УДК 621.396.41

А.Н. Сычев, С.М. Стручков, Н.Ю. Рудый

Синтез идеального фазового отношения для ответвителей на связанных линиях по заданному типу направленности

Впервые получена формула идеального фазового отношения, выражающая отношение электрических длин нормальных волн в связанных линиях через три целых числа – код направленности, число близости и число различия. Функция идеального фазового отношения образует три двумерные последовательности, значения элементов которых представляются рациональными числами. Из полученной формулы следует, что противонаправленный режим работы связанных линий возможен не только в однородной диэлектрической среде, но и в неоднородной. Формула также удобна для синтеза сонаправленных и транснаправленных ответвителей.

Ключевые слова: направленный ответвитель, связанные линии, идеальное фазовое отношение, противонаправленный ответвитель, сонаправленный ответвитель, транснаправленный ответвитель.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-2-15-18

Направленный ответвитель (НО), являясь пассивным СВЧ-устройством, находит широкое применение в технике СВЧ. Он может функционировать и как самостоятельный компонент в составе сложных систем, и как базовый элемент составных СВЧ-устройств, таких как балансный усилитель, смеситель, мостовой фазовращатель, аттенюатор, антенный переключатель, диаграммообразующее устройство антенной решётки и т.п.

Различают три типа направленных ответвителей: 1) противонаправленный (ПрНО, обратный); 2) сонаправленный (СоНО, прямой); 3) транснаправленный (ТрНО, поперечный) [1–3]. Упомянутые типы ответвителей, построенные на основе связанных линий, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Типы направленных ответвителей на СЛ

Тип (код) направленности n	Направленный ответвитель	
	Название	Схема
1	Противонаправленный (ПрНО)	
2	Сонаправленный (СоНО)	
3	Транснаправленный (ТрНО)	

Ответвители различают ещё и по уровню связи: с сильной связью (0...6) дБ; со слабой связью (6...20 и более) дБ. При этом ответвитель с 3 дБ связью называют мостом.

При конструировании ПрНО обычно используют проводные и полосковые связанные линии, имеющие как однородное [4], так и неоднородное [5] диэлектрическое заполнение. Создание СоНО и ТрНО на той же конструктивно-технологической

базе – более трудная задача, и здесь неизбежно используют неоднородное диэлектрическое заполнение [6–9], а зачастую применяют и сосредоточенные элементы, как в [2, 3, 10].

Отсюда, цель работы – получить проектные соотношения для синтеза НО на СЛ, введя понятие «фазовое отношение», характеризующее неоднородность диэлектрика, а также математически выразить фазовое отношение через тип направленности.

Параметры связанных линий

Вначале рассмотрим основные параметры связанных линий (СЛ) с неоднородным диэлектриком, которые являются основой при построении НО всех трёх типов. Обычно симметричные СЛ полностью характеризуются следующими четырьмя параметрами – парой модальных импедансов Z_{0e} , Z_{0o} и парой эффективных диэлектрических проницаемостей ϵ_{re} , ϵ_{ro} для структур чётного (e) и нечётного (o) типов возбуждения соответственно. Однако в ряде практических случаев бывает удобнее перейти к несколько иной четвёрке параметров – характеристическому импедансу Z_0 и коэффициенту импедансной связи k , а также характеристической диэлектрической проницаемости ϵ_r и коэффициенту фазовой связи δ . Эти параметры выражаются следующим образом [11]:

$$Z_0 = \sqrt{Z_{0e} Z_{0o}}; \quad k = (Z_{0e} - Z_{0o}) / (Z_{0e} + Z_{0o});$$

$$\epsilon_r = \sqrt{\epsilon_{re} \epsilon_{ro}}; \quad \delta = (\epsilon_{re} - \epsilon_{ro}) / (\epsilon_{re} + \epsilon_{ro}).$$

Последние два параметра, определяющие замедляющие свойства СЛ, можно заменить следующей равнозначной парой диэлектрических параметров – ϵ_{re} и $\epsilon_{ro}/\epsilon_{re}$, используя которые с учётом геометрической длины отрезка СЛ, получаем соответствующую пару фазовых параметров – θ_e и θ_o/θ_e . Последний из них назовём фазовым отношением m .

$$m = \sqrt{\epsilon_{ro} / \epsilon_{re}} = \theta_o / \theta_e.$$

Заметим, что тип направленности НО формируется неоднородностью диэлектрического заполнения, зависит, прежде всего, от параметра m , характеризующего СЛ, и выявляется в результате анализа готовой конструкции. При проектировании же выполняется обратный процесс – синтез и, следова-

тельно, необходимо иметь в распоряжении формулу идеального фазового отношения m , вычисляемого по заданному типу идеальной направленности n .

Формула идеального фазового отношения

Поиск формулы для m осуществляем методом логической индукции и многократным численным экспериментом на компьютерной модели. Опуская подробности процедуры вывода обобщённой формулы, дадим ей дедуктивное объяснение и рассмотрим её частные случаи.

Итак, общая формула для идеального фазового отношения m выражается через три целых числа – код направленности n , число близости i и число различия j , и, следовательно, результирующее значение фазового отношения может быть представлено рациональным числом (отношением целых чисел)

$$m \equiv m_{n,i,j} = \frac{\theta_o}{\theta_e} = \frac{[3 - (-1)^n](i+j)/2 + n}{[3 - (-1)^n](i-j)/2 + 1}, \quad (1)$$

где n – код (номер типа) направленности, $n = \{1, 2, 3\}$; i – число близости; j – число различия; $i \geq j = 0, 1, 2, \dots$

Теперь рассмотрим частные случаи (1). Задав все допустимые числовые значения кода направленности n , получаем конкретные условия идеальной (противо-, со- и транс-) направленности НО на СЛ

$$m_{n,i,j} = \begin{cases} \frac{2(i+j)+1}{2(i-j)+1}, & n=1; \\ \frac{i+j+2}{i-j+1}, & n=2; \\ \frac{2(i+j)+3}{2(i-j)+1}, & n=3. \end{cases} \quad (2)$$

При этом, если $j = 0$, то

$$m_{n,i,0} = \begin{cases} 1, & n=1, j=0; \\ \frac{i+2}{i+1}, & n=2, j=0; \\ \frac{2i+3}{2i+1}, & n=3, j=0. \end{cases} \quad (3)$$

Если $i = j = 0$, то получаем тривиальный случай

$$m_{n,0,0} = \begin{cases} 1, & n=1, i=j=0; \\ 2, & n=2, i=j=0; \\ 3, & n=3, i=j=0, \end{cases} \quad (4)$$

т.е. $m_{n,0,0} = n$.

Для удобства последующего анализа числовые значения функции идеального фазового отношения (2) сведём в три таблицы (табл. 2–4), которые соответствуют всем трём типам направленных ответвителей на СЛ – ПрНО, СоНО, ТрНО (см. табл. 1).

Заметим, что в них отражен вариант медленной нечётной волны $\theta_o > \theta_e$, $m > 1$, в противном случае будет $\theta_o < \theta_e$, $m < 1$.

Анализируя представленные выше соотношения и содержание таблиц, можно сделать следующие выводы: 1) функция идеального фазового отношения m зависит от трёх аргументов – кода направленности n , числа близости i и числа различия j – и является

целочисленной функцией, значения которой образуют три двумерные последовательности (см. табл. 2–4); 2) код направленности является параметром, принимающим три целых значения: $n = \{1, 2, 3\}$; 3) число близости i является целым неотрицательным, $i \geq 0$, и с его ростом фазовое отношение выравнивается, $m \rightarrow 1$, т.е. $\theta_o \approx \theta_e$; 4) число различия j также является целым, всегда меньшим или равным числу близости, $j \leq i$, но с его ростом фазовое отношение увеличивается, $m \rightarrow \infty$; 5) если числа близости и различия различны, $i \neq j$, то идеальное фазовое отношение выражается рациональным числом (отношением целых чисел); 6) если числа близости и различия равны друг другу, $i = j$, то идеальное фазовое отношение выражается целым числом; 7) если числа близости и различия оба равны нулю, $i = j = 0$, то значение идеального фазового отношения просто равно коду направленности, $m = n$.

Таблица 2

Идеальные фазовые отношения для ПрНО $n = 1$

Число близости i	Число различия j					
	0	1	2	3	4	5
0	1	–	–	–	–	–
1	1	5	–	–	–	–
2	1	7/3	9	–	–	–
3	1	9/5	11/3	13	–	–
4	1	11/7	13/5	5	17	–
5	1	13/9	15/7	17/5	19/3	21
6	1	15/11	17/9	19/7	21/5	23/3
7	1	17/13	19/11	21/9	23/7	5

Таблица 3

Идеальные фазовые отношения для СоНО $n = 2$

Число близости i	Число различия j				
	0	1	2	3	4
0	2	–	–	–	–
1	3/2	4	–	–	–
2	4/3	5/2	6	–	–
3	5/4	2	7/2	8	–
4	6/5	7/4	8/3	9/2	10
5	7/6	8/5	9/4	10/3	11/2
6	8/7	9/6	2	11/4	4
7	9/8	10/7	11/6	12/5	13/4
8	10/9	11/8	12/7	13/6	14/5

Таблица 4

Идеальные фазовые отношения для ТрНО $n = 3$

Число близости i	Число различия j			
	0	1	2	3
0	3	–	–	–
1	5/3	7	–	–
2	7/5	3	11	–
3	9/7	11/5	13/3	15
4	11/9	13/7	3	17/3
5	13/11	15/9	17/7	19/5
6	15/13	17/11	19/9	3
7	17/15	19/13	21/11	23/9

Импедансные условия функционирования

Помимо синтеза требуемого типа направленности НО, осуществлённого выше, необходимо обеспечить выполнение ещё двух базовых условий

функционирования НО: 1) идеального импедансного согласования; 2) достаточной импедансной связи.

Условие идеального согласования состоит в достижении точного равенства собственного характеристического импеданса связанных линий Z_0 и нагрузочного импеданса одиночных подводящих линий Z_L на каждом из четырёх портов, т.е. $Z_0/Z_L = 1$.

Условие достаточной импедансной связи заключается в том, что для обеспечения необходимого фазового отношения m и соответственно фазовой связи δ требуется обеспечить достаточно сильную импедансную связь k , превышающую нижний предельный (критический) уровень [11]

$$m = \frac{\theta_o}{\theta_e} < \frac{1+k}{1-k} = \frac{Z_{0e}}{Z_{0o}}. \quad (5)$$

Например, чтобы получить весьма большое значение фазового отношения m , достигающее 3 (коэффициент фазовой связи $\delta = -0,8$) необходимо обеспечить импедансную связь k сильнее 0,5 (6 дБ). Другими словами, для физической реализуемости значение импедансного отношения Z_{0e}/Z_{0o} всегда должно превышать значение фазового отношения θ_o/θ_e . Кроме того, заметим, что при отсутствии импедансной связи между линиями распределённая фазовая связь между ними, естественно, не возникает.

Частотные характеристики

Получив основные проектные соотношения для синтеза НО на СЛ, перейдём к построению их частотных характеристик. При этом будем учитывать известное соотношение для электрической длины четной волны θ_e :

$$\theta_e = \frac{\omega}{v_e} l = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon_{re}} l,$$

где l – геометрическая длина отрезка линий; c – скорость света в свободном пространстве; v_e – скорость чётной волны в среде; f – частота.

Рис. 1. S-параметры ПрНО на СЛ при $n = 1$; $C = 15$ дБ: $a - m = 1$; $b - m = 15/11$

Исходными данными для синтеза являются: условие идеального согласования $Z_0/Z_L = 1$; требуемая импедансная связь $C \equiv C_{\text{ПрНО}} = -20 \lg(k)$ дБ; требуемый тип (код) направленности n , определяющий допустимые значения идеального фазового отношения m . Результаты расчетов частотных зависимостей S-параметров приводятся на рис. 1–3.

Для ПрНО со слабой связью и однородным диэлектриком ($m = 1$) из рис. 1, a видно, что характеристики прямой передачи S_{31} (близка к 0 дБ) и связи S_{21} имеют обычный периодический характер, а согласование S_{11} и развязка S_{41} – идеальны и не попадают в поле графиков. Однако из рис. 1, b выявляется, что ПрНО можно построить и на структуре с неоднородным диэлектриком ($m = 15/11 = 1,36$), хотя с весьма большой электрической длиной $\theta_e = 990$ град.

Главной особенностью, отличающей синтез СоНО от синтеза ПрНО и ТрНО, является необходимость задания слабой противонаправленной связи $C_{\text{ПрНО}} = (10 \dots 20)$ дБ на нижней нерабочей частоте ($\theta_e = 90$ град) для обеспечения сильной сонаправленной связи $C_{\text{СоНО}} = 3$ дБ в центре полосы рабочих частот (см. рис. 2).

Рис. 2. S-параметры СоНО на СЛ при $n = 2$; $C_{\text{СоНО}} = 3$ дБ ($C_{\text{ПрНО}} = 15$ дБ): $a - m = 5/4$; $b - m = 10/9$

Результаты синтеза электрических параметров ТрНО (см. рис. 3) говорят о том, что наиболее компактная структура СЛ ($\theta_e = 90^\circ$) формируется при трехкратном фазовом отношении $m = 3$ ($i = j = 0$). При этом заметим, что последующий этап проектирования – синтез конструкции СЛ – был уже ранее успешно осуществлён в [7–9].

Заключение

Для моделирования НО на СЛ с произвольным диэлектрическим заполнением введено понятие «фазовое отношение». Показано, что НО с идеаль-

ной направленностью заданного типа, построенный на отрезке СЛ с неоднородным диэлектриком, можно создать только при условии, если обеспечено соответствующее идеальное фазовое отношение для нормальных волн в СЛ.

Рис. 3. S-параметры ТрНО на СЛ при $n = 3$; $C = 3$ дБ:
 $a - m = 3$; $b - m = 5/3$

Впервые получена обобщённая формула идеального фазового отношения, выражающая отношение электрических длин нормальных волн в СЛ через три целых числа – код направленности n , число близости i и число различия j .

Рассмотрены частные случаи общей формулы при трёх значениях кода направленности, $n = \{1, 2, 3\}$, соответствующие конкретным условиям идеальной (противо-, со- и транс-) направленности НО на СЛ. Отсюда функция идеального фазового отношения $m_{n,i,j}$ образует три двумерные последовательности, значения элементов которых представляются рациональными числами (отношением целых чисел).

Сформулированы также импедансные условия функционирования НО – идеального согласования и достаточной импедансной связи.

Для иллюстрации полученных соотношений представлены частотные зависимости S-параметров всех трёх типов НО на СЛ – ПрНО, СоНО, ТрНО с различными исходными фазовыми и импедансными параметрами.

Литература

1. Фельдштейн А.Л. Справочник по элементам волноводной техники / А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич, В.П. Смирнов. – 2-е изд. – М.: Сов. радио, 1967. – 651 с.
2. Vogel R.W. Analysis and design of lumped- and lumped-distributed element directional couplers for MIC and MMIC applications // IEEE Trans. – 1992, MTT. – Vol. 40, No. 2. – P. 253–262.
3. Lourandakis E. Circuit agility / E. Lourandakis, R. Weigel, H. Mextorf, R. Knoechel // IEEE Microwave Magazine, 2012. – Vol. 13, No. 1. – P. 111–121.

4. Мещанов В.П. Автоматизированное проектирование направленных ответвителей СВЧ / В.П. Мещанов, А.Л. Фельдштейн. – М.: Связь, 1980. – 144 с.

5. Малютин Н.Д. Синтез нерегулярных рельефных связанных микрополосковых линий методом «выращивания» / Н.Д. Малютин, А.А. Ильин, А.Г. Лошилов // 20-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрымиКо'2010): в 2 т. – Т. 2. – Севастополь: Бебер, 2010. – С. 745–747.

6. Mongia R. RF and microwave coupled-line circuit / R. Mongia, I. Bahl, P. Bhartia. – London: Artech House, 1999. – 520 p.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. Сычев А.Н. Системы параметров одинаковых связанных линий с неуровненной 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
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: ans@main.tusur.ru

Стручков Сергей Михайлович

Канд. техн. наук, ассистент каф. КСУП
Тел.: +7 (382-2) 41-47-17
Эл. почта: struchkov.sm@gmail.com

Рудый Николай Юрьевич

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

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

Synthesis of an ideal phase ratio for a coupled-line coupler with a given type of directionality

For the first time, an ideal phase ratio formula is obtained that expresses the ratio of the electrical lengths of normal modes in coupled lines through three integers – the directivity code, the number of proximity and the number of the difference. The ideal phase ratio function forms three two-dimensional sequences whose values are represented by rational numbers. From the obtained formula it follows that the contra-directional operation mode of coupled lines is possible not only in a homogeneous dielectric medium, but also in an inhomogeneous medium. The formula is also convenient for the synthesis of co-directional and trans-directional couplers.

Keywords: directional coupler, coupled lines, ideal phase ratio, contra-directional coupler, co-directional coupler, trans-directional coupler.