

Андрианов Артур Валерьевич,
Начальник отдела,
АО ТНИИС, г. Таганрог

Дёмочкин Денис Игоревич, Инженер,
АО ТНИИС, г. Таганрог

Зикий Анатолий Николаевич,
к.т.н., старший научный сотрудник,
АО ТНИИС, г. Таганрог

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ДЕЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ

Аннотация: в статье проведено исследование девятиканального делителя мощности, работающего в широком диапазоне частот. Даны описания схемы и конструкции делителя мощности на микрополосковых линиях передачи. Проведён анализ амплитудно-частотных характеристик разных каналов с помощью пакета Microwave Office. Экспериментально исследован макет делителя мощности, получены следующие результаты: в полосе от 2 до 18 ГГц потери не превышают 20 дБ, неравномерность не превышает 2 дБ, а неидентичность каналов не превышает 0,5 дБ.

Ключевые слова: делитель мощности; микрополосковые линии; амплитудно-частотные характеристики; потери; неравномерность; неидентичность; моделирование; эксперимент.

Введение

Делители мощности и направленные ответвители (далее ДМ и НО) широко используются в приёмно-передающей аппаратуре СВЧ для деления и суммирования мощности радиосигналов. Особенно широкое использование НО и ДМ нашли в антенных решётках. Велико разнообразие схем и конструкций ДМ и НО, в том числе по числу используемых каналов, по диапазону частот, по используемым линиям передачи. ДМ и НО посвящено значительное число научных публикаций, в том числе монографии [1-6], статьи [7-13], патенты [14].

Объектом исследования в данной работе является 9-канальный делитель мощности на микрополосковых линиях передачи. Целью работы является получение передаточных характеристик в широком диапазоне частот.

К ДМ предъявляются следующие требования:

- диапазон рабочих частот от 2 до 18 ГГц;
- максимальные потери не более 20 дБ;
- максимальная неидентичность каналов не более 0,5 дБ;
- волновое сопротивление 50 Ом;
- размер печатной платы 60×12 мм;
- требование по фазовой идентичности не предъявляется.

Для обеспечения большого перекрытия по частоте принято решение использовать схему на резисторах. При этом базовым элементом ДМ является делитель мощности на три. Для получения девяти равноценных выходов понадобится использовать четыре делителя мощности на три.

Трёхканальные делители мощности широко используются в кабельном телевидении, однако имеют большие габариты и волновое сопротивление 75 Ом. С волновым сопротивлением 50 Ом делитель на три рекламирует КБ «Фаза», г. Ростов-на-Дону. Его тип ДМЗ-28-37.101. Его основные размеры 32×64×11,5 мм [15].



Схема и конструкция

Если бы все плечи ДМ имели одинаковую длину и одинаковый коэффициент стоячей волны, можно было бы использовать 4 одинаковых делителя мощности на три. Однако на плате размером 60×12 мм не удаётся выровнять длину плеч, поэтому приходится использовать разные делители мощности на три для выравнивания потерь и КСВН.

Принципиальная схема делителя мощности (ДМ) приведена на рисунке 1. Из неё видно, что ДМ содержит 12 резисторов, 10 соединителей типа СР50-751ФВ, 15 отрезков микрополосковой линии передачи. Все резисторы напылены на поликоровой подложке. Краткие сведения о резисторах помещены в таблицу 1. Геометрические размеры микрополосковых линий собраны в таблицу 2.

Конструкцию ДМ можно представить с помощью рисунка 2. ДМ представляет собой поликоровую печатную плату с проводниками W1-W15 и резисторами R1-R12. Плата помещена в корпус рамочного типа и закрывается с двух сторон крышками. Соединители X1-X10 впаяны в корпус. Нижняя сторона печатной платы имеет сплошную металлизацию. Для поглощения объёмных волн на верхней крышке наклеивается поглощающий материал марки ХВ-3,2 размером 58×10 мм.

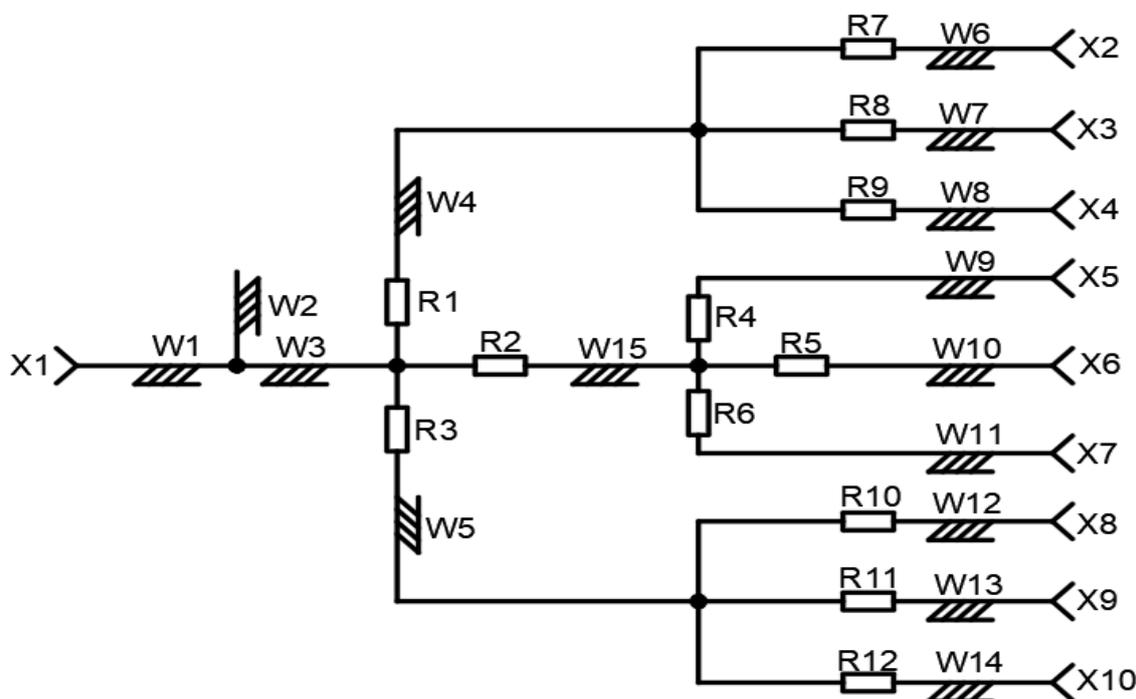


Рисунок 1. Принципиальная схема делителя мощности.

Таблица 1

Сопротивления резисторов		
Позиционное обозначение	Расчётный номинал и допуск	Удельное поверхностное сопротивление резистивного слоя
R4, R6, R7, R9, R10, R11	39 Ом ± 5%	$\rho_0 = 100 \text{ Ом}/\square \pm 10\%$
R5, R8, R12	43 Ом ± 5%	
R1, R2, R3	60 Ом ± 5%	



Таблица 2

Геометрия и другие параметры полосковых линий делителя мощности

Позиционное обозначение	Длина, мм	Ширина, мм	Наименование
W1	3	0,5	Микрополосковая линия
W2	0,75	0,5	Микрополосковая линия
W3	3	0,5	Микрополосковая линия
W4	2,5	0,5	Микрополосковая линия
W5	2,5	0,5	Микрополосковая линия
W6, W12	12,25	0,5	Микрополосковая линия
W7, W14	22,75	0,5	Микрополосковая линия
W8, W13	24,25	0,5	Микрополосковая линия
W9, W11	14	0,5	Микрополосковая линия
W10	3,75	0,5	Микрополосковая линия
W15	1,25	0,5	Микрополосковая линия
ϵ_r	9,8±		Относительная диэлектрическая проницаемость
a×b×c	12×60×0,5		Размер подложки, мм
tgδ	0,0003		Тангенс угла диэлектрических потерь
t	9		Толщина проводящего слоя, мкм

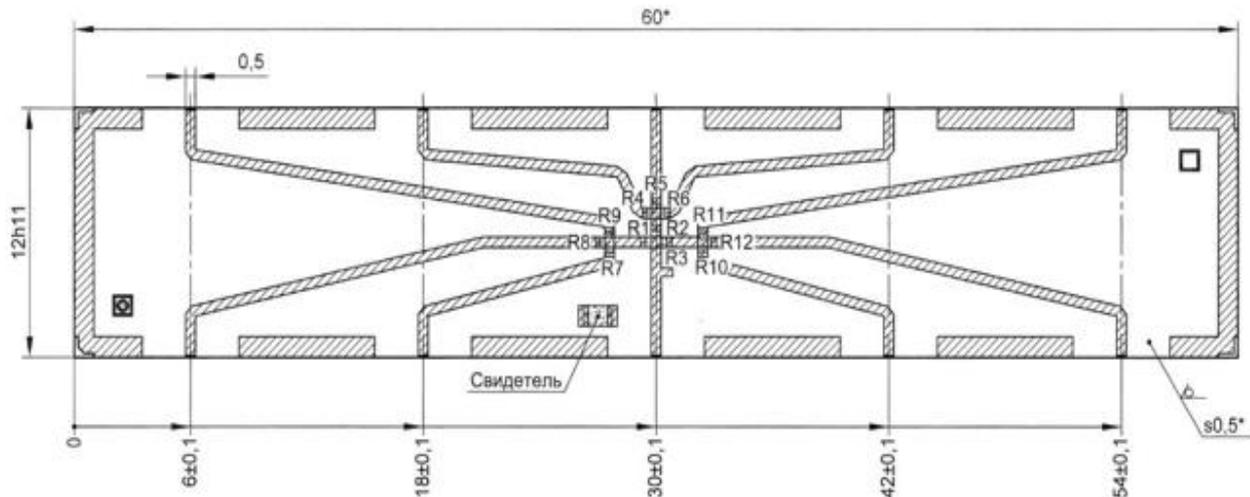


Рисунок 2. Топология делителя мощности

Моделирование

Моделирование ДМ проводилось в среде Microwave Office [16]. (MWO) Модель ДМ из MWO можно видеть на рисунке 3. Она составлена с использованием исходных данных из рисунков 1,2 и таблиц 1,2. На рисунке 4 показана передаточная характеристика со входа X1 на первый выход (X2). (S21). Там же показаны передаточные характеристики S3.1, S4.1, S5.1, S6.1. Из этих графиков можно сделать выводы: максимальные потери не превышают 17,5 дБ, неравномерность составляет около 2 дБ, а неидентичность каналов равно около 0,5 дБ.



Передаточные характеристики S7.1, S8.1, S9.1 и S10.1 не исследовались из-за предположения об их соответствии рисунку 4 благодаря симметрии схемы и конструкции делителя мощности.

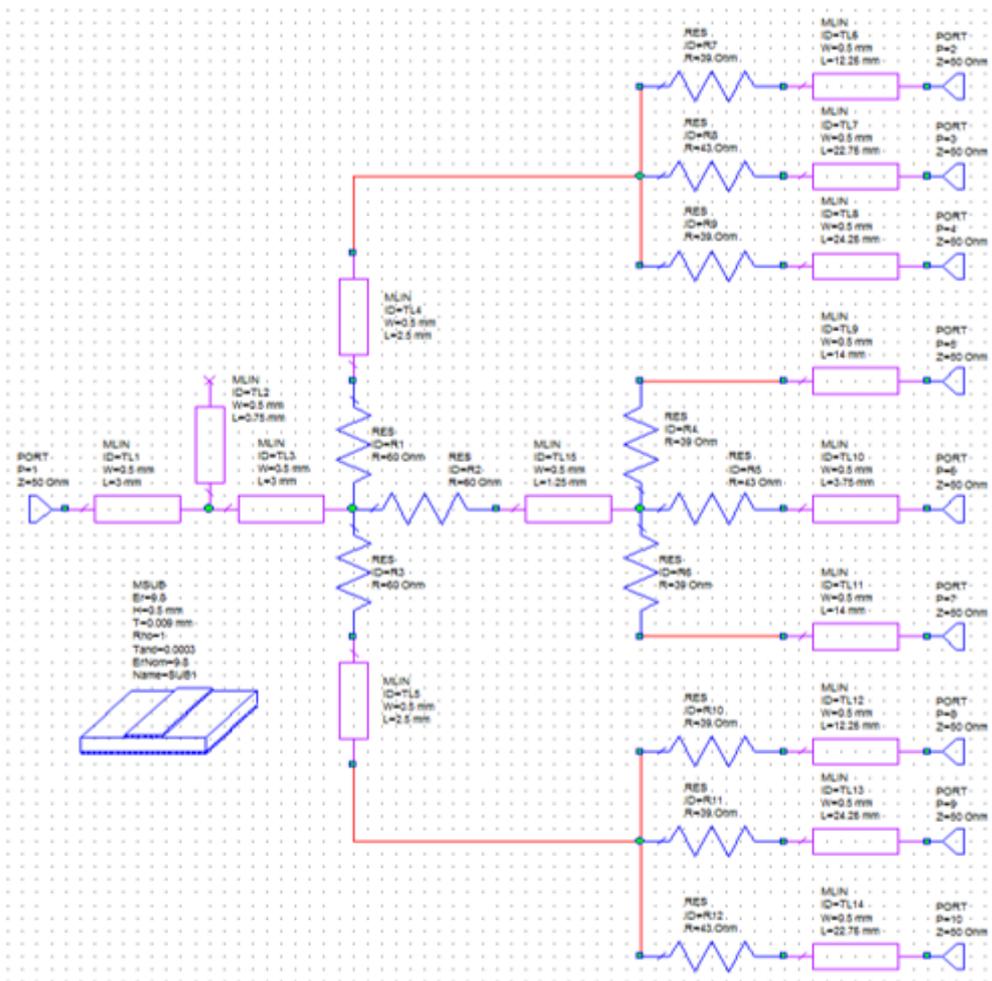


Рисунок 3. Модель 9-канального делителя мощности

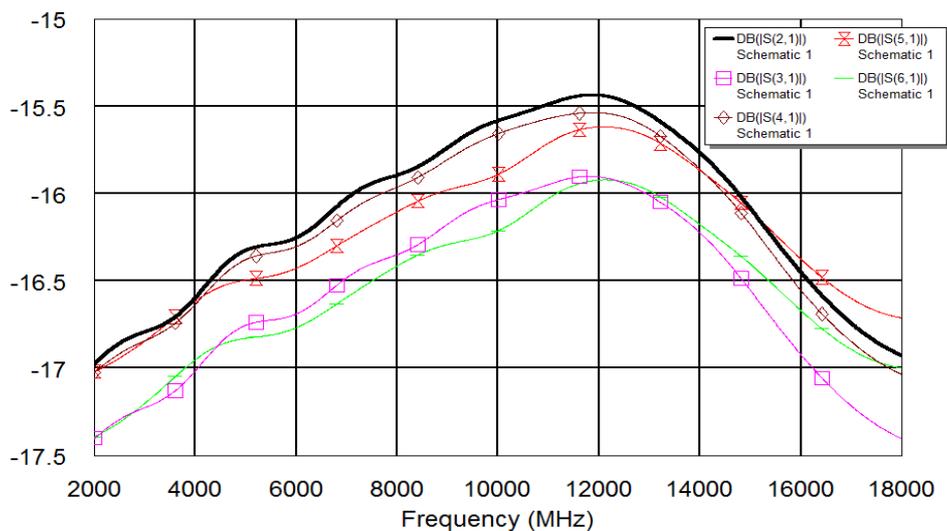


Рисунок 4. АЧХ 9-канального делителя мощности



Эксперимент

Эксперименты проводились на установке, содержащей векторный анализатор цепей типа PNA-L, набор кабелей и переходов, 16 согласованных нагрузок. Первые 5 экспериментов проводились с восемью согласованными нагрузками с диапазоном рабочих частот 2-8 ГГц.

В первом эксперименте исследован коэффициент передачи S21. Все незадействованные выходы соединены с согласованными нагрузками.

Во втором эксперименте снята кривая коэффициента передачи S31. Все свободные выходы нагружены на согласованные нагрузки.

В третьем эксперименте получена кривая коэффициента передачи S41.

В четвертом эксперименте результатом является кривая коэффициента передачи S51.

Пятый эксперимент позволил получить кривую коэффициента передачи S61.

Предполагая схему и конструкцию ДМ симметричной, остальные коэффициенты передачи S71, S81, S91 и S101 не снимались.

Эксперименты с шестого по десятый проводились в диапазоне рабочих частот 8-18 ГГц с 8 согласованными нагрузками для диапазона частот 8-18 ГГц.

Полученные в 10 экспериментах результаты соответствуют заданным требованиям.

Выводы

Ниже в таблице 3 проведено сравнение заданных и достигнутых параметров делителя мощности (при моделировании и в эксперименте)

Таблица 3

Основные параметры ДМ

Наименование параметра, размерность	Задано	Модель	Эксперимент
Диапазон рабочих частот, ГГц	2-18	2-18	2-18
Максимальные потери в каналах, дБ	20	17,5	20
Максимальная неравномерность потерь в каналах, дБ		2	3
Максимальный КСВН	$\leq 1,7$	—	—
Волновое сопротивление, Ом	50	50	50
Максимальная неидентичность каналов, дБ	$\leq 0,5$	0,5	—

Из этой таблицы видно, что все требования к делителю мощности выполняются.

Делитель мощности рекомендуется использовать в тракте распределения сигналов от генератора опорных частот, от генератора контрольных сигналов.

Список литературы:

1. Сверхширокополосные микроволновые устройства. Под ред. Креницкого А.П. и Мещанова В.П. –М.: Радио и связь, 2001. – 560с.
2. Устройства сложения и распределения мощности высокочастотных колебаний. Под ред. З.И. Моделя. - М.: Сов. Радио, 1980.-295 с.



3. Печурин В.А., Петров А.С. Широкополосные кольцевые делители-сумматоры мощности СВЧ диапазона. LAP Lambert Academic Publishing. 2011. – 144 с.
4. Летавин Д.А. Миниатюризация делителей мощности УВЧ диапазона: монография. – М.: Издательский дом Академии Естествознания. 2022. – 138 с.
5. Гостев В.И., Конин В.В., Мацепура А.Л. Линейные многоканальные устройства СВЧ. Киев, Изд-во «Радіаматор», 1997. – 315 с.
6. Летавин Д.А. Конструкции микрополосковых делителей мощности с уменьшенными размерами: монография. – М.: Издательский дом Академии Естествознания. 2023. – 92 с.
7. Кисиленко К.И., Мякишева М.С., Тимофеев Е.П. Разработка трёхканального делителя мощности СВЧ диапазона. Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2016, №3 (114), с. 64-71.
8. Губарев Д.Е., Зикий А.Н., Сперанская Г.В., Сташок П.А. Моделирование и экспериментальное исследование синфазного кольцевого делителя мощности. Инженерный вестник Дона, 2019, №4.
9. Андрианов А.В., Губарев Д.Е., Зикий А.Н., Баталова Е.А. Направленный ответвитель на ферритовых кольцах. Инженерный вестник Дона, 2019, №2.
10. Андрианов А.В., Губарев Д.Е., Зикий А.Н., Сленчковский В.Г. Исследование направленного ответвителя на связанных полосковых линиях. Инженерный вестник Дона, 2018, №4.
11. Андрианов А.В., Губарев Д.Е., Зикий А.Н., Сленчковский В.Г. Делитель мощности на основе 4-х шлейфного квадратурного моста. Инженерный вестник Дона, 2018, №3.
12. Андрианов А.В., Зикий А.Н., Кочубей А.С., Литвинов М.С. Экспериментальное исследование синфазного делителя мощности дециметровых волн. В сб.: Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении (КомТех-2022). Материалы Всероссийской НТК. В двух томах. Таганрог, 2022, с. 364 – 371.
13. Андрианов А.В., Зикий А.Н., Кочубей А.С., Ремпе А.Б. Делитель мощности СВЧ диапазона. В сб.: Человек, общество, технологии: актуальные вопросы взаимодействия. Сб. статей II МНПК. Петрозаводск, 2022, с. 58 – 67.
14. Патент РФ № 2.526.742. Многоканальный делитель мощности. Опубл. 27.08.2014, Бюл. №16. МПК H01P 5/00/ Говорухин В.И., Унру Н.Э.
15. Трёхканальный делитель мощности СВЧ ДМЗ-28-37.101. <http://faza-don.ru/products>
16. Резевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. – М.: Солон-Пресс, 2003. – 496 с.

