

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЫЧЕК НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОПОЛОСКОВОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ ЛАНГЕ

### Введение

Один из наиболее часто используемых в СВЧ-усилителях ответвитель был предложен Дж. Ланге в 1969 году. Он образуется с помощью двух связанных встречноштыревых микрополосковых линий, которые печатаются на жесткой подложке, как правило, из керамики или плавленного кварца. Линии складываются из двух связанных портов, расположенных рядом друг с другом. Для подавления высших мод при сохранении распространения основной моды открытые концы полос соединены с теми же линиями, к которым они уже подключены на противоположной стороне. Эти четыре моста, как правило, реализуются либо по проволочным связям, либо по печатным воздушным мостам. [1]

Поскольку производство ответвителей с большим количеством перемычек создает определенные сложности, возникает вопрос, как количество и диаметр перемычек, а также место сварки влияют на параметры ответвителя. Однако в литературе не рассматривается влияние характеристик перемычек на параметры фильтра.

Цель работы – предоставление практических рекомендаций по параметрам перемычек при проектировании, моделировании и производстве микрополосковых направленных ответвителей Ланге.

### Расчет топологии ответвителя Ланге

Для анализа был выбран направленный ответвитель Ланге, предложенный в [2]. Этот ответвитель имеет ряд преимуществ по сравнению с другими направленными ответвителями на связанных линиях: все питающие линии имеют одинаковые волновые сопротивления  $Z_{\text{в}}$ , величина которого выбирается из условия согласования ответвителя с подключаемыми к нему устройствами; ширина всех проводников в структуре одинакова, как и зазоры между ними, что уменьшает трудоемкость проектирования и сложность производства.

Анализ основан на рассмотрении многопроводной структуры, для которой находятся волновые проводимости при четном и нечетном возбуждении для каждой пары соседних проводников. При анализе предполагалось, что структура состоит из четного числа полосковых проводников равной длины, и учитывалось взаимодействие только между рядом расположенными проводниками. Исходные характеристики и данные для расчета анализируемого направленного ответвителя Ланге представлены на рис. 1.

Волновое сопротивление питающих линий записано в выражении (1):

$$Z^2 = \frac{Z_{Be} Z_{Bo} (Z_{Be} + Z_{Bo})^2}{[Z_{Be} + (k-1)Z_{Bo}] [Z_{Bo} + (k-1)Z_{Be}]}, \quad (1)$$

где  $k = 2, 4, 6, \dots, n+2$  – число линий в многопроводной структуре.

Коэффициент связи по напряжению рассчитывается по выражению (2):

$$C = 10^{\frac{\text{коэффициент\_связи\_в\_дБ}}{20}} = \frac{(k-1)Z_{Be}^2 - (k-1)Z_{Bo}^2}{(k-1)(Z_{Be}^2 + Z_{Bo}^2) + 2Z_{Be}Z_{Bo}}. \quad (2)$$

На основе выражений (1) и (2) получены приближенные формулы для синтеза такого ответвителя, представленные в виде выражений (3):

$$Z_{Bo} = Z_B \left( \frac{1-C}{1+C} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{(k-1)(1+q)}{(C+q)+(k-1)(1-C)} \quad (3)$$

$$Z_{Be} = \frac{Z_{Bo}(C+q)}{(k-1)(1-C)}$$

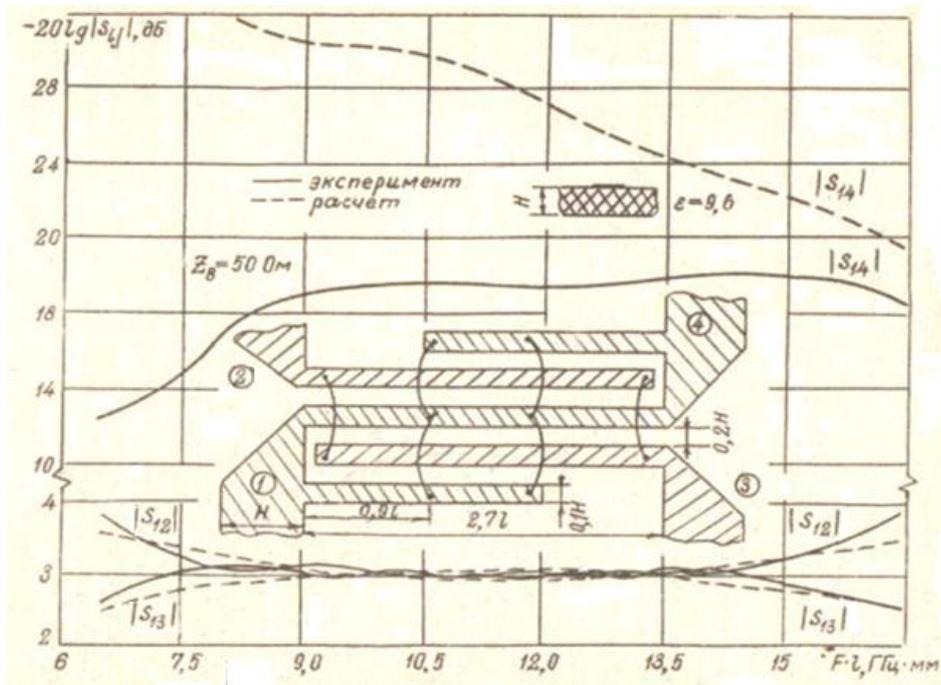


Рис. 1

На основании приведенных формул, а также методик расчета конструктивных параметров, изложенных в [3, 4], а также модуля TXLine, представленного в системе Microwave Office от AWR, был проведен расчет параметров ответвителя Ланге. Так как полученные результаты были близки, то для проведения анализа были приняты значения параметров, представленные в таблице. При моделировании структуры в Microwave Office по заданным параметрам результат (график 1) оказался близок к экспериментальному (график 2), как видно из рис.2.

Параметр анализируемого направленно-го ответвителя Ланге	Обозначение	Числовое значение	Размерность
Толщина полоска	W	0.05	мм
Расстояние между полосками	S	0.1	мм
Длина полоска	L	16.2	мм
Толщина плеча	H	0.5	мм
Волновое сопротивление линии	Zв	50	Ом
Диэлектрическая проницаемость	Er	9.6	
Рабочая частота	F	1.9	ГГц

Электромагнитное моделирование проводилось с помощью систем HFSS Ansoft, которая предназначена для проектирования трехмерных СВЧ устройств.

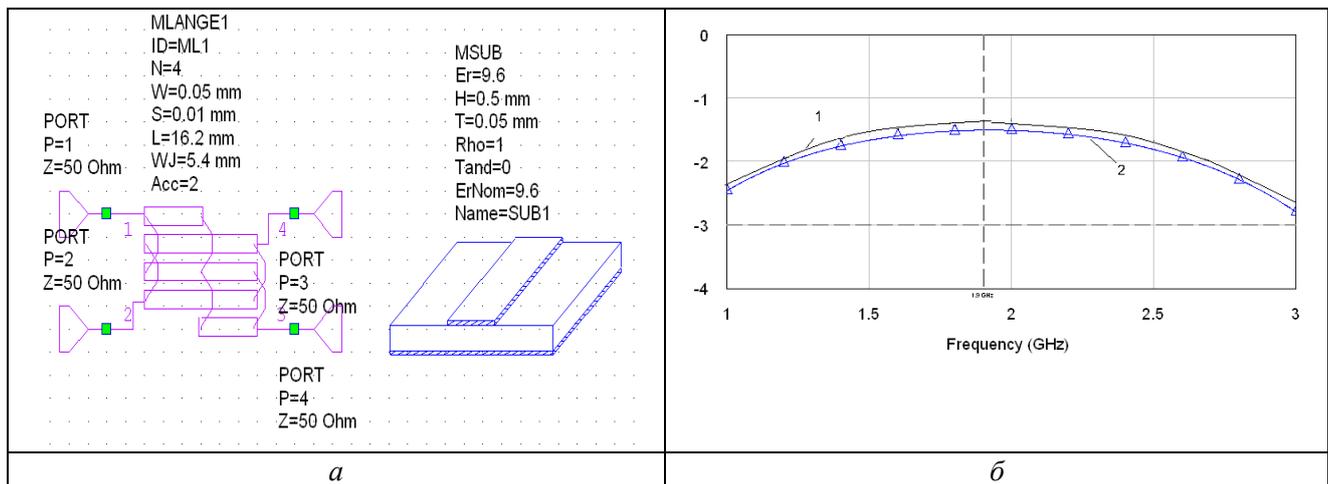


Рис. 2

### Описание электромагнитного моделирования направленного ответвителя Ланге

Электромагнитное моделирование было проведено с помощью систем HFSS Ansoft, которая предназначена для проектирования трехмерных СВЧ устройств.

Для получения достоверного результата электромагнитного моделирования в системе HFSS, был проведен выбор формы перемычек в направленном ответвителе Ланге. Было рассмотрено два варианта задания перемычек: с помощью операции Bondwire (рис. 3, а); перемычки в виде половин торов (рис. 3, б). При этом форма перемычек анализируемой модели близка к форме перемычек направленного ответвителя Ланге, выполненного с помощью установки для автоматической сварки, в первом случае, и форме перемычек, выполненной при ручной сварке, во втором.

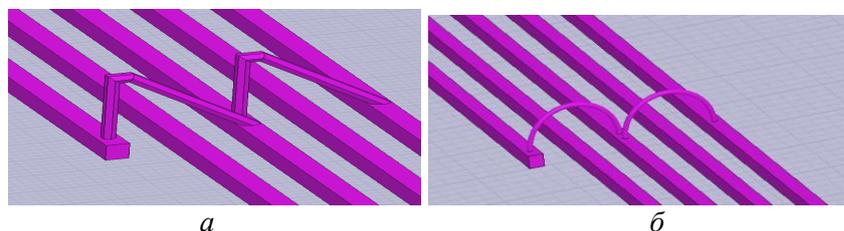


Рис. 3

На графике (рис. 4) показаны АЧХ, полученные в результате анализа конструкций с перемычками, которые заданы с помощью операции Bondwire (график 1), как половины торов (график 2).

Оба способа задания перемычек дают результаты, близкие к экспериментальным данным, что свидетельствует о возможности использования обоих предложенных методов моделирования перемычек на практике. Выбор способа задания перемычек должен осуществляться в зависимости от исполнения перемычек в проектируемом ответвителе Ланге на производстве.

При задании перемычек с помощью операции Bondwire необходимо выбрать условное количество граней проволоки, из которой будут выполнены перемычки. Было проведено исследование зависимости параметра S13 от количества граней перемычек. На рис. 5 показаны результаты анализа конструкций ответвителя Ланге, в которых перемычки были заданы как проволока с различным количеством граней: график 1 соответствует перемычке, имеющей 6 граней, график 2 – 12 граней, 3 – 18 граней, 4 – 24 грани.

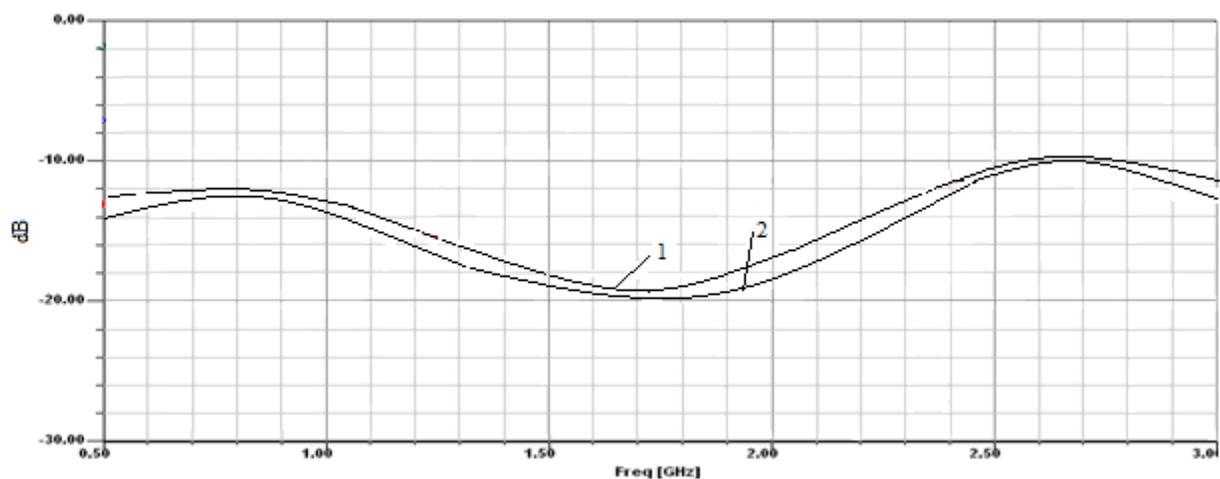


Рис. 4

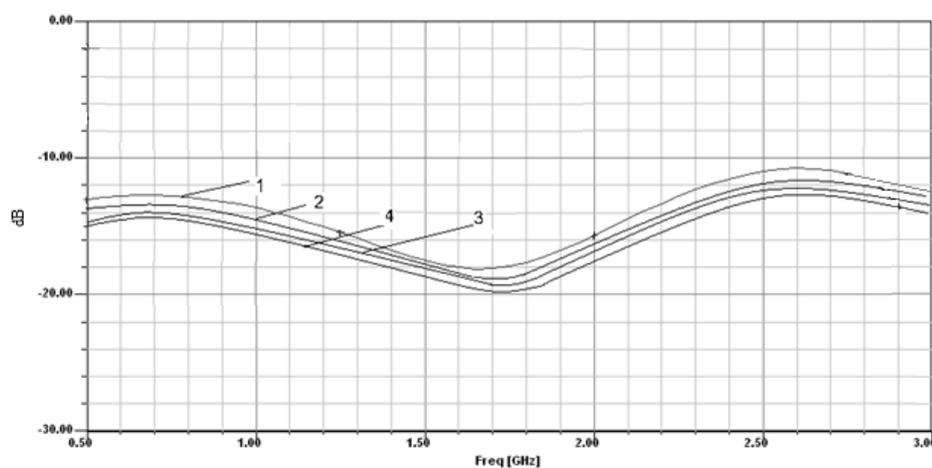


Рис. 5

При увеличении количества граней перемычек до определенного значения затухание уменьшается, но при дальнейшем увеличении количества граней время исследований будет значительно увеличиваться, а результат станет менее точным из-за повышения уровня сложности при разбиении модели на ячейки.

После определения наиболее подходящих условий для моделирования ответвителя, приступаем непосредственно к анализу перемычек, а именно влияния диаметра, материала и количества перемычек в направленном микрополосковом ответвителе Ланге.

На рис. 6 и 7 показаны АЧХ конструкций ответвителей Ланге, которые имеют диаметр 0.02, 0.025, 0.03, 0.035 мм (графики 1, 2, 3 и 4 соответственно); перемычки были смоделированы двумя описанными выше способами. Значения диаметра проволоки выбраны в соответствии с рекомендациями, приведенными в [5].

Как видно из рис.6 и 7, с увеличением диаметра перемычек значение коэффициента передачи  $S_{13}$  уменьшается, поэтому для соблюдения условия отклонения минимальной энергии из плеча 1 в плечо 3 необходимо сделать выбор в пользу того диаметра перемычек, который обеспечивает максимальное затухание. В нашем случае этот размер составляет 35 мкм, наибольший диаметр из возможных толщин проволоки при заданной ширине полоски.

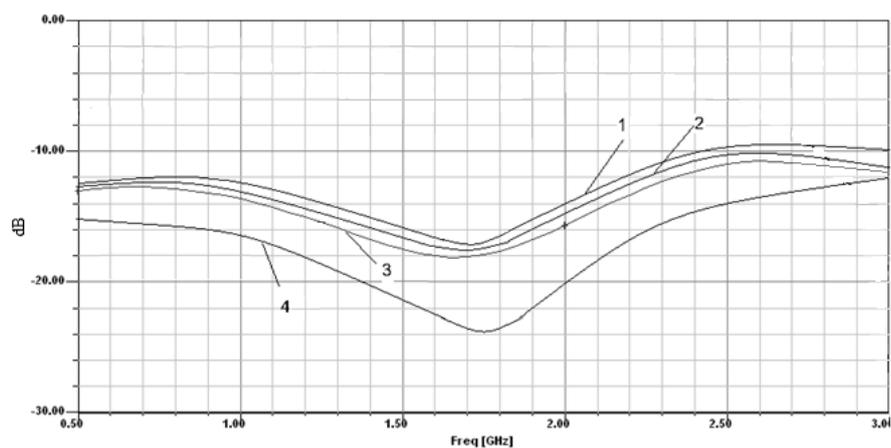


Рис. 6

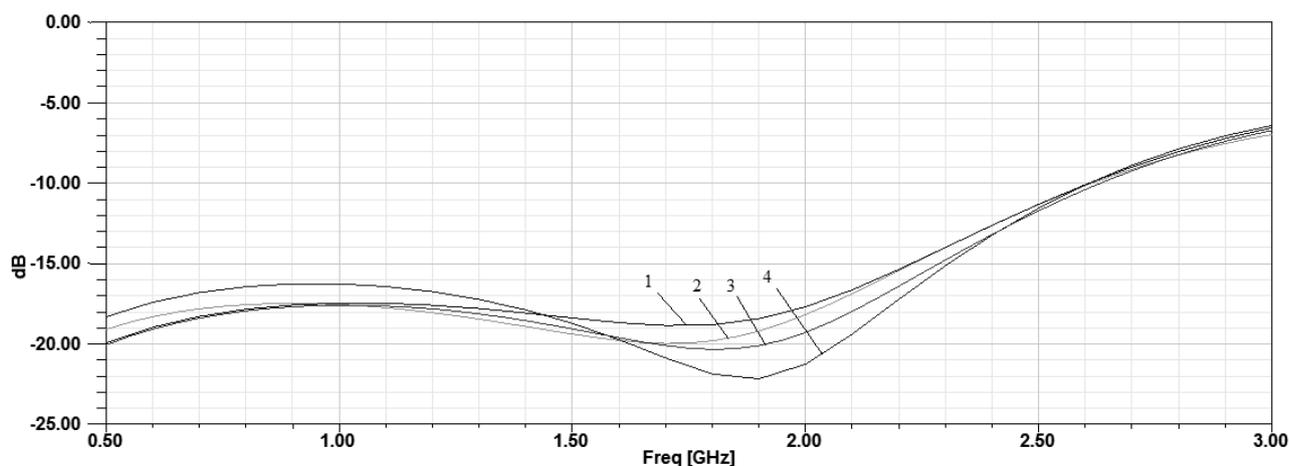


Рис. 7

На рис. 8 показаны АЧХ ответвителя Ланге, полученные в результате анализа конструкций, в которых в качестве материала перемычек выбраны золото (график 1) и медь (график 2).

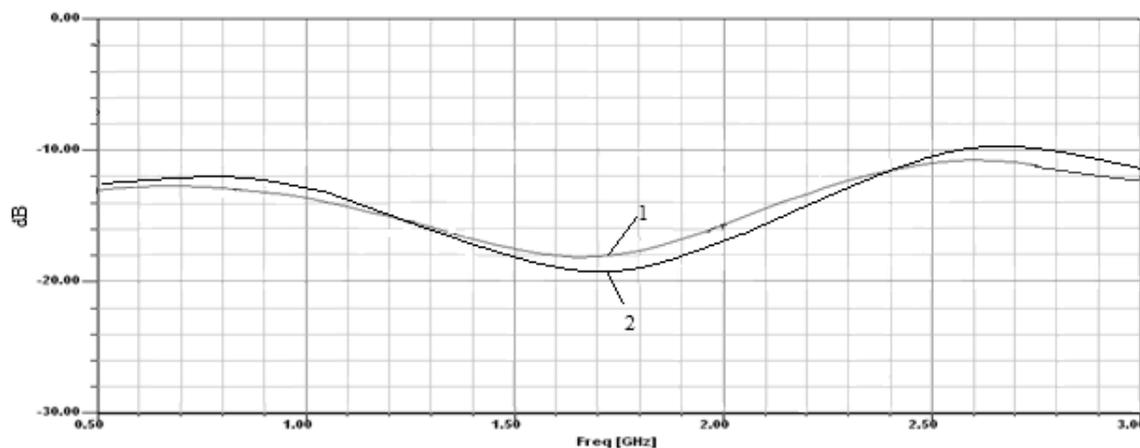


Рис. 8

Как видно из рис. 8, использование в качестве материала меди или золота при моделировании перемычек не дает больших изменений в АЧХ. Золотая проволока обладает более высокой стоимостью, чем медная, однако медная проволока сложнее в использовании, поскольку она обладает большей твердостью, чем золото. В связи с этим параметры сварки должны контролироваться с особым вниманием. Медь подвержена окислению, поэтому

необходимо принимать во внимание условия и сроки ее хранения [6]. Решение по выбору материала проволоки должен принимать изготовитель, исходя из условий производства.

Каждая из перемычек может быть выполнена из нескольких параллельно включенных перемычек. Вид конструкций, где перемычки выполнены из одной и четырех проволочных перемычек приведен на рис. 9 а, б. АЧХ ответвителей Ланге с разным количеством перемычек показаны на рис. 9, в, где график 1 соответствует конструкции с 6 перемычками, график 2 – 12 перемычками, график 3 – 18, график 4 – 24 перемычки.

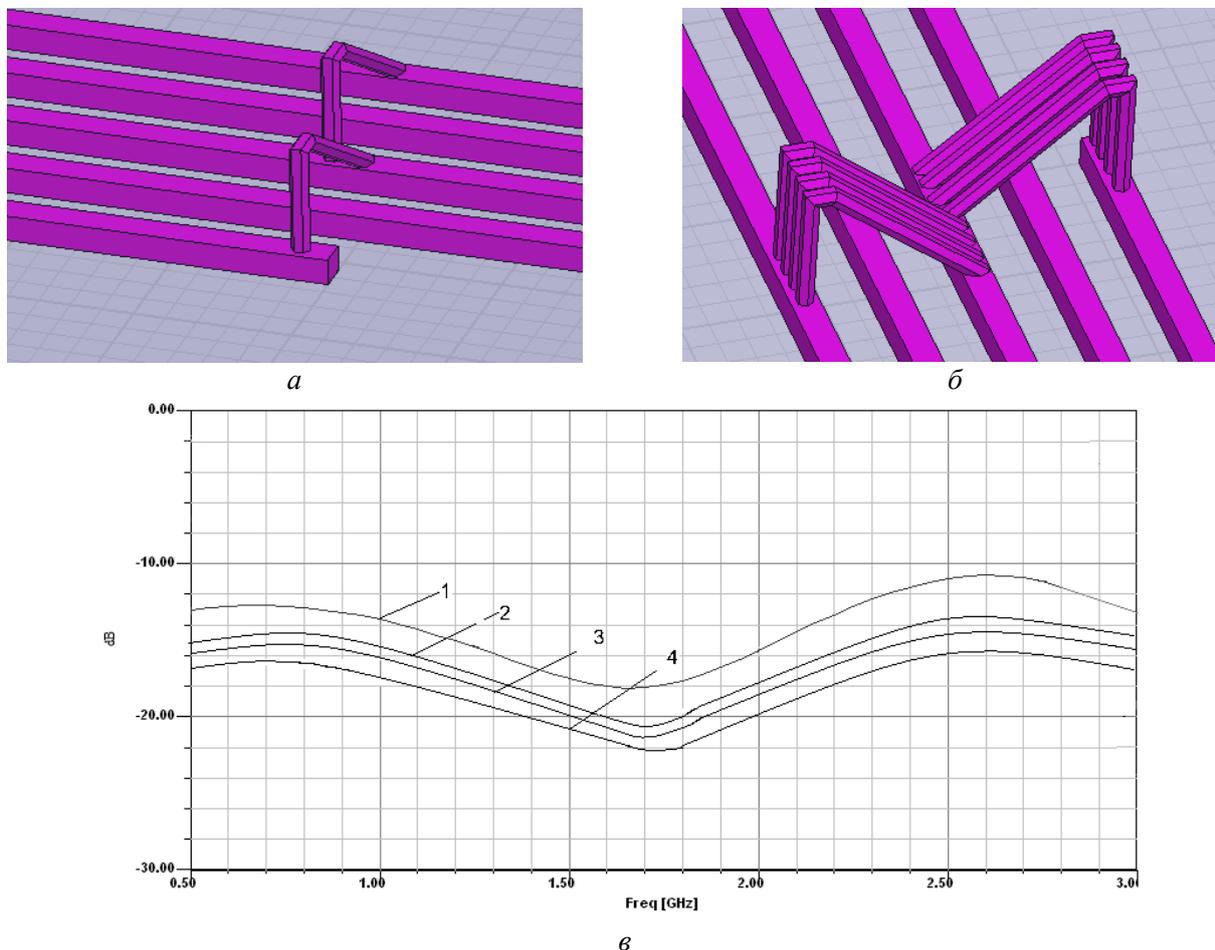


Рис.9

Как видно из рис.9, увеличение количества перемычек в анализируемой конструкции направленного ответвителя Ланге приводит к уменьшению энергии, ответвляемой из основного во вспомогательный тракт при прохождении через направленный ответвитель.

На практике для минимизации механических воздействий на перемычки в направленных ответвителях их покрывают лаком, клеем или компаундом. Модель ответвителя Ланге, в котором перемычки залиты каплей компаунда УП-5-220 (диэлектрическая проницаемость равна 3.7), также была проанализирована (рис.10). Полученная АЧХ свидетельствует о том, что нанесение компаунда на участки крепления перемычек не оказывает значительного влияния на параметры ответвителя в пределах рабочего диапазона (рис. 11). Для проверки адекватности модели был проведен дополнительный расчет, в котором значение диэлектрической проницаемости было увеличено до 30. Расчет показал, что в этом случае АЧХ анализируемого направленного ответвителя будет отличаться от АЧХ направленного ответвителя

без нанесения дополнительных материалов на частоте 5-6  $f_0$ , что свидетельствует об адекватности модели.

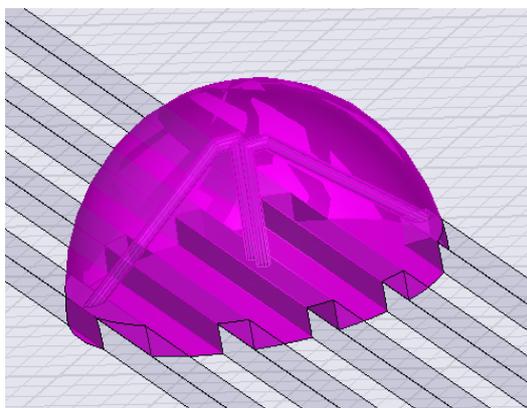


Рис. 10

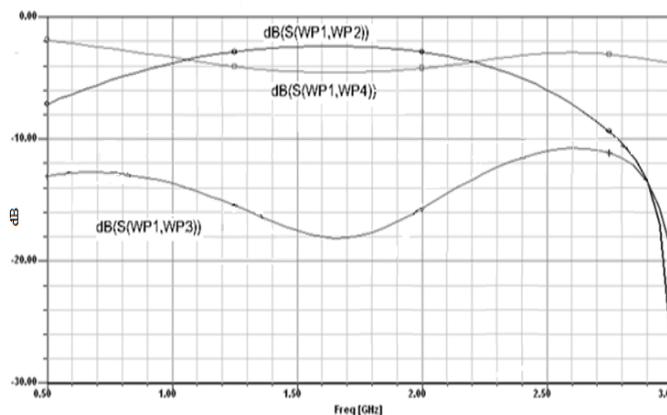


Рис. 11

## Выводы

Проведено исследование влияния параметров перемычек на АЧХ микрополосковых направленных ответвителей Ланге. Даны рекомендации по моделированию таких конструкций в системе HFSS. Моделирование перемычек, устанавливаемых вручную, предложено с помощью создания тора и последующего его сечения пополам, а перемычек, устанавливаемых автоматически, – с помощью операции Bondwire. В этом случае при задании количества граней проволоки, из которой выполнены перемычки, необходимо сделать выбор в пользу 12 граней, поскольку такое количество граней позволяет получить поперечное сечение перемычки, близкое к окружности. При этом размерность задачи возрастает незначительно, что позволяет не увеличивать длительность расчетов.

Проанализирована зависимость АЧХ ответвителя Ланге от диаметра, материала и количества перемычек. При необходимости увеличения энергии, ответвляемой из основного во вспомогательный тракт, необходимо воспользоваться большим количеством перемычек, устанавливая в местах крепления несколько параллельно включенных перемычек, или увеличить диаметр проволоки, используемой для изготовления перемычек.

**Список литературы:** 1. *Sechi, F. Solid-State Microwave High-Power Amplifiers* [Текст] / Franco Sechi, Marina Vujatti. – Artech House Inc. Norwood, MA, USA. – 2009. 2. *Современные методы и результаты квазистатического анализа полосковых линий и устройств*. А.И. Гипсман, В.М. Красноперкин, Г.С. Самохин, Р.А. Силин // *Электроника СВЧ*. Вып.1. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1991. 3. *Проектирование интегральных устройств СВЧ: Справочник* / Ю.Г. Ефремов, В.В. Конин, Б.Д. Солганик и др. – К.: Техника, 1990. – 159 с. 4. *Малорацкий, Л.Г. Проектирование и расчёт СВЧ элементов на полосковых линиях*. [Текст] / Л.Г. Малорацкий, Л.Р. Явич. – М.: Сов. радио, 1972. – 232 с. 5. *Проволока из золота, серебра и их сплавов. Технические условия* [Текст]: ГОСТ 7222-75. Введ. 1975-18-07. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 16 с. 6. *Остек. Медная проволока: Технологические материалы* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ostec-micro.ru/tech/podgroup/96.html>

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 15.07.2012