

Широкополосные шлейфные структуры и их применение при проектировании устройств СВЧ

В.А. Неганов¹, И.А. Петров²

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

² АО «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 четырехполосников. Приводится теорема о каскадном включении одинаковых реактивных симметричных четырехполосников. Приводятся примеры проектирования различных устройств СВЧ, путем совмещения их с широкополосными шлейфными структурами.

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

Введение

В работах [1–11] последовательно развивается метод применения широкополосных шлейфных структур при проектировании различных линейных и нелинейных, активных и пассивных устройств СВЧ. Под шлейфной структурой понимается каскадное соединение четырехполосников содержащих короткозамкнутые и разомкнутые шлейфы. Совмещение подобных структур со структурами СВЧ-устройств, синтезируемых общепринятыми (традиционными, классическими) методами, будем называть структурным синтезом устройств СВЧ.

Структурный синтез СВЧ-устройств основан:

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 четырехполосников.
4. Применении, в качестве исходных широкополосных шлейфных структур, каскадных сое-

динений одинаковых реактивных симметричных шлейфных четырехполосников.

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 фазо-частотные 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 шлейфных структур предлагается использовать каскадные соединения одинаковых реактивных симметричных Т- и П-образные четырехполосников с разомкнутыми и короткозамкнутыми шлейфами, а также каскадные соединения комбинированных шлейфных четырехполосников. Применение каскадных соединений одинаковых реактивных симметричных четырехполосников обусловлено прежде всего тем, что это несколько облегчает задачу поиска подходящих

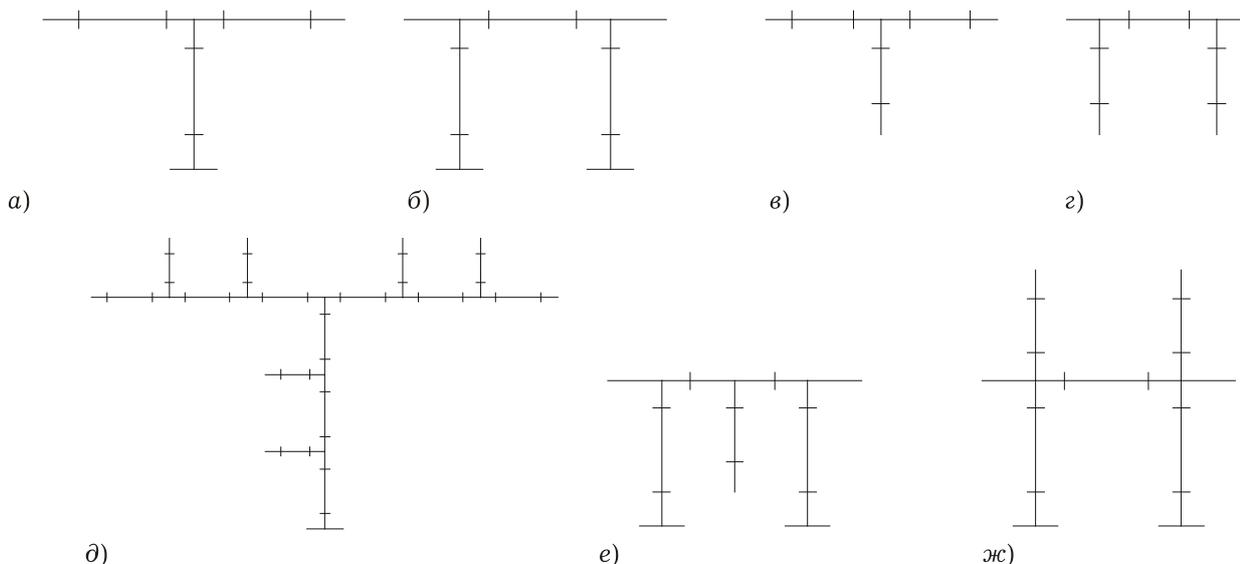


Рис. 1. Варианты шлейфных четырехполосников

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

1. Типы шлейфных четырехполосников

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

На рис. 1, а и б приведены широкополосные Т- и П-четыреполосники с короткозамкнутыми шлейфами. Каскадные соединения подобных четырехполосников 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-четыреполосники с разомкнутыми шлейфами. Каскадные соединения данных четырехполосников 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 четырехполосники, содержащие как разомкнутые, так и короткозамкнутые шлейфы.

Каскадные соединения одинаковых реактивных симметричных Т-образных четырех-

полосников с короткозамкнутыми шлейфами (рис. 1, а) использовались в качестве исходных структур для построения многоканальных переключателей с полупроводниковыми элементами, работа [1]. Было установлено, что независимо от числа каналов, т. е. каскадно соединенных четырехполосников, полоса рабочих частот, максимальные значения ослабления и КСВН определяются параметрами одиночного четырехполосника. Было проведено исследование и получено доказательство этого свойства. Данное доказательство опубликовано в работах [2; 3]. Распространяя принцип совмещения структур на другие устройства СВЧ, это свойство было сформулировано в виде теоремы, которая впервые была опубликована в работе [4].

2. Теорема о каскадном включении реактивных симметричных четырехполосников

Теорема: «При каскадном включении одинаковых реактивных симметричных четырехполосников функция рабочего затухания результирующего четырехполосника $L_p^n(f_w)$ 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 четырехполосника; $a_{11}(f_w)$ – элемент классической матрицы передачи одиночного четырехполосника; f_w – частота в математической полосе пропускания четырехполосника».

Результирующая функция рабочего затухания каскадного соединения n четырехполосни-

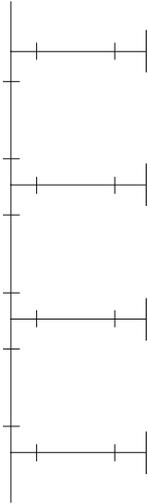


Рис. 2. 4-х шлейфный четырехполосник

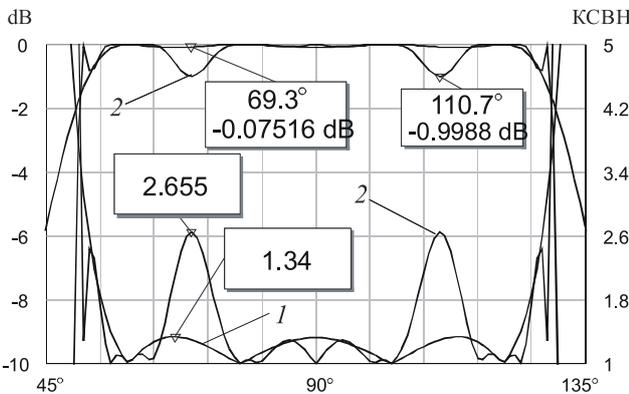


Рис. 3. Характеристики четырехполосников

ков в полосе пропускания будет определяться следующим выражением

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

где $P(f_w)$ – функция, определена в теореме;

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

– 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 [12] необходимо искать в виде $e^{i\gamma n}$. Таким образом, анализ частотных свойств реактивных симметричных четырехполосников,

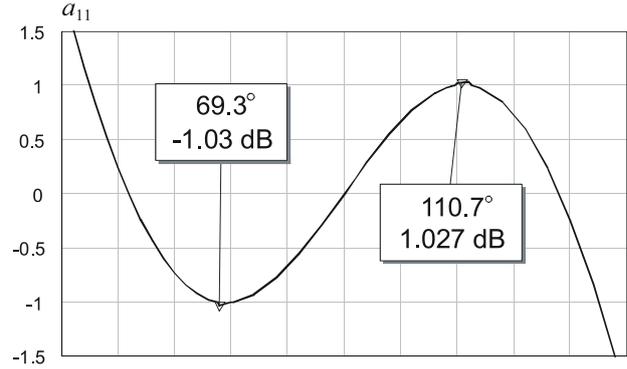


Рис. 4. Коэффициент a_{11} в диапазоне

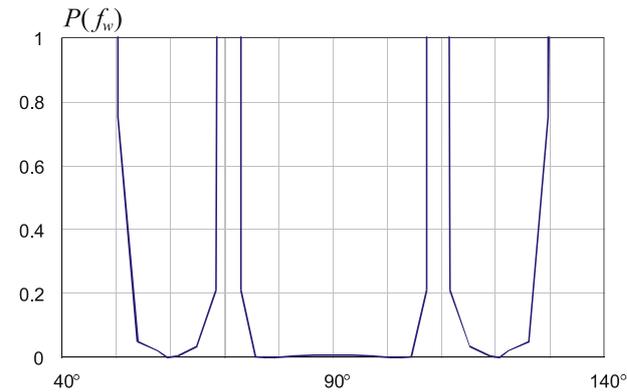


Рис. 5. Функции $P(f_w)$ в диапазоне

а также широкополосных согласующих структур, получаемых при каскадном соединении подобных шлейфных четырехполосников, можно проводить на основе изложенной выше теоремы. Наиболее полно частотные свойства шлейфных четырехполосников приведены в работе [9].

Рассмотрим одиночный четырехполосник с 4 короткозамкнутыми шлейфами изображенный на рис. 2. Рассчитаем его как полосовой фильтр с характеристикой Чебышева. На рис. 3 приведены характеристики ослабления и КСВН, кривые 1. На рис. 3 (кривые 2) приведены характеристики каскадного соединения четырех таких фильтров. Согласно теореме при каскадном включении одинаковых реактивных симметричных четырехполосников ослабление и КСВН не должны зависеть от n , здесь же произошло их увеличение слева и с право от центральной частоты.

Знаменатель функции $P(f_w)$ равен $1 - a_{11}^2$. На рис. 4 приведены изменение коэффициента a_{11} в диапазоне частот. Как видно, слева и с право от центральной частоты $|a_{11}| > 1$, при $|a_{11}| = 1$ функции $P(f_w) = \infty$ и при $|a_{11}| > 1$ она не существует, т. е. имеет разрывы. На рис. 5 приведена зависимость функции $P(f_w)$ в диапазоне частот.

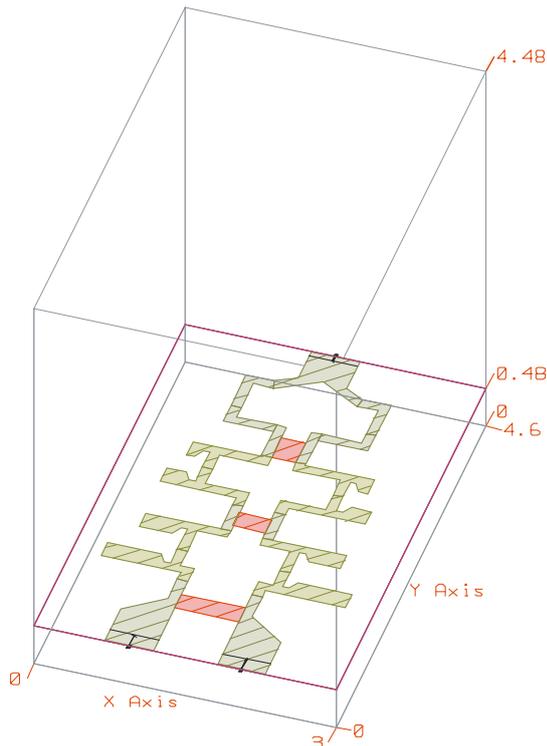


Рис. 6. Электродинамическая модель

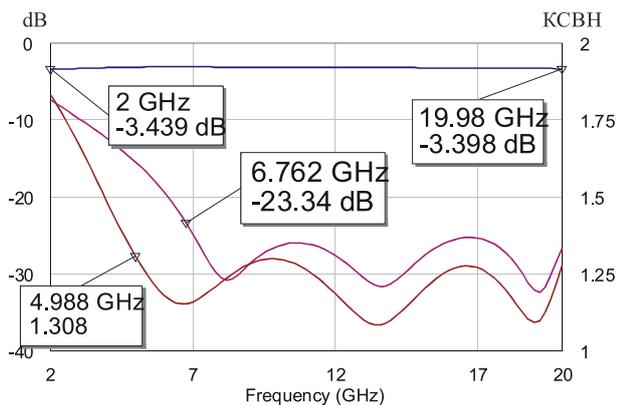


Рис. 7. Частотные характеристики

3. Примеры структурного синтеза устройств СВЧ

На рис. 6 приведена электродинамическая модель трехзвенного делителя мощности, а на рис. 7 его расчетные характеристики в диапазоне частот от 2 до 20 ГГц.

Трехзвенный делитель мощности с неперидической 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.

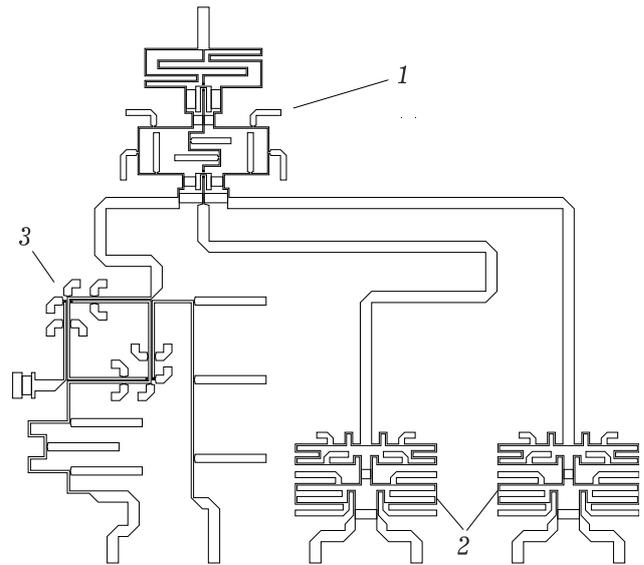


Рис. 8. Топология делителя 1 × 6

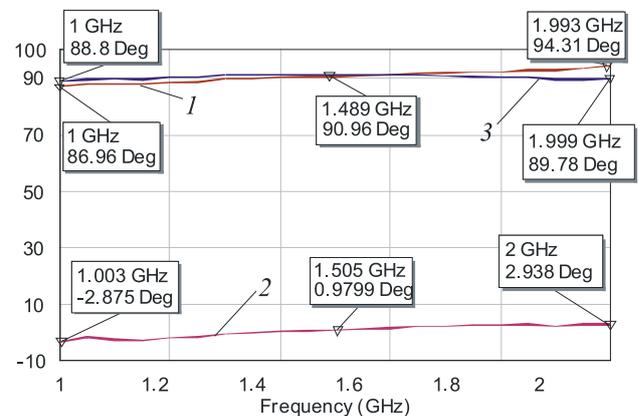


Рис. 9. Разности фаз между каналами

На рис. 8 приведена топология делителя мощности на шесть выходов. Данный делитель состоит из: делителя 1×3 – 1, делителей 1×2 – 2 и тандемного ответвителя – 3.

Трансформирующие отрезки линий в делителях и связанные линии ответвителя заменялись каскадным соединением четырехполюсников с разомкнутыми шлейфами и далее оптимизировались, что позволило получить хорошие частотные характеристики и уменьшить габариты. Кроме того, основные линии делителей имеют высокое волновое сопротивление и малую ширину, поэтому их удалось компактно свернуть.

Необходимость применения тандемного ответвителя обусловлена тем, что фазовая характеристика первого канала в диапазоне рабочих частот должна быть сдвинута на 90° относительно других пяти выходов. На рис. 9 приведены фазовые частотные характеристики первого (кривая 1) и второго (кривая 2) относительно последующих каналов. Характеристика первого кана-

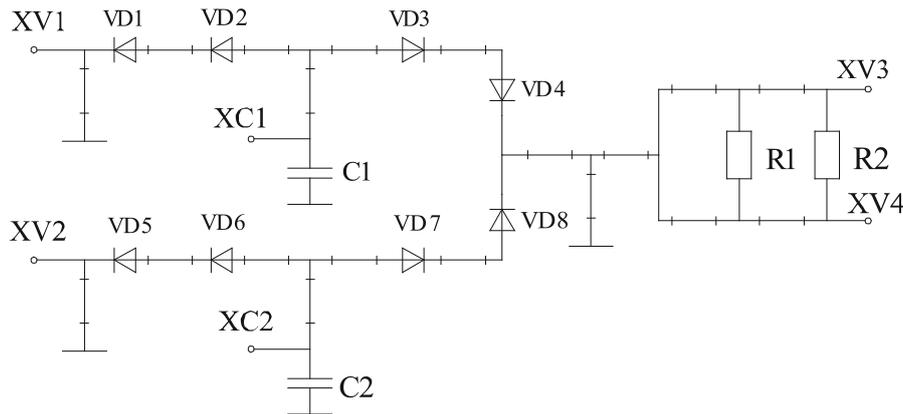


Рис. 10. Схема переключателя и делителя мощности

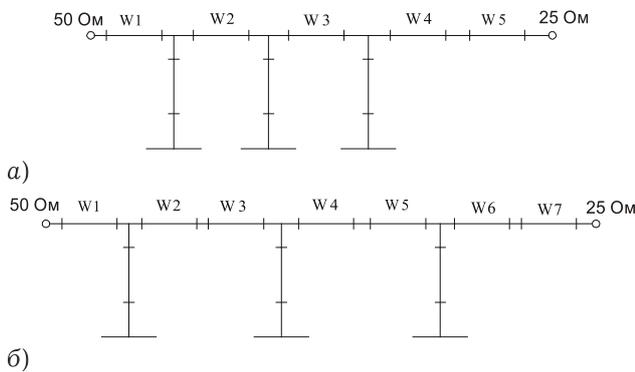


Рис. 11. Эквивалентные схемы переключателя и делителя мощности

ла имеет наклон $7,4^\circ$, второго 6° . Для уменьшения наклона фазовых характеристик к выходам ответвителя подключены каскадные соединения четырехполюсников с разомкнутыми шлейфами. Так как, входные проводимости разомкнутых шлейфов имеют тангенсальную зависимость, фазовые характеристики таких структур имеют нелинейный характер по сравнению с однородными линиями. В результате наклон фазовой характеристики первого канала уменьшился до 1° , аналогично корректируется и второй канал.

В работе [11] подробно анализируются основные принципы проектирования переключающих СВЧ-устройств с полупроводниковыми элементами (ПЭ). Приводятся примеры применения шлейфных структур при создании новых схемотехнических решений переключающих устройств с последовательным, параллельным и последовательно-параллельным включением ПЭ в линии передачи. Приведем еще один пример.

На рис. 10 приведена схема устройства, состоящего из диодного переключателя и делителя мощности. Высокочастотный сигнал, поступающий на один из входов (XV1 или XV2) подключается р-і-п диодным переключателем к общей линии и, далее, через делитель мощности разветвляется на выходы (XV3 и XV4).

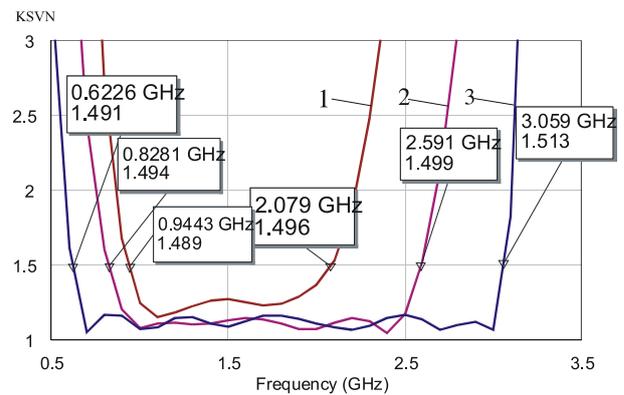


Рис. 12. Характеристики переключателя и делителя мощности

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. 11, а (вариант 1). Волновое сопротивление отрезков линий W1, W2 и W3 равно 50 Ом, отрезки W4 и W5 образуют двухступенчатый переход. Частотная характеристика КСВН такого устройства приведена на рис. 12 (кривая 1), коэффициент перекрытия по диапазону частот равен 2 для уровня КСВН не более 1,5.

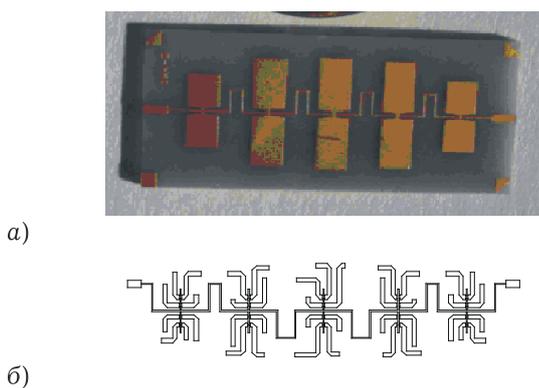


Рис. 13. Фильтры нижних частот

Для расширения частотного диапазона, рассматриваемого устройства, заменим обычные четвертьволновые шлейфы в переключателе каскадными структурами, состоящими из четырехполосников рис. 1, б (вариант 2) и из четырехполосников рис. 1, а (вариант 3). Эквивалентная схема варианта 2 будет соответствовать рис. 11, а, варианта 3 – рис. 11, 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. 12 (кривые 2 и 3, соответственно). Коэффициент перекрытия по диапазону частот в варианте 2 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.

Основные принципы проектирования переключающих СВЧ-устройств с полупроводниковыми элементами были доложены на данной конференции в прошлом году [11].

На рис. 13, а приведен пример микрополоскового ФНЧ, выполненного на подложке из поликора толщиной 0,5 мм.

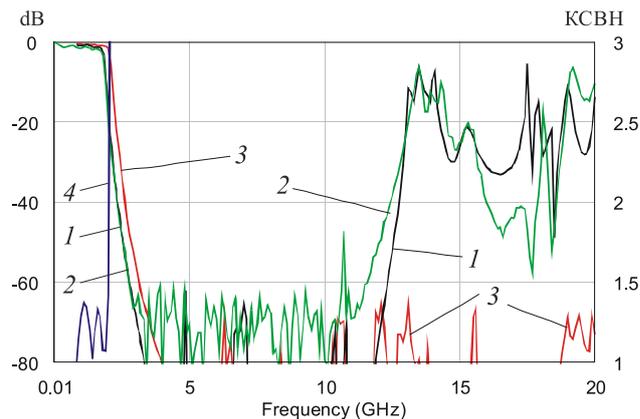


Рис. 14. Характеристики фильтров

На рис. 14 приведены расчетная (кривая 1) и экспериментальная (кривая 2) частотные характеристики ослабления фильтра, изображенного на рис. 13, а. Экспериментальные и расчетные частотные характеристики фильтра достаточно хорошо совпадают как в полосе пропускания, так и в полосе заграждения, что говорит о высокой точности электродинамических методов расчета. Фильтр имеет паразитную полосу пропускания выше 10 ГГц.

В ФНЧ разомкнутые шлейфы выполняются из отрезков линии передачи с низким волновым сопротивлением, поэтому они могут быть заменены каскадным соединением четырехполосников с разомкнутыми шлейфами. После такой замены разомкнутых шлейфов в исходном фильтре на эквивалентные периодические структуры, характеристики ослабления и КСВН в полосе пропускания фильтра практически не изменились, а в полосе заграждения уровень паразитных полос снизился до минус 30 дБ.

Проведем оптимизацию этого фильтра, произвольно изменяя длины разомкнутых шлейфов и соединительных отрезков линий передачи в исходных периодических структурах. Топология ФНЧ после оптимизации приведена на рис. 13, б. В нем, разомкнутые шлейфы исходного фильтра, заменены непериодическими структурами с разомкнутыми шлейфами. Характеристики ослабления и КСВН такого фильтра приведены, соответственно, на рис. 14 (кривые 3, 4).

Как видно из этих частотных характеристик, получился уникальный ФНЧ с частотой среза около 2 ГГц, в котором паразитные полосы пропускания задавлены ниже уровня минус 60 дБ до частот 20 ГГц.

Синтезируем полосовой фильтр с чебышевской характеристикой, состоящий из 7 коротко-

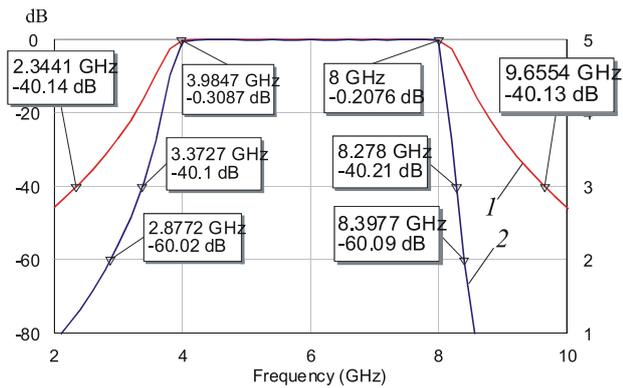


Рис. 15. Частотные характеристики ППФ

замкнутых шлейфов с четвертьволновыми связями, его расчетная характеристика приведена на рис. 15 (кривая 1). На рис. 15 (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. 16 приведены частотные характеристики 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 четырехполюсников, позволяющий значительно увеличивать количество вариантов схмотехнического построения устройств, расширять рабочий диапазон, получать заданные амплитудно- и фазочастотные характеристики, увеличивать число параметров для параметрического синтеза устройств, в ряде случаев, получать новые частотные свойства и расширять функциональные возможности устройств, уменьшать габариты.

2. Приведена теорема о каскадном включении реактивных симметричных четырехполюсников. В теореме введена функция $P(f_w)$, зависящая от параметров элементов одиночного четырехполюсника, но позволяющая анализировать частотные свойства каскадного соединения с любым числом одиночных четырехполюсников. Дано понятие математической полосы пропуска-

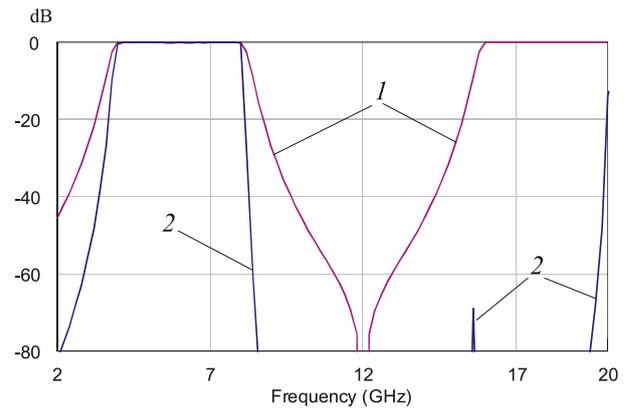


Рис. 16. Частотные характеристики ППФ в расширенном диапазоне

ния и ее отличие от физической полосы пропускания.

3. Приведены примеры структурного синтеза новых устройств СВЧ таких как: делителей и ответвителей мощности, трансформаторов сопротивлений, переключающих устройств с полупроводниковыми элементами, фильтров 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.
2. Петров И.А. Синтез р-і-п диодных переключателей с произвольным числом каналов // Специальная радиоэлектроника. 1981. Вып. 9.
3. Петров И.А. Управляющие устройства на полупроводниковых приборах с использованием широкополосных структур диапазона СВЧ // Труды X Международной научно-технической конференции. Радиолокация, навигация и связь. Воронеж, 13-15 апреля 2004. Т. 3. С. 428-435.
4. Петров И.А. Широкополосные согласующие структуры и их применение в устройствах СВЧ // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 2. С. 52-57.
5. Петров И.А. Фильтры СВЧ с использованием широкополосных согласующих структур // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 14. № 1. С. 51-56.
6. Петров И.А. Многоканальные СВЧ переключатели с полупроводниковыми элементами на основе широкополосных согласующих структур // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 14. № 4. С. 60-67.
7. Неганов В.А., Петров И.А. Структурный синтез устройств СВЧ на основе теоремы о каскадном включении одинаковых реактивных симметричных четырехполюсников // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2012. Т. 15. № 3. С. 46-50.

-
8. Лобанов Б.С., Петров И.А., Неганов В.А. Структурный синтез СВЧ устройств с использованием шлейфных четырехполюсников // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 1. С. 15.
 9. Петров И.А. Частотные свойства реактивных симметричных четырехполюсников на основе шлейфных структур // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 1. С. 21.
 10. Неганов В.А., Петров И.А. Проектирование шлейфных структур СВЧ на основе теоремы о каскадном включении реактивных симметричных четырехполюсников // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17. № 3. С. 71–75.
 11. Неганов В.А., Петров И.А. Основные принципы проектирования переключающих СВЧ-устройств с полупроводниковыми элементами // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т. 18. № 3. С. 89–95.
 12. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р. Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ; 2-е изд. М.: Связь, 1971. 388 с.
-

Broadband shunting structures and their using when designing microwave devices

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, broadband shunting structures.
