

УДК 621.372

А.Н. Сычев, С.М. Стручков, Н.Ю. Рудый

Трёхкаскадный транснаправленный ответвитель X-диапазона

Исследуется каскадное соединение разнородных типов ответвителей. В моделируемом трехкаскадном ответвителе центральная секция с сильной связью (1 дБ) является транснаправленной, две крайние секции со слабой связью (12 дБ) – противонаправленные. Результирующий ответвитель становится транснаправленным с 3 дБ связью. В транснаправленной секции использовались линии, выполненные на вертикальной вставке из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью. Был изготовлен прототип, предназначенный для работы в X-диапазоне (8–12 ГГц), показавший приемлемые характеристики.

Ключевые слова: связанные линии, транснаправленный ответвитель, вертикальная вставка.

В последнее время некоторые исследователи обратили своё внимание на малоизученный тип направленных ответвителей – транснаправленный, реализованный с использованием межлинейных шунтирующих конденсаторов [1]. И в этом году впервые была предложена новая конструкция транснаправленного ответвителя (ТРНО) на сильносвязанных линиях с вертикальной вставкой [2, 3] (рис. 1), несмотря на то, что противонаправленные ответвители с вертикальными элементами известны достаточно давно [4]. Уникальной особенностью ТРНО является то, что в полосе рабочих частот входной сигнал в нём почти не достигает дальнего конца основной линии, а поступает на ближний и дальний концы связанной линии. И как следствие, главное достоинство ТРНО – полная гальваническая развязка входного плеча 1 от двух выходных плеч 2 и 4 (см. рис. 1), что позволяет упростить схему и конструкцию ответвителя и избежать нежелательных перемычек в большинстве устройств, построенных на его основе.

Технология монтажа вертикальной вставки является достаточно отлаженной и относится к варианту технологии монтажа поверхностномонтируемых компонентов (ПМК, SMD).

Однако по ширине полосы рабочих частот ТРНО уступает обычным противонаправленным ответвителям (ПРНО) на связанных линиях с уравновешенной связью. Также известно, что каскадирование ПРНО ведёт к расширению их полосы частот. При этом использование такого же подхода к ТРНО (т.е. каскадного соединения) ранее не рассматривалось. По-видимому, главной причиной этого является невозможность создания ТРНО со слабой связью, требуемой для крайних секций секционированного ответвителя.

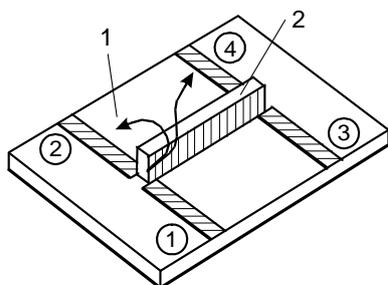


Рис. 1. Конструкция ТРНО на связанных линиях с вертикальной вставкой: 1 – горизонтальная плата; 2 – вертикальная вставка

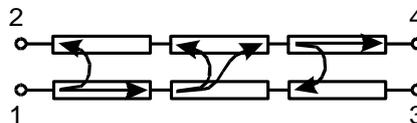


Рис. 2. Схема трёхкаскадного транснаправленного ответвителя

Исходя из этих соображений, в данной работе предлагается многокаскадная схема, содержащая как сильносвязанный ТРНО в центре, так и слабосвязанные ПРНО по краям (рис. 2). При этом не совсем очевидно, какие физические явления будут происходить при таком каскадировании ТРНО и ПРНО. Также возникает важный практический вопрос – насколько расширится полоса рабочих частот? И ещё, применима ли технология ПМК при создании ТРНО в довольно высокочастотном X-диапазоне (8–12 ГГц)?

Схемная модель ответвителя. Результаты численного моделирования. На предварительном этапе исследования достаточно продуктивный подход состоит в построении электрической схемы ТРНО и её анализе в частотной области. Схемное моделирование реализуется в коммерчески доступной системе AWR Microwave Office.

Взятые за базу для сравнения схемные проектные параметры одиночного ТРНО были следующими: длина отрезка связанных линий – 4 мм; характеристический импеданс – 41 Ом; электромагнитная связь – 2,8 дБ; диэлектрические проницаемости при чётном и нечётном возбуждениях – 3,5 и 31,5 соответственно. Рассчитанные амплитудно- и фазочастотные характеристики одиночного ТРНО при выбранных проектных параметрах дали следующие параметры частотного отклика: полоса рабочих частот 8,8–11,2 ГГц (24%), амплитудный баланс между выходными плечами 2 и 4 2,8–3,4 дБ, фазовый баланс между плечами 2 и 4 $\pm 1,2$ град, уровень развязки и возвратных потерь – не хуже 20 дБ.

Проектные схемные параметры трёхкаскадного ТРНО были взяты следующими (рис. 3). Параметры центральной секции: длина отрезка линии – 4 мм; характеристический импеданс – 60 Ом; электромагнитная связь – 1 дБ; диэлектрические проницаемости при чётном и нечётном возбуждениях – 3,5 и 31,5 соответственно. Параметры крайних секций: длина отрезка линий – 4 мм; характеристический импеданс – 60 Ом; электромагнитная связь – 12 дБ; диэлектрические проницаемости одинаковые для чётного и нечётного возбуждений – 3,5.

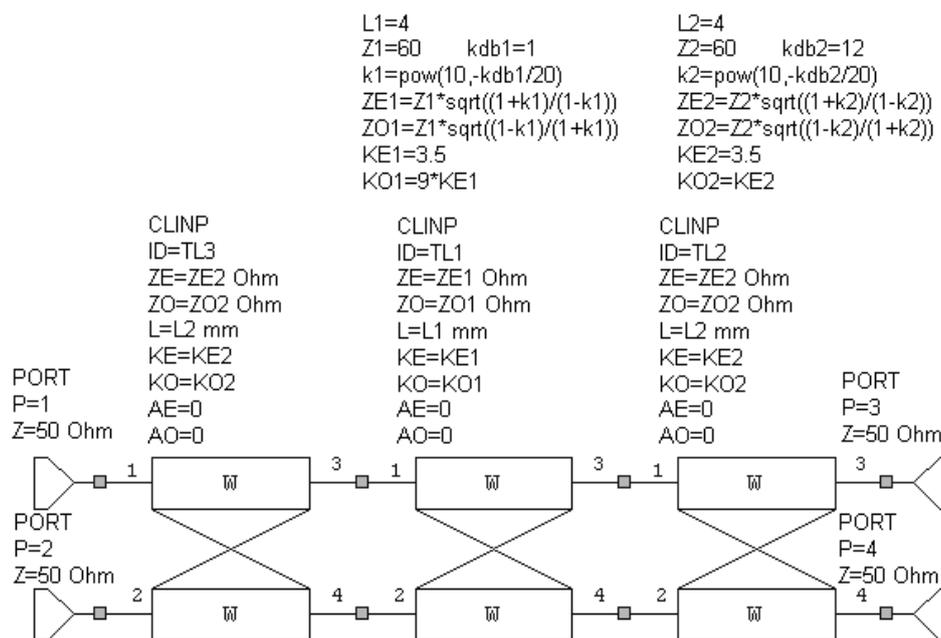


Рис. 3. Электрическая схема трёхкаскадного транснаправленного ответвителя

В результате при заданных проектных параметрах расчётные частотные характеристики трёхкаскадного ТРНО оказались следующими (рис. 4). Полоса рабочих частот 8–12 ГГц (40%), т.е. полоса в сравнении с одиночной ТРНО-секцией расширилась на 16%, амплитудный баланс между выходными плечами 2 и 4 составил 2,7–3,5 дБ, фазовый баланс между плечами 2 и 4 ($90 \pm 0,7$) град, уровень развязки и возвратных потерь – лучше 20 дБ.

Представленные расчёты характеризуют идеализированный схемный вариант построения трёхкаскадного ТРНО без привязки к параметрам конструкции связанных линий.

Моделирование конструкции связанных линий. Следующий шаг состоял в проектировании конструкции по отдельным каскадам. Заметим, что конструкция секции ТРНО для моделирования довольно сложна и является трёхмерной, поэтому коммерчески доступная САПР Microwave Office не способна осуществить её анализ. САПР 3D-моделирования CST Microwave Studio могла бы справиться с задачей, но с большими временными затратами, так как электромагнитные расчёты трёхмерных структур являются «долгоиграющими».

Исходя из этих соображений, применялся квазистатический подход в виде комбинированного метода частичных емкостей и конформных отображений [5]. Конформные отображения многоугольных областей поперечного сечения полосковых структур выполнялись с помощью интеграла Кристоффеля–Шварца, вычисление которого осуществлялось с использованием пакета SC-Toolbox [6].

Моделирование включало анализ и оптимизацию конструкции каждой секции по частотному отклику и проводилось в среде MATLAB. Методика компьютерного моделирования реализована как

для связанных линий с вертикальной вставкой, т.е. сильносвязанной центральной секции ТРНО [7], так и для микрополосковых слабо связанных крайних секций ПРНО [8–10].

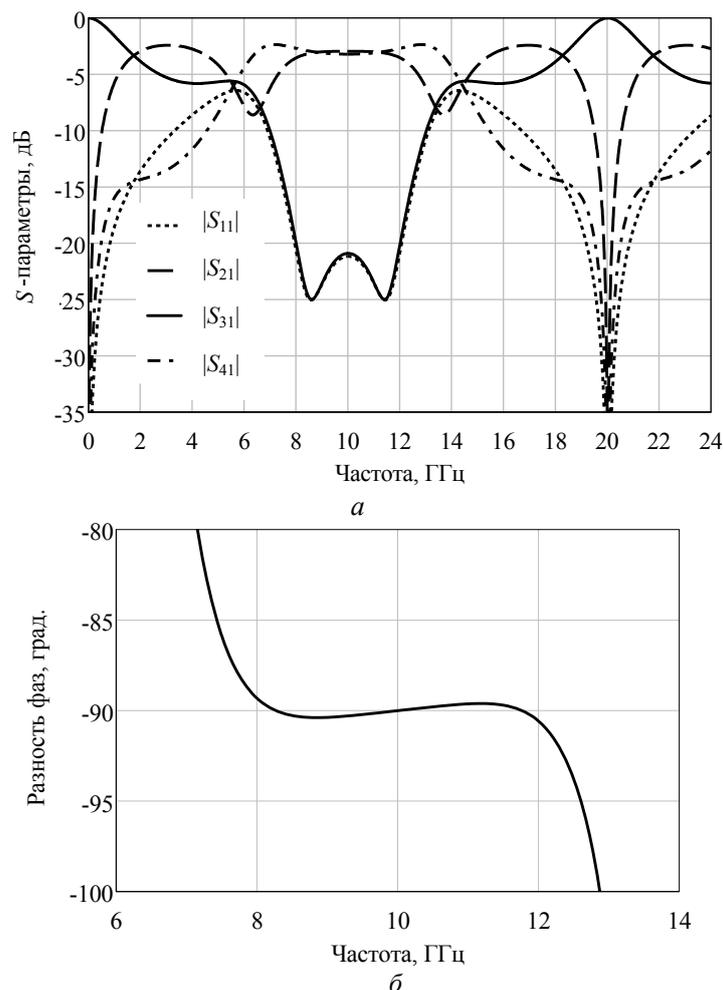


Рис. 4. Рассчитанные частотные зависимости параметров рассеяния схемной модели трёхкаскадного ТРНО:

a – модули комплексных S -параметров; b – разность фаз между портами 2 и 4

Результаты эксперимента. С целью экспериментальной проверки работоспособности и эффективности предложенного трёхкаскадного ответвителя был изготовлен прототип (рис. 5, a) со следующими параметрами конструкции. Габариты подложки – $12 \times 24 \times 1$ мм³; расстояние между осями высокочастотных разъемов 15 мм; материал горизонтальной диэлектрической подложки ФЛАН-5 (диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 5$) от ЗАО «Завод «Молдавизолит». Ширина подводящих микрополосковых линий $w = 1,5$ мм. Размеры связанных линий, на которых построены крайние секции противонаправленных ответвителей: ширина линий $w_{\text{СЛ}} = 1,8$ мм; зазор между ними $s = 0,5$ мм; длина $\ell_{\text{СЛ}} = 4,7$ мм. Вертикальная вставка, на которой построена центральная секция трёхкаскадного ответвителя, имела следующие свойства: материал – керамика с высокой диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 44$; высота вставки (ширина линий) $w_{\text{ВП}} = 0,8$ мм; толщина $h_{\text{ВП}} = 0,5$ мм; длина $\ell_{\text{ВП}} = 4,1$ мм. Длина области пайки – по 0,5 мм с краёв.

Для этого макета измеренные зависимости S -параметров от частоты оказались следующими (рис. 5, b): в полосе рабочих частот 8,3–12,75 ГГц ($10,5 \pm 2,2$ ГГц ($\pm 21\%$), т.е. 42%), величина возвратных потерь $|S_{11}|$ лучше 13,3 дБ и развязка $|S_{31}|$ лучше 16,1 дБ; связь на ближнем и на дальнем концах – $|S_{21}| = 3,5$ дБ и $|S_{41}| = 5,5$ дБ соответственно, в которой; амплитудный и фазовый баланс между выходными плечами 2 и 4 – $(4,25 \pm 1,25)$ дБ и (90 ± 9) град соответственно.

При сопоставлении расчёта и эксперимента наблюдается качественное согласие результатов. Однако при этом следует иметь в виду то обстоятельство, что при моделировании не учитывались параметры коаксиально-полосковых переходов (разъемов) и результаты эксперимента приведены

без деэMBEDINGA, т.е. без исключения паразитного влияния коаксиальных соединителей и возможной несогласованности подводящих линий.

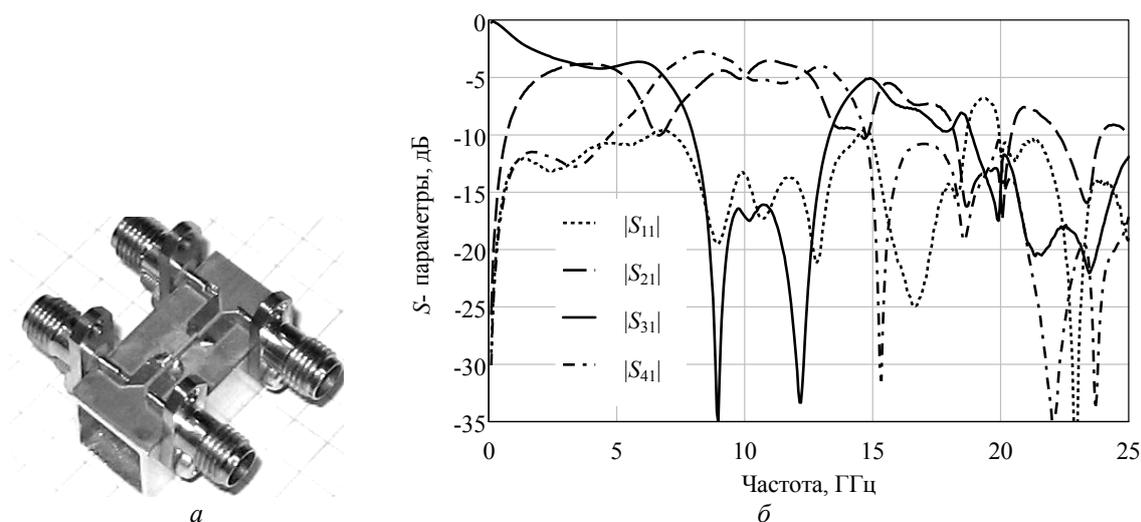


Рис. 5. Конструкция трёхкаскадного ТРНО (а) и измеренные его частотные зависимости параметров рассеяния (б)

Также следует учитывать высокую сложность трёхкаскадной структуры и чрезвычайную неравномерность электромагнитной связи центрального каскада, имеющего отношение модальных диэлектрических проницаемостей, близкое к девяти.

Поэтому эти первые результаты можно считать обнадеживающими, так как они показывают перспективность предлагаемого направления исследований – создания направленных ответвителей, построенных на явлении транснаправленности в связанных линиях с нечётно-кратным (троекратным и более) отношением модальных скоростей.

Заключение. Таким образом, в представленном исследовании были предложены схема и конструкция трёхкаскадного транснаправленного ответвителя на связанных линиях. Такой тип ответвителя имеет полную гальваническую развязку входного плеча и двух выходных плеч, при этом сами выходные плечи гальванически соединены и являются ближним и дальним концом одной и той же линии передачи.

При каскадировании центральной сильносвязанной транснаправленной секции и крайних слабосвязанных противонаправленных секций результирующий трёхкаскадный ответвитель сохраняет свойства центральной секции и является транснаправленным.

Компьютерное моделирование показало, что при заданном уровне развязки и возвратных потерь 20 дБ полоса рабочих частот трёхкаскадного ТРНО достигает 40%, т.е. на 16% шире, чем для одиночной секции ТРНО, взятой для сравнения.

Впервые экспериментально продемонстрирована возможность создания транснаправленного ответвителя, изготовленного по технологии поверхностного монтажа, с приемлемыми частотными характеристиками в сантиметровом X-диапазоне (8–12 ГГц).

Авторы выражают благодарность профессору Б.А. Беляеву за полезный информационный обмен и предоставленные керамические компоненты с высокой диэлектрической проницаемостью, а также И.М. Добушу за помощь в проведении измерений.

Литература

1. Shie C.-I. Trans-directional coupled-line couplers implemented by periodical shunt capacitors / C.-I. Shie, J.-C. Cheng, S.-C. Chou, Y.C. Chiang // IEEE Trans. – 2009. – Vol. MTT-57, № 12. – P. 2981–2988.
2. Sychev A.N. A novel trans-directional coupler based on vertically installed planar circuit / A.N. Sychev, S.M. Struchkov, V.N. Putilov, N.Yu. Rudyi // 18th European Microwave Week 2015.– Proc. of the 45th Eur. Microwave Conf., 6–11 Sept. 2015, Paris, France. – P. 283–286.
3. Sychev A.N. A transdirectional coupled-line coupler with a vertical insert / A.N. Sychev, S.M. Struchkov, N.Yu. Rudyi // 25th Int. Crimean Conf. “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2015), 6–12 Sept. 2015, Sevastopol, Russia. – P. 547–549.

4. Pat. 4150345 US, Int. Cl. H01P 5/18. Microstrip coupler having increased coupling area / M.V. Goldman, R.C. Simione. – Raytheon Co., appl. N 856839; filed 02.12.77; publ. 17.04.79. – 5 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 радиоэлектрон., 2007. – 138 с.
6. Driscoll T.A. Schwarz–Christoffel mapping / T.A Driscoll, L.N. Trefethen. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2002. – 132 p.
7. 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 // 20th Int. Crimean Conf. “Microwave and Telecommunication Technology”, CriMiCo’2010 Conf. Proc., 13–17 Sept. 2010. – Sevastopol, Ukraine, 2010. – С.636–638.
8. Sychev A.N. Modeling of the coupled microstrip lines with using numerical conformal transformations / A.N. Sychev, M.A. Chekalin, V.A. Shestakov., S.M. Struchkov // 16th European Microwave Week 2013. – Proc. of the 43rd Eur. Microwave Conf., 7–10 Oct. 2013. – Nuremberg, Germany. – P. 1107–1110.
9. Sychev A.N. Combining the partial-capacitance and the conformal mapping techniques for analysis of the multiconductor microstrip lines / A.N. Sychev, M.A. Chekalin, S.M. Struchkov // 17th European Microwave Week 2014. – Proc. of the 44th Eur. Microwave Conf., 6–9 Oct. 2014. – Rome, Italy. – P. 410–413.
10. Сычев А.Н. Системы параметров одинаковых связанных линий с неуравновешенной электромагнитной связью / А.Н. Сычев, С.М. Стручков // Доклады ТУСУРа. – 2014. – № 1 (31). – С. 39–50.

Сычев Александр Николаевич

Д-р техн. наук, профессор каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРа
Эл. почта: ans@main.tusur.ru
Тел.: +7-961-887-16-21

Стручков Сергей Михайлович

Аспирант каф. КСУП
Эл. почта: struchkov.sm@gmail.com
Тел.: +7-923-427-60-08

Рудый Николай Юрьевич

Студент каф. КСУП
Эл. почта: nickolay0512@mail.ru
Тел.: +7-8-953-918-18-00

Sychev A.N., Struchkov S.M., Rudyi N.Yu.

Three-section trans-directional coupler of X-band

The cascade connection of dissimilar types of couplers is studied. In a simulated three-section coupler, central section with tight coupling (1 dB) is trans-directional; two external sections with loose coupling (12 dB) are contradirectional. The resulting coupler becomes trans-directional with 3 dB coupling. Transdirectional coupled-line section is formed by vertical insert of ceramics with a high dielectric permeability. A prototype was designed for operating in X-band (8–12 GHz) and measured. Its performance was evaluated as acceptable.

Keywords: coupled lines, trans-directional coupler, vertical insert.