

УДК 621.396.41

А.Н. Сычев

Кроссоверы СВЧ на связанных линиях с полной связью

Анализируются кроссоверы СВЧ, содержащие пару направленных ответвителей на связанных линиях с сильной связью 3 дБ. На основе трёх типов ответвителей – (противо-, со- и транс-) направленных, соединённых по трем схемам – тандемной, каскадной и параллельной соответственно, строятся кроссоверы с полной связью 0 дБ. Впервые представлены частотные характеристики кроссовера на транснаправленных ответвителях. Моделирование и компьютерные расчёты показали, что по критерию полосы рабочих частот (при уровне развязки более 15 дБ) превосходство имеют тандемные кроссоверы на основе противоположенных ответвителей с полосой 73% против 26 и 25% у каскадных и параллельных кроссоверов на (со- и транс-) направленных ответвителях соответственно. Результаты могут быть полезны при поиске оптимального проектного решения кроссовера, удовлетворяющего заданным техническим требованиям.

Ключевые слова: кроссовер СВЧ, связанные линии, направленный ответвитель, противоположенный ответвитель, сонаправленный ответвитель, транснаправленный ответвитель, тандемное соединение, каскадное соединение, параллельное соединение.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-3-124-127

Кроссоверы используются в диаграммообразующих устройствах антенных решёток – матрицах Батлера [1], обеспечивая непрерывную передачу двух потоков СВЧ-энергии в двух пересекающихся направлениях без взаимодействия их между собой [2]. Отсюда кроссовер представляет собой четырёхпортовое СВЧ-устройство, реализующее физическое пересечение двух сигнальных каналов с высокой развязкой между ними.

В простейшем случае пересечение микрополосковых линий можно организовать с помощью проволочных перемычек, воздушных мостиков или слоистых структур типа металл–диэлектрик–металл. Однако для обеспечения технологичности пересечение часто требуется выполнять в одной плоскости (в слое проводников). И здесь традиционными являются решения на паре двущлейных мостов [2], их модификациях [3], а также на сонаправленных ответвителях (СоНО) с полной связью [3]. В целом кроссовер можно представить направленным ответвителем (НО) с полной связью 0 дБ (рис. 1).

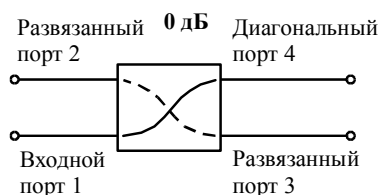


Рис. 1. Кроссовер как направленный ответвитель с полной связью 0 дБ

Матрица рассеяния идеального кроссовера в диапазоне рабочих частот имеет следующий вид [3]:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Не фиксируясь на задаче обеспечения планарности кроссовера и не рассматривая хорошо изученные шлейфные мосты, сосредоточимся на схемах,

образованных с использованием связанных линий (СЛ) в случае отсутствия диссипативных потерь.

Отсюда цель работы – моделирование и сравнительный анализ всех типов одиночных и составных направленных ответвителей на СЛ, обеспечивающих полную связь 0 дБ при построении кроссоверов.

Схемы кроссоверов на связанных линиях

Проблема построения направленных ответвителей на связанных линиях, имеющих полную связь 0 дБ, сформулирована достаточно давно и уже имеет некоторые решения [4–8], показанные в таблице. Однако известные решения даны лишь для противо- и сонаправленных ответвителей (ПрНО, СоНО) и упускают из вида малоизученный третий транснаправленный тип ответвителей (ТрНО) [9–11]. Причина этого, видимо, кроется в том, что ТрНО невозможно построить на распределенной структуре с однородным диэлектрическим заполнением.

При этом заметим, что одиночный НО с сильной связью 3 дБ называют мостом, а составной НО с полной связью 0 дБ – кроссовером (см. таблицу).

Анализируя схемы и конструкции представленных мостов и кроссоверов (см. таблицу), можно отметить следующее.

При конструировании тандемного НО с полной связью 0 дБ, построенного на паре ПрНО, предпочтительно использовать связанные линии с однородным диэлектрическим заполнением [4–7]. Кроме того, тандемный кроссовер на двух ПрНО имеет основной недостаток – наличие двух перемычек, однако он достаточно компактен ($\theta = 90^\circ$).

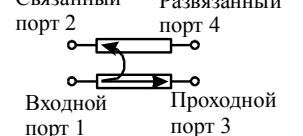


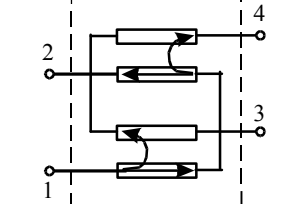
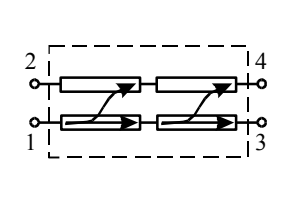
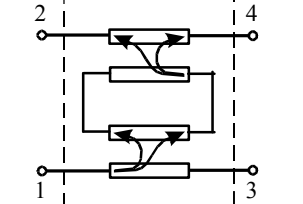
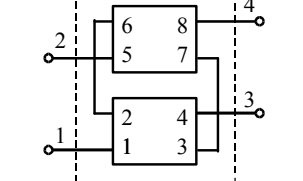
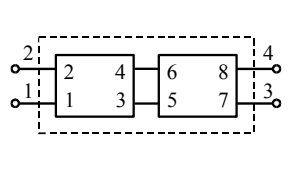
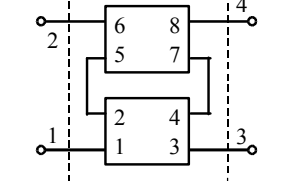
Каскадный кроссовер на двух СоНО, обеспечивающий полную связь, отличается существенной электрической ($\theta > 360^\circ$) и, следовательно, геометрической длинами [3, 8], что нежелательно. При этом, каскадное соединение двух одинаковых СоНО можно рассматривать как одиночный СоНО удвоенной длины. Тем не менее этот недостаток компенсируется такими преимуществами, как планарность, кон-

структурная простота и технологичность, легкость реализации в микрополосковом исполнении [3, 8].

Параллельный кроссовер на двух ТрНО обязательно требует для своей реализации неоднородного

диэлектрического заполнения, создаваемого вертикальной керамической вставкой, при этом он отличается отсутствием перемычек и пересечений линий, к тому же относительно компактен ($\theta = 90^\circ$) [9–11].

Типы направленных ответвителей на связанных линиях и схемы их соединения для построения кроссоверов

Тип ответвителя	Типы 3-дБ направленных ответвителей на отрезках связанных линий и схемы их соединения для достижения полной связи 0 дБ		
	Противонаправленный	Сонаправленный	Транснаправленный
Направленные ответвители с сильной связью 3 дБ (мосты)	Связанный порт 2 Развязанный порт 4  Входной порт 1 Проходной порт 3	Развязанный порт 2 Связанный порт 4  Входной порт 1 Проходной порт 3	Связанный порт 2 Дальний связанный порт 4  Входной порт 1 Развязанный порт 3
Двусоставные направленные ответвители с полной связью 0 дБ (кроссоверы)	Тандемное	Каскадное	Параллельное
			
Схемы соединения двух четырёхпортовых устройств			

Частотные характеристики мостов и кроссоверов на связанных линиях

После общего анализа конструкций и схемотехники мостов и кроссоверов перейдём к электрическому моделированию и расчёту их частотных характеристик.

Исходными данными для всех расчётов являются следующие параметры: $Z_0 = \sqrt{Z_{0e}Z_{0o}}$ – характеристический импеданс связанных линий, который всегда выбирается идеально согласованным с импедансом одиночных подводящих линий и равным 50 Ом; $C \equiv C_{\text{ПрНО}}$ – требуемая величина противонаправленной связи между линиями с электрической длиной $\theta = 90$ град; Z_{0e}, Z_{0o} и $\epsilon_{re}, \epsilon_{ro}$ – модальные

импедансы и эффективные диэлектрические проницаемости для структур чётного и нечётного типов возбуждения соответственно; ℓ – геометрическая длина отрезка связанных линий. При расчётах использовались соотношения из [12].

Результаты расчетов частотных характеристик S-параметров приводятся на рис. 2–4.

Обозначения представленных частотных зависимостей S-параметров направленных ответвителей (мостов) следующие. $|S_{11}|$ – возвратные потери по всем портам (пунктирная линия). Остальные параметры для каждого типа моста имеют различающийся смысл, который легко выявляется сопоставлением нумерации портов, приведенной в таблице, и индексов при S-параметрах на графиках (см. рис. 2–4).

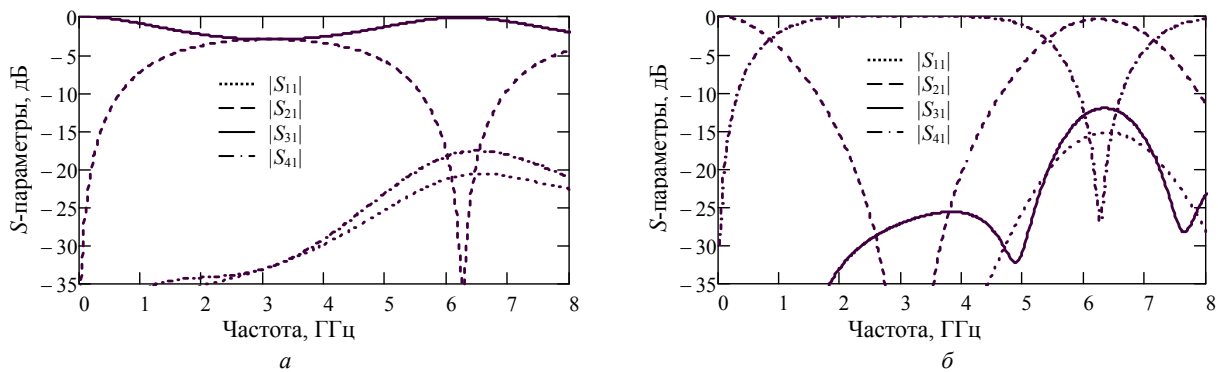


Рис. 2. S-параметры структур на СЛ с параметрами $C = 3$ дБ; $(\epsilon_{re} \ \epsilon_{ro}) = (2,4 \ 2,7)$; $\ell = 15$ мм: а – мост на ПрНО; б – кроссовер на тандемном соединении двух ПрНО-мостов

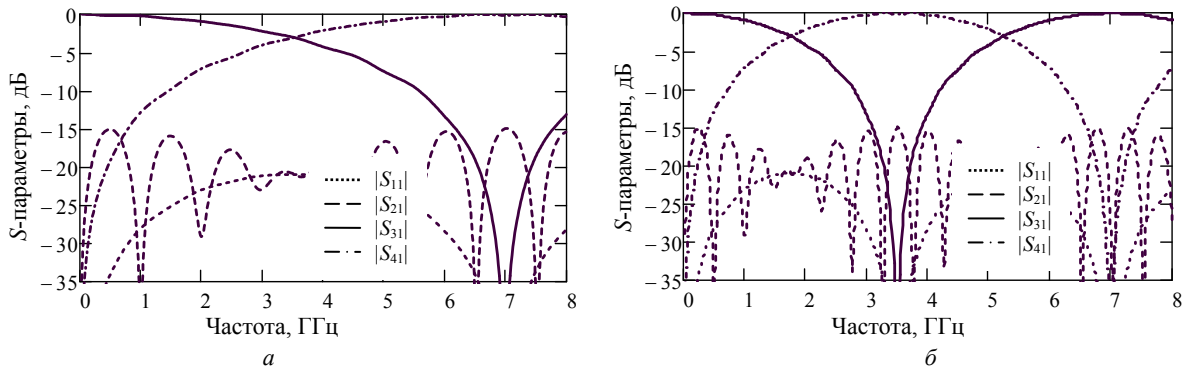


Рис. 3. S -параметры структур на СЛ с параметрами $C = 15$ дБ; $C_{\text{CoNO}} = 3$ дБ; $(\epsilon_{re} \epsilon_{ro}) = (4 \ 3)$; $\ell = 80$ мм:
 а – мост на СоНО; б – кроссовер с каскадным соединением двух СоНО-мостов

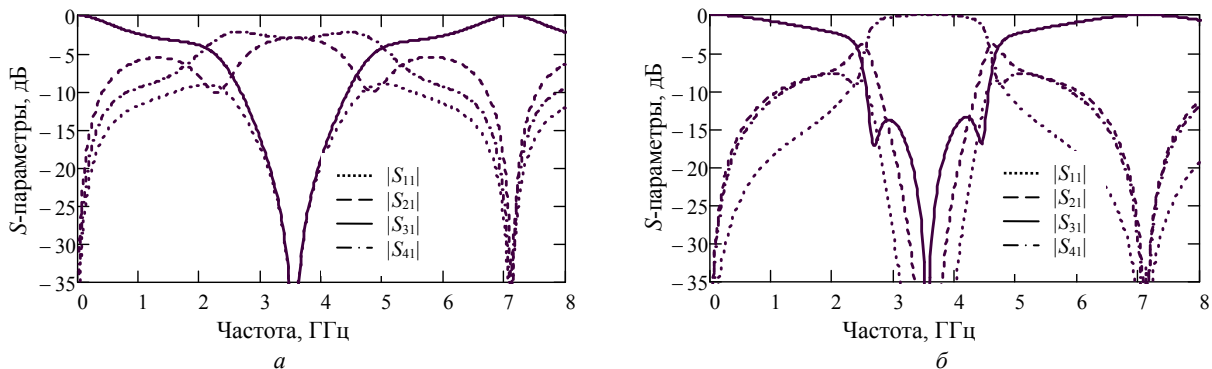


Рис. 4. S -параметры структур на СЛ с параметрами $C = C_{\text{TrNO}} = 3$ дБ; $(\epsilon_{re} \epsilon_{ro}) = (1,1 \ 10)$; $\ell = 20$ мм:
 а – мост на ТрНО; б – кроссовер с параллельным соединением двух ТрНО-мостов

Для ПрНО: $|S_{21}|$ – связь (штриховая линия); $|S_{31}|$ – вносимые потери (сплошная линия); $|S_{41}|$ – развязка (штрихпунктирная линия).

Для СоНО: $|S_{21}|$ – развязка, она же противонаправленная связь $C_{\text{ПрНО}}$ (штриховая линия); $|S_{31}|$ – вносимые потери (сплошная линия); $|S_{41}|$ – сонаправленная связь ($C_{\text{СоНО}}$) (штрихпунктирная линия).

Для ТрНО: $|S_{21}|$ – связь (штриховая линия); $|S_{31}|$ – развязка (сплошная линия); $|S_{41}|$ – связь с дальним диагональным портом (штрихпунктирная линия).

Обозначения представленных частотных зависимостей S -параметров для кроссоверов всех типов одинаковые: $|S_{11}|$ – потери на отражение по всем портам (пунктирная линия); $|S_{21}|$ – развязка 1-го и 2-го портов (штриховая линия); $|S_{31}|$ – развязка 1-го и 3-го портов (сплошная линия); $|S_{41}|$ – диагональная полная связь 1-го и 4-го портов (штрихпунктирная линия).

Из рис. 2 видно, что для структуры СЛ с параметрами $C = 3$ дБ; $(\epsilon_{re} \epsilon_{ro}) = (2,4 \ 2,7)$; $\ell = 15$ мм, образующей одиночный ПрНО-мост, по уровню связи $C = (2,5\text{--}4)$ дБ полоса рабочих частот составляет $(1,9\text{--}4,4)$ ГГц (79%). А для кроссовера с тандемным соединением двух таких ПрНО-мостов по уровню развязки 15 дБ полоса частот составляет $(2\text{--}4,3)$ ГГц (73%). Отсюда следует, что полоса рабочих частот кроссовера на тандемной паре ПрНО на 6% меньше полосы частот одиночного ПрНО, хотя и остается довольно широкой.

Из рис. 3 видно, что для структуры СЛ с параметрами $C = 15$ дБ; $C_{\text{СоНО}} = 3$ дБ; $(\epsilon_{re} \epsilon_{ro}) = (4 \ 3)$; $\ell = 80$ мм, образующей одиночный СоНО-мост, по уровню сонаправленной связи $C_{\text{СоНО}} = (2,5\text{--}4)$ дБ полоса рабочих частот составляет $(3\text{--}3,9)$ ГГц (26%). А для кроссовера с каскадным соединением двух таких СоНО-мостов по уровню развязки 15 дБ полоса частот тоже составляет $(3\text{--}3,9)$ ГГц (26%), т.е. полоса рабочих частот кроссовера на каскадной паре СоНО равна полосе частот одиночного СоНО.

Главной особенностью СоНО, отличающей его от ПрНО и ТрНО, является возможность задания слабой противонаправленной связи $C \equiv C_{\text{ПрНО}} = (10\text{--}20)$ дБ на нижней нерабочей частоте ($\theta_e = 90^\circ$) для обеспечения сильной сонаправленной связи $C_{\text{СоНО}} = 3$ дБ в центре полосы рабочих частот (см. рис. 3).

Из рис. 4 видно, что для структуры СЛ с параметрами $C = C_{\text{ТрНО}} = 3$ дБ; $(\epsilon_{re} \epsilon_{ro}) = (1,1\text{--}10)$; $\ell = 20$ мм, образующей одиночный ТрНО-мост, по уровню связи $(2,5\text{--}4)$ дБ полоса рабочих частот составляет $(3\text{--}4,1)$ ГГц (31%). А для кроссовера с параллельным соединением двух таких ТрНО-мостов по уровню развязки 15 дБ полоса частот составляет $(3,1\text{--}4)$ ГГц (25%), т.е. полоса рабочих частот кроссовера на каскадной паре ТрНО на 6% меньше полосы частот одиночного ТрНО.

Заключение

При создании кроссоверов, построенных на паре НО с заданным типом направленности, содержащих отрезки СЛ, необходимо учитывать следующее.

Практическое использование тандемного кроссовера на ПрНО видится маловероятным, т.к. для реализации одной перемычки неэффективно применять два ПрНО-моста с двумя необходимыми перемычками. Поэтому структура на ПрНО здесь представлена лишь как база для сравнения по критерию широкополосности.

Параллельный кроссовер на ТрНО требует сильно неоднородного диэлектрического заполнения, при этом не нуждается в перемычках, компактен и имеет умеренную полосу рабочих частот. Оба этих кроссовера – тандемный и параллельный – строятся при сильной связи 3 дБ и электрической длине 90°.

Особенностью каскадного кроссовера на СоНО, отличающей его от двух предыдущих, является возможность задания слабой противонаправленной связи (10–20) дБ на нижней нерабочей частоте для обеспечения сильной сонаправленной связи 3 дБ в центре полосы рабочих частот. Это ведёт к тому, что требуемая длина области связи существенно (примерно в 5–10 раз) превышает длину предыдущих кроссоверов. Однако это компенсируется простотой и легкостью реализации в микрополосковом исполнении.

Полосы рабочих частот при уровне связи (2,5–4) дБ для мостов на ПрНО, СоНО и ТрНО составляют 79, 26 и 31% соответственно.

При соединении этих мостов по тандемной, каскадной и параллельной схемам, соответственно, и формировании кроссоверов с полной связью 0 дБ при уровне развязки более 15 дБ их полосы частот немного сужаются, составляя 73, 26 и 25% соответственно.

Заметим, что частотные характеристики кроссовера на ТрНО представлены впервые. Результаты исследования могут быть полезны при поиске оптимальных проектных решений кроссоверов, удовлетворяющих заданным техническим требованиям.

Литература

1. Djerafi T. Design and implementation of a planar 4×4 Butler matrix in SIW technology for wide band high power application / T. Djera, N.J.G. Fonseca, K. Wu // Progress in Electromagnetics Research (PIER) B. – 2011. – Vol. 35. – P. 29–51.
2. Wight J.S. A microstrip and stripline crossover structure / J.S. Wight, W.J. Chudobiak, V. Makios // IEEE Trans. – 1976. – Vol. MTT-24, No. 5. – P. 270.
3. Kholodniak D. V. Wideband 0-dB branch-line directional couplers / D.V. Kholodniak, I.B. Vendik // Proc. of the 29th Eur. Microwave Conf., October, 1999. – Munich, Germany, 1999. – P. 341–344.
4. Shelton J.P. Tandem couplers and phase shifters for multi-octave bandwidth / J.P. Shelton, J.J. Wolfe, R.C. von Wagoner // Microwaves. – 1965. – No. 4. – P. 14–19.
5. Горбачев А.П. Широкополосные тандемные соединения на связанных неоднородных линиях / А.П. Горбачев, Е.И. Машарский, А.Н. Романов // Радиотехника. – 1976. – Т. 21, № 9. – С. 1987–1989.
6. Мещанов В.П. Автоматизированное проектирование направленных ответвителей СВЧ / В.П. Мещанов, А.Л. Фельдштейн. – М.: Связь, 1980. – 144 с.
7. Uysal S. Nonuniform line microstrip directional coupler and filters. – London: Artech House, 1993. – 228 p.
8. Стручков С.М. Проблематика моделирования связанных микрополосковых линий передачи / С.М. Стручков, А.Н. Сычев // Электронные средства и системы управления: матер. докл. 12-я Междунар. науч.-практ. конф. (16–18 нояб. 2016 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2016. – С. 108–109.
9. 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, 2015. – P. 547–549.
10. 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.
11. Сычев А.Н. Трёхкаскадный транснаправленный ответвитель X-диапазона / А.Н. Сычев, С.М. Стручков, Н.Ю. Рудый // Доклады ТУСУРа. – 2015. – № 4 (38). – С. 12–50
12. Сычев А.Н. Системы параметров одинаковых связанных линий с неуравновешенной электромагнитной связью / А.Н. Сычев, С.М. Стручков // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 1 (31). – С. 39–50.

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

Sychev A.N.

Microwave crossovers based on coupled line couplers

The microwave crossovers with a pair of directional couplers based on coupled lines with a tight 3-dB coupling are analyzed. On the basis of three types (contra-, co-, and trans-) directional couplers connected in three schemes: tandem, cascade and parallel, respectively, crossovers with a total coupling of 0 dB are constructed. The frequency characteristics of a crossover based on trans-directional coupler are presented for the first time. Modeling and computer simulation have shown that tandem crossovers based on the contra-directional couplers have the superiority in terms of the working frequency band (with a decoupling level of more than 15 dB) with a bandwidth of 73% versus 26 and 25% for cascade and parallel crossovers based on (co- and trans-) directional couplers, respectively. The results can be used when finding the optimal crossover design solution that meets the specified technical requirements.

Keywords: microwave crossover, coupled lines, directional coupler, contra-directional coupler, co-directional coupler, trans-directional coupler, tandem connection, cascade connection, parallel connection.