

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ И РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ¹

Рассматривается задача оптимального проектирования аналоговых радио-электронных устройств и систем с учетом закономерностей случайных вариаций их параметров и требований надежности. Предложены алгоритмы построения областей работоспособности, многовариантного анализа и параметрической оптимизации по стохастическим критериям, основанные на технологии параллельных и распределенных вычислений. Для автоматизации решения указанных задач предложена распределенная система автоматизированного надежностного проектирования.

PARALLEL AND DISTRIBUTED COMPUTATIONS IN PROBLEMS OF CIRCUIT DESIGN / O.V. Abramov (Institute of Automation and Control Processes Far East Division of the Russian Academy of Sciences, 5 Radio Street, Vladivostok, 690041, Russia, E-mail: abramov@iacp.dvo.ru). A theoretical approach and applied techniques for designing analogous electronic devices and systems with due account of random variations in system parameters and reliability specifications are considered. Several algorithms for region of acceptability location, modeling and discrete optimization using parallel and distributed processing are discussed. For seeking a numerical solution of the parametric design problem a distributed computer-aided reliability-oriented design system is proposed.

1. Введение

Одной из основных проблем, возникающих при создании и использовании систем автоматизированного проектирования схем РЭА, является высокая вычислительная трудоемкость задач моделирования, многовариантного анализа и оптимизации, решение которых составляет основу схемотехнического проектирования.

К числу особо тяжелых, с точки зрения вычислительных затрат, относятся задачи проектирования с учетом стохастических закономерностей изменений параметров проектируемых устройств и требований надежности. Здесь к необходимости моделирования динамических и часто нелинейных систем добавляется моделирование случайных процессов изменения параметров этих систем, статистическое моделирование и оптимизация, которая должна осуществляться по вероятностным (стохастическим) критериям.

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта ДВО РАН 12-1-ОЭММПУ-01 в рамках программы фундаментальных ОЭММПУ №14 «Анализ и оптимизация функционирования систем многоуровневого, интеллектуального и децентрализованного управления в условиях неопределенности»

Несмотря на постоянное развитие и совершенствование инструментальных средств автоматизированного проектирования РЭА, примеры их успешного использования при проектировании достаточно сложных радиоэлектронных схем и систем управления, особенно при оптимальном проектировании по критериям надежности, практически отсутствуют. Вместе с тем в последние годы успешно развивается достаточно радикальный путь повышения эффективности решения задач высокой вычислительной сложности, в основе которого – технология параллельных и распределенных вычислений. Представляется весьма интересным и перспективным создание систем автоматизированного проектирования (САПР), ориентированных на технологию параллельных вычислений.

В данной работе предпринята попытка очертить круг задач, которые возникают в процессе создания нового класса САПР РЭА - систем автоматизированного проектирования распределенного типа, и наметить пути их решения.

2. Оптимальный параметрический синтез

Под созданием САПР понимается разработка прикладного программного обеспечения, задачей которого является прием исходной информации, которая содержит описание топологии (структуры) и параметров проектируемого объекта, её обработка, с целью нахождения оптимального решения и предоставление результатов в виде, удобном для дальнейшей обработки.

Процесс проектирования включает следующие этапы:

- 1) Ввод схемы и определение параметров моделирования;
- 2) Моделирование (построение математической модели);
- 3) Анализ работоспособности и степени удовлетворения заданным требованиям;
- 4) Параметрический синтез (выбор оптимальных значений параметров элементов схемы).

Общая постановка задачи оптимального параметрического синтеза (ОПС) имеет следующий вид [1]. Найти номинальные значения внутренних параметров исследуемой системы $\mathbf{x}_{\text{НОМ}} = (x_{1\text{НОМ}}, \dots, x_{n\text{НОМ}})$, обеспечивающие максимум вероятности выполнения условий ее работоспособности в течение заданного времени эксплуатации:

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

где $\mathbf{X}(\mathbf{x}_{\text{НОМ}}, t)$ – случайный процесс изменения параметров элементов системы; \mathbf{D}_x - область работоспособности в пространстве внутренних параметров; T - заданное время эксплуатации системы.

Область допустимых вариаций внутренних параметров \mathbf{D}_x , как правило, неизвестна, а условия работоспособности чаще всего задаются системой неравенств:

$$(2) \quad a_j \leq y_j(\mathbf{x}) \leq b_j, \quad j = 1, m,$$

где $\mathbf{y} = \{y_j\}_{j=1}^m$ – вектор выходных параметров системы, причем $y_j = F_j(x_1, \dots, x_n)$, а $F_j(\bullet)$ – известный оператор, зависящий от топологии исследуемой системы.

Вероятность выполнения условий работоспособности в течение требуемого времени в этом случае имеет вид

$$(3) \quad P(\mathbf{y} \in D_y, \forall t \in [0, T]) = P(y_1 \in [a_1, b_1] \cap y_2 \in [a_2, b_2] \cap \dots \cap y_m \in [a_m, b_m]).$$

Программную среду для решения задач ОПС можно представить в виде набора взаимосвязанных программно-алгоритмических модулей.

- 1) Модуль ввода описания проектируемой системы в вычислительную среду.
- 2) Модуль преобразования описания системы в математическую модель, связывающую выходные параметры системы с параметрами ее элементов и возмущениями.
- 3) Модуль детерминированного анализа. Для выбранной структуры (топологии) и заданных значений внутренних параметров $\mathbf{x}_{\text{НОМ}} = (x_{1\text{НОМ}}, \dots, x_{n\text{НОМ}})$ здесь происходит вычисление значений выходных параметров системы $\mathbf{y} = \{y_j\}_{j=1}^m$, $y_j = F_j(x_1, \dots, x_n)$ и проверка выполнения условий работоспособности.
- 4) Модуль статистического анализа. Он включает в себя алгоритмические и программные средства генерации случайных процессов изменения внутренних параметров $\mathbf{X}(t)$ и вычисления целевой функции (вероятности выполнения условий работоспособности) методом статистических испытаний (Монте-Карло) $P(T) = P\{\mathbf{X}(\mathbf{x}_{\text{НОМ}}, t) \in D_x, \forall t \in [0, T]\}$.
- 5) Модуль оптимизации, включающий в себя набор алгоритмических и программных средств поиска номинальных значений параметров элементов системы $\mathbf{x}_{\text{НОМ}} = (x_{1\text{НОМ}}, \dots, x_{n\text{НОМ}})$, доставляющих максимум целевой функции.

Эффективным средством преодоления вычислительной трудоемкости (временных затрат) решения задач оптимального параметрического синтеза, как отмечалось выше, может стать использование современных технологий параллельных и распределенных вычислений.

3. Технология параллельных и распределенных вычислений в задачах параметрического синтеза

При создании параллельной (распределенной) программной среды, ориентированной на решение задач параметрического синтеза, необходимо решить, по крайней мере, две основные задачи.

Первая из них заключается в распределении операций используемого алгоритма между процессорами и установлении нового (по сравнению с последовательным алгоритмом) порядка их выполнения. Основная проблема, возникающая при решении этой задачи, состоит в сохранении порядка выполнения информационно-связных операций – выполнении условий сохранения зависимостей алгоритма.

Вторая задача заключается в распределении данных алгоритма между процессорами и установлении схемы обмена данными при выполнении параллельного алгоритма. Основная проблема, возникающая при решении задачи, состоит в необходимости устанавливать в определенный момент времени местоположение требуемого для выполнения операции данного и дополнять вычислительный алгоритм новыми операциями передачи и приема данных. При этом следует учитывать, что реализация коммуникаций в распределенной вычислительной среде (на параллельном компьютере с распределенной памятью) требует значительных временных затрат. Поскольку целью использования распределенной вычислительной среды является уменьшение времени решения задачи параметрического синтеза, то при распараллеливании алгоритма необходимо стремиться к уменьшению коммуникационных затрат на его реализацию.

Один из очевидных подходов к распределению данных и минимизации коммуникационных затрат заключается в разбиении алгоритма на блоки независимых вычислений [2]. В этом случае распределение данных осуществляется в соответствии с распределением операций, которые эти данные используют, поэтому все процессоры вычислительной системы могут работать независимо один от другого, не нуждаясь в обмене данными. Очевидно, такой подход упрощает проблему распределения данных между процессорами и устраняет проблему обмена данными, однако не всегда алгоритм допускает декомпозицию на независимые части.

Другой подход заключается в получении блочных версий алгоритма, т.е. разбиении специальным образом пространства итераций гнезд циклов. Целью такого разбиения является увеличение пакета передаваемых данных и уменьшение частоты коммуникаций. Подход направлен на минимизацию накладных расходов на обмены данными, не затрагивая проблемы размещения массивов данных.

При программной реализации параллельных алгоритмов представляется целесообразным использование возможностей как современных многопроцессорных вычислительных систем, так и распределенных многомашинных комплексов, связанных локальной сетью. Главным критерием качества распараллеливания вычислений является сокращение общего времени решения задачи. Возможности для распараллеливания вычислений ограничиваются не только числом имеющихся процессоров, но и особенностями вычислительного алгоритма, который может оказаться принципиально последовательным. В задачах ОПС целесообразно использовать SPMD модель передачи сообщений (каждое задание выполняет одну и ту же программу, но с разными данными) и, так называемую, master-slave парадигму параллельного программирования. Один из процессоров назначается главным (master), он производит динамическую балансировку загрузки, рассылает задания остальным подчиненным процессорам (slave), формирует результаты. Распараллеливание базируется на декомпозиции последовательного алгоритма вычислений, а в качестве единицы параллелизма выступает задача однократного расчета модели системы (моделирования системы).

Можно предложить несколько вариантов стратегии ОПС с использованием технологии параллельных вычислений.

В основе первой из стратегий лежит идея создания параллельных методов расчета целевой функции и оптимизации.

Создание и реализация параллельного аналога метода статистических испытаний (Монте-Карло) не вызывает принципиальных затруднений. Использование параллельных вычислений в этом методе является вполне логичным, поскольку идея параллелизма – повторения некоторого типового процесса с различными наборами данных – заложена в самой структуре метода. Интуитивно понятно, что использование k независимых процессоров и распределение между ними независимых испытаний, уменьшит трудоемкость статистического моделирования почти в k раз, поскольку затраты на заключительное суммирование и осреднение результатов практически несущественны.

В общем виде алгоритм получения оценки искомой вероятности методом Монте-Карло выглядит следующим образом. Моделируется множество N реализаций случайного процесса изменения параметров системы, которое делится на k непересекающихся подмножеств. Для каждой реализации осуществляется проверка ее нахождения в области допустимых значений D_x в течение заданного времени T . Оценку вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии можно будет вычислить по формуле:

$$(4) \quad \hat{P} = \sum_{i=1}^k n_{gi} / N$$

где n_{gi} – количество «хороших» реализаций (удовлетворяющих условиям работоспособности) для каждого из процессоров, N – требуемое число испытаний.

Оценка (4) является случайной величиной и подчиняется биномиальному закону распределению вероятностей. Она обладает желаемым свойством несмещенности, т.е. ожидаемое (асимптотическое) значение оценки \hat{P} в точности равно истинному значению вероятности $P(T)$.

Существенным требованием при распределении испытаний по процессорам является отсутствие межпроцессорных корреляций при формировании реализаций векторов варьируемых параметров на различных процессорах. Для решения этих задач привлекаются специальные библиотеки параллельных датчиков случайных чисел, что позволяет осуществить распределенный подход в получении последовательностей псевдослучайных чисел [4].

Простейшим из прямых методов поисковой оптимизации, обладающих свойством потенциального параллелизма, является метод сканирования. Этот метод заключается в последовательном переборе значений номиналов параметров из множества допустимых, при этом запоминается наибольшее значение целевой функции и вектор номиналов, приведший к этому значению. В соответствии с алгоритмом это состояние заменяется другим только в случае, если новое значение целевой функции окажется больше, чем значение, хранимое в памяти. Особенность и преимущество метода сканирования заключается в независимости поиска от вида и характера целевой функции, а также в том, что этот метод всегда позволяет найти глобальный экстремум.

В простейшем случае решение задачи сводится к полному перебору элементов множества возможных значений номиналов внутренних параметров, для каждого из которых осуществляется расчет соответствующей целевой функции. Учитывая цикличность процедуры вычисления целевой функции, несложно применить параллелизм по данным.

Еще одним методом поиска, обладающим свойством потенциального параллелизма, является метод случайного поиска.

При использовании этого метода также необходимо, прежде всего, задать область поиска в пространстве внутренних параметров D . Далее по случайному закону генерируется совокупность номинальных точек области поиска, для которых вычисляются значения целевой функции. Номинальную точку, доставляющую наибольшее значение целевой функции, выбирают в качестве оптимального решения задачи параметрического синтеза. Достоинством метода является возможность его использования для поиска глобального экстремума.

Другая возможная стратегия ОПС основана на построении области допустимых значений внутренних параметров (области работоспособности) D_x .

Привлекательность этой стратегии в определенной мере связана с возможностью декомпозиции общей задачи ОПС на две подзадачи.

Первая из них состоит в построении, анализе и аппроксимации области D_x . Это задача высокой вычислительной трудоемкости, поскольку ее решение связано с необходимостью многократного вычисления значений выходных параметров системы (обращения к модулю детерминированного анализа).

Вторая подзадача включает вычисление целевой функции и нахождение оптимальных

значений номиналов параметров. Получение решений в этом случае не связано с необходимостью обращения к модулю детерминированного анализа, что значительно уменьшает трудоемкость параметрического синтеза.

Таким образом, стратегия ОПС в этом случае будет состоять из двух этапов, первый из которых связан с построением области допустимых вариаций параметров D_x . К наиболее известным методам ее построения относятся метод матричных испытаний [5,6]. Его основная идея состоит в том, что диапазон возможных изменений каждого из внутренних параметров разбивается на равные интервалы, называемые квантами. В качестве представителя кванта выбирается значение параметра, лежащее в середине кванта. Можно составить матрицу несовместных ситуаций, понимая под ситуацией такое состояние исследуемой системы, когда каждый из его внутренних параметров принимает значение, соответствующее представителю определенного кванта.

Для каждого элемента матрицы несовместных ситуаций проводится моделирование системы (вычисление выходных параметров) и проверяется выполнение условий работоспособности. Множество ситуаций, соответствующих работоспособному состоянию системы, можно рассматривать как аппроксимацию области допустимых значений параметров D_x .

Достоинством метода матричных испытаний является возможность достаточно точно определения границ D_x , обнаружение разрывов внутри области и нахождение всех областей, если их больше одной. К его недостаткам относятся необходимость перебора большого количества сочетаний изменяемых параметров, что обуславливает низкое быстродействие метода, дополнительные накладные расходы на составление, хранение и расшифровку матрицы ситуаций.

Уменьшение трудоемкости нахождения области работоспособности можно обеспечить путем распараллеливания процесса матричных испытаний. Параллельный аналог метода матричных испытаний описан в работах [7,8].

На втором этапе осуществляется поиск оптимальных решений. При известной области работоспособности трудоемкость вычисления значений целевой функции и поиска экстремума существенно уменьшается. Теперь при проведении испытаний нет необходимости вычислять значения выходных параметров системы (обращаться к модулю детерминированного анализа).

Дальнейшее сокращение вычислительных затрат может быть достигнуто путем использования параллельных аналогов методов поисковой оптимизации, некоторые из которых были рассмотрены выше.

Таким образом, при использовании стратегии ОПС, основанной на построении областей работоспособности, решение поставленной задачи осуществляется в два этапа, первый из которых можно считать подготовительным (построение области D_x), а второй – основным. Эффективность каждого из этапов обеспечивается на основе использования технологии параллельных или распределенных вычислений.

4. Распределенная САПР РЭА

На основе рассмотренных выше методов и алгоритмов разработана система автоматизированного проектирования аналоговых схем РЭА распределенного (сетевое) типа.

Структура системы включает модули ввода и математического моделирования электронных схем, многомерного детерминированного и статистического анализа, построения, анализа и аппроксимации областей работоспособности, многомерной поисковой оптимизации по детерминированным и вероятностным критериям.

В качестве модуля построения и анализа математической модели проектируемого объекта используется широко распространенная моделирующая среда SPICE, которая позволяет моделировать процессы функционирования широкого класса аналоговых радиоэлектронных схем во временной и частотной областях.

Система имеет клиент-серверную архитектуру, реализованную на персональных компьютерах под управлением операционных систем семейства ОС Unix и объединенных локальной сетью. Использование юниксо-подобных операционных систем, обусловлено доступностью, простотой и в своем большинстве открытым исходным кодом многих сервисов самой ОС. Это позволит оптимизировать ОС для большей производительности, ориентируясь на выполнение приложений и передачу данных, используя сетевые протоколы.

Передача сетевой информации основана на протоколе SSH. Этот протокол обеспечивает возможность удаленного выполнения команд и копирования файлов с аутентификацией клиента и сервера и шифрованием, сжатием передаваемых данных (пароли также шифруются). Дополнительно обеспечивается перенаправление любых TCP-соединений.

Набор средств SSH представляет собой протоколы транспортного уровня, аутентификации и соединения и программные средства безопасного доступа к компьютерам по небезопасным каналам связи. Клиентская программа SFTP позволяет пересылать файлы в интерактивном режиме подобно FTP однако осуществляет все операции поверх защищенного транспорта SSH, который, собственно, и вызывается. Пакетный режим позволяет копировать файлы без ручного вмешательства при условии не интерактивной аутентификации. Программа SFTP имеет интерактивные команды аналогичные обычному программному средству FTP.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов О.В.* Методы и алгоритмы параметрического синтеза стохастических систем // Проблемы управления. 2006. № 4 С. 3-8.
2. *Shang W., Fortes J.A.* Independent partitioning of algorithms with uniform dependencies // IEEE Trans. on Computers. 1992. 41. No 2. P. 190-206.
3. *Адуцкевич Е.В., Лиходед Н.А.* Согласованное получение конвейерного параллелизма и распределение операций и данных между процессорами // Программирование, 32. № . 2006. С. 54-65.
4. *P.Coddington.* Random number generators for parallel computers. NHSE Review, 1996.
5. *Васильев Б.В., Козлов Б.А., Ткаченко Л.Г.* Надежность и эффективность радиоэлектронных устройств. – М.: Советское радио, 1964.
6. *Смагин Ю.Е.* Матричные испытания радиоэлектронных устройств с помощью ЭВМ. – М.: Энергия, 1979.
7. *Абрамов О.В., Диго Г.Б., Диго Н.Б., Катусева Я.В.* Параллельные алгоритмы построения области работоспособности // Информатика и системы управления. 2004. № 2. С. 121-133.
8. *Назаров Д.А.* Использование распределенных вычислений при построении области работоспособности // Информатика и системы управления. 2008. № 1. С. 142-151.