

УДК 621.372

А.Н. Сычев, С.М. Стручков, Ф.И. Шеерман

Направленный ответвитель 20 дБ на связанных линиях с круглыми проводниками в прямоугольном экране

Представлены результаты моделирования и измерений направленного ответвителя со слабой связью 20 дБ для измерительных систем, работающих в диапазоне частот 1–4 ГГц. Связанные линии выполнены в виде круглых проводников, помещенных в прямоугольный экран. Новая модель построена в квазистатическом приближении с использованием подхода синфазно-противофазного возбуждения и метода численных конформных отображений Кристоффеля–Шварца. При этом двусвязные области поперечного сечения линий сводятся к односвязным с помощью магнитных разрезов, а круглые границы проводников аппроксимируются многоугольными. Приводятся карты электромагнитного поля. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментом.

Ключевые слова: направленный ответвитель, связанные линии, круглый проводник, слабая связь.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-3-8-10

Направленный ответвитель (НО) является одним из ключевых компонентов разнообразных СВЧ-устройств и систем. При этом в измерительных системах, как правило, требуются широкополосные ответвители со слабой связью, в которых полоса рабочих частот превышает октаву, и связь поддерживается на уровне 15–20 дБ. Такого типа ответвители исследуются и разрабатываются уже достаточно долгое время [1], однако при возникновении новых практических задач каждый раз выполняется поиск согласованных с современным уровнем техники конструкторско-технологических решений. Нужны экономически обоснованные технологичные конструкции устройств. При этом новые решения зачастую требуют построения оригинальных электродинамических и квазистатических моделей.

Постановка задачи

В данной работе требуется спроектировать одноступенчатый (четвертьволновый) противонаправленный НО (рис. 1). Этот тип НО отличается простотой реализации и обеспечивает достаточную для большого числа практических применений ширину полосы рабочих частот [1, с. 57]. При этом однородное воздушное заполнение структуры помогает нивелировать довольно значимую проблему деградации направленности, вызванную неравенством скоростей нормальных волн (синфазной и противофазной), с которой приходится сталкиваться при проектировании НО в полосковом исполнении с использованием диэлектрических подложек [2]. Прямоугольный экран в сравнении с круглым [3] является достаточно простой конструкцией. Проводники круглого сечения весьма технологичны, хотя несколько сложнее в моделировании, чем прямоугольные.

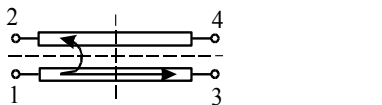


Рис. 1. Противонаправленный ответвитель на связанных линиях с двумя плоскостями симметрии

Итак, прежде всего требуется построить квазистатическую модель круглых слабосвязанных линий в прямоугольном экране, обладающих межлинейной

симметрией (рис. 2). Для этого будет применена оригинальная методика моделирования на основе численного метода конформных преобразований с использованием интеграла Кристоффеля–Шварца [4, 5]. Методика будет реализована на компьютере в среде MATLAB.

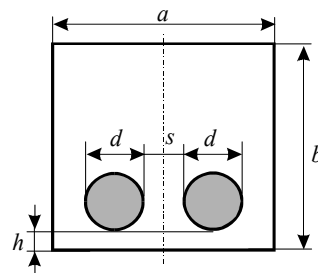


Рис. 2. Поперечное сечение связанных линий в прямоугольном экране с круглыми проводниками и воздушным заполнением

Методика моделирования

Анализируемая конструкция связанных линий (см. рис. 2), являющаяся основой направленного ответвителя, характеризуется следующими параметрами: d – диаметр проводников; s – зазор между проводниками; h – расстояние между проводниками и нижним экраном; a – ширина корпуса; b – высота корпуса.

Учёт межлинейной симметрии связанных линий позволяет применить подход синфазно-противофазного возбуждения, в котором одна общая задача анализа связанных линий сводится к двум частным задачам анализа одиночных линий. При этом в случае синфазного (чётного) возбуждения в межлинейной вертикальной плоскости симметрии устанавливается магнитная (непроницаемая) стенка, а в случае противофазного (нечётного) возбуждения в плоскости симметрии устанавливается электрическая (проводящая) стенка. Таким образом, из исходной структуры (см. рис. 2) формируется две полуструктуры – синфазная (чётная) и противофазная (нечётная). Они представляют собой одиночные линии передачи в прямоугольном корпусе, их модели будут построены ниже.

Теперь заметим, что области поперечного сечения полуструктур являются двусвязными, т.е. имеют две границы – внешнюю по корпусу и внутреннюю по контуру круглого проводника. Но чтобы применить отображение Кристоффеля–Шварца, необходимо иметь односвязную область. Поэтому с целью корректного преобразования двусвязных областей в односвязные вводится в каждую из них магнитный разрез (предположительно совпадающий с одной из силовых линий поля), соединяющий круглый внутренний проводник и ту внешнюю сторону корпуса, где расположена плоскость симметрии [6]; для синфазной полуструктуры – это магнитная стенка, а для противофазной – электрическая.

Получив односвязные полуструктуры, для каждой из них формируется интеграл Кристоффеля–Шварца, позволяющий отобразить многоугольную область на верхнюю полуплоскость. При этом круглый проводник адекватно аппроксимируется 24-угольником. Далее верхняя полуплоскость конформно отображается на область плоского конденсатора, и задача определения погонной ёмкости полуструктуры становится легко решаемой. В итоге по погонным ёмкостям полуструктур вычисляются основные параметры связанных линий (см. рис. 2) [6], это – характеристический импеданс Z_0 и коэффициент связи k .

Изложенная методика реализована на компьютере в среде MATLAB с использованием пакета SC Toolbox [4].

Численные результаты

Компьютерные вычисления по данной методике позволяют получать не только основные параметры связанных линий, но и карты поля, т.е. распределение силовых и эквипотенциальных линий электрического поля квази-Т-волны для полуструктур при синфазном (с магнитной стенкой) и противофазном (с электрической стенкой) возбуждениях (рис. 3).

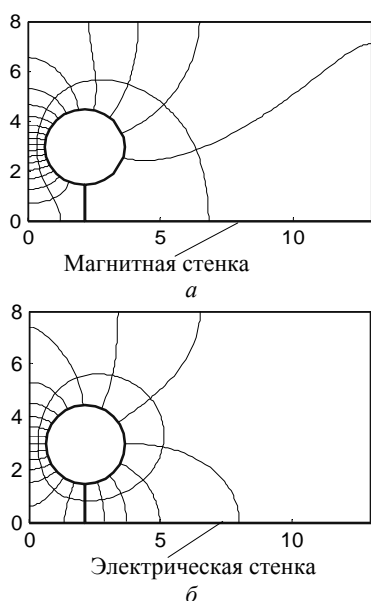


Рис. 3. Карты электрического поля для полуструктур синфазного (а) и противофазного (б) возбуждений

Априорно задав неизменяемые параметры конструкции – размеры корпуса $a = 16$ мм; $b = 13$ мм и диаметр проводников $d = 3$ мм (см. рис. 2), выполнялось проектирование направленного ответителя. Проектирование заключалось в многократном анализе (параметрической оптимизации) по данной методике и дало следующие оставшиеся параметры конструкции связанных линий: зазор между проводниками $s = 2,9$ мм; расстояние между проводниками и нижним экраном $h = 0,65$ мм. Расчёт этой конструкции приводит к следующим электрическим рабочим параметрам: характеристический импеданс $Z_0 = 50,3$ Ом; коэффициент связи $k = 0,116$ ($C = 18,7$ дБ).

Эксперимент

Полученное в предыдущем разделе проектное решение было взято за основу при изготовлении прототипа НО, показанного на рис. 4 и 5.



Рис. 4. Направленный ответитель в сборе

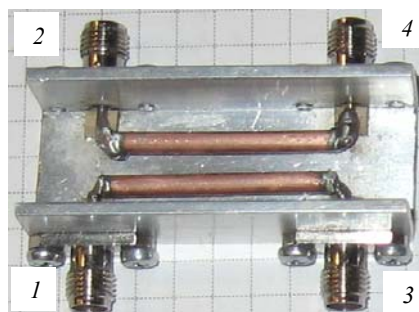


Рис. 5. Направленный ответитель в корпусе со снятой крышкой с обозначением номеров портов

Корпус был изготовлен из стандартного дюралюминиевого швеллера 20×15 с толщиной стенок 2 мм, а проводники линий длиной 30 мм – из стандартного медного прутка диаметром 3 мм.

Измеренные S-параметры НО в зависимости от частоты показаны на рис. 6.

Из графиков видно, что в полосе частот (1...4) ГГц связь $|S_{21}|$ составляет (19...23) дБ; согласование $|S_{11}|$ лучше 18 дБ; рабочее затухание $|S_{31}|$ не более 0,34 дБ; развязка $|S_{41}|$ не хуже 27 дБ, а наилучшая – 44 дБ. Итак, результаты эксперимента показали, что даже односекционный НО способен в двухоктавной полосе частот обеспечить слабую связь 20 дБ с практически приемлемой погрешностью, не превышающей (-1...+3) дБ.

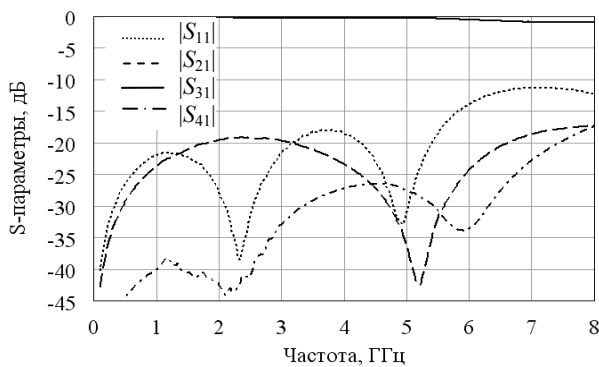


Рис. 6. Экспериментально измеренные частотные зависимости S -параметров направленного ответвителя

Заклучение

Таким образом, представлены результаты моделирования и измерений направленного ответвителя со слабой связью 20 дБ для измерительных систем, работающих в диапазоне частот (1...4) ГГц. Связанные линии выполнены в виде круглых проводников, помещенных в прямоугольный экран. Новая модель, реализованная в среде MATLAB, построена в квазистатическом приближении с использованием подхода синфазно-противофазного возбуждения и метода численных конформных отображений Кристоффеля-Шварца. При этом двусвязные области поперечного сечения линий сводятся к односвязным с помощью магнитных разрезов, а круглые границы проводников аппроксимируются многоугольными. Приводятся карты электромагнитного поля. Результаты моделирования согласуются с экспериментом с приемлемой для практики точностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке прикладных научных исследований Министерством образования и науки РФ. Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57715X0179.

Литература

1. Мещанов В.П. Автоматизированное проектирование направленных ответвителей СВЧ / В.П. Мещанов, А.Л. Фельдштейн. – М.: Связь, 1980. – 144 с.
2. Анализ модели направленного ответвителя на основе нерегулярных полосковых линий с комбинированной связью / А.Ю. Попков и др. // Доклады ТУСУРа. – 2015. – № 4 (38), ч. 1. – С. 5–11.
3. Sychev A.N. Numerical conformal transformations for modeling of an eccentric shielded pair / A.N. Sychev, M.A. Chekalin, S.M. Struchkov, V.N. Putilov // 24th Int. Crimean Conf. «Microwave & Telecommunication Techno-

logy» (CriMiCo'2014), 7–13 Sept. 2014, Sevastopol, Crimea, Russia. – P. 125–126.

4. Driscoll T.A. Schwarz–Christoffel mapping / T.A. Driscoll, L.N. Trefethen. – Cambridge: Cambridge Univ. Press., 2002. – 132 p.

5. Сычев А.Н. Комбинированный метод частичных емкостей и конформных отображений для анализа многомодовых полосковых структур. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 138 с.

6. Sychev A.N. Analysis of the broad-side coupled lines on the vertical substrate using the numerical conformal transformations / A.N. Sychev, M.E. Dolgushin // Proc. 20-th Int. Crimean Conf. «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2010), Sept. 13–17, 2010. – Sevastopol: Crimea, 2010. – P. 636–638.

Сычев Александр Николаевич

Д-р техн. наук, профессор каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: ans@main.tusur.ru

Стручков Сергей Михайлович

Аспирант каф. КСУП
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: struchkov.sm@gmail.com

Шеерман Федор Иванович

Канд. техн. наук, доцент каф. КСУП
Тел.: +7-913-805-94-54
Эл. почта: fish@kcup.tusur.ru

Sychev A.N., Struchkov S.M., Sheyerman F.I.

Coupled line directional coupler with round wires inside rectangular shield

The simulation and measurement results of the directional coupler with loose coupling of 20 dB for measuring systems operating in the frequency range of 1–4 GHz are presented. Coupled lines are formed as round wires, placed in the shield with a rectangular cross section. The model is built in a quasi-static approximation using the in-phase/out-of-phase excitation approach and Schwarz–Christoffel conformal mapping numerical technique. The doubly-connected cross-section regions are reduced to a simply-connected ones via magnetic slits, and round wires are approximated by polygonal boundaries. The electromagnetic field maps are given. The simulation results are in good agreement with experiment.

Keywords: directional coupler, coupled lines, round wire, loose coupling.