

К. т. н. В. Н. КРИЩУК, к. т. н. Л. М. КАРПУКОВ,
к. т. н. Г. Н. ШИЛО, к. т. н. А. Ю. ФАРАФОНОВ,
Б. А. АРТЮШЕНКО

Украина, Запорожский национальный технический университет
E-mail: gshilo@zntu.edu.ua_farafon@zntu.edu.ua_bogdartysh@ukr.net

Дата поступления в редакцию
30.01—07.06 2007 г.

Оппонент к. т. н. Э. Н. ГЛУШЕЧЕНКО
(НПП "Сатурн", г. Киев)

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА В ЗАДАЧАХ ДОПУСКОВОГО СИНТЕЗА МИКРОПОЛОСКОВЫХ УСТРОЙСТВ

Использование генетического алгоритма дает возможность решения задач с немонотонными выходными функциями и с нестандартными ограничениями.

Быстрое проникновение систем радиолокации, автоматизированных систем связи, систем телекоммуникации во все сферы нашей жизни — серьезное испытание для разработчиков СВЧ-техники, потому что конкуренция и условия рынка диктуют жесткие требования к параметрам СВЧ-устройств, срокам проектирования и цене. Эти требования в полной мере касаются и пассивных элементов СВЧ-схем, основанных на микрополосковой топологии.

С использованием наиболее точных методов синтеза и определения геометрических параметров микрополосковых устройств актуальной остается проблема обеспечения точности изготовления, которая непосредственно обусловлена технологическими допусками. Поэтому возникает задача определения допусков на геометрические размеры конструкции в зависимости от параметров материалов и заданной нестабильности выходных характеристик.

Разработке методов анализа и синтеза допусков в радиоэлектронике посвящено значительное количество работ [1, 2]. При определении допусков используются два базовых принципа — максимума-минимума и статистический. Однако использование статистического подхода возможно только при наличии большого объема статистических данных, что не всегда возможно.

Существующие методы требуют либо большого количества вычислений, либо монотонности выходных функций [3]. Для решения задач анализа и синтеза допусков в условиях немонотонности выходной функции могут быть использованы методы детерминированного и случайного поиска. При этом различия в особенностях поведения характеристик устройств не позволяют выработать единой стратегии поиска. Относительная сложность и ресурсоемкость решения задач СВЧ-техники значительно ограничивают использование генетического алгоритма, однако для задач анализа допусков в настоящее время этот алгоритм может использоваться без ограничений.

Целью данной статьи является разработка универсального метода допускового синтеза пассивных СВЧ-устройств на основе генетического алгоритма.

В качестве объекта исследований был выбран микрополосковый полосовой фильтр (ППФ) на связанных линиях с немонотонным характером АЧХ в области граничных частот полосы пропускания при наличии отклонений параметров конструкции.

Для решения поставленной задачи необходимо:

— построить математическую модель СВЧ-фильтра, позволяющую определять его характеристики при заданных значениях параметров;

— определить математические подходы к задаче анализа работоспособности синтезированного решения;

— доработать генетический алгоритм для задачи допускового синтеза.

Анализ работоспособности параметрической области

Наиболее часто встречающимися ограничениями при проектировании СВЧ-техники выступают:

— допусковая область, которая должна содержать номинальные значения:

$$x^{\text{ном}} \in X, \quad (1)$$

где $x^{\text{ном}}$ — номинальное решение, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_d\}$ — интервальная допусковая область (брус), $x_i = [x_i, \bar{x}_i]$ — интервал значений параметра i , d — количество параметров;

— ограничения на параметры элементов:

$$x_i \subset sp_i = [sp_i, \bar{sp}_i], \quad (2)$$

где sp_i — интервал, ограничивающий возможные значения параметра i ;

— ограничения на допуск:

$$w(x_i) \in [\min t_i, \max t_i], \quad (3)$$

где $\min t_i$, $\max t_i$ — минимальная и максимальная ширина допуска;

— ограничения на выходные функции (ограничения работоспособности):

$$f_j(x_1 \dots x_n) \in F_j = [F_j, \bar{F}_j], \quad \forall x_i \in x_i, \quad j = \overline{1, m}, \quad (4)$$

где $f(x_1, \dots, x_d)$ — выходные функции, F_j и \bar{F}_j — нижнее и верхнее ограничения на выходные функции, m — количество выходных функций.

При анализе работоспособности найденного решения возможно применение:

— методов Мура и нулевого поиска, эвристических и стохастических методов (вычислительная сложность 2^{qd} , где q — точность);

— естественного интервального расширения (применимо, если $f(x_1, \dots, x_d)$ — рациональные выражения, содержащие переменные не более одного раза);

— метода внешних воздействий (применим, если $f(x_1, \dots, x_d)$ — строго монотонные выходные функции, вычислительная сложность — $2d$);

— анализа вершин (применим для задач с выпуклой областью допустимых значений, вычислительная сложность до 2^d).

Нами был выбран анализ вершин, поскольку в большинстве случаев в пределах поля допуска область работоспособности является выпуклой. Основной метода анализа вершин является последовательная проверка значений в вершинах бруса. Генетический алгоритм при поиске неоднократно генерирует брусья, пересекающиеся с ранее рассмотренными. Поэтому при сохранении неработоспособных вершин и проверке на пересечение с ними вновь сгенерированных брусьев вероятность ошибки анализа работоспособности снижается и, таким образом, более чем на 30% уменьшается количество запусков анализа вершин для рассматриваемой далее задачи.

Генетический алгоритм

Генетический алгоритм — это стохастический метод оптимизации и поиска, базирующийся на принципах генетики и естественного отбора [4, с. 22; 5, с. 11—30]. Особенностью алгоритма является то, что он работает с набором решений (геномов). На каждом шаге алгоритма создается новое поколение (набор геномов). Для этого из предыдущего поколения процедурой селекции отбирают наиболее приспособленные геномы-родители (приспособленность показывает, насколько решение оптимально). Далее процедура скрещивания создает новые геномы и отбираются наиболее приспособленные из вновь созданных геномов (процедура репродукции), которые образуют новое поколение. Алгоритм продолжает работу до выполнения критерия останова, после чего выбирается наиболее приспособленный геном (лучшее решение).

Формально шаг генетического алгоритма может быть представлен следующим образом:

$$P^{gen+1} = r \left(c \left(m \left(s \left(P^{gen}, f_r \right) \right) \right), P^{gen}, f_r, elite \right), \quad (5)$$

где $P^{gen} = (G^1, G^2, \dots, G^{PopSize})$ — популяция на поколении $genom$;
 G^{gn} — решение задачи, представленное в виде генома gn ;
 $PopSize$ — размер популяции;
 r — репродукция;
 c — скрещивание;
 m — мутация;
 s — оператор селекции;
 f_r — функция приспособленности генома.

Геномы представляют собой битовые строки G^{gn} длиной $width$. Поэтому возникает необходимость их отображения в интервальную допусковую область. При применении генетического алгоритма для задач с ограничениями обычно рассматривают внешнее от-

ображение [6], которое позволяет адаптировать отображение генома к поставленным ограничениям на возможные значения синтезируемых параметров изделия. Применительно к задаче назначения допусков устройств СВЧ внешнее отображение может быть осуществлено либо посредством задания центра с допуском [7], либо непосредственным отображением в интервал [8] (при отсутствии ограничения на допуск сверху):

$$\underline{X}_{Gi} = x_i^{nom} - \sum_{jj=0}^{width-1} 2^{jj-width} G_{2id+jj}^{gn} (x_i^{nom} - \underline{sp}_i); \quad (6)$$

$$\overline{X}_{Gi} = \max \{ \min t_i + \underline{X}_{Gi} + \sum_{jj=0}^{width-1} 2^{jj-width} G_{2id+d+jj}^{gn} \times (\overline{sp}_i - x_i^{nom} - \min t_i / 2) x_i^{nom} \}. \quad (7)$$

Оба метода требуют одинакового количества вычислений. Но из-за необходимости выполнения ограничений (1), (3) одинаковые брусья могут кодироваться разными геномами, а их скрещивание ведет к непредсказуемости допусковых областей, соответствующих геномам потомков. Поэтому было внесено следующее изменение в работу генетического алгоритма: после проведения процесса отображения генома в допусковую область (6), (7) производится обратное преобразование области в геном. Это привело к сокращению количества вычислений в рассматриваемой задаче до 15%.

Для задачи допускового синтеза в качестве меры приспособленности генома наиболее целесообразно использовать зависимость [8]

$$f_r(G) = \begin{cases} V(X_G) & \text{if } f(X_G) \subset F; \\ -\text{dist}(f(X_G), F) & \text{if } f(X_G) \not\subset F, \end{cases} \quad (8)$$

где $\text{dist}(f(X_G), F)$ — расстояние между интервалами, $V(X_G)$ — объем бруса X_G .

Селекция отбирает наиболее приспособленные геномы. Для этого геномы сортируются по возрастанию (8) в таблицу. Выбор геномов для скрещивания может осуществляться: по положению в таблице, по отношению приспособленности генома к общему уровню на популяции. Так как функция приспособленности (8) для геномов существенно отличается по значению, то становится обоснованным применение селекции по положению в таблице.

Скрещивание обычно разделяют на две процедуры: кроссинговер (создание потомка обменом случайных частей битовых строк родительских геномов) и мутацию (внесение случайных изменений в битовую строку потомка). Проведенные нами исследования показали, что использование равномерного кроссинговера позволяет сократить вычисления до 7% (по сравнению с более распространенным одноточечным кроссинговером), что связано с большей степенью рассеивания допусковых областей при равномерном кроссинговере и немонотонностью задачи.

Из наиболее приспособленных геномов-потомков и геномов-родителей (элита) в процессе репродукции создается новая популяция (новое поколение). Применение анализа вершин требует большого коли-

чества вычислений, к тому же задача связана с немонотонностью и, следовательно, с возможностью сползания в локальный максимум. Поэтому необходимо изменить величину элиты.

Проведенные нами численные эксперименты показали, что для задачи допускового синтеза СВЧ-фильтра элита должна составлять примерно 30% от популяции из 60 геномов [9].

Примеры применения генетического алгоритма

Исследование допусков выполнено на примере показанного на рис. 1 микрополоскового полосового фильтра [10] на одинаковых связанных линиях с частотной характеристикой максимально плоского типа и следующими параметрами: граничные частоты полосы пропускания фильтра $f_{-п} = 945$ МГц, $f_{п} = 1055$ МГц по уровню вносимого затухания $\alpha_{п} = 3$ дБ; граничные частоты полос заграждения $f_{з} = 800$ МГц, $f_{з} = 1200$ МГц по уровню затухания $\alpha_{з} \geq 30$ дБ; волновое сопротивление подводящих линий передачи $Z_0 = 50$ Ом.

Заданным исходным данным соответствует фильтр из четырех звеньев связанных микрополосковых линий ($n=4$) на подложке с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 9,6$ и толщиной $h = 1$ мм. Толщина металлизации в расчетах не учитывалась. Одним из наиболее

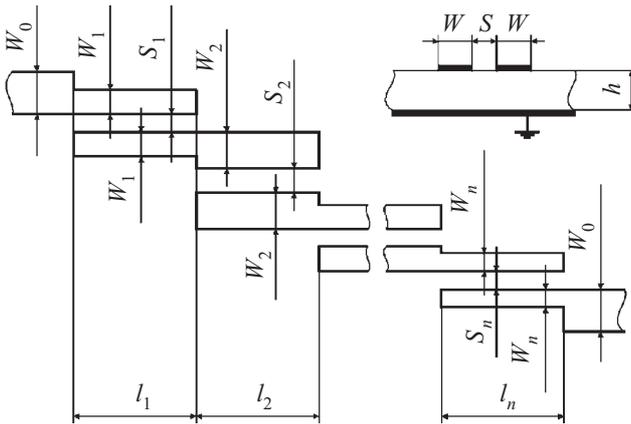


Рис. 1. Топология фильтра на связанных линиях: W_i — ширина связанных линий фильтра; S_i — зазоры между связанными линиями; l_i — длина звеньев фильтра; h — толщина диэлектрической подложки

распространенных и точных методов синтеза при проектировании микрополосковых ППФ является использование фильтров-прототипов нижних частот [10].

Синтез допусков проводился с использованием внутренней интерполяции при интервальном методе синтеза и с применением генетического алгоритма (табл. 1). С целью сравнения алгоритмов допускового синтеза допуски синтезировались на основе критерия максимального объема [3]. При этом в связи с использованием внутренней интерполяции рассматривались взаимонезависимые допуски на каждый элемент геометрии (теоретический случай), а отклонение затухания фильтра было выбрано $\delta_{\alpha} = \pm 5\%$. Отклонение затухания определялось на верхней границе полосы пропускания фильтра $f_{п} = 1055$ МГц в связи с особенностями АЧХ (ее меньшей крутизной), вызванными вносимыми потерями и близостью паразитной полосы пропускания.

Полученные результаты синтеза свидетельствуют о неточности данных внутренней интерполяции. Важно отметить, что применение генетического алгоритма дает не только более точные значения гарантированных допусков, но и значительно увеличивает интервал допуска на некоторые параметры. При этом расширяется объем допусков.

Однако в реальности отклонения на толщину подложки и ее диэлектрическую проницаемость задаются параметрами материала и технологией изготовления. Кроме того, важны смещение полосы пропускания фильтра относительно центральной частоты и изменение ширины полосы пропускания. Таким образом, задача синтеза допусков может быть сформулирована в виде: $h = l_{-0,02}$ мм, $\epsilon_r = 9,6 \pm 0,2$, $\delta_{(W_i, S_i, l_i)} \geq 20$ мкм при условии, что ширина допускового интервала по частоте относительно ширины полосы пропускания $\delta_{\Delta f / (f_n - f_{-n})} = \pm 10\%$. Результаты работы генетического алгоритма для этой задачи приведены в табл. 2.

Данные таблицы свидетельствуют о возможности реализации заданного фильтра в условиях современного состояния тонкопленочной технологии изготовления и о возможности ужесточения требований к отклонению АЧХ фильтра.

Таблица 1

Результаты синтеза допусков с использованием генетического алгоритма и внутренней интерполяции

Параметр	Номинальное значение, мм	Внутренняя интерполяция, отклонения, %			Генетический алгоритм, отклонения, %		
		Нижнее	Верхнее	Ширина	Нижнее	Верхнее	Ширина
h	1	-0,038	0,045	0,083	-0,001	0,069	0,07
ϵ_r	9,6 отн. ед.	-0,009	0,009	0,018	-0,001	0,015	0,016
$W_1=W_4$	0,57728	-0,481	0,493	0,974	0,587	0,737	1,324
$S_1=S_4$	0,28508	-0,64	0,642	1,282	-0,210	0,740	0,95
$l_1=l_4$	29,87	-0,054	0,053	0,107	-0,034	0,083	0,117
$W_2=W_3$	0,901	-0,137	0,13	0,267	-0,115	0,084	0,2
$S_2=S_3$	1,08129	-0,126	0,125	0,251	-0,105	0,305	0,410
$l_2=l_3$	29,34	-0,01	0,01	0,020	-0,015	0,05	0,020
Объем области		$2,68 \cdot 10^{-7}$			$2,7 \cdot 10^{-7}$		

Таблица 2
 Результаты синтеза допусков с использованием
 генетического алгоритма

Параметр	Нижнее отклонение, мм	Верхнее отклонение, мм
$W_1=W_4$	-0,0194	0,0206
$S_1=S_4$	-0,0196	0,0204
$l_1=l_4$	-0,0418	$3 \cdot 10^{-5}$
$W_2=W_3$	-0,0207	0,0193
$S_2=S_3$	-0,0189	0,0211
$l_2=l_3$	$-2,9 \cdot 10^{-5}$	0,0678

Выводы

Применение генетического алгоритма позволяет разработать эффективный метод назначения асимметричных допусков и подходы для параметрического и допускового анализа и синтеза СВЧ-устройств. Использование генетического алгоритма дает возможность решения задач с немонотонными выходными функциями и с нестандартными ограничениями. При этом интервальный анализ позволяет относительно быстро проводить внешнее оценивание области допустимых значений функций, что дает возможность существенно упростить задачу определения приемлемости совокупности параметров.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Конструкторско-технологические основы проектирования полосковых микросхем / Под ред. И. П. Бушминского. — М.: Радио и связь, 1987.

2. Воробьев Е. А. Расчет производственных допусков устройств СВЧ. — Л.: Судостроение, 1980.

3. Шило Г. М. Формування інтервальних моделей для обчислення допусків // *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління.* — 2002. — № 1. — С. 90—95.

4. Haupt R. L., Haupt S. E. Practical genetic algorithm. — New Jersey: Wiley & Sons Inc., 1998.

5. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев, С. А. Сергеев. — Харьков: Основа, 1997.

6. Bentley P., Kumar S. Three ways to grow designs: a comparison of embryogenies for an evolutionary design problem // *Genetic Programming and Evolvable Machines.* — 2003. — N 4. — P. 255—286.

7. Spagnuolo G., Vitelli M. Worst-case tolerance design by genetic algorithm // *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics.* — L'Aquila (Italy). — 2002. — P. 1178—1183.

8. Кришук В. М., Шило Г. М., Артюшенко Б. А. Генетичний алгоритм призначення допусків на радіоелементи з інтервальним оцінюванням // *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління.* — 2006. — № 2. — С. 28—32.

9. Артюшенко Б., Шило Г., Кришук В. Генетический алгоритм назначения интервальных допусков // *Всероссийское совещание по интервальному анализу и его приложениям.* — Петергоф, Россия. — 2006. — С. 5—8.

10. Кришук В. М., Фарафонов О. Ю., Романенко С. М. та ін. Врахування допусків і оптимізація параметрів мікросмужкових смугових фільтрів на зв'язаних лініях // *Вісник НУ «Львівська політехніка».* Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. — 2005. — № 548. — С. 83—90.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Залогин Н. Н., Кислов В. В. Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. — М.: Радиотехника, 2006. — 208 с.

Рассмотрены вопросы, связанные с генерацией интенсивных широкополосных хаотических колебаний в аналоговых и цифровых нелинейных системах. Подробно описаны микроволновые генераторы хаотических колебаний на электровакуумных и твердотельных элементах электроники СВЧ, а также алгоритмы реализации цифровых хаотических последовательностей заданного периода. Приведены возможные применения источников мощных широкополосных шумовых колебаний в радиотехнических и информационных системах. Проанализированы возможности радиолокации с использованием широкополосного шумового зондирующего сигнала, возможности применения таких сигналов в радиоэлектронной борьбе, в устройствах хранения и передачи информации, а также в дизайнерских разработках.

НОВЫЕ КНИГИ



Колосовский Е. А. Устройства приема и обработки сигналов. Учебное пособие для вузов. — М: Горячая линия—Телеком, 2007. — 456 с.

Систематизированы сведения по всем разделам вузовской программы одноименного курса. Изложены теоретические основы приема сигналов на фоне помех, принципы построения трактов сигнальной и промежуточной частоты радиоприемных устройств, основные положения теории синтеза частот, способы обеспечения регулировок и структуры частных трактов при приеме сигналов с различными видами модуляции. Рассмотрены факторы, влияющие на качественные показатели радиоприемных устройств.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Радиотехника». Может быть использовано для повышения квалификации специалистами.