

Малогобаритные делители мощности и направленные ответвители на искусственных длинных линиях в интегральном исполнении

И.Н. Рыжман, Д.В. Холодняк

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: Представлены конструкции и частотные характеристики микрополосковых делителей мощности (ДМ) и направленных ответвителей (НО) с уменьшенными габаритными размерами, которые достигнуты путем замены четвертьволновых отрезков традиционных длинных линий с распределенными параметрами искусственными длинными линиями (ИДЛ) на элементах с сосредоточенными параметрами. Использование ИДЛ, состоящих из двух элементарных ячеек на четверть длины волны, позволяет реализовывать малогабаритные ДМ и НО с рабочей полосой частот более 20%, а для реализации менее широкополосного НО достаточно ИДЛ на основе одной ячейки.

Ключевые слова: делители мощности, направленные ответвители, искусственные длинные линии элементы с сосредоточенными параметрами

1. Введение

На протяжении десятков лет в технике СВЧ широко применяются делители мощности (ДМ) и направленные ответвители (НО) – пассивные СВЧ-устройства, предназначенные для деления входной мощности в заданном отношении между выходными плечами или сложения мощности от нескольких источников. Габаритные размеры ДМ и НО, использующих четвертьволновых отрезки длинных линий (ДЛ) с распределенными параметрами, тем больше, чем ниже рабочая частота. Физические размеры устройств могут быть заметно уменьшены путем замены отрезков традиционных ДЛ на искусственные длинные линии (ИДЛ), состоящие из элементов с сосредоточенными параметрами [1 – 3].

На практике ИДЛ могут выполняться как на компонентах поверхностного монтажа (КПМ), так и на квазисосредоточенных *LC*-элементах в интегральном исполнении. К преимуществам интегрального исполнения относятся: более высокая точность реализации значений и меньший разброс параметров индуктивных и емкостных элементов, что положительно сказывается на частотных характеристиках (ЧХ) устройств; отсутствие необходимости организации переходных металлизированных отверстий для параллельного включения конденсаторов; отсутствие дополнительных технологических операций по установке и пайке КПМ.

В работе представлены результаты разработки малогабаритных вариантов двухканального ДМ конструкции Уилкинсона, квадратного двушлейфного НО и синфазно-противофазного кольцевого НО, выполненных на интегральных *LC*-элементах в микрополосковом исполнении. Разработанные устройства с центральной частотой 1 ГГц обладают лишь на 2-4% более узкой рабочей полосой частот по сравнению с традиционными ДМ и НО при сопоставимых разбалаксах амплитуд и фаз и выигрыше в занимаемой площади от 5 до 14 раз.

2. Реализация искусственных длинных линий и СВЧ-устройств на их основе

Под ИДЛ принято понимать квазипериодические структуры, представляющие собой каскадное соединение Т- или П-образных ячеек, состоящих из индуктивных и

емкостных элементов с сосредоточенными параметрами. При определенных условиях ИДЛ может рассматриваться в качестве эквивалента отрезка однородной ДЛ с распределенными параметрами, характеристики распространения электромагнитной волны в которой могут быть выражены через параметры ИДЛ.

Параметры элементарных ячеек ИДЛ рассчитываются по заданным значениям волнового сопротивления (Z_0) и электрической длины отрезка ДЛ ($\theta_0 \leq 90^\circ$) как [3]:

$$L_T = Z_0/\omega_0 \tan(\theta_0/(2n)), \quad C_T = (\omega_0 Z_0)^{-1} \sin(\theta_0/n),$$

$$L_{\Pi} = Z_0/\omega_0 \sin(\theta_0/n), \quad C_{\Pi} = (\omega_0 Z_0)^{-1} \tan(\theta_0/(2n)),$$

где L_T , L_{Π} , C_T и C_{Π} – последовательные индуктивности и емкости «на землю» Т- и П-ячеек соответственно, $\omega_0 = 2\pi f_0$ – центральная частота, n – число элементарных ячеек в составе ИДЛ. Значения LC-элементов элементарных ячеек ИДЛ с различным волновым сопротивлением приведены в таблице.

Таблица. Параметры элементарных ячеек ИДЛ с $\theta_0 = 90^\circ$ на центральной частоте $f_0 = 1$ ГГц

Z_0 (Ом)	35,4			50			70,7		
n	1	2	3	1	2	3	1	2	3
L_T (нГн)	5,63	2,33	1,51	7,96	3,30	2,13	11,25	4,66	3,02
C_T (пФ)	4,50	3,18	2,25	3,18	2,25	1,59	2,25	1,59	1,13
L_{Π} (нГн)	5,63	3,98	2,81	7,96	5,63	3,98	11,25	7,96	5,63
C_{Π} (пФ)	4,50	1,87	1,21	3,18	1,32	0,85	2,25	0,93	0,60

При отстройке от центральной частоты f_0 , на которой достигается целевое значение θ_0 , ЧХ ИДЛ отличаются от ЧХ отрезка ДЛ с распределенными параметрами. Эти отличия тем заметнее, чем больше отстройка по частоте, выше значение θ_0 и меньше элементарных ячеек в составе ИДЛ.

Для ИДЛ на основе одной элементарной ячейки на четверть длины волны полоса частот, в которой отклонение модуля коэффициента отражения не превышает $\pm 0,1$, а отклонение фазы коэффициента передачи находится в пределах $\pm 10\%$, составляет около 20%. Для ИДЛ, состоящей из двух каскадно соединенных ячеек, рабочая полоса частот охватывает диапазон от нуля до $2f_0$. Увеличение числа элементарных ячеек до трех расширяет полосу частот до $2,25f_0$, но при этом площадь подложки, необходимая для размещения такой ИДЛ, возрастает в полтора раза. Таким образом, для разработки малогабаритных ДМ и НО с рабочей полосой частот 20-40%, достаточно ИДЛ на основе двух элементарных ячеек на четверть длины волны, а для менее широкополосных устройств можно обойтись ИДЛ, состоящими всего из одной ячейки.

Исходя из этих соображений, для реализации малогабаритных вариантов ДМ конструкции Уилкинсона и синфазно-противофазного кольцевого НО, которые в традиционном исполнении имеют рабочую полосу частот 36% и 28% соответственно, использовались ИДЛ на основе двух элементарных ячеек. Малогабаритный вариант двухшлейфного НО, рабочая полоса которого в обычных условиях ограничена 10,5%, выполнен на ИДЛ, состоящих из одной ячейки.

Все устройства разработаны на центральную частоту 1 ГГц и реализованы в микрополосковом исполнении без применения переходных металлизированных отверстий на подложке толщиной 0,6 мм из ламинированного диэлектрика Isola IS620i с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 3,6$, тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}(\delta) = 0,008$ и толщиной металлизации 17 мкм. Последовательные индуктивности Т- и П-ячеек ИДЛ выполнены в виде узких отрезков

микрополосковых линий (МПЛ), которые для компактности свернуты в виде меандра. Емкости «на землю» реализованы в виде плоскопараллельных конденсаторов, у которых один электрод представляет собой прямоугольный участок металлизации в верхнем слое, а в качестве другого выступает заземленный экран МПЛ. Минимальная ширина МПЛ и зазоров между ними составляет 200 мкм. Для анализа ЧХ ИДЛ и разработанных СВЧ-устройств применялось численное электродинамическое моделирование в программном пакете Cadence AWR Microwave Design Environment.

3. Двухканальный делитель мощности

Традиционный двухканальный ДМ конструкции Уилкинсона состоит из двух четвертьволновых отрезков ДЛ и резистора, включенного между выходными плечами. Для согласования входов и обеспечения равного деления входной мощности между выходами, волновое сопротивление ДЛ должно быть равно $Z_0 = 70,7$ Ом, а сопротивление резистора – $R = 100$ Ом.

Эквивалентная схема и топология малогабаритного ДМ на ИДЛ, состоящих из двух Т-образных ячеек, показаны на рисунках 1-а и 1-б соответственно. Значения LC -элементов ячейки ИДЛ приведены в таблице. Реализованная ИДЛ имеет длину 8,6 мм, т. е. менее $1/20$ длины волны в МПЛ на центральной частоте. Таким образом, физическая длина ИДЛ в пять раз короче традиционного четвертьволнового отрезка МПЛ. Габаритные размеры ДМ (без учета подводящих линий) составляют $15,2 \times 8,6$ мм, что соответствует $1/12 \times 1/21$ длины волны в линии. Эффективная площадь подложки, которую занимает ДМ, равна $130,7$ мм², что в пять раз меньше по сравнению с традиционным ДМ, имеющим форму кольца.

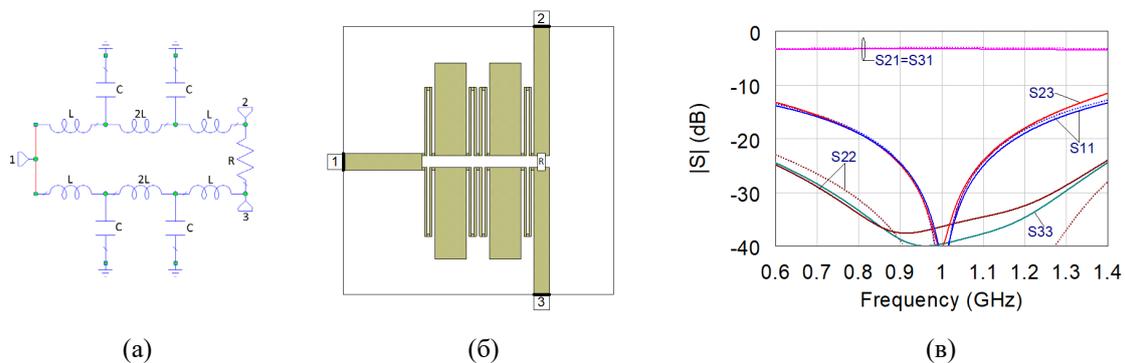


Рисунок 1. Малогабаритный ДМ на ИДЛ, состоящих из двух Т-образных элементарных ячеек: (а) эквивалентная схема, (б) топология, (в) АЧХ. Сплошными линиями показаны результаты электродинамического моделирования, пунктиром – результаты схемотехнического моделирования.

ЧХ разработанного ДМ, полученные при помощи электродинамического моделирования, хорошо совпадают с ЧХ эквивалентной схемы (рисунок 1-в). Рабочая полоса частот, в которой коэффициент отражения по всем входам не превышает -20 дБ, а развязка между выходными плечами составляет не менее 20 дБ, достигает 34%, что лишь на 2% меньше, чем у традиционного ДМ. В рабочей полосе частот вносимые потери не превышают 0,25 дБ, что также сопоставимо с традиционным ДМ, выполненным на такой же подложке.

4. Синфазно-противофазный направленный ответвитель

В традиционном исполнении синфазно-противофазный кольцевой НО состоит из трех четвертьволновых отрезков ДЛ и одного отрезка ДЛ с электрической длиной,

равной трем четвертям длины волны в линии на центральной частоте. В случае равного деления мощности между выходными плечами, волновое сопротивление всех отрезков ДЛ равно $Z_0 = 70,7 \text{ Ом}$.

Топология малогабаритного НО разработана на базе шести одинаковых секций ИДЛ, состоящих из двух Т-образных ячеек, которые использовались для реализации ДМ (рисунок 2). НО имеет размеры $22,2 \times 18,1 \text{ мм}$ ($1/8 \times 1/10$ длины волны) и занимает площадь 402 мм^2 , что в 14 раз меньше по сравнению с традиционным кольцевым НО.

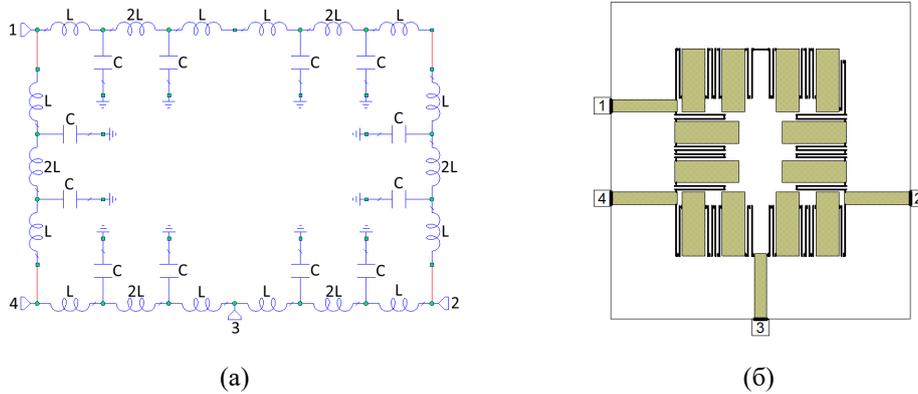


Рисунок 2. Малогабаритный синфазно-противофазный НО на ИДЛ, состоящих из двух Т-образных элементарных ячеек: (а) эквивалентная схема, (б) топология.

ЧХ НО в синфазном и противофазном режимах представлены на рисунке 3. По результатам электродинамического моделирования рабочая полоса частот, определяемая по уровню коэффициента отражения по всем входам -20 дБ и развязки выходных плеч 20 дБ , составляет 24% в синфазном режиме и 28% в противофазном режиме. В рабочей полосе частот обеспечивается равное деление мощности с разбалансом амплитуд не хуже $\pm 0,5 \text{ дБ}$ в синфазном режиме и $-1,5/+0,5 \text{ дБ}$ в противофазном режиме. Разбаланс фаз выходных сигналов не превышает $\pm 8^\circ$ в синфазном режиме и $\pm 11^\circ$ в противофазном режиме. Вносимые потери на центральной частоте составляют около $0,4 \text{ дБ}$. Таким образом, ЧХ разработанного малогабаритного НО сопоставимы с ЧХ традиционного кольцевого НО.

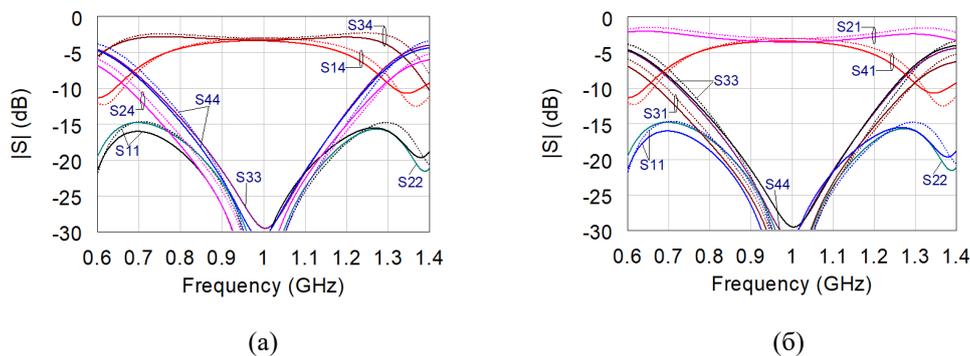


Рисунок 3. АЧХ малогабаритного синфазно-противофазного НО, полученные при помощи электродинамического моделирования (сплошные линии) и схематического моделирования (пунктир): (а) синфазный режим, (б) противофазный режим.

5. Квадратурный направленный ответвитель

Традиционный квадратурный двухшлейфный НО состоит из двух пар четвертьволновых отрезков ДЛ. У НО, делящего мощность поровну, одна пара линий имеет волновое сопротивление $Z_{01} = 35,4 \text{ Ом}$, а пара соединяющих их шлейфов –

$Z_{02} = 50 \text{ Ом}$.

Поскольку рабочая полоса частот традиционного двухшлейфного НО равна 10,5%, его малогабаритный вариант был выполнен на основе ИДЛ, состоящих всего из одной Т-образной ячейки (рисунок 4). Устройство имеет эффективные размеры $29,4 \times 9,9 \text{ мм}$ ($1/6 \times 1/18$ длины волны) и занимает площадь 291 мм^2 , т.е. почти в семь раз меньше, чем традиционный двухшлейфный НО.

По результатам электродинамического моделирования рабочая полоса частот, малогабаритного квадратурного НО достигает 8,5% (рисунок 4-в). В этой полосе разбаланс амплитуд равен $\pm 0,1 \text{ дБ}$, а разбаланс фаз не хуже $\pm 3^\circ$. Вносимые потери на центральной частоте не превышают 0,5 дБ.

Дополнительный анализ показал, что рабочая полоса частот расширяется до 10% при увеличении числа элементарных ячеек в составе ИДЛ до двух. При этом площадь, занимаемая НО, возрастает в 1,6 раза. Разбалансы амплитуд и фаз, а также вносимые потери не ухудшаются.

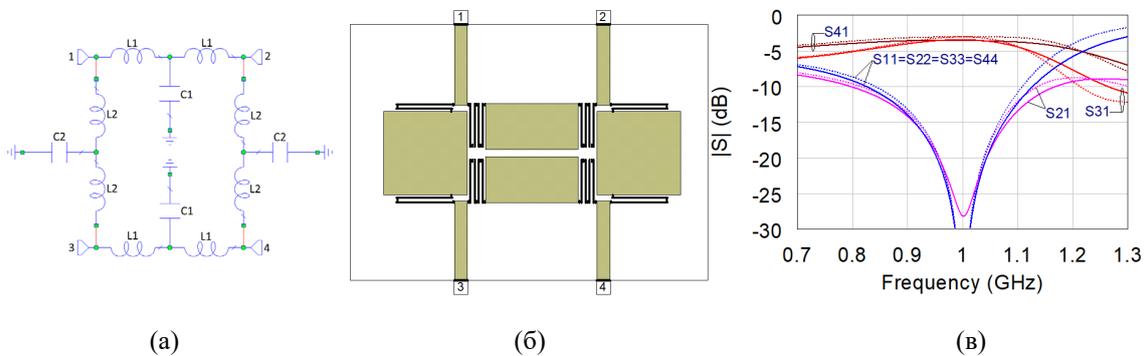


Рисунок 4. Малогабаритный квадратурный НО на ИДЛ на основе одной Т-образной ячейки: (а) эквивалентная схема, (б) топология, (в) АЧХ. Сплошными линиями показаны результаты электродинамического моделирования, пунктиром – результаты схемотехнического моделирования.

6. Заключение

Применение ИДЛ позволило разработать малогабаритные ДМ и НО, которые обладают практически такими же ЧХ, как и их традиционные аналоги, но занимают от 5 до 14 раз меньшую площадь.

Дальнейшее уменьшение размеров устройств возможно при использовании подложек с более высокой диэлектрической проницаемостью или переходе к многослойной реализации с размещением LC -элементов в нескольких слоях [1 – 3].

Преимуществом разработанных ДМ и НО является однослойная полностью интегральная реализация без использования переходных металлизированных отверстий, сверхузких проводников и зазоров между ними, а также без применения КПМ (за исключением резистора в составе ДМ), что позволяет изготавливать такие СВЧ-устройства по стандартной технологии производства печатных плат.

Список литературы

1. Piatnitsa V. et al. Right/left-handed transmission line LTCC directional couplers // 35th European Microwave Conference. – IEEE, 2007. – P. 636-639.
2. Turalchuk P. et al. Broadband small-size LTCC directional couplers // 40th European Microwave Conference. – IEEE, 2010. – P. 1162-1165.
3. Kholodnyak D. V. Metamaterial transmission lines and their applications // 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. – IEEE, 2017. – P. 3-8.