

Повышение направленности микрополоскового ответвителя

М.М. Полуни¹, Г.И. Глушков², Д.В. Колесников², А.Н. Моисеенко¹, С.В. Тарасов²

¹АО «Концерн «Созвездие», г. Воронеж

²АО «ПКК Миландр», г. Москва, tarasov.s@milandr.ru

Аннотация — Предложена методика повышения направленности микрополоскового ответвителя путем включения в конструкцию вспомогательной печатной платы, содержащей линии с емкостной связью. Изготовлен макет октавного ответвителя с неравномерностью ± 0.5 дБ и направленностью не хуже 23 дБ.

Ключевые слова — направленный ответвитель, микрополосковые линии, измерение методом нагрузочной линии, радиопередатчик.

I. ВВЕДЕНИЕ

Для построения мостовых устройств измерения уровня мощности (рефлектометров) СВЧ диапазона, как правило, применяют направленные ответвители, выполненные с помощью цепей с распределенными параметрами. Причем направленность применяемого ответвителя является одним из важнейших параметров рефлектометра, обеспечивающим точность проведения измерений.

Одним из наиболее технологически простых вариантов исполнения ответвителя на линиях с распределенными параметрами является ответвитель на микрополосковых линиях. Вследствие разности распространения скоростей четной и нечетной мод возбуждения в микрополосковой линии, направленность такого ответвителя является крайне низкой. Для выравнивания эффективных скоростей распространения четной и нечетной мод возбуждения в микрополосковой линии известно несколько решений; как чисто топологических, так и с использованием дополнительных дискретных элементов. [1]-[3] В случае проектирования ответвителя для измерения большой мощности, например, для устройств контроля мощности передатчиков или составных частей стенов тестирования мощных усилительных СВЧ-транзисторов, эти решения могут оказаться неприемлемыми: топологические решения приводят к уменьшению зазора между микрополосковыми линиями (что может приводить к пробоям), а коммерческие дискретные элементы имеют ограничения по максимально допустимой реактивной мощности в цепи.

Для обхода этих ограничений предлагается в качестве дополнительной емкости между линиями ответвителя использовать емкость между двумя полигонами на разных слоях внешней

вспомогательной печатной платы, расположенной в плоскости, перпендикулярной плоскости линий ответвителя.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

A. Описание тестовой структуры

В качестве тестовой структуры взят простой ответвитель, выполненный на одной паре связанных микрополосковых линий, обеспечивающий неравномерность коэффициента передачи ± 0.5 дБ в частотной полосе, равной одной октаве. Ответвление на центральной частоте выбрано равным величине минус 20 дБ. В качестве тестовой частотной полосы выбран диапазон 1...2 ГГц.

В качестве материала подложки выбран коммерческий СВЧ диэлектрик Ro4003C Rogers Corp толщиной 0.813 мм (32 мил) с диэлектрической проницаемостью 3.55. [4] В качестве материала вспомогательной печатной платы выбран диэлектрик ФАФ-4Д. [5]

B. Схемотехнический анализ тестовой структуры

Первоначальный подбор компенсирующей емкости производился в схемотехническом редакторе, величина емкости подбиралась таким образом, чтобы обеспечить максимально возможную направленность во всей рассматриваемой полосе частот.

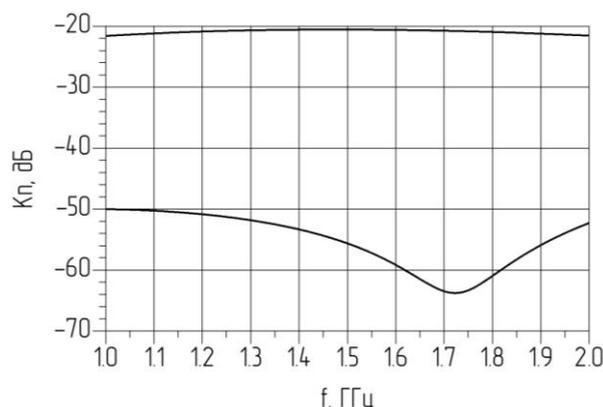


Рис. 1. Коэффициенты передачи падающей и отраженной волн, схемотехнический анализ

Вследствие того, что емкость, включенная между связанными линиями, влияет на коэффициент связи и КСВн устройства, дополнительно при схемотехнической оценке настраивались как

расстояние между связанными линиями, так и ширина линий в области связи.

Коэффициенты передачи падающей и отраженной волн, полученные в результате схемотехнического анализа, представлены на рис. 1. Направленность ответвителя, полученная в результате схемотехнического анализа, представлена на рис. 2.

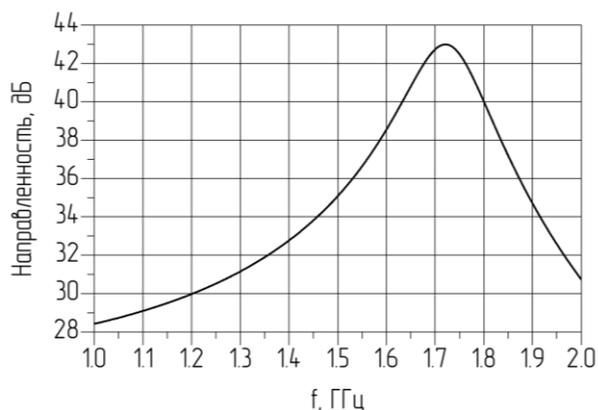


Рис. 2. Направленность ответвителя, схемотехнический анализ

Для преобразования подобранной емкости в топологические параметры вспомогательной печатной платы использовалась, в качестве первого приближения, известная формула емкости бесконечного плоского конденсатора, из которой определялась площадь полигонов на вспомогательной печатной плате.

С. Топологический анализ тестовой структуры

Для получения данных, необходимых для изготовления тестовой структуры, проведено численное моделирование электромагнитного поля топологии, полученной в ходе схемотехнического анализа, и её последующая корректировка. Для моделирования использована САПР конечно-элементного анализа PathWave EMPro. Так как для измерения направленности ответвителя требуется обеспечить минимально возможное значение КСВн по входу, то в общую 3D-модель была добавлена упрощенная модель разъема SMA. Для снижения требуемого объема оперативной памяти из 3D-модели разъема исключена резьба, диэлектрик внутри разъема продлен до передней плоскости разъема с целью имитации плоскости калибровки внешнего коаксиального кабеля от векторного анализатора цепей.

Так как предполагалось проведение измерений макета ответвителя на двухпортовом векторном анализаторе цепей, нагрузочные сопротивления на незадействованных портах аппроксимировались идеальным резистором сопротивлением 50 Ом заданной ширины.

Конденсатор на вспомогательной печатной плате выполнен в виде трапеции с шириной оснований 2 мм (в области пайки к основным линиям ответвителя) и

6 мм. Данный выбор обусловлен тем, что, чем меньше длина соприкосновения проводников вспомогательной и основной печатных плат ответвителя, тем меньше влияние вспомогательная печатная плата оказывает на итоговый КСВн по входу. Из ранее рассчитанной величины площади полигонов вспомогательной печатной платы найдено первое приближение для высоты трапеции.

Проведены моделирования S-параметров для ряда топологий ответвителя. В качестве параметра задавалась высота трапеции (с шагом 0.5 мм) для поиска конфигурации с максимальной направленностью. Также в топологию добавлен небольшой полигон, вносящий дополнительную емкость на «землю», для улучшения КСВн по входу. Трехмерная модель ответвителя представлена на рис. 3.

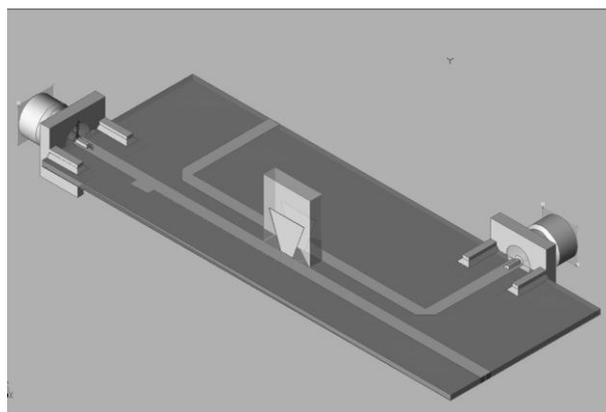


Рис. 3. Направленный ответвитель, модель для топологического анализа

Вычисления матриц S-параметров проводились методом конечных элементов. Сетка разбиения на элементарные тетраэдры строилась на максимальной частоте исследуемой полосы (2 ГГц). Сгущения начальной сетки разбиения на элементарные тетраэдры проводилось до тех пор, пока максимальная разница S-параметров между соседними итерациями не становилась менее 0.005, что эквивалентно амплитудному значению S-параметра, равному минус 46 дБ.

Из массива полученных характеристик S-параметров выбрана топология варианта, обеспечивающего максимальную направленность.

Максимальная направленность рефлектометра достигается при величине высоты трапециевидного полигона на вспомогательной печатной плате, равного 5.5 мм.

Результаты моделирования КСВн по входу и коэффициентов передачи в плечах падающей и отраженной волн представлены на рис. 4-6, соответственно.

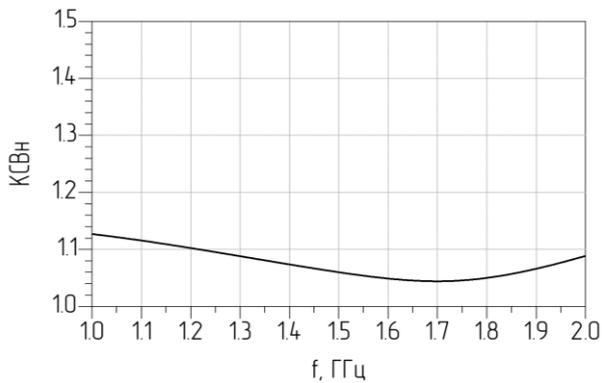


Рис. 4. КСВн ответвителя по входу, численное моделирование топологии

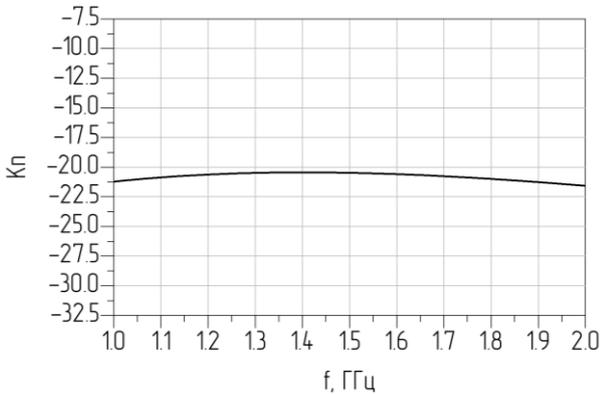


Рис. 5. Коэффициент передачи падающей волны ответвителя, численное моделирование топологии

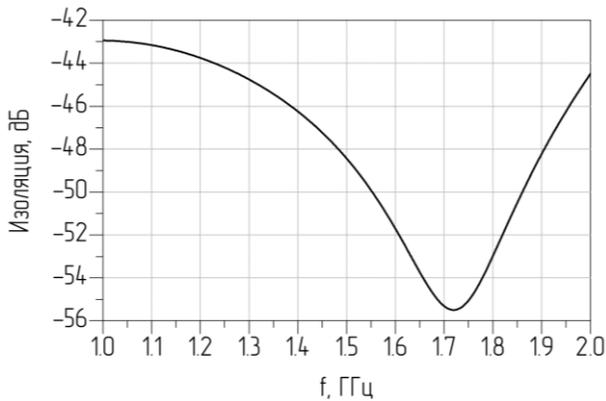


Рис. 6. Коэффициент передачи отраженной волны (изоляция) ответвителя, численное моделирование топологии

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проверки полученных расчетных данных был изготовлен макет ответвителя. Измерения параметров проводились на двухпортовом векторном анализаторе цепей. Для обеспечения минимально возможного КСВн по входу ответвителя в качестве нагрузки использованы два SMD резистора типоразмера 0402 (01005) сопротивлением 100 Ом с допуском 1%. Выбор данных типоразмеров корпусов обусловлен тем, что величины паразитных емкостей и индуктивностей элементов в данном корпусе меньше,

чем у элементов в корпусах SMD 0603 или SMD 0805. Длина резисторов близка к толщине печатной платы, а их суммарная ширина сравнима с шириной печатного проводника импедансом 50 Ом на выбранной подложке. Поэтому, для минимизации отражений волны, вызванных геометрическими неоднородностями, резисторы подпаивались на срезе основной печатной платы перпендикулярно к ней и потенциальному проводнику на верхнем слое, а также сплошному полигону «земли» на нижнем слое.

Фотография изготовленного макета ответвителя приведена на рис. 7.

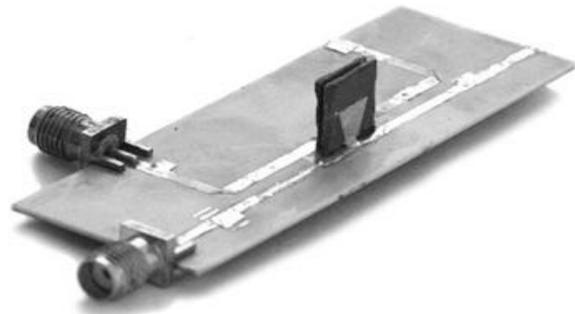


Рис. 7. Макет рефлектометра

Измерения макета проводились на векторном анализаторе цепей R&S ZVA24. Результаты измерений представлены на рис. 8-10.

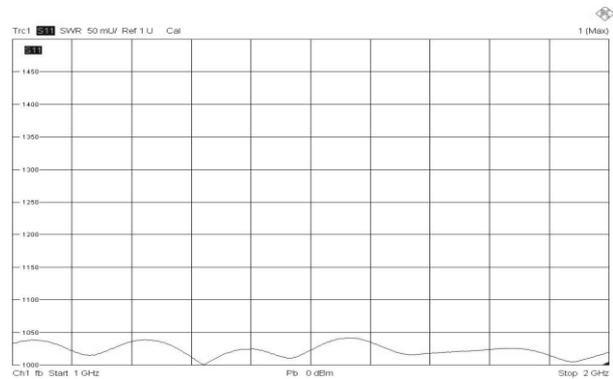


Рис. 8. КСВн макета ответвителя по входу

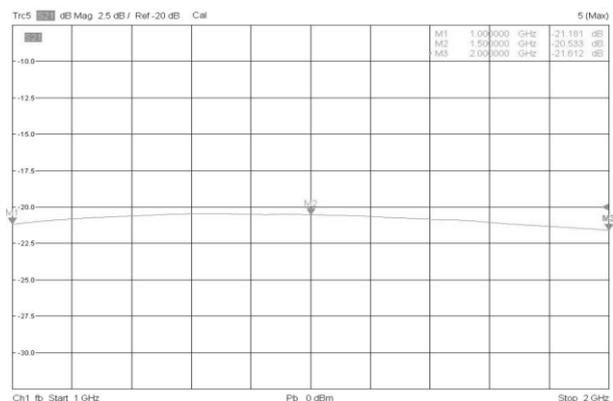


Рис. 9. Коэффициент передачи макета ответвителя, падающая волна

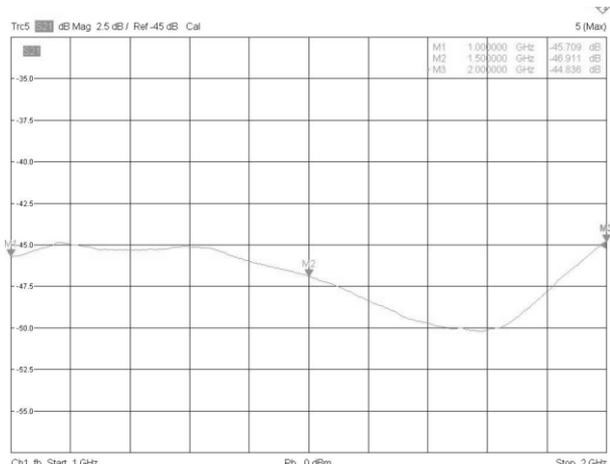


Рис. 10. Изоляция макета ответвителя

IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Введение дополнительных полигонов с сильной емкостной связью, как и введение дискретного конденсатора, увеличивает долю энергии, ответвляющуюся в плечо падающей волны. Без вспомогательной платы максимум коэффициента передачи составляет, по данным схемотехнического анализа, минус 26 дБ.

Введение вспомогательной печатной платы улучшает направленность ответвителя до величины не хуже 23 дБ во всем диапазоне частот. Итоговая направленность макета представлена на рис. 11.

Все три величины изоляции – полученные в ходе схемотехнического анализа, топологического анализа (численного моделирования электромагнитных полей) и измерений макета – качественно схожи. Величины изоляции, сведенные на один график, представлены на рис. 12. Сплошной линией показаны результаты измерений изоляции макета ответвителя векторным анализатором цепей, штрихпунктирной – моделирования топологии и пунктирной – схемотехнического анализа направленного ответвителя.

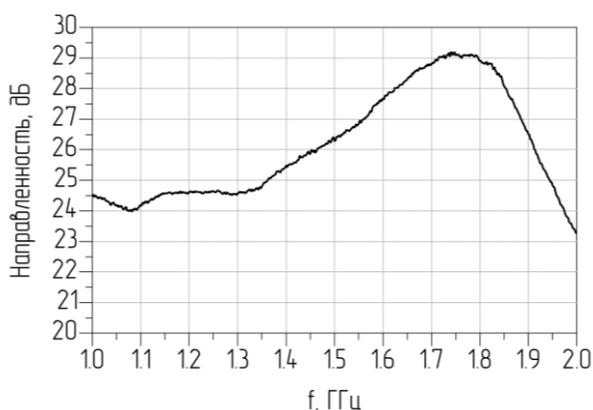


Рис. 11. Направленность ответвителя, результаты измерений макета

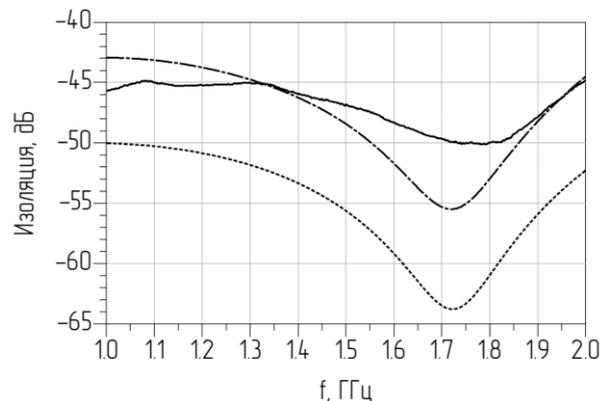


Рис. 12. Расчетная изоляция моделей рефлектометра (схемотехнической и топологической) и изоляция макета

Очевидно, что грубое приближение вспомогательной печатной платы идеальным дискретным конденсатором численно дает наилучший результат и сильно отличается даже от результатов моделирования электромагнитных полей в топологии ответвителя. Однако стоит отметить, что качественно характер поведения кривой изоляции не изменился.

При сгущении сетки разбиения в ходе численного моделирования топологии до разницы между соседними итерациями не более величины 0.005 предел погрешности составляет минус 46 дБ. С учетом этого факта, результаты моделирования топологии и результаты, полученные в ходе измерений макета, весьма схожи.

V. ВЫВОДЫ

Предложен метод повышения направленности микрополоскового ответвителя, не приводящий к уменьшению расстояния между печатными проводниками топологии и не использующий внешние дискретные компоненты. В ходе измерений макета подтверждены расчеты топологии численными методами и получена направленность не хуже 23 дБ в рабочем диапазоне частот.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Dydyk M. Accurate design of microstrip directional couplers with capacitive compensation // IEEE International Digest on Microwave Symposium. 1990. V. 1. P. 581-584.
- [2] Dydyk M. Microstrip directional couplers with ideal performance via single-element compensation // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1999. V. 47. № 6. P. 956-964.
- [3] Kim C., Lim J., Kim D. Ahn D. A design of single and multisection microstrip directional coupler with the high directivity // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2004. V. 3. P. 1895-1898.
- [4] URL: <https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro4000-series-laminates/ro4003c-laminates> (дата обращения: 25.08.2022)
- [5] ГОСТ 21000-82 Листы фторопластовые неармированные и армированные фольгированные. Технические условия. М. 2006. 16 с.

Microstrip Directional Coupler Directivity Improvement

M.M. Polunin¹, G.I. Glushkov², D.V. Kolesnikov², A.N. Moiseenko¹, S.V. Tarasov²

¹JSC “Concern “Sozvezdie”, Voronezh, Russia

²JSC “ICC Milandr”, Zelenograd, Moscow, Russia, tarasov.s@milandr.ru

Abstract — A new way of the microstrip directional coupler directivity improvement is proposed. A daughterboard with capacitive-coupled polygons is added into the classic microstrip coupled lines coupler. A prototype of the octave-band reflectionmeter with 1 dB coupling unevenness and more than 23 dB isolation is made.

Keywords — directional coupler, microstrip lines, load-pull test, transmitter

REFERENCES

- [1] Dydyk M Accurate design of microstrip directional couplers with capacitive compensation // IEEE International Digest on Microwave Symposium. 1990. V. 1. P. 581-584.
- [2] Dydyk M Microstrip directional couplers with ideal performance via single-element compensation // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1999. V. 47. № 6. P. 956-964.
- [3] Kim C., Lim J., Kim D. Ahn D. A design of single and multisection microstrip directional coupler with the high directivity // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2004. V. 3. P. 1895-1898.
- [4] URL: <https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro4000-series-laminates/ro4003c-laminates> (access date: 25.08.2022)
- [5] GOST 21000-82 Non-strengthened and strengthened fluoroplast sheets laminated with foil. Specifications // M. 2006. 16 p.