

Проектирование шлейфных структур СВЧ на основе теоремы о каскадном включении реактивных симметричных четырехполюсников

В.А. Неганов¹, И.А. Петров²

¹ Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Российская Федерация, г. Самара
ул. Л. Толстого, 23

² ФГУП «ЦНИРТИ им. ак. А.И. Берга»
105066, Российская Федерация, г. Москва
ул. Новая Басманная, 20

В статье рассматривается структурный синтез СВЧ-устройств с использованием шлейфных четырехполюсников. Приводится теорема о каскадном включении одинаковых реактивных симметричных четырехполюсников. Приводятся примеры проектирования различных устройств СВЧ, путем совмещения их с широкополосными шлейфными четырехполюсниками.

Ключевые слова: теорема, устройства СВЧ, широкополосные согласующие структуры.

Введение

В более ранних, так и в последних работах [1–4] приводятся многочисленные примеры проектирования устройств СВЧ с использованием широкополосных согласующих структур с короткозамкнутыми и разомкнутыми шлейфами. Совмещение подобных структур со структурами СВЧ-устройств, синтезируемых общепринятыми (традиционными, классическими) методами, будем называть структурным синтезом устройств СВЧ.

Структурный СВЧ-устройство основан на:

1. Общепринятых (традиционных, классических) схемотехнических решениях проектирования и методах анализа и синтеза устройств СВЧ.
2. Применении современных вычислительных средств и программного обеспечения при схемотехническом и электродинамическом моделировании, а также параметрическом синтезе устройств.
3. Принципе совмещения структур СВЧ-устройств, полученных общепринятыми методами, с широкополосными согласующими цепями и, прежде всего, со структурами на основе шлейфных четырехполюсников.
4. Применении, в качестве исходных широкополосных согласующих цепей, каскадных соединений одинаковых реактивных симметричных шлейфных четырехполюсников.

Под словом «структура» понимается не только схемное соединения элементов, но и их взаимное расположение, размеры, конфигурация и другие особенности схемного, конструктивного и технологического характера.

Структурный синтез СВЧ-устройств позволяет:

1. Значительно увеличивать количество вариантов схемотехнического построения устройств.
2. Расширять рабочий диапазон устройств.
3. Получать заданные амплитудно- и фазочастотные характеристики.
4. Увеличивать число параметров для параметрического синтеза устройств.
5. В ряде случаев, получать новые частотные свойства и расширять функциональные возможности устройств.
6. Уменьшать габариты устройств.

В качестве исходных широкополосных согласующих цепей предлагается использовать каскадные соединения одинаковых реактивных симметричных Т- и П-образные четырехполюсников с разомкнутыми и короткозамкнутыми шлейфами, а также каскадные соединения комбинированных шлейфных четырехполюсников. Применение каскадных соединений одинаковых реактивных симметричных четырехполюсников обусловлено прежде всего тем, что это несколько облегчает задачу поиска подходящих структур для структурного синтезе устройств

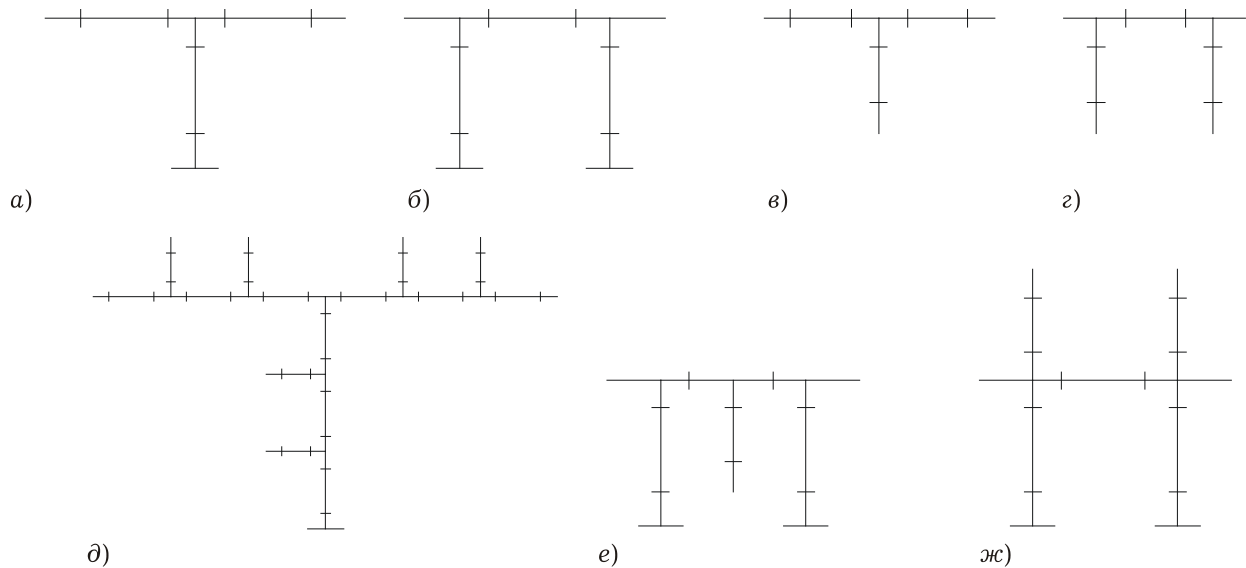


Рис. 1. Варианты шлейфных четырехполюсников

СВЧ, т. е. для реализации принципа совмещения различных структур в единую результирующую структуру с новыми частотными и другими свойствами.

1. Типы шлейфных четырехполюсников и их частотный анализ на основе теоремы о каскадном включении реактивных симметричных четырехполюсников

На рис. 1 приведены некоторые варианты шлейфных четырехполюсников, которые могут быть использованы при структурном синтезе различных СВЧ-устройств, включая: линейные, нелинейные, усилительные и другие типы устройств.

На рис. 1, а и б приведены широкополосные Т- и П-четыреполюсники с короткозамкнутыми шлейфами. Каскадные соединения подобных четырехполюсников могут применяться в цепях смещения для подачи питающих и управляющих напряжений на полупроводниковые элементы, для создания многоканальных переключателей и широкополосных фильтров. На рис. 1, в и г приведены широкополосные Т- и П-четыреполюсники с разомкнутыми шлейфами. Каскадные соединения данных четырехполюсников могут применяться для замены любых отрезков линий передачи, при этом уменьшаются габариты и увеличивается число параметров для последующего параметрического синтеза устройств. На рис. 1, д-ж приведены комбинированные шлейфные четырехполюсники, содер-

жащие как разомкнутые, так и короткозамкнутые шлейфы.

Применение, в качестве исходных широкополосных согласующих цепей каскадных соединений одинаковых реактивных симметричных четырехполюсников, обусловлено тем, что частотные свойства данных цепей (структур) определяются, прежде всего, параметрами элементов одиночного четырехполюсника. Данное свойство можно сформулировать в виде теоремы, которая приведена ниже.

Теорема: «При каскадном включении одинаковых реактивных симметричных четырехполюсников функция рабочего затухания результирующего четырехполюсника $L_p^n(f_w)$ в математической полосе пропускания не превышает значений функции $1 + P(f_w)$, где

$$P(f_w) = (L_p(f_w) - 1) / (1 - a_{11}^2(f_w));$$

$L_p(f_w)$ – функция рабочего затухания одиночного четырехполюсника; $a_{11}(f_w)$ – элемент классической матрицы передачи одиночного четырехполюсника; f_w – частота в математической полосе пропускания четырехполюсника».

Результирующая функция рабочего затухания каскадного соединения n четырехполюсников в полосе пропускания будет определяться следующим выражением

$$L_p^n(f_w) = 1 + P(f_w)\Psi(n, a_{11}(f_w)), \quad (1)$$

где $P(f_w)$ – функция, определяемая только параметрами одиночного четырехполюсника и равна

$$P(f_w) = \frac{L_p(f_w) - 1}{1 - a_{11}^2(f_w)}, \quad (2)$$

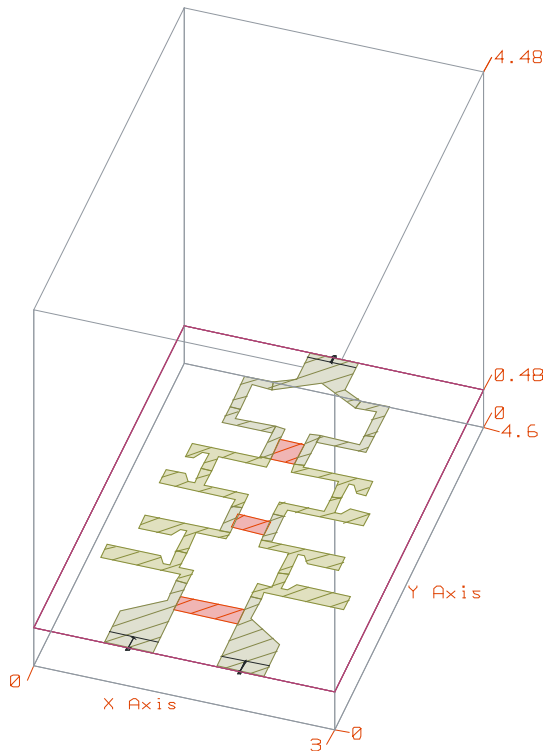


Рис. 2. Электродинамическая модель

$$L_p(f_w) = a_{11}^2(f_w) + \frac{1}{4} \left| \frac{a_{12}(f_w)}{\rho_0} + \rho_0 a_{21}(f_w) \right|^2$$

– функция рабочего затухания одиночного четырехполосника,

$$\Psi(n, a_{11}(f_w)) = \sin^2 n(\arccos a_{11}(f_w)).$$

В полосе пропускания функция $\Psi(n, a_{11}(f_w))$ изменяется от 0 до 1 и результирующая функция рабочего затухания (1) не превышает значений $1 + P(f_w)$. Под полосой пропускания, с математической точки зрения, здесь понимаются частоты f_w , на которых элемент a_{11} классической матрицы передачи одиночного четырехполосника лежит в пределах от -1 до 1 , т. е. когда решение разностных уравнений цепочки четырехполосников [5] необходимо искать в виде $e^{i\gamma n}$. Таким образом, анализ частотных свойств реактивных симметричных четырехполосников, а также широкополосных согласующих структур, получаемых при каскадном соединении подобных шлейфных четырехполосников, можно проводить на основе изложенной выше теоремы. Более подробно частотные свойства шлейфных четырехполосников приведены в работе [4].

2. Примеры структурного синтеза устройств СВЧ

На рис. 2 приведена электродинамическая модель трехзвенного делителя мощности, а на

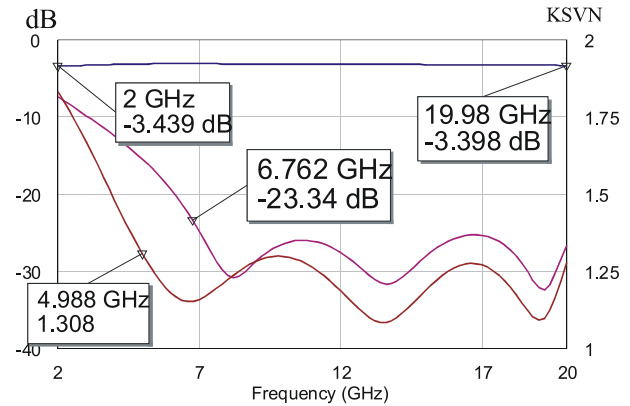


Рис. 3. Частотные характеристики

рис. 3 его расчетные характеристики в диапазоне частот от 2 до 20 ГГц.

Трехзвенный делитель мощности с неперiodической структурой оптимизировался для получения максимальной полосы согласования при минимальных значениях КСВН на верхних частотах. Хотя, на низких частотах КСВН увеличивается, но остается менее 2, а развязка снижается до -10 дБ. Такой делитель вполне можно применять в диапазоне частот от 2 до 20 ГГц, при этом ослабление сигнала от входа до выхода не превышает 3,6 дБ. Длина делителя не превышает 4 мм.

На рис. 4 приведена схема устройства, состоящего из диодного переключателя и делителя мощности. Высокочастотный сигнал, поступающий на один из входов (XV1 или XV2) подключается р-и-п-диодным переключателем к общей линии и, далее, через делитель мощности разветвляется на выходы (XV3 и XV4).

Переключатель выполнен по схеме с последовательным включением диодов в 50-омную линию передачи. Открывание одного из каналов осуществляется подачей управляющего напряжения положительной полярности на низкочастотный вход того канала, который необходимо открыть (XC1 или XC2). Ток управления через четвертьволновые, короткозамкнутые по СВЧ сигналу конденсаторами C1 и C2 на корпус, открывает соответствующие диоды и замыкается крайними четвертьволновыми шлейфами. Делитель выполнен на основе двухступенчатого перехода, согласующего входную 50-омную линию с суммарным сопротивлением выходных линий, равным 25 Ом. Эквивалентная схема устройства при одном открытом канале переключателя, без учета емкостей C_i и сопротивлений r_+ и r_- диодов, приведена на рис. 5, а (вариант 1). Волновое сопротивление отрезков линий W1, W2 и

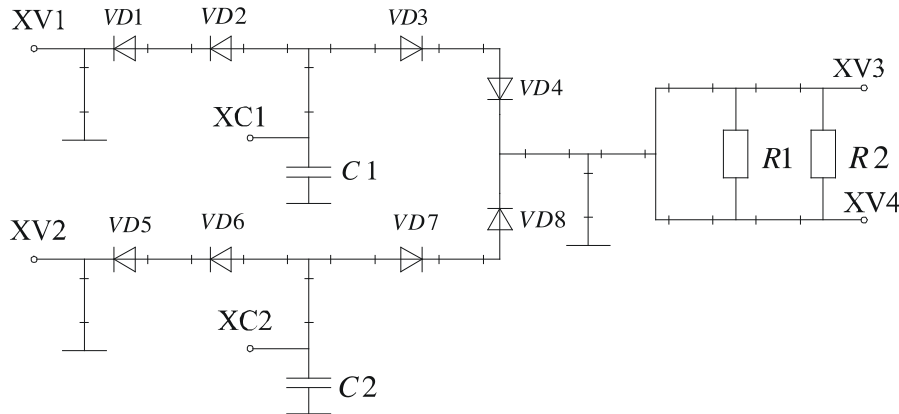


Рис. 4. Схема переключателя и делителя мощности

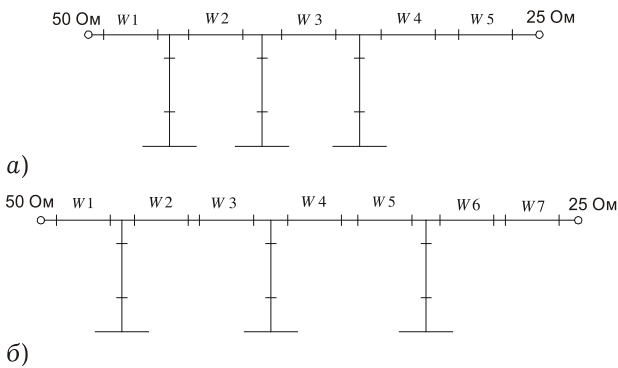


Рис. 5. Эквивалентные схемы переключателя и делителя мощности

$W3$ равно 50 Ом, отрезки $W4$ и $W5$ образуют двухступенчатый переход. Частотная характеристика КСВН такого устройства приведена на рис. 6 (кривая 1), коэффициент перекрытия по диапазону частот равен 2 для уровня КСВН не более 1,5.

Для расширения частотного диапазона, рассматриваемого устройства, заменим обычные четвертьволновые шлейфы в переключателе каскадными структурами, состоящими из четырехполюсников рис. 1, б (вариант 2) и из четырехполюсников рис. 1, а (вариант 3). Эквивалентная схема варианта 2 будет соответствовать рис. 5, а, варианта 3 – рис. 5, б. Длины всех последовательных отрезков линий передачи $W1...W5$ в варианте 2 и $W1...W7$ в варианте 3 будут равны $\lambda/4$. Волновые сопротивления этих отрезков будем рассчитывать как многоступенчатые трансформаторы, с одной стороны, согласующие входное 50-омное волновое сопротивление с выходным 25-омным, а с другой стороны, чтобы они компенсировали реактивности короткозамкнутых шлейфов. Частотные характеристики КСВН вариантов 2 и 3 приведены на рис. 5 (кривые 2 и 3, соответственно). Коэффициент перекрытия по диапазону частот в варианте 2

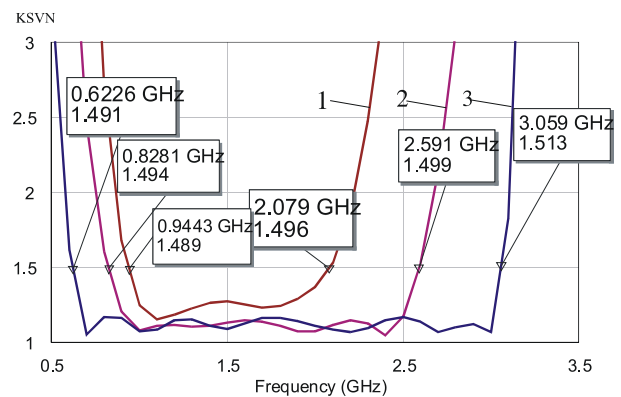


Рис. 6. Характеристики переключателя и делителя мощности

увеличился до 3, а в варианте 3 до 5. Далее все последовательные отрезки линий можно заменить каскадными структурами с разомкнутыми шлейфами (рис. 1, в и г), что уменьшит габариты. Приведенные выше примеры (варианты 2 и 3) показывают, как в единую широкополосную согласующую структуру могут быть совмещены многоступенчатый переход, диодный переключатель, делитель мощности, а также каскадные структуры с короткозамкнутыми и разомкнутыми шлейфами.

Синтезируем полосовой фильтр с чебышевской характеристикой, состоящий из 7 короткозамкнутых шлейфов с четвертьволновыми связями, его расчетная характеристика приведена на рис. 7 (кривая 1). На рис. 7 (кривая 2) приведена частотная характеристика ППФ с таким же числом короткозамкнутых шлейфов, синтезируемого путем каскадного соединения шести одинаковых комбинированных четырехполюсников, схема которого изображена на рис. 1, е.

Если для фильтра с чебышевской характеристикой коэффициент прямоугольности на уровне -40 дБ равен 1,84, то для второго фильтра на уровне -40 дБ равен 1,25, а на уровне -60 дБ равен 1,4. На рис. 8 приведены частотные харак-

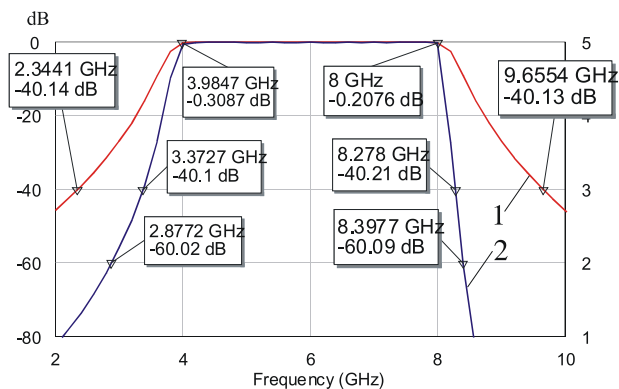


Рис. 7. Частотные характеристики ППФ

теристики этих же фильтров, но в расширенном диапазоне частот. Как видно из рисунка, если первый фильтр имеет паразитную полосу пропускания, то во втором она подавлена почти до 20 ГГц.

Заключение

1. Рассмотрен структурный синтез СВЧ-устройств с использованием шлейфных четырехполосников.

2. Приведена теорема о каскадном включении реактивных симметричных четырехполосников.

3. Приведены примеры структурного синтеза новых устройств СВЧ.

Список литературы

1. Петров И.А. Многоканальный переключатель. Авторское свидетельство № 881902 Н01Р 1/15. Приоритет от 06.09.1976. Опубликовано 15.11.1981, бюллетень № 42.

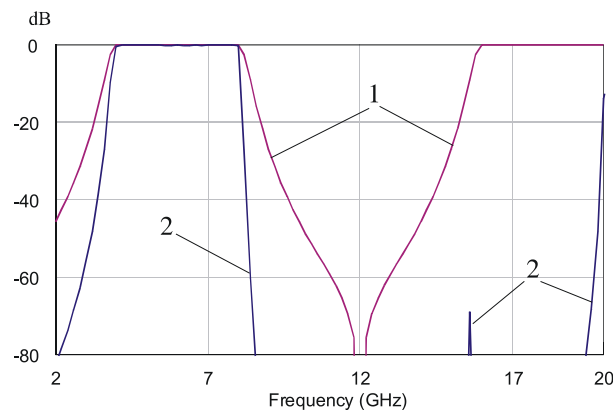


Рис. 8. Частотные характеристики ППФ в расширенном диапазоне

2. Неганов В.А., Петров И.А. Структурный синтез устройств СВЧ на основе теоремы о каскадном включении одинаковых реактивных симметричных четырехполосников // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2012. Т. 15. № 3. С. 46–50.

3. Лобанов Б.С., Петров И.А., Неганов В.А. Структурный синтез СВЧ-устройств с использованием шлейфных четырехполосников // Электронный журнал «Журнал радиоэлектроники». 2014. № 1. 15 с.

4. Петров И.А. Частотные свойства реактивных симметричных четырехполосников на основе шлейфных структур // Электронный журнал «Журнал радиоэлектроники». 2014. № 1. 21 с.

5. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р. Синтез четырехполосников и восьмиполосников на СВЧ. 2-е изд. М.: Связь, 1971. 388 с.

Microwave device there is designing on base of the theorem about cut-in alike reactive symmetrical quadrupoles

V.A. Neganov, I.A. Petrov

The microwave devices structured syntheses with use shunting quadrupoles is considered in given to article. The Theorem about cascade cut-in reactive symmetrical quadrupoles happens to here. The examples different microwave devices are brought in given to article.

Keywords: theorem, microwave devices, structures matching broadband.