АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ СТРУКТУРНОЙ ИНФОРМАЦИИ
(Вычислительные системы)
1981 год Выпуск 85

УДК 621.382.825

СПОСОБ УСКОРЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Н.А.Деревцова, Н.И.Назаров

Чтобы обеспечить высокое качество разработки большой интегральной схемы, обычно ее разбивают на функционально законченные фрагменты, для каждого фрагмента определяются эквиваленты нагрузок на выходных полюсах, требования на статические и динамические характеристики и разрабатывается такая топология, при которой максимально удовлетворяются все требования. При проектировании топологии на основе моделирования статического режима и переходного процесса осуществляется поиск наиболее подходящего варианта схемы. На этом этапе целесообразно использование процедур оптимизации.

При параметрической оптимизации интегральных схем задача достижения глобального оптимума ставится редко. Считается достаточным, если процедура оптимизации обеспечивает направленное улучшение исходного варианта схемы при движении рабочей точки в область локального оптимума; это позволяет использовать эффективные алгоритмы локального поиска.

Задача параметрической оптимизации интегральных схем является многокритериальной. Один из распространенных подходов к решению задач основан на построении обобщенного скалярного критерия оптимальности и на решении затем задачи безусловной оптимизации.

В настоящей работе при построении аддитивного скалярного критерия используются нелинейные функции полезности частных критериев; в процессе поиска предлагается использовать и корректировать информацию о схеме для сокращения числа анализируемых вариантов.

Предположим, что схема характеризуется вектором оптимизируемых переменных x и вектором выходных параметров $p(x)$. Последние обычно несоизмеримы, и к их значениям у разработчика схемы могут быть разные требования, например, максимально возможное улучшение, ограничение снизу или сверху.

Обобщенный скалярный критерий качества будем строить в виде

$$Q = \sum_i a_i \, q(p_i); \qquad i = \overline{1,m}, \tag{1}$$

где $q(p_i)$ – функция полезности i-го выходного параметра; m – число выходных параметров; a_i – весовой множитель. Простой и достаточно универсальной функцией полезности, достаточно адекватно отвечающей требованиям разработчика, является экспонента $q(p_i) = \exp((p_i - p_{0i})/(p_i - p_{Mi}))$, где p_{0i}, p_{Mi} – параметры, которые условно можно рассматривать как границу области работоспособности и масштаб [I]; при решении задач минимизации значение p_{Mi} должно находиться в области работоспособности, причем улучшение значения параметра способствует уменьшению $q(p_i)$.

Следует отметить [2], что экспоненциальные функции использовались для достижения допустимой области в том случае, если алгоритм оптимизации должен был начинать работу из допустимой точки. По нашему мнению, этот критерий можно рассматривать в качестве основного при оптимизации схем. Тогда задача оптимизации схемы сводится к безусловной минимизации функции (I). Возможно, что результаты оптимизации после первого решения задачи с помощью ЭВМ не удовлетворяют разработчика; однако в настоящее время считается вполне допустимым решать задачу несколько раз, меняя вид критерия и значения числовых коэффициентов, пока не будет достигнут желательный компромисс между частными критериями [3]; при использовании (I) трудности постановки задачи уменьшаются до минимума.

Вектор-столбец градиента функции Q можно записать в виде

$$\nabla Q = \frac{\partial Q}{\partial x} = \left(\frac{\partial Q}{\partial p}\right)^T \frac{\partial p}{\partial x}. \tag{2}$$

Матрицу $\partial p/\partial x$ после однократного ее вычисления одновременно с вычислением ∇Q можно использовать на нескольких шагах как при определении направления поиска, так и при одномерном поиске в этом направлении без дополнительных вычислений вектора $p(x)$. При этом во многих случаях затраты на поиск значительно сокращаются.

Безразмерному шагу α_n в направлении поиска в области x соответствует шаг из рабочей точки x_n: $\Delta x_n = -\nabla Q/\|\nabla Q\| \cdot \alpha_n$. Считая вектор $p_n = p(x_n)$ известным, значения выходных параметров в точке $x_n + \Delta x_n$ с точностью до линейного члена можно представить в виде

$$p_{n+1} = p_n - \frac{\alpha_n}{\|\nabla Q\|} \frac{\partial p}{\partial x} \nabla Q \qquad (3)$$

и использовать эти значения при вычислении $Q(p)$ в процессе одномерного поиска.

Отметим, что если бы функция $Q(p)$ была линейной, то одномерный поиск с использованием линейного приближения к $p(x)$ не имел бы смысла, так как решение всегда находилось бы на границе области x.

После завершения одномерного поиска и определения Δx_n^*, соответствующего минимуму (I), путем моделирования схемы вычисляем $p(x_n + \Delta x_n^*)$ и проверяем выполнение условия $Q(x_n + \Delta x_n^*) < Q(x_n)$. Если оно выполняется, то по формуле (2), в которой $\partial Q/\partial p$ вычисляется аналитически, а матрица $\partial p/\partial x$ была вычислена ранее, определяем новое направление поиска. Если функция Q в новой точке не уменьшилась, следует заново восстановить ∇Q и $\partial p/\partial x$, используя процедуры моделирования схемы.

Практическое применение предложенной методики позволило сделать следующие выводы:

I) матрица $\partial p/\partial x$ может сильно изменяться в оптимизируемой области, поэтому необходима ее коррекция;

2) формулы (2), (3) в окрестности оптимума не всегда обеспечивают точность, достаточную для работы алгоритма оптимизации.

В процессе оптимизации мы располагаем точными значениями $p(x_n)$, $p(x_n + \Delta x_n^*)$, а также приближенным значением $\partial p/\partial x$ в точке x_n. Но эти данные недостаточны для точной коррекции элементов $\partial p/\partial x$, поэтому на практике используется следующая методика: если $\Delta p_i = p_i(x_n + \Delta x_n^*) - p_i(x_n)$, $\tilde{\Delta} p_i$ – приращение в формуле (3), $b_i = \min\limits_j |\partial p_i/\partial x_j|$, $c_i = \max\limits_j |\partial p_i/\partial x_j|$, $j = \overline{1,N}$, где N – размерность x, то элементы строки i матрицы $\partial p/\partial x$ умножаются на коэффициенты

$$\beta_{ij} = \left| \frac{\Delta p_i/\tilde{\Delta} p_i - 1}{c_i - b_i} \left(\left| \frac{\partial p_i}{\partial x_j} \right| - b_i \right) + 1 \right|, \quad i = \overline{1,m}; \quad j = \overline{1,N}. \qquad (4)$$

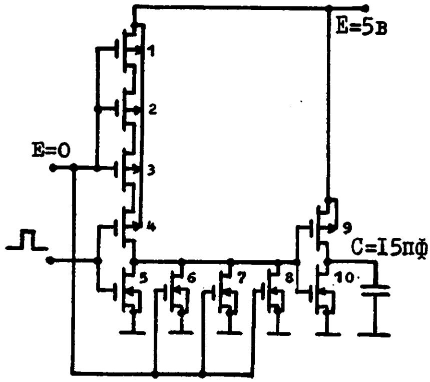

Рис. I

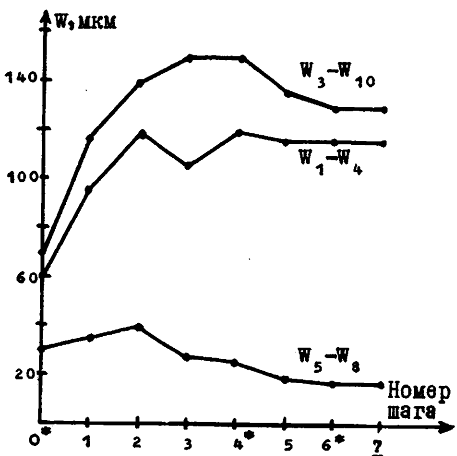

Рис. 2

Если окрестность оптимума достигнута, то при дальнейшей оптимизации на каждом шаге вычисляется точный градиент и моделируется схема при одномерном поиске; вывод о достижении окрестности оптимума делается в том случае, если после точного вычисления ∇Q и $\partial p/\partial x$ удалось сделать не более одного шага с использованием (2) и (4).

Опыт показывает, что поиск с использованием (2)-(4) в большинстве случаев приводит в область оптимума, причем количество обращений к процедуре моделирования схемы уменьшается в I,2-I,4 раза. Отметим, что частные производные при этом определялись методом приращений.

Приведем пример оптимизации. На рис.I показана четырехвходовая схема ИЛИ-НЕ с выходным инвертором на основе МДП-транзисторов с дополняющими типами проводимости. Схема оптимизировалась по трем переменным: ширине W канала транзисторов I-4, транзисторов 5-8 и транзисторов 9-I0. Вектор выходных параметров содержал задержку включения, задержку выключения и сумму ширин каналов транзисторов.

Процесс оптимизации показан на рис.2; по горизонтальной оси отложены номера шагов, звездочкой обозначены шаги, на которых восстанавливались ∇Q, $\partial p/\partial x$, подчеркивание означает, что данная точка получена точным одномерным поиском; векторы выходных параметров в начальной и конечной точках соответственно равны $p_н$ = $= (300, 433, 500)$ и $p_к = (254, 238, 792)$.

Литература

1. НАЗАРОВ Н.И. Некоторые вопросы схемотехнического проектирования МДП ИС умеренной и средней сложности. -В кн.: Вопросы обработки информации при проектировании систем (Вычислительные системы, вып. 69).Новосибирск, 1977, с.70-83.

2. БЕККЕР П., ЙЕНСЕН Ф. Проектирование надежных электронных схем. -М.: Сов.радио, 1977. - 256 с.

3. БАТИЩЕВ Д.И. Поисковые методы оптимального проектирования.-М.: Сов.радио, 1975. - 216 с.

Поступила в ред.-изд.отд.
13 апреля 1981 года