

УДК 621.372

Г.Г. Гошин, А.В. Зорин, С.А. Подлиннов, А.Ю. Попков, А.В. Фатеев

## Исследование способов увеличения направленности симметричных направленных ответвителей диапазона 2–20 ГГц

Проведено исследование возможности использования воздушной полости, образующейся в результате сборки симметричных направленных ответвителей на основе полосковых нерегулярных линий с комбинированной связью, для коррекции их частотных характеристик. Коррекция проводилась путём добавления между основными слоями диэлектрика тонкого слоя другого диэлектрического материала. Основными критериями при его выборе были его гибкость, эластичность и диэлектрическая проницаемость.

**Ключевые слова:** направленный ответвитель, направленность, переходное ослабление.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-3-5-7

Направленный ответвитель (НО) – это четырёхпортовое пассивное устройство, предназначенное для разделения волн, распространяющихся в связанных линиях передачи, а также для направленного отбора мощности из основного канала во вторичный. Поэтому его широко применяют в радиоизмерительной аппаратуре, такой как скалярные и векторные анализаторы цепей, рефлектометры, радиометры [1, 2] и в других радиотехнических системах для сложения, разветвления и смешивания сигналов, для измерения параметров передачи и отражения, для контроля и стабилизации уровня мощности, частоты сигнала и т.д.

В [3] была рассмотрена реализация симметричного направленного ответвителя на основе нерегулярных полосковых линий с комбинированной связью. В рамках исследования проводилось моделирование влияния воздушной полости (рис. 1), образующейся в результате сборки устройства, на его характеристики. Результаты моделирования показали, что при определённом размере воздушной полости можно добиться улучшения характеристик НО. В данной статье представлены результаты экспериментального исследования возможности коррекции частотных характеристик устройства путём изменения размеров воздушной полости добавлением в неё дополнительных диэлектрических материалов.

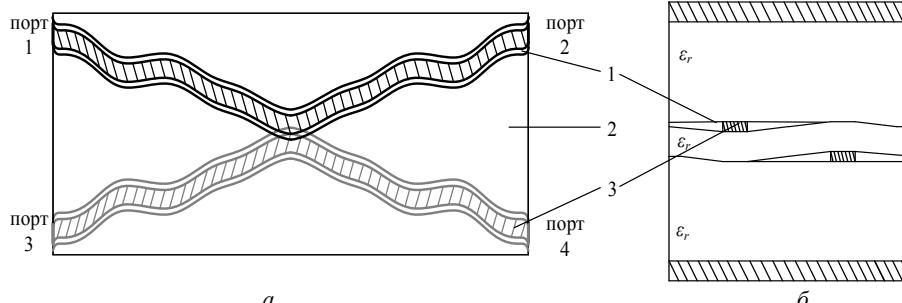


Рис. 1. Топология полосковых связанных линий с комбинированной связью, учитывающая воздушную полость между слоями диэлектрика: 1 – воздушная полость; 2 – диэлектрик; 3 – линия передачи; вид сверху – а, поперечное сечение – б

Экспериментальный макет имеет ряд отличий от модели. Так, например, в модели не учитывались такие особенности, как искажение формы среднего слоя диэлектрика, наличие коаксиально-полосковых переходов и другие неоднородности, образующиеся в результате производства и сборки НО. Таким образом, в силу конструктивных особенностей размеров воздушной полости для коррекции частотных характеристик будет различным для каждого ответвителя. Для исследования был проведён ряд экспериментов с использованием направленного ответвителя диапазона 2–20 ГГц производства АО «НПФ «Микран». Первый этап экспериментов был направлен на поиск наиболее подходящего материала для компенсации воздушной полости. В качестве критериев выбора служили гибкость, эластичность и диэлектрическая проницаемость, которая должна быть близкой к ди-

электрической проницаемости диэлектрика, на основе которого построен НО. В нашем случае это Rogers RT/Duroid 5880 с относительной диэлектрической проницаемостью среднего слоя  $\epsilon_r = 2,2$ ; у верхнего и нижнего слоёв  $\epsilon_r = 2,33$ . В рамках эксперимента были рассмотрены такие материалы, как сухая бумага ( $\epsilon_r = 2\text{--}2,5$ ), силиконовая резина ( $\epsilon_r = 2,8\text{--}3,2$ ) и фторопластовая лента PTFE ( $\epsilon_r = 1,9\text{--}2,2$ ). Толщина всех материалов была одинаковой и составляла 0,12 мм.

Результаты эксперимента показали, что потери в основном канале и переходное ослабление слабо изменяются, а модуль коэффициента отражения от первого порта  $|S_{11}|$  (рис. 2) и направленность  $D$  (рис. 3) сильно зависят от типа используемого материала. Как и следовало ожидать, в силу больших различий относительной диэлектрической прони-

цаемости силиконовая резина имеет худший из результатов при оценке модуля коэффициента отражения. В данном случае на некоторых частотах его значение превышает уровень в 20 дБ, в то время как остальные эксперименты показывают примерно одинаковый результат. Оценивая частотную зависимость направленности, видно, что отсутствие компенсирующего диэлектрика приводит к значительному снижению её уровня на частотах выше 10 ГГц, а наилучший результат – при компенсации воздушной полости фторопластовой лентой.

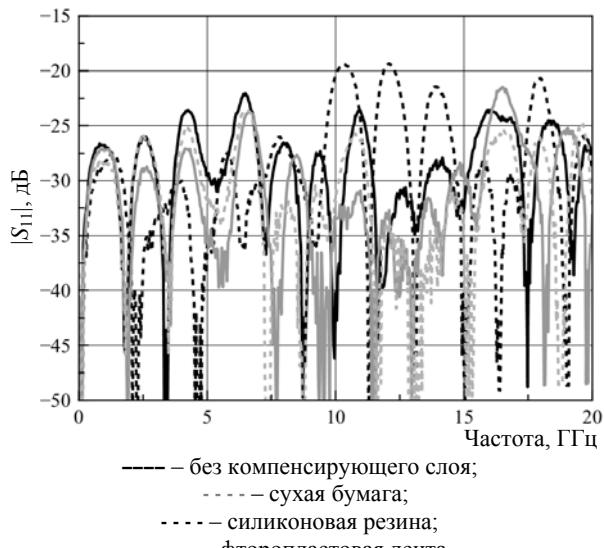


Рис. 2. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения от первого порта для различных материалов

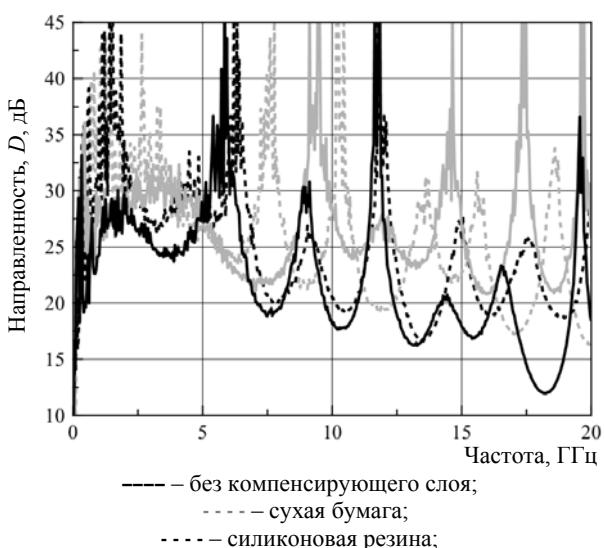


Рис. 3. Частотная зависимость направленности для различных материалов

Цель второго этапа экспериментов заключалась в определении оптимального размера воздушной полости, при котором наблюдается улучшение частотных характеристик. При этом, по результатам экспериментов предыдущего этапа, для исследования был выбран материал – фторопластовая лента.

Величина воздушной полости регулировалась путем варьирования расстояния  $x$  от токонесущего проводника до ленты (рис. 4). По причине сложности обеспечения фиксированного размера этой полости вдоль линии было решено упростить форму диэлектрических слоёв до прямоугольной.

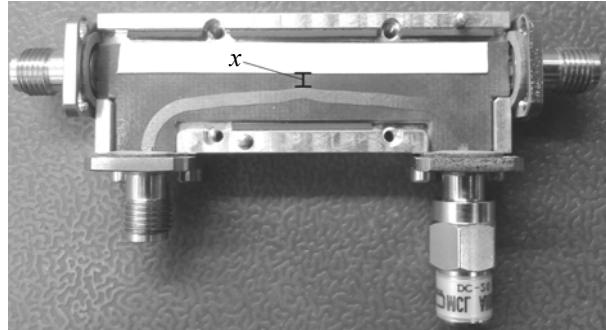


Рис. 4. Топология платы НО с фторопластовой лентой

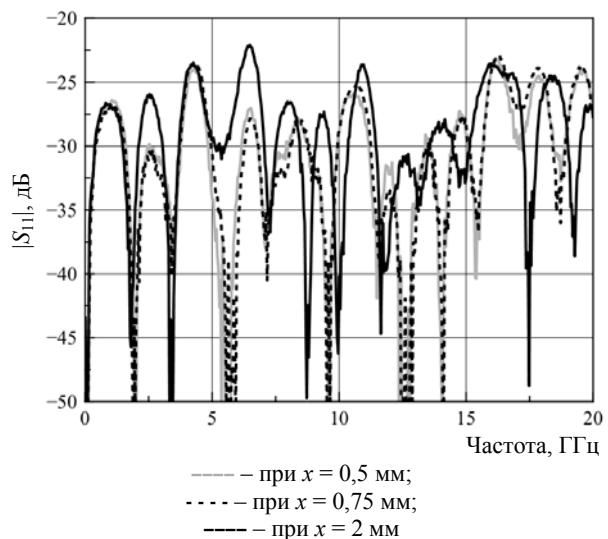


Рис. 5. Частотная зависимость модуля коэффициента отражения от первого порта при различных размерах воздушной полости

В результате экспериментальных измерений выявлено, что изменение размеров воздушной полости почти не оказывает влияния на переходное ослабление и потери в основном канале. При этом изменяются значения модуля коэффициента отражения от первого порта  $|S_{11}|$  (рис. 5) и направленности  $D$  (рис. 6) устройства. Так, при  $x = 0,5$  и  $0,75$  мм на некоторых частотах очевидно преимущество в несколько децибел в сравнении с результатами, полученными при  $x = 2$  мм.

В свою очередь, значительные различия наблюдаются при сравнении уровня направленности исследуемого устройства. Если на частотах до 10 ГГц преимущество образца с  $x = 0,75$  мм не выглядит явным, то на частотах выше 10 ГГц заметно повышение уровня направленности. Её величина во всём рабочем частотном диапазоне не опускается ниже 20 дБ, в то время как остальные варианты размеров

воздушной полости приводят к ухудшению этой характеристики.

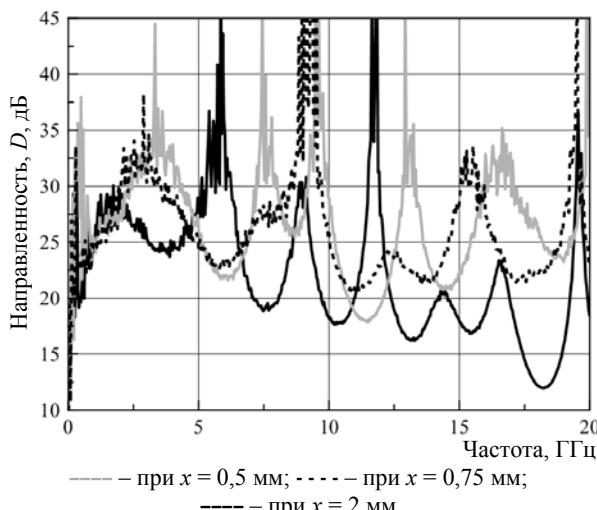


Рис. 6. Частотная зависимость направленности при различных размерах воздушной полости

Таким образом, по результатам проведённых исследований можно заключить следующее:

1. Обеспечение воздушной полости определённых размеров, образующейся в результате сборки симметричных направленных ответвителей на основе нерегулярных полосковых линий с комбинированной связью, позволяет повысить направленность и улучшить согласование устройства.

2. Материал, используемый в качестве компенсирующего элемента, должен обладать высокой гибкостью и эластичностью, а его диэлектрическая проницаемость должна быть максимально близка к диэлектрической проницаемости материала, на котором выполнена топология направленного ответвителя.

#### Литература

1. Filatov A.V. A microwave four-channel null L-band radiometer / A.V. Filatov, A.V. Ubaichin, D.E. Paraev // Instruments and Experimental Techniques. – 2012. – Vol. 55, № 1. – P. 59–64.
2. Filatov A.V. A two-receiver microwave radiometer with high transfer characteristic linearity / A.V. Filatov, A.V. Ubaichin, A.A. Bombizov // Measurement Techniques. – 2013. – Vol. 55, № 11. – P. 1281–1286.

3. Анализ модели направленного ответвителя на основе нерегулярных полосковых линий с комбинированной связью / А.Ю. Попков и др. // Доклады ТУСУРа. – 2015. – № 4 (38), ч. 1. – С. 5–11.

#### Гошин Геннадий Георгиевич

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧиКР)  
Томского государственного университета  
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Тел.: +7 (382-2) 79-91-75  
Эл. почта: goshingg@svch.rk.tusur.ru

#### Зорин Андрей Валерьевич

Сотрудник департамента информационно-измерительных систем (ДИИС) АО «НПФ «Микран»  
Тел.: +7-953-910-43-19  
Эл. почта: zandreyv@sibmail.com

#### Подлиннов Сергей Александрович

Аспирант каф. СВЧиКР  
Тел.: +7-952-808-17-35  
Эл. почта: spodlinnov@gmail.com

#### Попков Александр Юрьевич

Ассистент каф. СВЧиКР  
Тел.: +7-923-401-92-75  
Эл. почта: payu.9275@gmail.com

#### Фатеев Алексей Викторович

Канд. техн. наук, доцент каф. СВЧиКР  
Тел.: +7-906-199-98-88  
Эл. почта: fateev\_alexey@mail.ru

Goshin G.G., Zorin A.V., Podlinnov S.A., Popkov A.Yu., Fateev A.V.

#### Research on ways to increase the directivity of symmetrical directional couplers 2–20 GHz

Research on possible using of the air gap, that appears as a result of an assembly of a symmetric directional coupler based on irregular offset strip lines, to adjust its frequency response is carried out. The adjustment is produced by an additional material that is set up between main dielectric layers of the device. The main criteria to select the material were its flexibility, elasticity and dielectric permittivity.

**Keywords:** directional coupler, directivity, coupling.