

Частотная селекция в проводящих линиях с использованием каскадных соединений кольцевых концентрических разрезных резонансных структур*И. В. Малышев, Е. В. Николаев*

В данной работе приведены результаты исследований, проведённых на базе электромагнитного анализа проводящих структур. Показано, что во внутреннем пространстве планарной структуры двойного кольцевого разрезного резонатора также возможно размещение элементов топологии пассивных элементов СВЧ или КВЧ, имеющих резонансные частоты, превышающие рабочий диапазон базовой структуры основного резонатора. Эта возможность позволяет использовать для формирования во внутреннем пространстве основного двойного кольцевого разрезного резонатора иных резонансных структур или элементов микрополоскового тракта, что актуально при необходимости плотной компоновки элементов модуля или для случая размещения резонансного включения во внутренних слоях многослойной печатной платы.

Ключевые слова: полосковая или копланарная линии передачи, S-параметры, поверхностные структуры из разрезных концентрических колец, резонансная частота, полосно-заградительный фильтр.

Ссылка: Малышев И. В., Николаев Е. В. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 6. С. 601.

Reference: I. V. Malyshev and E. V. Nikolaev, Usp. Prikl. Fiz. 7 (6), 601 (2019).

Введение

Частотно-селективные устройства представляют собой важные элементы радиолокации и систем связи. От работы этих устройств зависят такие параметры аппаратуры, как помехоустойчивость, их линейные габаритные размеры и общий вес. Требования миниатюризации и современный уровень развития электроники привели к необходимости разработки соответствующих фильтров с заданными параметрами, размещенных в составе линий передачи полоскового или копланарного типов.

Система автоматизированного моделирования

В системе автоматизированного моделирования полного электродинамического анализа был смоделирован базовый элемент, который приведен на рис. 1. Данный элемент представлен в виде печатной платы на подложке из стеклотекстолита FR4 с пассивной линией передачи СВЧ-мощности и двойным кольцевым резонатором, расположенным с обратной стороны рассматриваемой печатной платы [2, 3].

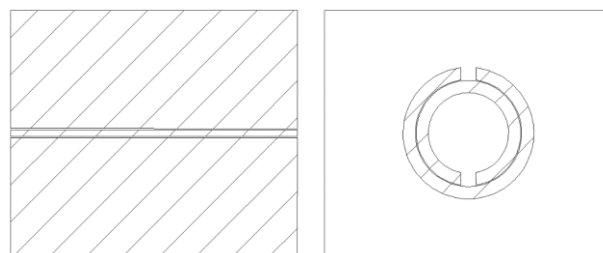


Рис. 1. Топология базового элемента.

Различные типы СВЧ-устройств можно описать с помощью падающих и отражённых волн, которые распространяются в подклю-

Малышев Игорь Владимирович¹, доцент, к.т.н.

Николаев Евгений Вадимович², аспирант.

¹ ИНЭП ЮФУ.

Россия, 347922, г. Таганрог, Ростовская обл., ул. Шевченко, 2.

E-mail: im1960@mail.ru, nikolayev@mail.ru

² ИРТСУ ЮФУ.

Россия, 347928, г. Таганрог, Ростовская обл., Некрасовский пер., 44.

Статья поступила в редакцию 13 ноября 2019 г.

© Малышев И. В., Николаев Е. В., 2019

ченных к ним линиях передач. Связь между этими волнами описывается волновой матрицей рассеяния или матрицей S-параметров. В частности, параметр S_{21} – это коэффициент передачи «падающей волны» от входа к выходу.

Вышеуказанный базовый элемент был рассчитан на резонансную частоту f_p сантиметрового диапазона частот. На рис. 2 представлена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) базового элемента.

Противофазное действие коэффициентов индуктивной и емкостной связи приводит к появлению паразитного резонанса, который обозначен на рис. 2 меткой номер 2.

Изменение коэффициента затухания (увеличения) можно добиться путём каскадного подключения дополнительные разрезных резонаторов вдоль линии передачи [3].

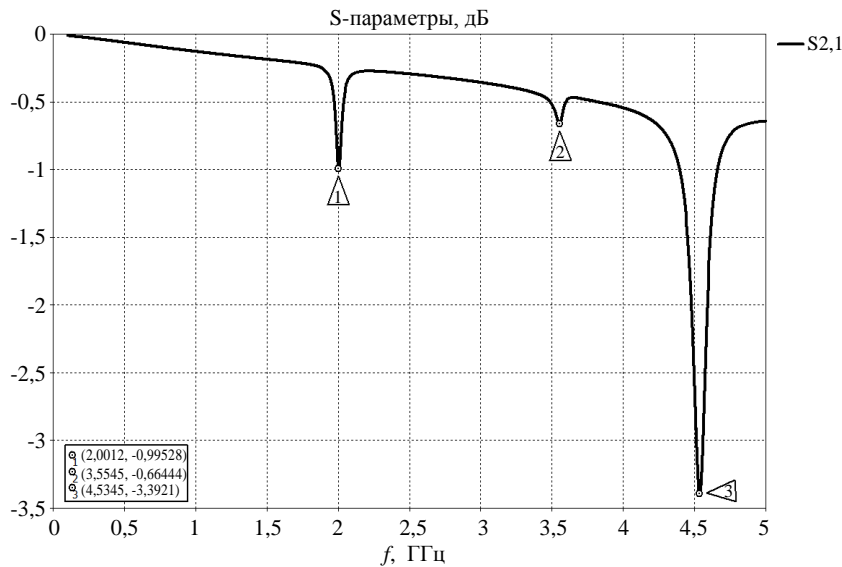


Рис. 2. АЧХ базового элемента для параметра S_{21} .

Каскадирование резонансных включений

На рис. 3 приведено топологическое решение каскадного размещения двух кольцевых концентрических резонаторов, электрическая эквивалентная схема которого отображена на рис. 4. На ней отражен распределённый характер размещения реактивных элементов на данном участке проводящей линии.

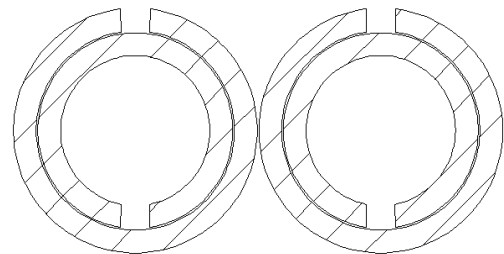


Рис. 3. Каскадное соединение двух резонаторов.

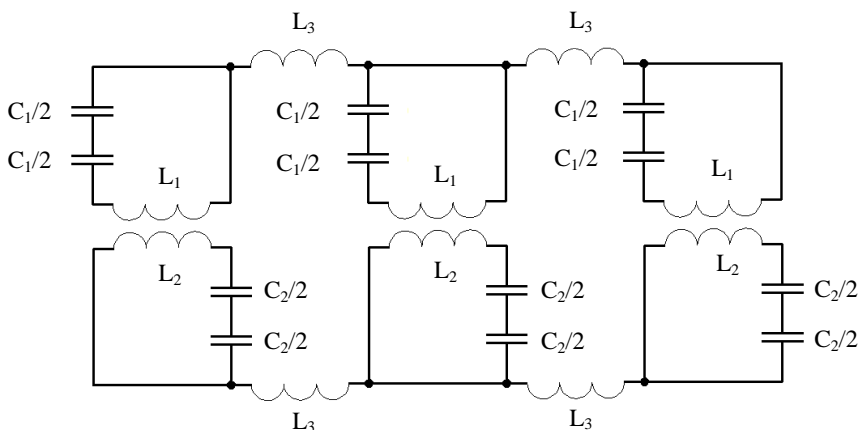


Рис. 4. Эквивалентная схема каскадного соединения двух резонаторов.

При электродинамическом моделировании были рассмотрены три случая каскадного соединения кольцевых разрезных резонаторов:

1) каскадное соединение кольцевых резонаторов, рассчитанных на одну резонансную частоту;

2) каскадное соединение двух кольцевых резонаторов, рассчитанных на резонансные частоты f_p и $1,5f_p$.

3) каскадное соединение двух кольцевых резонаторов, рассчитанных на резонансные частоты f_p и $(2f_p + f_p/5)$.

Выбор вторых значений резонансных частот второго и третьего из вышеперечисленных случаев был обусловлен тем, что эти частоты будут находиться ниже (случай 2) и выше (случай 3) от значения $2f_p$ на частотной оси АЧХ.

В первом случае было проведено моделирование каскадного соединения 2-х структур, состоящих из двух и трех кольцевых резонаторов с одинаковыми конструктивными параметрами каждого резонатора. Теоретически и экспериментально была выявлена возможность каскадирования любого необходимого для выполнения технического задания количества резонаторов [3]. Данные о необходимом количестве резонаторов для достижения заданного коэффициента затухания всей проводящей структуры представлены в таблице,

где X – коэффициент затухания на резонансной частоте одного базового элемента.

Таблица

Коэффициент затухания резонаторов при их каскадировании

Количество резонаторов, N	1	2	3
Коэффициент затухания, S_{21}	X	$2,5X$	$3,7X$

Множитель коэффициента затухания может меняться в зависимости от конкретного типа включения резонатора со своей топологической структурой в состав пассивной линии передачи. Амплитудно-частотные характеристики, экспериментально измеренные на векторном анализаторе цепей для трёх образцов фильтров, содержащих соединенные последовательно каскады из 1, 2 и 3-х кольцевых резонаторов, представлены на рис. 5.

Во втором случае было произведено электродинамическое моделирование каскадного соединения двух кольцевых резонаторов с резонансными частотами f_p и $1,5f_p$ (рис. 6). Установлено, что каскадное последовательное соединение этих двух резонаторов при условии, что резонансная частота второго меньше значения второй гармоники первого резонатора, позволяет получить для совокупной конструкции два указанных резонансных значения в рабочей полосе частот.

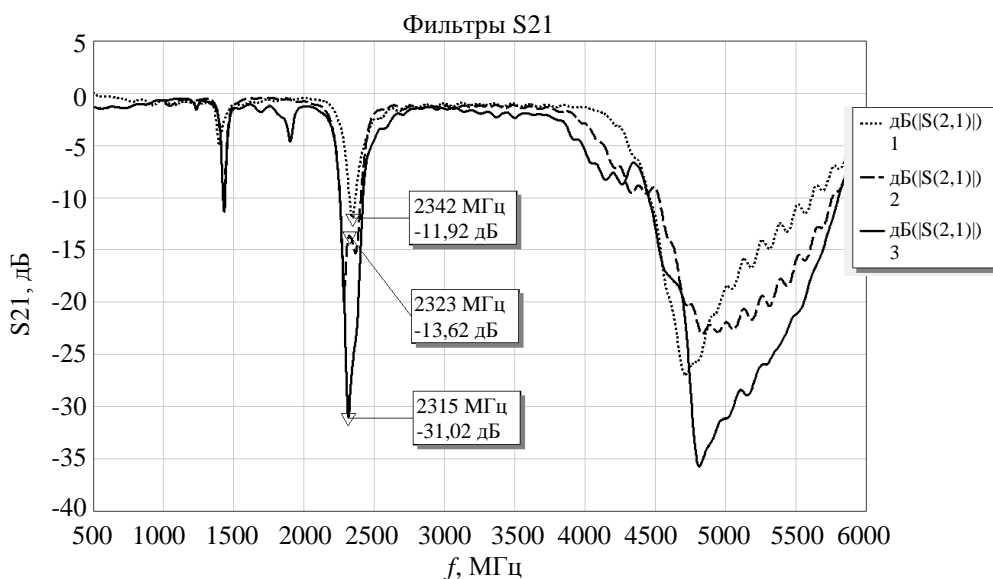


Рис. 5. Экспериментальные АЧХ коэффициентов передачи СВЧ-мощности для фильтров на основе одного, двух и трех кольцевых резонаторов.

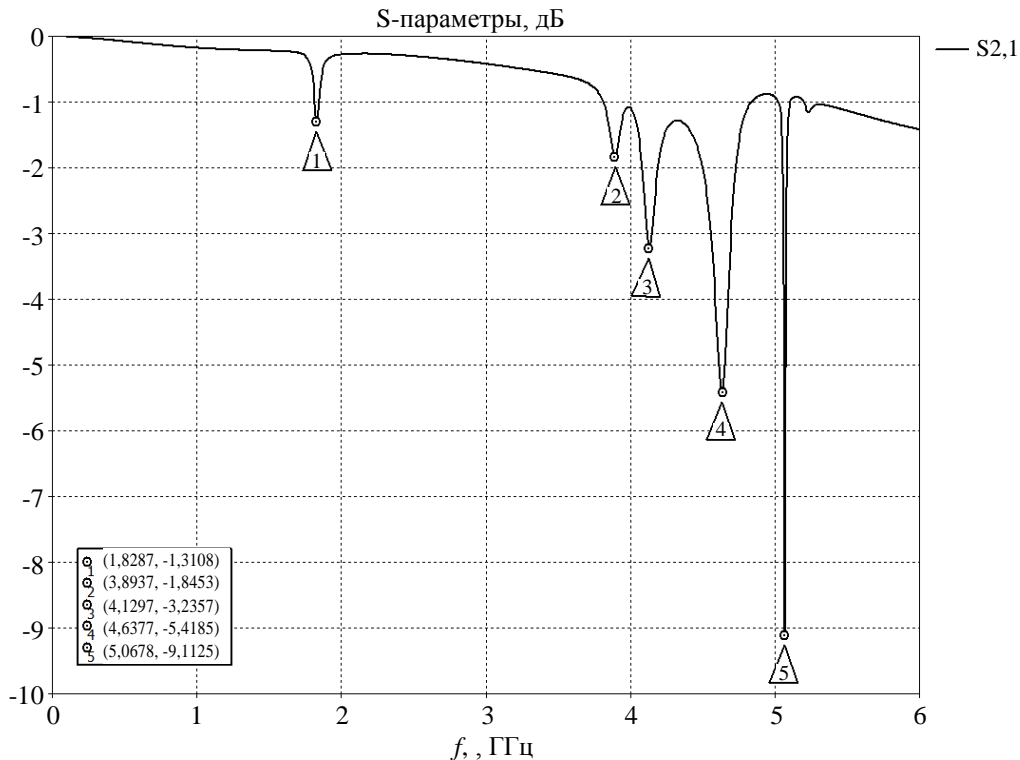


Рис. 6. S-параметры каскадного соединения резонаторов с резонансными частотами f_p и $1,5f_p$

Для третьего случая частотной селекции, как и ранее, вначале был рассчитан базовый элемент с резонансной частотой f_p в сантиметровом диапазоне длин волн. Как указано выше, эта конструкции обеспечивает также частоту второй гармоники $2f_p$. Таким образом, для этого третьего случая, было проведено моделирование топологии конструкции состоящей из двух кольцевых резонаторов:

- 1) двойной кольцевой разрезной резонатор с резонансной частотой, равной f_p ;
- 2) двойной кольцевой разрезной резонатор с резонансной частотой равной $(2f_p + f_p/5) = 2\frac{1}{5}f_p$.

Итак, обнаружено, что при каскадном последовательном соединении этих двух резонаторов вторая гармоника первого резонатора и резонансная частота второго резонатора сместились вверх, а вторая гармоника второго резонатора сместилась вниз по оси частот. Резонансная частота первого резонатора осталась неизменной. Указанные наблюдения дают основание для учёта обнаруженных погрешностей при дальнейшем расчёте конкретных проводящих структур.

Для минимизации габаритных параметров данных конструкций было проведено исследова-

ние возможности каскадирования путем встраивания второго кольцевого резонатора в свободную внутреннюю область сторонних элементов топологии. Первым этапом исследования был электродинамический анализ структуры кольцевого резонатора с расположенным металлизированным переходом во внутренней части, которая отображена на рис. 7.

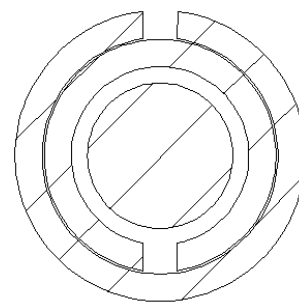


Рис. 7. Резонатор с металлизированным полигоном в центре.

Для уменьшения неоднородности линии передачи мощности, что соответствует незаземлённому копланару, внутренняя область кольцевого резонатора должна иметь металлизированный полигон по форме кольцевого резонатора. АЧХ структуры (см. рис. 8), размещенной на данном полигоне, будет более линейной на участке полосы пропускания резонатора.

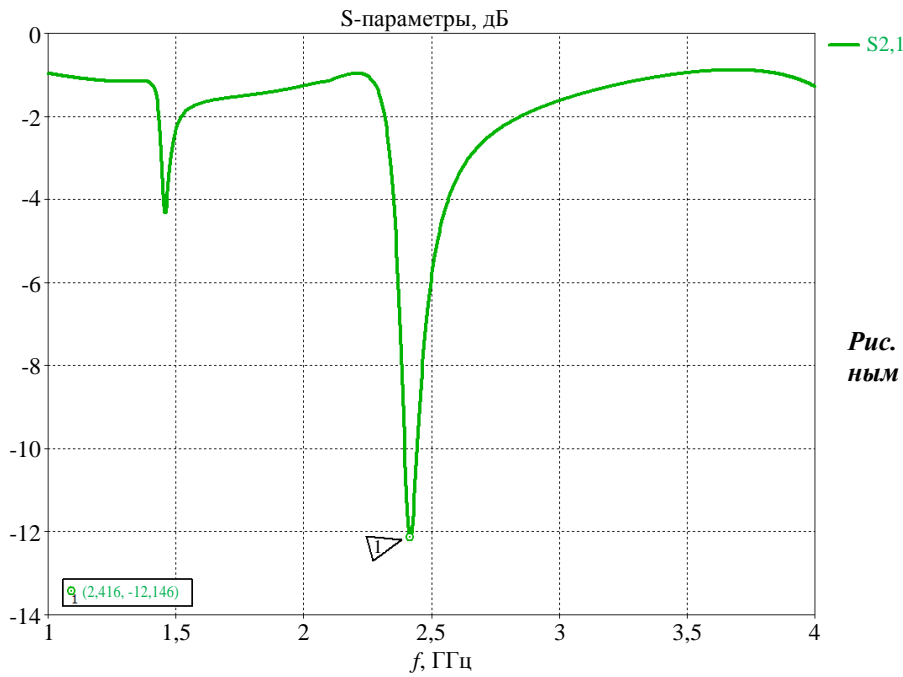


Рис. 8. АЧХ резонатора с вложенным полигоном.

Таким образом, с точки зрения миниатюризации, если данный резонатор будет находиться в слое многослойной печатной СВЧ-платы, то металлизированный полигон внутри резонатора позволяет размещать в данной области как межслойные переходы и линии передачи мощности, так и элементы СВЧ-топологии.

И, наконец, было проведено исследование возможности каскадирования путем встраивания второго кольцевого резонатора в свободную внутреннюю область первого резонатора. При этом внутренний металлизированный по-

лигон был удален. Топология такой структуры приведена на рис. 9.

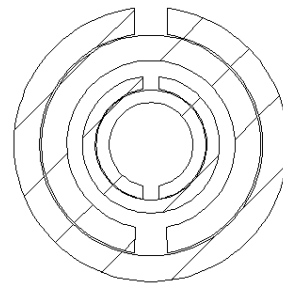


Рис. 9. Вложенное каскадное соединение резонаторов.

АЧХ структуры, отображенной на рис. 9, представлена на рис. 10.

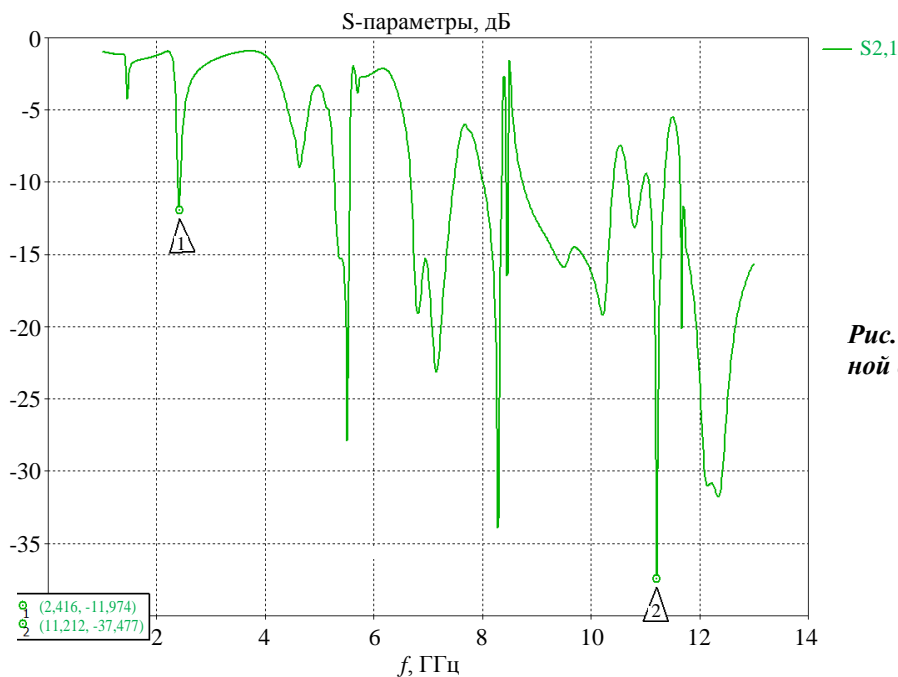


Рис. 10. АЧХ структуры каскадной структуры с вложением.

Метод размещения резонансных структур с вложенным каскадированием имеет ограничение, заключающееся в том, что, согласно габаритным размерам вложенного резонансного включения, его резонансная частота находится в области второй гармоники первого резонансного включения. В полосе частот конструкции (см. рис. 7) АЧХ будет иметь множество всплесков, которые можно объяснить индуктивно-емкостным взаимодействием контуров этих резонаторов.

Заключение

В работе приведены результаты исследований, проведённых на базе электромагнитного анализа проводящих структур СВЧ-диапазона. Основные результаты сводятся к следующим положениям.

1. Каскадные соединения N кольцевых разрезных резонаторов, рассчитанных на одну резонансную частоту, позволяют увеличить коэффициент затухания примерно в N раз.

2. Каскадные соединения нескольких кольцевых разрезных резонаторов с разными резонансными частотами позволяют, не меняя

резонансную частоту базового элемента структуры f_p , добавлять к спектру всей структуры дополнительные частотные компоненты, значения которых находятся в областях второй гармоники ($2f_p$).

3. Внутреннее пространство разрезных колец может быть использовано для размещения, как дополнительных резонаторов, так и для расположения других пассивных распределённых структур или участков линии передачи, что позволит минимизировать габаритные размеры линии передачи и размещать такие конструкции внутри проводящих слоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мальшев И. В., Николаев Е. В. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 6. С. 531.
2. Мальшев И. В., Николаев Е. В. Способ создания полосно-заграждающих фильтрующих элементов на основе концентрических разрезных колец в полосковых линиях передач СВЧ и КВЧ диапазонов / Материалы 28-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» 9–15 сентября 2018 г. Севастополь, Крым, Россия. С. 1471–1479.
3. Мальшев И. В., Николаев Е. В. // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 3. С. 79.

PACS: 84.30.Vn

Frequency selection in conducting lines using cascade connections of circular concentric split resonant structures

I. V. Malyshev¹ and E. V. Nikolaev²

¹ INTEI SFEDU

2 Shevchenko st., Taganrog, Rostov Region, 347922, Russia
E-mail: im1960@mail.ru

² IRTSC SFEDU

44 Nekrasovsky Lane, Taganrog, Rostov Region, 347928, Russia
E-mail: nikolayev@mail.ru.

Received November 13, 2019

Consideration is given to the results of studies conducted on the basis of electromagnetic analysis of conductive structures. It is shown that in the interior of the planar structure of a double ring split resonator. It is also possible to place topology elements of passive microwave or EHF elements having resonant frequencies exceeding the working range of the basic structure of the main resonator. This feature allows to use other resonant structures

or elements of a microstrip path to form in the inner space of the main double ring split resonator, which is important if you need a dense arrangement of module elements or for the case of placing a resonant switch in the inner layers of a multilayer printed circuit board.

Keywords: striped or coplanar transmission lines, S-parameters, surface structures of split concentric rings, resonant frequency, band-barrage filter.

REFERENCES

1. I. V. Malyshev and E. V. Nikolaev, Usp. Prikl. Fiz. **6** (6), 531 (2018).
2. I. V. Malyshev and E. V. Nikolaev, *A method for creating band-stop filtering elements based on concentric split rings in strip transmission lines of microwave and UHF bands*, in *Proc. 28th International Conference "Microwave and Telecommunication Technologies"* (September 9–15, 2018 Sevastopol, Crimea, Russia), p. 1471–1479.
3. I. V. Malyshev and E. V. Nikolaev, Radio Engineering **83** (3), 79 (2019).