебор пар суммированием длин повторов по приведенному выше описанию, причем в этом случае начальное значение $L_{min} = L_{min}^{k*} - 1$.

Оба описанных выше метода оптимизации структуры МИ позволяют существенно уменьшить объем его данных, однако даже с их применением доступных ресурсов оперативной памяти компьютера может оказаться недостаточно. В этом случае данные можно хранить на дисковых накопителях. При этом стоит иметь в виду, что скорость доступа к данным, находящимся в файле на диске значительно ниже скорости доступа к данным в оперативной памяти. Использовать сегментированное хранение данных МИ в нескольких файлах целесообразно либо в случае, если один файл данных достаточно большой, либо в случае использования сжатия данных с использованием алгоритма RLE, как было описано выше. В последнем случае каждый файл представляет собой сегмент массива кодирующих пар, для которого указан диапазон (9) индексов элементов МИ, которые он кодирует.

4. Заключение

В докладе обсуждалась задача построения ОР сложных технических систем. Рассмотрен способ аппроксимации многомерной области множеством элементарных параллелепипедов, описана модель такого представления и была поднята проблема ресурсных ограничений при реализации предложенного подхода, а именно обсуждалась проблема хранения больших объемов данных СПОР. Предложены способы оптимизации структуры данных и применения алгоритма сжатия RLE. Для ускорения доступа к данным, закодированным с использованием алгоритма RLE предложен способ сегментирования сжатых данных. Для хранения больших объемов данных, а также для работы с ними в случае недостаточной емкости оперативной памяти предложен способ хранения сегментов сжатых данных в файлах на дисковых накопителях.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов ДВО РАН (11-III-B-03-038, 09-I-OЭММПУ-01, 09-I-П2-03)

Список литературы

1. Абрамов О.В. Параметрический синтез стохастических систем с учетом требований надежности. М.: Наука, 1992.
2. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 336 с.: ил.
3. Васильев Б.В., Козлов Б.А., Ткаченко Л.Г. Надежность и эффективность радиоэлектронных устройств. - М.: Советское радио, 1964.
4. Назаров Д.А. Использование областей работоспособности для оптимального выбора номиналов параметров. // Информатика и системы управления. - 2011. - №2(28). - С. 59 - 69.
5. Salomon D. Data Compression: the complete reference. Vol. 10. - Springer, 2007.