

Сверхоктавный полосковый направленный ответвитель для работы на высоком уровне мощности

М.Г. Пищенко¹, Д.Г. Пищенко¹, М.Б. Мануилов²

¹АО НПП "Фаза", Ростов-на-Дону

²Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Предложена новая компактная технологичная конструкция 20-децибельного направленного ответвителя диапазона 4-12 ГГц для работы на повышенном уровне мощности. Использована трехступенчатая структура на симметричных полосковых линиях с боковой связью. Для широкополосной компенсации возникающей на неоднородностях разности фазовых скоростей четной и нечетной мод в конструкцию ответвителя введены периодические структуры на внешних краях полосковых проводников. Изготовленный 20 дБ направленный ответвитель в диапазоне 4-12 ГГц имеет неравномерность переходного ослабления 0.5 дБ, изоляцию 35 дБ, направленность 15 дБ, КСВ<1.35, максимальную допустимую мощность 100 Вт. Размеры корпуса ответвителя 39×35×26 мм.

Ключевые слова: направленный ответвитель, связанные полосковые линии, четные и нечетные моды, периодические структуры, фазовая скорость мод, линии с боковой связью.

Введение

Направленные ответвители (НО) с различным переходным ослаблением широко применяются в составе распределительных цепей антенных решеток, а также для контроля мощности радиосигнала, распространяющегося в линии передачи, в измерителях мощности, системах автоматической регулировки усиления, радиоприемных устройствах и др. [1-5]. В этой связи актуальна задача разработки широкополосных НО с высокими электрическими характеристиками и максимально простой и технологичной конструкцией. Ключевыми требованиями к НО являются заданный уровень переходного ослабления в рабочей полосе частот и его малая неравномерность, высокая направленность и высокое согласование.

Для достижения заданной направленности НО необходимо строго выдерживать равенство электрических длин линии для синфазной и противофазной волн, прошедших через всю область связи, включая неоднородные участки. Однако в сантиметровом диапазоне сказывается

влияние неоднородностей в местах изменения связи между линиями, что приводит к ухудшению направленности.

Целью данной работы является создание компактной широкополосной конструкции 20-децибельного направленного ответвителя сантиметрового диапазона для работы на высоких уровнях мощности

Конструкция направленного ответвителя

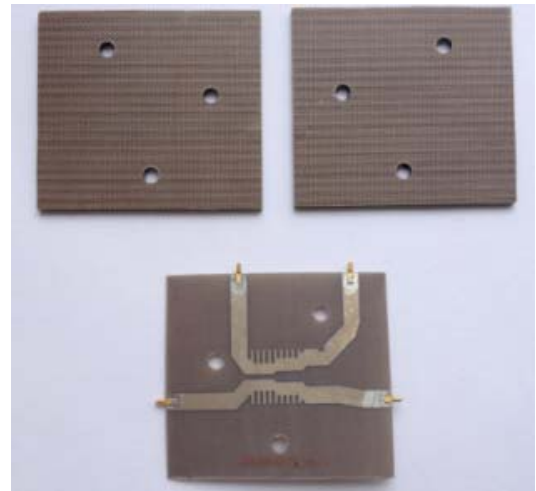
В работе предложена, теоретически и экспериментально исследована конструкция 20-децибельного направленного ответвителя на симметричных связанных полосковых линиях для диапазона 4-12 ГГц (рис.1). С учетом заданных диапазонных свойств был исследован трехступенчатый несимметричный направленный ответвитель на полосковых линиях с боковой связью (рис.1,б,в). Предложенная четырехслойная конструкция НО (рис.1,г) содержит два толстых внешних диэлектрических слоя ($\epsilon=2.5$, толщина 1.5 мм) и два внутренних тонких слоя ($\epsilon=2.2$, толщина 0.45 мм).

На одном из внутренних слоев расположены полосковые проводники, что обеспечивает симметричное положение полосковых линий относительно верхнего и нижнего экранов. В качестве рабочих выходов НО использованы коаксиальные разъемы N-типа, предназначенные для работы на высоком уровне мощности. Нумерация портов ответвителя приведена на рис. 1,в. Вариант конструкции на рис. 1,а содержит 50-омный разъем на выходе 4 для проведения тестовых измерений НО. В рабочем варианте ответвителя порт 4 нагружен согласованной нагрузкой. Анализ и оптимизация НО выполнены с использованием аппарата теории цепей [6] и электродинамических моделей на основе метода конечного интегрирования [7].

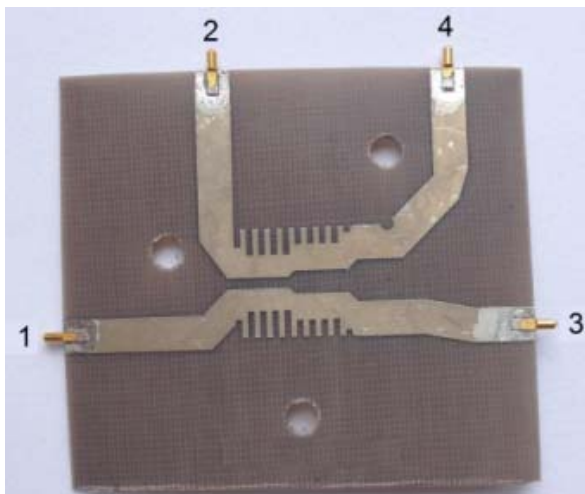
При прохождении волн через неоднородности в связанных полосковых линиях возникает разность фаз синфазной и противофазной волн, которая приводит к возникновению ненаправленного сигнала [8-10]. Такие неоднородности возникают в местах изменения связи полосковых линий.



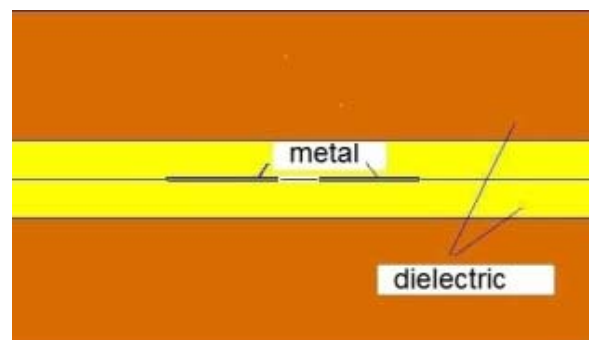
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 1. – Направленный 20-децибельный ответвитель на связанных полосковых линиях: конструкция ответвителя (а), диэлектрические платы ответвителя (б), топология полосковых проводников (в), поперечное сечение (г).

Для подавления этого сигнала и увеличения направленности необходимо выровнять фазы синфазной и противофазной волн. С этой целью в конструкции НО (рис.1, в) были использованы периодические неоднородности на внешних сторонах связанных полосковых линий, которые обеспечивают широкополосную компенсацию разницы фазовых скоростей

четной и нечетной мод. На основе экспериментальных и теоретических исследований установлено, что периодические структуры на внешних сторонах связанных полосковых линий уменьшают фазовую скорость четной и нечетной мод, но замедление четной моды будет больше.

Экспериментальные и теоретические результаты

Трехмерная электродинамическая модель направленного ответвителя и распределение электрического тока на связанных полосковых линиях при возбуждении порта 1 приведены на рис. 2. Из приведенного распределения токов хорошо видна слабая (-20 дБ) связь между первичным и вторичным каналами НО, а также высокая изоляция порта 4 при возбуждении порта 1.

Теоретические и экспериментальные характеристики разработанной конструкции НО приведены на рис. 3-6, где показано хорошее совпадение теории и эксперимента (при расчете не учитывались разъемы). Неравномерность переходного ослабления (20 дБ) в рабочем диапазоне частот 4-12 ГГц составляет 0.5 дБ, коэффициент отражения по всем входам не превышает -17 дБ ($K_{СВ} < 1.35$), изоляция 35 дБ, направленность 15 дБ, уровень рабочей мощности может достигать 100 Вт. Вносимые потери в рабочей полосе составляют около 0.7 дБ. Предложенная конструкция весьма компактна - размеры корпуса без разъемов составляют 39×35×26 мм.

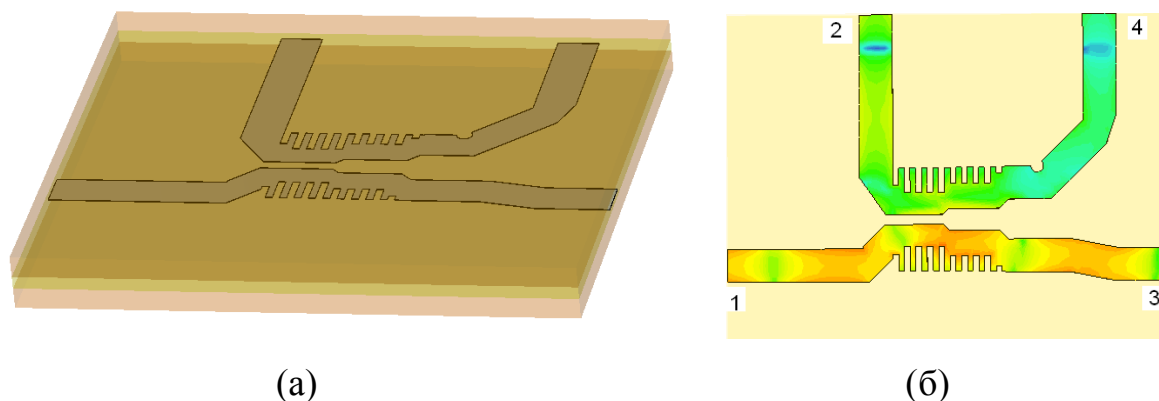


Рис. 2. – Трехмерная модель НО (а) и распределение тока (б)

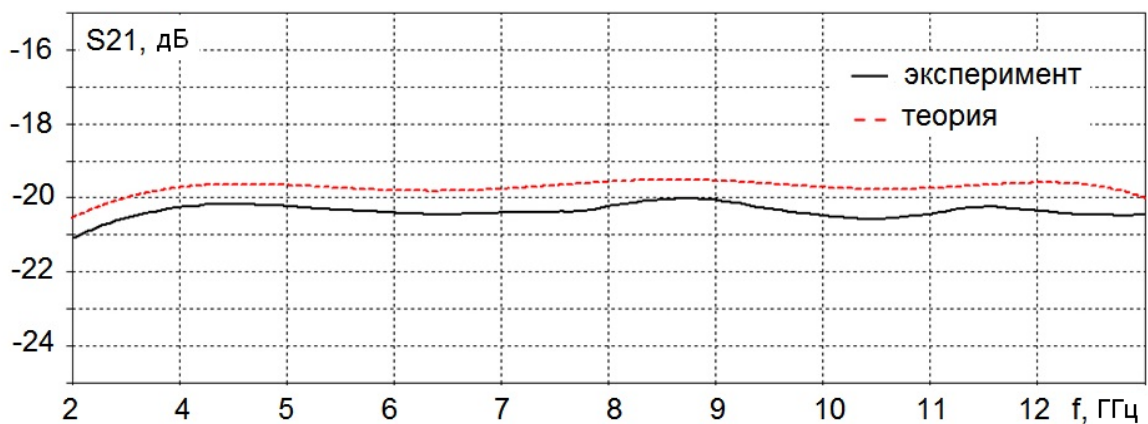


Рис. 3. – Экспериментальная частотная характеристика переходного ослабления

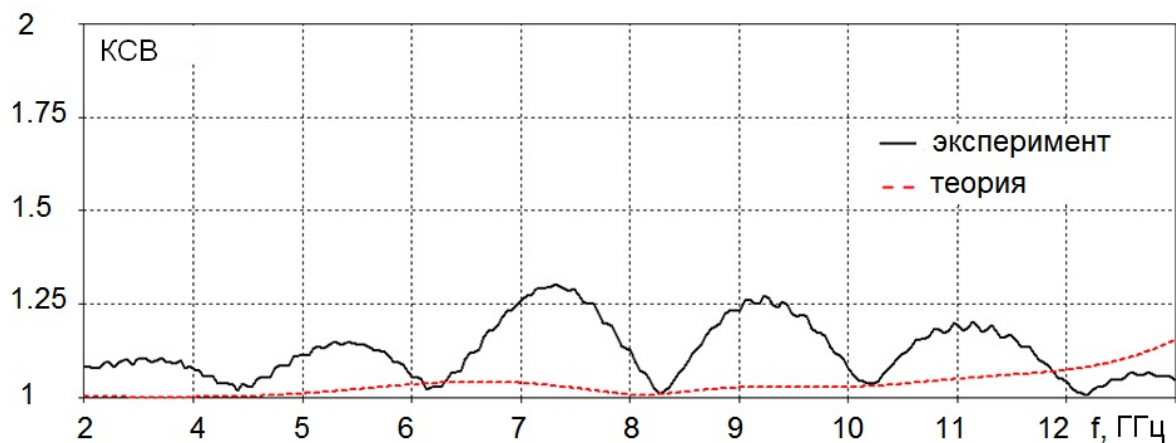


Рис. 4. –Сравнение экспериментальной и теоретической характеристики КСВ порта 1

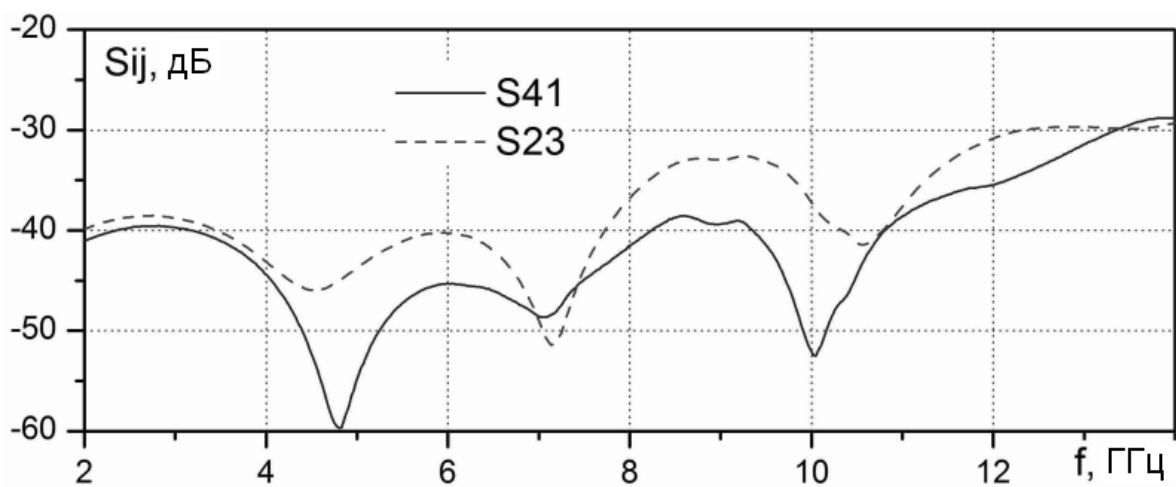


Рис. 5. –Экспериментальная частотная характеристика изоляции (S_{41}).

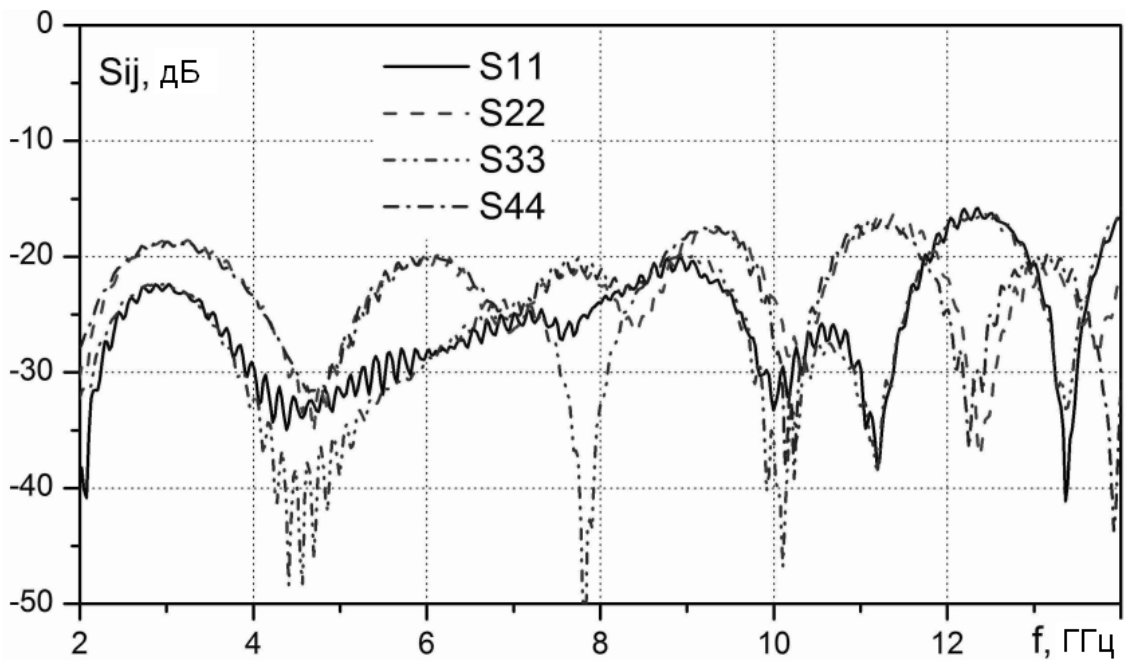


Рис. 6. –Экспериментальные частотные характеристики коэффициента отражения для портов 1, 2, 3, 4

Имеющееся на рис. 4 расхождение между измеренным и расчетным КСВ связано с тем, что приведенные расчетные данные получены без учета влияния коаксиальных разъемов, т.е. без учета коаксиально-полосковых переходов. В модели также не учитывались омические потери в полосковых проводниках и диэлектрике, которые приводят к увеличению измеренных вносимых потерь по сравнению с расчетными (рис. 3).

Для теоретической оценки предельной допустимой мощности использовано соотношение

$$P_{\max} = P_1 \left(\frac{E_{\text{breakdown}}}{E_{\text{peak}}} \right)^2$$

где P_{\max} - максимальная допустимая мощность, $P_1 = 1$ Вт - мощность, поданная на вход НО, $E_{\text{breakdown}}$ - напряженность поля пробоя для диэлектрика, E_{peak} - пиковое значение напряженности поля в структуре, которое вычисляется в процессе электродинамического моделирования НО.

Согласно проведенным расчетам P_{\max} существенно выше требуемого уровня 100 Вт.

Заключение

В работе предложена, теоретически и экспериментально исследована новая компактная конструкция 20-децибельного НО на связанных полосковых линиях, обеспечивающая перекрытие полосы частот 3:1 и работу на уровне мощности до 100 Вт. Ключевой особенностью предложенной конструкции являются периодические ступенчатые неоднородности на внешних краях полосковых линий, что позволило за счет широкополосной компенсации фазовых скоростей четной и нечетной мод обеспечить высокую направленность, изоляцию и согласование НО. Изготовленный 20 дБ направленный ответвитель в диапазоне 4-12 ГГц имеет неравномерность переходного ослабления 0.5 дБ, изоляцию 35 дБ, направленность 15 дБ, КСВ<1.35. Размеры корпуса ответвителя 39×35×26 мм. (без учета коаксиальных разъемов).

Литература

1. Сверхширокополосные микроволновые устройства / Под ред. Креницкого А.П. и Мещанова В.П. – М.: Радио и связь, 2001, 560 с.
2. Gruszczynski S., Wincza K. Broadband multisection asymmetric 8.34-dB directional coupler with improved directivity // Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference 2007, pp.1-4.
3. Gruszczynski S., Wincza K., Sachse K. Design of broadband low-loss coupled-line multisection symmetrical 3-dB directional coupler in suspended strip-line technology // Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference 2010, pp.1-4.
4. 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. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5105.

5. Воропай М.Н., Иванов С.В. Синтез структуры и реализация радиоприемного устройства в диапазоне частот 0,02... 18,00 ГГц для комплексов радиомониторинга // Инженерный вестник Дона, 2010, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2010/194.

6. Справочник по элементам полосковой техники / Под. ред. Фельдштейна А.Л.–М.: Связь, 1979, 336 с.

7. Weiland T. Time Domain Electromagnetic Field Computation with Finite Difference Methods // Int. Journal of Numerical Modeling. – 1996. – V. 9. – pp. 295– 319.

8. Следков В.А., Рейзенкинд Я.А., Рязанов В.Д. Расчет эквивалентных параметров неоднородностей в линиях передачи по измеренным частотам резонаторов, содержащих неоднородности // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 1987, N. 8, С. 33–35.

9. Следков В.А., Рязанов В.Д., Ржевская Л.А., Рейзенкинд Я.А., Нойкин Ю.М. Экспериментальное исследование неоднородностей в связанных полосковых линиях // Электрон. техника. Сер. Электроника СВЧ. 1988, N. 8. С. 7–12.

10. Shekhovtsov V.V., Sledkov V.A., Pischenko G.P., Pischenko M.G., Manuilov M.B. Design of Broadband Strip-Line Directional Couplers with Improved Directivity // Proc. of 24 Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2014), 2014, Sevastopol, pp. 1-2

References

1. Sverchshirokopolosnye mikrovolnovye ustroystva [Ultrawideband microwave devices]. Pod redakciej Krenitskogo A.P. and Meschanova V.P. Moscow, Radio i svyaz, 2001, 560 p.



2. Gruszczynski S., Wincza K. Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference 2007, pp.1-4.
3. Gruszczynski S., Wincza K., Sachse K. Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference 2010, pp.1-4.
4. Andriyanov A.V., Gubarev D.E., Zikii A.N., Slenchkovsky V.G. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5105.
5. Voropai M.N., Ivanov S.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2010, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2010/194.
6. Spravochnik po elementam poloskovoi tehniki [Handbook for elements of strip-line technology]. Pod redakciej Feldshteina A.L., Moscow, Svyaz, 1979, 336 p.
7. Weiland T. Int. Journal of Numerical Modeling. 1996. V. 9. pp. 295– 319.
8. Sledkov V.A., Reizenkind Ya.A., Riazanov V.D. Electronnaya tehnika. Ser. Elektronika SVCH, 1987, N8, pp.33-35.
9. Sledkov V.A., Riazanov V.D., Rzevskaya L.A., Reizenkind Ya.A., Noikin Yu. M. Electronnaya tehnika. Ser. Elektronika SVCH, 1988, N8, pp.7-12.
10. Shekhovtsov V.V., Sledkov V.A., Pischenko G.P., Pischenko M.G., Manuilov M.B. Proc. of 24 Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2014), 2014, Sevastopol, pp. 1-2.