

УДК 621.372

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

Анализ модели направленного ответвителя на основе нерегулярных полосковых линий с комбинированной связью

Проведено исследование направленного ответвителя на основе нерегулярных полосковых линий с комбинированной связью методом электродинамического моделирования. Метод позволил провести оценку воздействия геометрических параметров и топологий подводящих линий направленного ответвителя на его частотные характеристики. В результате исследования выявлено влияние на них высших типов волн и воздушного зазора вдоль линий. Сделан вывод о том, какие параметры следует учесть при разработке математической модели широкополосного направленного ответвителя.

Ключевые слова: нерегулярные полосковые линии, направленный ответвитель, направленность, коэффициент ответвления.

Направленный ответвитель (НО) – это пассивное устройство, предназначенное для разделения падающего и отражённого от испытываемого устройства сигналов [1]. Его широко применяют в радиоизмерительной аппаратуре: скалярных и векторных анализаторах цепей, рефлектометрах, радиометрах [2, 3] и других радиотехнических системах.

Для достоверной разработки любого СВЧ-устройства обычно используются два подхода. Первый подход основан на использовании современных систем автоматизированного проектирования и заключается в переборе параметров устройства до тех пор, пока не получатся удовлетворительные характеристики. Однако такой подход является весьма затратным по времени, поскольку не всегда очевидно, какие из параметров необходимо перебирать. А таких параметров может быть не один десяток. Кроме того, он требует наличия весьма дорогостоящего программного обеспечения.

Второй подход наиболее предпочтителен и заключается в использовании математической модели исследуемого устройства. Хотя подход и занимает немалое количество времени на этапе разработки, в дальнейшем его применение сводится к подстановке начальных данных в модель и получению готовых параметров и характеристик НО на выходе, что в долгосрочной перспективе даёт явные преимущества.

На данный момент в литературе отсутствуют достоверные математические модели НО на основе нерегулярных полосковых линий с комбинированной связью. Существующие подходы не принимают во внимание такие факторы, как высшие типы волн и технологические особенности производства устройства. Цель данной работы заключается в выявлении тех геометрических параметров, которые необходимо учесть в первую очередь, а какими можно пренебречь. В этом смысле проведённое исследование является актуальным и позволяет учесть полученные данные при разработке математической модели направленного ответвителя.

Характеристики и параметры направленного ответвителя. Для описания НО обычно используют такие характеристики, как переходное ослабление, направленность, потери в основном канале и потери на согласование. Направленный ответвитель можно рассматривать с точки зрения двух режимов работы. Чётный режим работы предполагает прохождение синфазных сигналов вдоль каждой из линий, в то время как нечётный – противофазных [4]. Каждому из режимов соответствует своё волновое сопротивление: Z^{++} – чётное и Z^{+-} – нечётное. При условии согласования связанных линий они удовлетворяют соотношению

$$\sqrt{Z^{++}Z^{+-}} = Z_0, \quad (1)$$

где Z_0 – волновое сопротивление подводящих линий.

Одной из ключевых характеристик НО является функция коэффициента связи (КС), которая определяет электромагнитную связь между двумя линиями. Отрезок линии, вдоль которого коэффициент связи не равен нулю, называется областью связи. Значение КС изменяется в пределах $0 \leq K \leq 1$ и определяется соотношением [5]

$$K = \frac{Z^{++} - Z^{+-}}{Z^{++} + Z^{+-}}. \quad (2)$$

На основании выводов, приведённых в [6, 7], для целей исследования были выбраны нерегулярные полосковые линии с комбинированной связью (рис. 1). Такие линии описываются рядом геометрических параметров, основными из которых являются: ширина W , длина L и высота b камеры связи; ширина w и толщина линий t ; расстояние между линиями по горизонтальной w_c и вертикальной s осям и ряд других параметров.

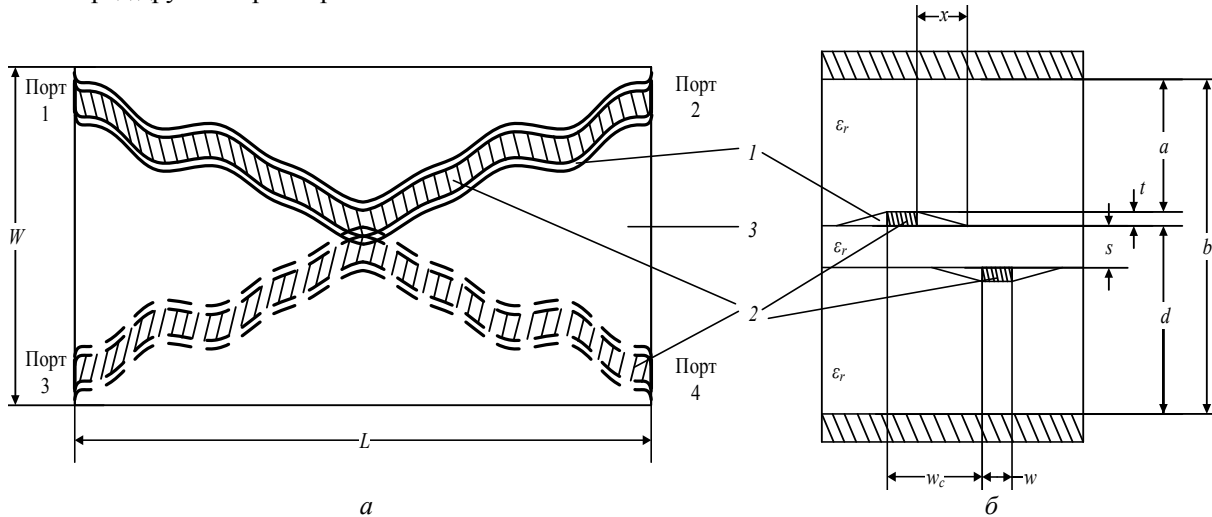


Рис. 1. Вид сверху (а) (пунктиром показана линия, выполненная на обратной стороне подложки) и поперечное сечение (б) топологии полосковых связанных линий с комбинированной связью:
1 – воздушный зазор вдоль линии; 2 – связанные линии; 3 – диэлектрик

Анализ параметров направленного ответвителя. С целью анализа влияния параметров был использован алгоритм анализа НО, описанный в [7]:

1. Вводятся входные данные в виде ряда геометрических параметров (W , t , b , s), а также диэлектрическая проницаемость (ϵ_r) материала, на котором изготавливается топология НО.

2. На основе входных данных рассчитываются волновые сопротивления для чётного и нечётного режимов работы в зависимости от параметров w и w_c , изменяющихся в пределах $w_{c1} \leq w_c \leq w_{c2}$ ($w_{c1} = 0$, поскольку данное значение обеспечивает максимальную связь, а w_{c2} подбирается таким образом, чтобы КС был равен нулю) и $w_1 \leq w \leq w_2$ (w_1 и w_2 подбираются в соответствии с граничными значениями w_{c2} таким образом, чтобы волновое сопротивление линии изменялось в пределах $Z_0 \pm \Delta Z_0$).

3. Массив данных в виде значений волновых сопротивлений связанных линий далее сортируется таким образом, чтобы соответствовать соотношению (1).

4. Значения w и w_c , соответствующие отсортированным величинам волновых сопротивлений, имеют зависимость от коэффициента связи K (рис. 2). На этом этапе можно судить о максимально возможном значении коэффициента связи линий с заданными параметрами (рис. 2, б).

5. Зависимости $w(K)$ и $w_c(K)$ далее аппроксимируются полиномами степени n типа

$$\sum_n a_n \cdot x^n, \quad (3)$$

где a_n – весовые коэффициенты полинома, n – их количество.

6. Рассчитываются коэффициенты функции КС, при которых обеспечивается заданный уровень ответвления во вторичный канал. На этом этапе можно оценить минимально требуемый уровень КС.

7. По полученным данным далее строится геометрическая объёмная модель НО.

8. Проводится электродинамическое моделирование НО.

По алгоритму возможно исследовать влияние каждого из геометрических параметров на характеристики НО независимо друг от друга. Для исследования была выбрана модель ответвителя с материалом с диэлектрической проницаемостью 2,2. В первую очередь было проведено исследование влияния топологий подводящих линий. Были выбраны 4 варианта: топология без подводящих линий; прямые линии; линии, изогнутые под углом 90° ; комбинация прямых и изогнутых линий.

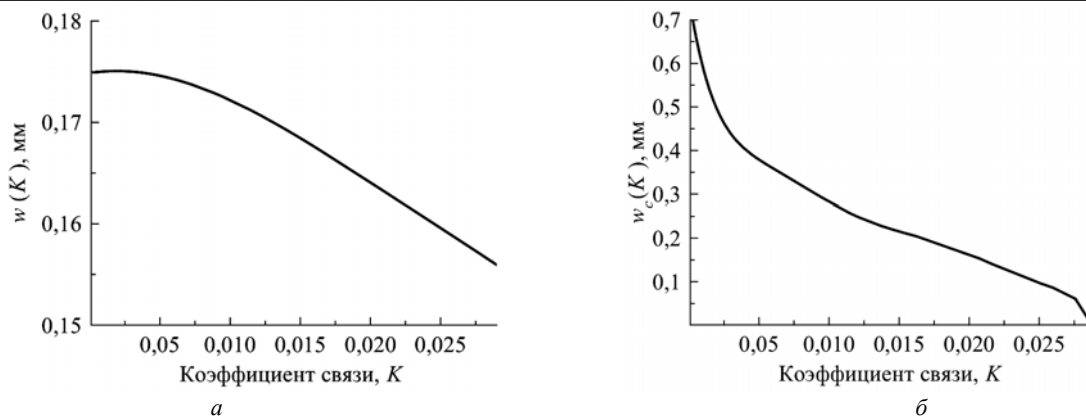


Рис. 2. Зависимости ширины линии (а) и расстояния между линиями в горизонтальной плоскости (б) от значения коэффициента связи

Результат моделирования показал, что степень влияния подводящих линий сводится к согласованию портов устройства. Модуль коэффициента отражения $|S_{11}|$ (рис. 3) минимален при отсутствии подводящих линий и максимален при использовании изогнутых линий в первичном и вторичном каналах. При этом различие в топологиях не вносит значительных искажений в модули коэффициентов ответвления в третий $|S_{31}|$ и четвертый $|S_{41}|$ порты.

Следующий исследуемый параметр – ширина камеры связи W – выбирался таким образом, чтобы искажения, вносимые боковыми стенками, были минимальными. При малых значениях этого параметра наблюдалось ухудшение согласования (рис. 4, а), а также проявление более высокого уровня осцилляций характеристики $|S_{41}|$ (рис. 4, б). На модуль коэффициента ответвления в третий порт $|S_{31}|$ влияние практически не оказывается. Основываясь на этом, можно заключить, что по ширине камеры связи есть некоторое ограничение на её минимально допустимое значение и его следует учитывать при разработке математической модели устройства.

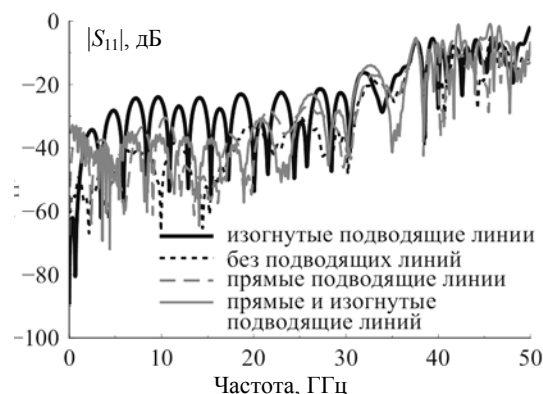


Рис. 3. Модуль коэффициента отражения НО при различной ширине камеры связи

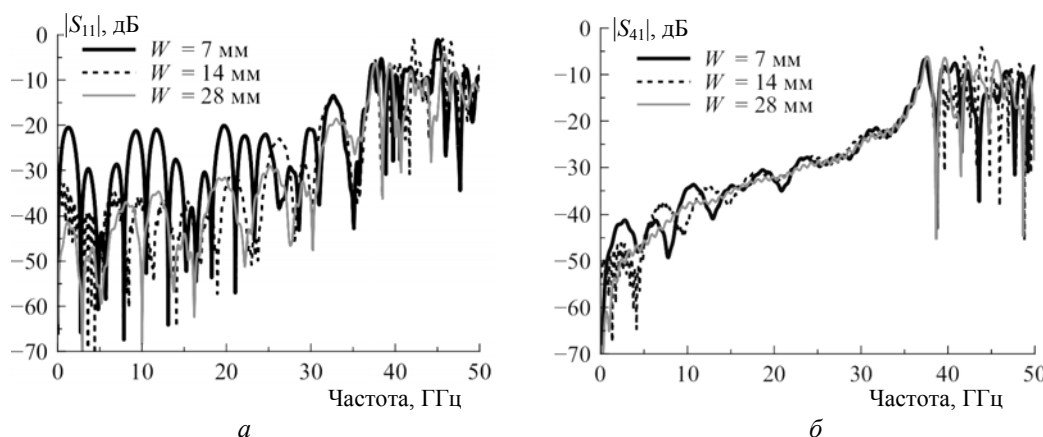


Рис. 4. Частотные характеристики НО при различной ширине камеры связи: а – коэффициент отражения от первого порта; б – коэффициент передачи в четвёртый порт

При изменении расстояния между линиями по вертикальной оси s брались только два варианта толщины диэлектрика 127 и 254 мкм, так как дальнейшее увеличение этого параметра приводит к уменьшению максимально возможного коэффициента связи и, следовательно, невозможности построения устройства с заданным уровнем ответвления; при $s = 254$ мкм уже наблюдается некоторое

уменьшение $|S_{31}|$ в рабочей области частот (рис. 5, *a*). Следствием изменения s является изменение расстояния от линии до нижней стенки камеры связи d . Расстояние до верхней стенки a остается неизменным. Как результат, становятся заметны искажения на частотах за пределами рабочей области устройства, вызванные появлением высших типов волн. Так, для $s = 254$ мкм они проявляются на частоте примерно 180 ГГц, в то время как для $s = 127$ мкм эта частота увеличилась примерно до 230 ГГц. Более наглядным их влияние на характеристики НО становится при рассмотрении модуля коэффициента $|S_{41}|$ (рис. 5, *б*). Из графика видно, что увеличение параметра d приводит к уменьшению частоты, на которой появляются высшие типы волн. При этом модуль коэффициента отражения $|S_{11}|$ изменяется незначительно.

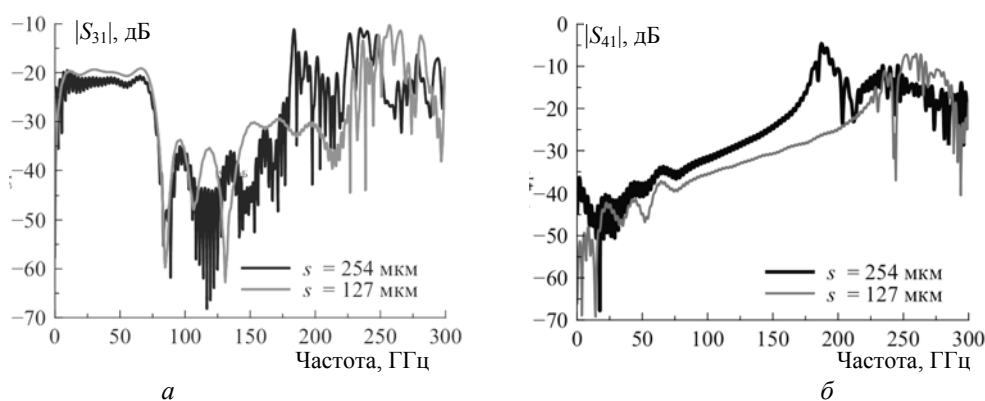


Рис. 5. Частотные характеристики НО при различной толщине центрального слоя диэлектрика: *a* – переходное ослабление; *б* – коэффициент передачи в четвертый порт

Аналогичное влияние на характеристики НО оказывает высота камеры связи b (рис. 6), изменение которой обеспечивалось изменением толщины верхнего и нижнего диэлектрических слоёв при неизменной толщине центрального слоя. Видно, что увеличение высоты камеры связи ведет к уменьшению частоты, на которой появляются высшие типы волн.

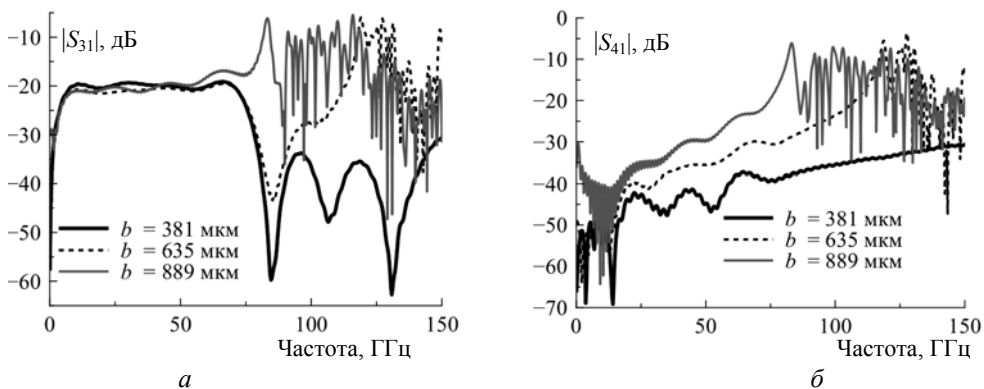


Рис. 6. Частотные характеристики НО при различной высоте камеры связи: *a* – коэффициент отражения от первого порта; *б* – переходное ослабление

При исследовании влияния толщины линий t рассмотрены типоразмеры 9, 17, 35 и 70 мкм. Изменение этого параметра при неизменных остальных параметрах приводит к изменению параметра a – расстояние от линии до верхней стенки камеры связи. По результатам моделирования (рис. 7) выяснилось, что изменение этого параметра оказывает такой же эффект, что и изменения высоты камеры связи и толщины центрального слоя диэлектрика, т.е. происходит смещение минимальной частоты появления высших типов волн. Следовательно, можно заключить, что частота, на которой начинают появляться высшие типы волн, зависит от расстояний от линий до верхней a и нижней d стенок камеры связи.

При производстве НО проявляется ряд технологических особенностей. Одной из них является наличие воздушного зазора вдоль связанных линий, обусловленного наложением диэлектрических слоёв и конечной толщиной самих линий. Геометрически описать такую неоднородность можно в виде треугольной трапеции, которая в сечении имеет вид треугольника с катетами t и x (см. рис. 1).

Для анализа влияния зазора были взяты различные варианты толщины линий, а x при этом изменялся от 5 до 300 мкм.

Результаты моделирования (рис. 8) показывают, что наличие зазора в конструкции НО влияет на конечные характеристики устройства. При этом, ухудшение происходит с ростом размеров зазора. Однако, при определённых значениях параметра x , можно наблюдать улучшение направленности НО. Заметим, что на характеристики согласования $|S_{11}|$ и коэффициент отвлечения в третий порт $|S_{31}|$ зазор оказывает минимальное влияние. Аналогично, наличие зазора не вносит изменений в появление высших типов волн.

Таким образом, возникает возможность использования воздушного заполнения вдоль линии с целью обеспечения компенсации неоднородностей в конструкции устройства для получения более высокого уровня направленности.

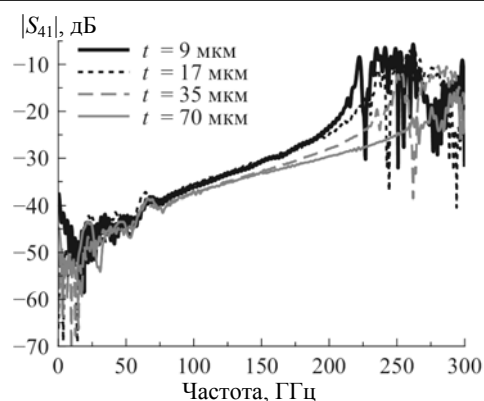
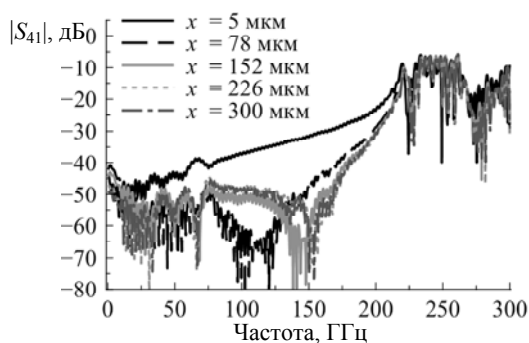
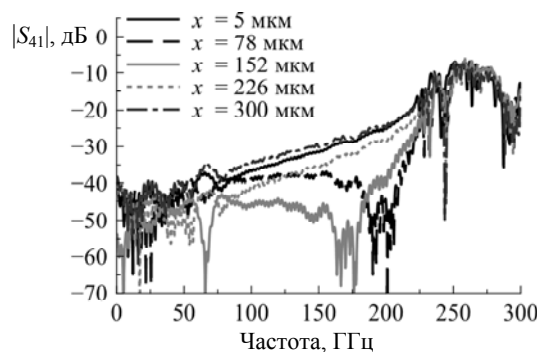


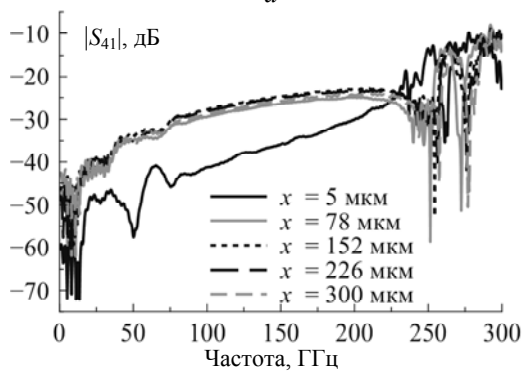
Рис. 7. Коэффициент отвлечения в четвёртый порт НО при различной толщине полосковых связанных линий



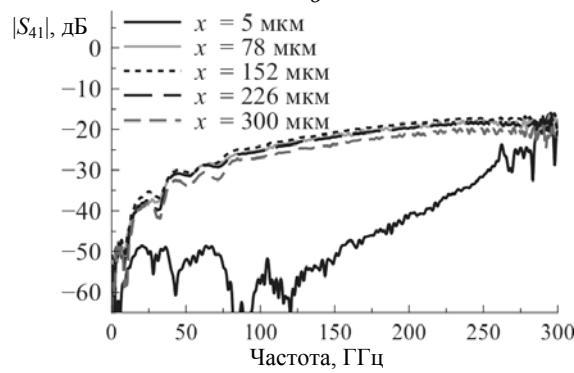
а



б



в



г

Рис. 8. Модули коэффициентов отвлечения в четвёртый порт $|S_{41}|$:
а – $t = 9$ мкм; б – $t = 17$ мкм; в – $t = 35$ мкм; г – $t = 70$ мкм

Заключение. По результатам проведённого исследования можно сделать вывод о том, что при построении математической модели следует учитывать все геометрические параметры НО, однако особое внимание следует уделить двум параметрам: расстояниям от линии до верхней a и нижней стенок камеры связи d . При этом улучшение характеристик наблюдается при условии, что эти размеры являются минимальными. Достичь этого возможно двумя способами: уменьшением толщины слоёв диэлектрика и увеличением толщины металлизации t . В первом случае мы ограничены возможностями производителя, во втором – технологией производства НО, поскольку на данный момент полосковая структура выполняется путем наложения диэлектриков друг на друга, что влечёт за собой образование вдоль линий воздушных зазоров, вносящих значительные искажения в характеристики НО.

Наличие зазора в большей степени оказывает влияние на модуль коэффициента передачи в $|S_{41}|$, а значит, и на направленность НО. Чем больше x , тем хуже характеристика. Однако при определенных размерах зазора можно наблюдать улучшение $|S_{41}|$, что обусловлено компенсирующим влиянием неоднородности в виде воздушного заполнения вдоль связанных линий. В свою очередь, характеристика ответвления и модуля коэффициента отражения незначительно изменяются при изменении параметра x . Так, например, $|S_{31}|$ не изменяется в рабочем диапазоне частот, а появление высших типов волн наблюдается на одних и тех же частотах при разных x .

Таким образом, значимость проведенного исследования заключается в выявлении таких геометрических параметров, которые необходимо учесть при разработке математической модели симметричного НО на основе нерегулярных полосковых связанных линий: расстояние от линий до стенок корпуса a и d ; наличие и размер x воздушного заполнения, обусловленного технологическими особенностями производства НО.

Литература

1. Сверхширокополосный направленный ответвитель с резистивными согласующими элементами / Е.В. Андронов, Г.Г. Гошин, О.Ю. Морозов и др. // 20-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо' 2010). Севастополь, 13–17 сентября 2010 г.: матер. конф. – Севастополь: Вебер, 2010. – С. 639–640.
2. 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.
3. 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.
4. Mongia R. RF and Microwave Coupled-Line Circuits / R. Mongia, I. Bahl, P. Bhartia. – London: Artech House microwave library, 2007. – 521 p.
5. Мещанов В.П. Автоматизированное проектирование направленных ответвителей СВЧ / В.П. Мещанов, А.Л. Фельдштейн. – М.: Связь, 1980. – 144 с.
6. Анализ и моделирование сверхширокополосного направленного ответвителя СВЧ-диапазона / Г.Г. Гошин, С.Ю. Екимов, О.Ю. Морозов и др. // Доклады ТУСУРа. – 2011. – Вып. 2(24), ч. 1. – С. 201–208.
7. Design of the directional coupler based on offset coupled striplines [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=7147175>, платный (дата обращения: 2.12.2015).

Попков Александр Юрьевич

Ассистент каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧКР) ТУСУРа
Тел.: +7-923-401-92-75
Эл. почта: rayu.9275@gmail.com

Гошин Геннадий Георгиевич

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. СВЧКР ТУСУРа
Тел.: +7-952-880-44-19
Эл. почта: goshingg@svch.tusur.ru

Фатеев Алексей Викторович

Канд. техн. наук, доцент каф. СВЧКР ТУСУРа
Тел.: +7-906-199-98-88
Эл. почта: fateev.alexey.v@gmail.com

Подлиннов Сергей Александрович

Аспирант каф. СВЧиКР ТУСУРа

Тел.: +7-952-808-17-35

Эл. почта: spodlinnov@gmail.com

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

Model analysis of the directional coupler based on the irregular offset coupled striplines

Research on a directional coupler based on the offset irregular striplines by means of the electrodynamic simulation method is carried out. Selected method allowed to estimate the influence of geometrical parameters and feeders of the directional coupler on its frequency responses. Obtained outcomes showed that these responses are influenced by the higher order propagation modes and an air gap along the lines. The conclusion about what parameters should be taken into account when designing the mathematical model of the broadband directional coupler based on irregular uniform offset coupled lines is made.

Keywords: irregular striplines, directional coupler, directivity, coupling.
