

МЕТОД АНАЛИЗА НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ПОЛОСКОВО-ЩЕЛЕВЫХ СТРУКТУРАХ. ЧАСТЬ 2. АНАЛИЗ КОМПЛЕКСНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ТРЕХСЛОЙНЫХ ПЛАНАРНЫХ СТРУКТУРАХ

Введение

Анализ трехмерных планарных полосно-пропускающих фильтров с топологией, включающей в себя периодические структуры из щелевых резонаторов различной формы (EBG-структуры), как правило, выполняется либо с помощью коммерческих программ анализа микроволновых устройств, либо путем построения эквивалентных схем таких неоднородностей [1, 2]. Описанный в предыдущей работе [3] способ алгебраизации краевой задачи для анализа характеристик рассеяния на индуктивном и емкостном отрезке микрополосковой линии методом поперечного резонанса дает возможность анализировать эти базовые неоднородности в комплексе с неоднородностями вида *defected ground plane*, то есть с щелевыми резонаторами различной формы в заземляющем слое. Ниже рассмотрены задачи для трехмерных планарных структур, в которые включаются узкие щелевые резонаторы прямоугольной формы. Для алгебраизации краевых задач используются известные и хорошо апробированные выражения для компонентов электромагнитного поля на апертуре щели [4, 5].

Алгебраизация и результаты численных расчетов краевых задач для трехслойных планарных структур методом поперечного резонанса

Решение краевых задач для симметричной комплексной неоднородности, содержащей и скачок ширины микрополосковой линии, и прямоугольный щелевой резонатор в заземляющем слое, также позволяет рассчитывать матрицы рассеяния на ней методом поперечного резонанса. В этом случае рассматривается трехслойная планарная структура, третий слой которой имеет воздушное заполнение. На рис. 1, *a – в* показаны топологии структуры с неоднородностью в виде скачка ширины в микрополосковой линии и прямоугольным щелевым резонатором с центром в плоскостях $z = 0$ либо $z = L$, размером $2L_r$ на s (половина сечения симметричной неоднородности). При фиксированном размере узкого отрезка микрополосковой линии передачи (рис. 1, *a*) из решения двух краевых задач получается матрица рассеяния на *индуктивном* отрезке полосковой линии с щелевым резонатором в ее заземляющей плоскости. Аналогично при фиксированной длине широкого отрезка микрополосковой линии (рис. 1, *б*) получается матрица рассеяния на *емкостном* отрезке микрополосковой линии с щелевым резонатором в ее заземляющей плоскости.

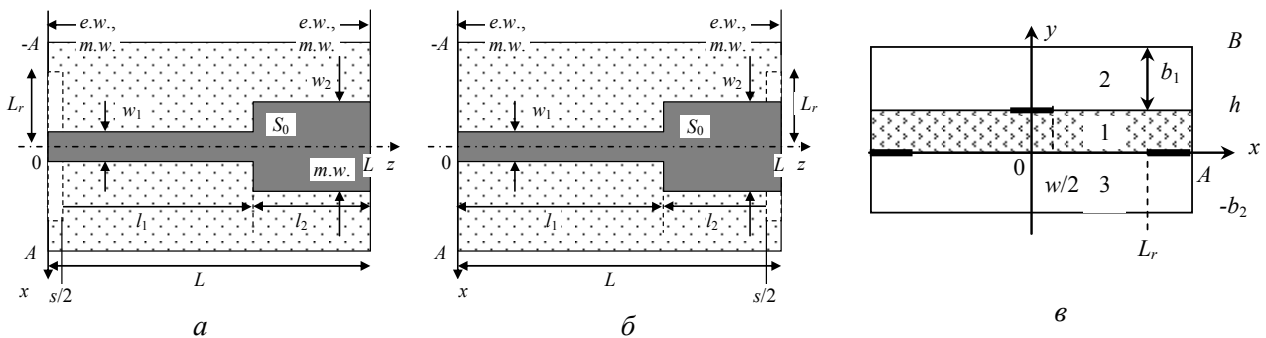


Рис. 1. Топология полоскового резонатора с комплексной неоднородностью для решения краевой задачи вида *e.w.-e.w.* или *m.w.-m.w.*: *a* – щелевой резонатор в плоскости $z=0$ (индуктивный отрезок микрополосковой линии с щелевым резонатором); *б* – щелевой резонатор в плоскости $z=L$ (емкостной отрезок микрополосковой линии с щелевым резонатором); *в* – поперечное сечение трехслойной структуры

Как и выше, поле резонатора в каждой из трех областей записывается через разложение в двойные ряды Фурье вида (1) (см. [3]), меняются только выражения для функций $F_{e(h)i,mn}(y)$. Для алгебраизации краевой задачи используются выражения для векторных потенциалов плотности тока вида (2) из [3], а компоненты электрического поля E_s на апертуре щелевого резонатора записываются в виде рядов по ортогональным полиномам Чебышева первого и второго рода T_k, U_k и продольным гармоникам резонатора [4, 5]. В случае, когда середина щелевого резонатора расположена в плоскости $z = 0$, компоненты поля записываются в виде

$$E_{sz}(x, z) = \sum_{p=1}^{N_p} \sqrt{\frac{2}{L_r}} \cos k_{x1p} x \frac{1}{\sqrt{1-(2z/s)^2}} \sum_{k=0}^{N_m} f_{p,k} T_{2k} \left(\frac{z}{s/2} \right), \quad k_{x1p} = \frac{\pi(2p-1)}{2L_r};$$

$$E_{sx}(x, z) = \sum_{p=1}^{N_p} \sqrt{\frac{2}{L_r}} \sin k_{x1p} x \sqrt{1-(2z/s)^2} \sum_{k=0}^{N_m} g_{p,k} U_{2k+1} \left(\frac{z}{s/2} \right), \quad (1)$$

Аналогичные выражения для поля на апертуре щели записываются в случае расположения середины щелевого резонатора в плоскости $z = L$, рис. 1, б. Алгебраизация краевой задачи и вывод системы уравнений относительно неизвестных коэффициентов разложения производится по стандартной процедуре [5]. В численных расчетах при описании поля на щелевых резонаторах (1) учитывались по две пространственные гармоники ($N_p = 2$), а суммирование в рядах по ортогональным с весом полиномам ограничено до пяти членов ряда ($N_w = 5$).

Далее рассмотрим результаты анализа симметричной комплексной неоднородности, содержащей индуктивный или емкостный отрезок полосковой линии передачи и щелевой резонатор прямоугольной формы в ее заземляющем слое (рис. 2, а, б).

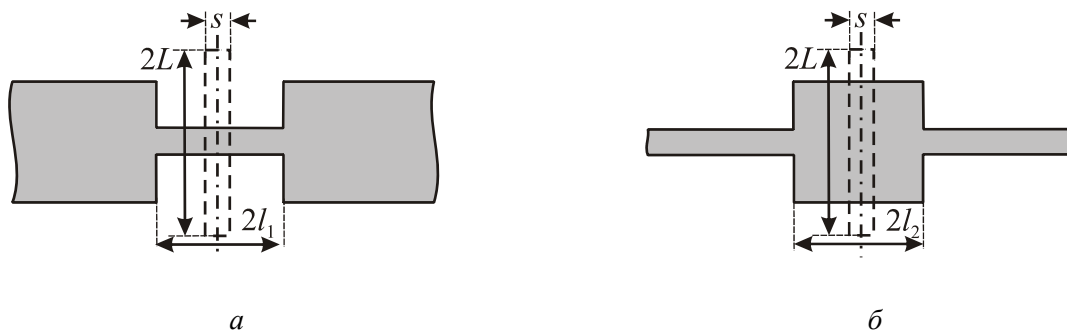


Рис. 2. Индуктивный – а и емкостный – б отрезки в микрополосковой линии передачи с щелевыми резонаторами в заземляющем слое

На рис. 3, а показан спектр собственных частот резонатора, полученный из решения электрической и магнитной краевых задач, с индуктивной неоднородностью в микрополосковой линии передачи размерами (мм) $w_1=0,58$, $w_2=2,0$ мм, $l=2 \cdot l_1=2,0$, с щелевым резонатором в заземляющем слое размером с размерами $L_r=7,0$, $s=0,3$. Видно, что минимум коэффициента отражения по сравнению с традиционной неоднородностью смещается в область нижних частот рассматриваемого частотного диапазона. На рис. 3, б показаны характеристики рассеяния на неоднородности, полученные методом поперечного резонанса, в зависимости от длины индуктивного отрезка l . Резонансный минимум коэффициента пропускания $|S_{21}|$ определяется только размером щелевого резонатора и слабо зависит от длины индуктивного отрезка l .

На рис. 4, а, б показан спектр собственных частот того же индуктивного полоскового резонатора с щелевым резонатором в заземляющем слое размерами $L_r=11,4$, $s=0,4$,

и рассчитанные из него характеристики рассеяния. В этом случае спектр собственных частот, полученный из решения электрической краевой задачи, расщепляется две ветви в рассматриваемом диапазоне частот, а максимум коэффициента отражения $|S_{11}|$ и минимум коэффициента передачи $|S_{21}|$ разнесены всего на $\Delta f=1.5$ ГГц. Таким образом, изменением длины индуктивного отрезка и длины щелевого резонатора можно регулировать взаимное расположение минимумов характеристик рассеяния на комплексной индуктивной неоднородности.

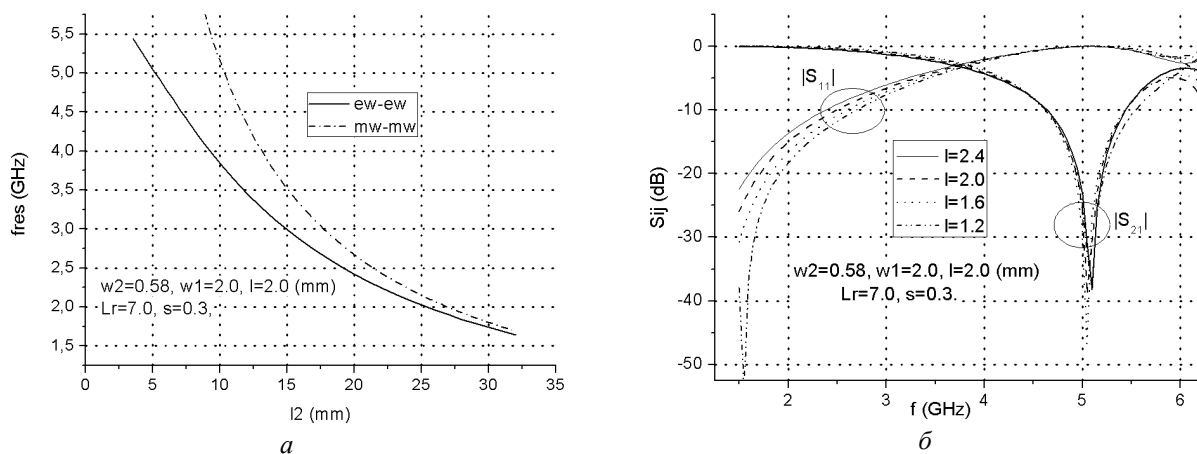


Рис. 3. *a* – спектр собственных частот резонатора, полученный из решения электрической и магнитной краевых задач, с комплексной индуктивной неоднородностью; *b* – характеристики рассеяния на неоднородности в зависимости от длины индуктивного отрезка $l=2l_1$.
 Размеры щелевого резонатора в заземляющей плоскости, мм: $L_r=7,0$, $s=0,3$

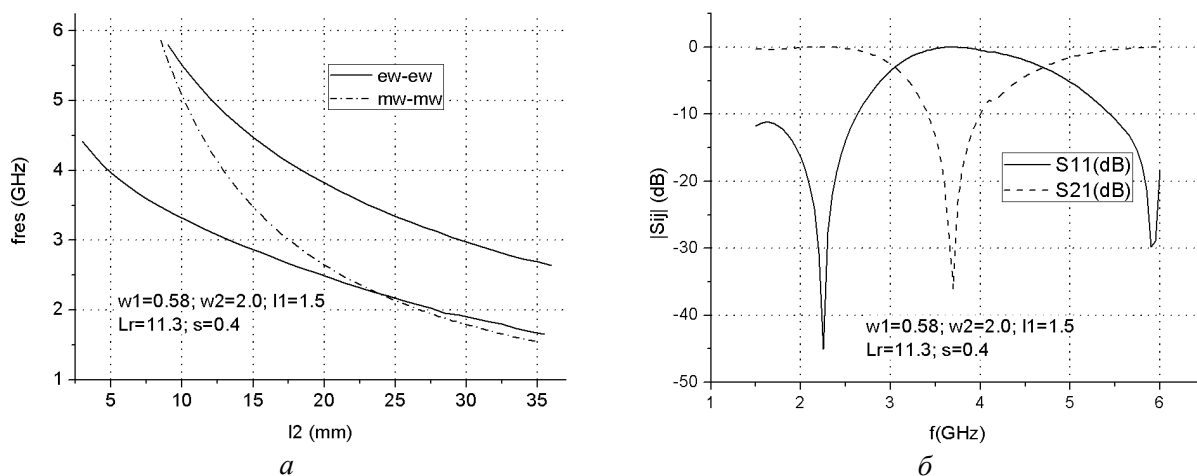


Рис. 4. *a* – спектр собственных частот резонатора, полученный из решения электрической и магнитной краевых задач, с комплексной индуктивной неоднородностью; *b* – характеристики рассеяния на неоднородности

На рис. 5, *a*, *b* приведены спектр собственных частот и характеристики рассеяния на индуктивной неоднородности с щелевым резонатором в заземляющем слое в зависимости от ширины индуктивного отрезка w_1 (остальные параметры структуры остаются постоянными). Видно, что чем больше отношение w_2/w_1 – тем выше частота резонансного пропускания основной волны микрополосковой линии передачи. При изменении отношения w_2/w_1 от 2,8 до 8,6 минимум коэффициента отражения смещается вверх по частоте на 30 %, а минимум коэффициента передачи – всего на 7 %.

Спектр собственных частот и характеристики рассеяния емкостной неоднородности с щелевым резонатором в заземляющей плоскости показан на рис. 6, *a*, *b*. Из полученных характеристик видно, что в отличие от традиционной емкостной неоднородности (рис. 2, *b* из

[3]), добавление щелевого резонатора в заземляющую плоскость под емкостным отрезком приводит к появлению дополнительных частот резонансного взаимодействия основной волны микрополосковой линии передачи с комплексной неоднородностью, а именно – обеспечивает появление частот резонансного записания и пропуска сигнала. При проектировании различных фильтрующих или согласующих схем варьированием параметров неоднородности можно добиться требуемой характеристики. Наличие в схеме щелевого резонатора (или их каскада) обеспечивает высокий уровень затухания вне полосы пропускания схемы, к примеру, на частоте высшей гармоники.

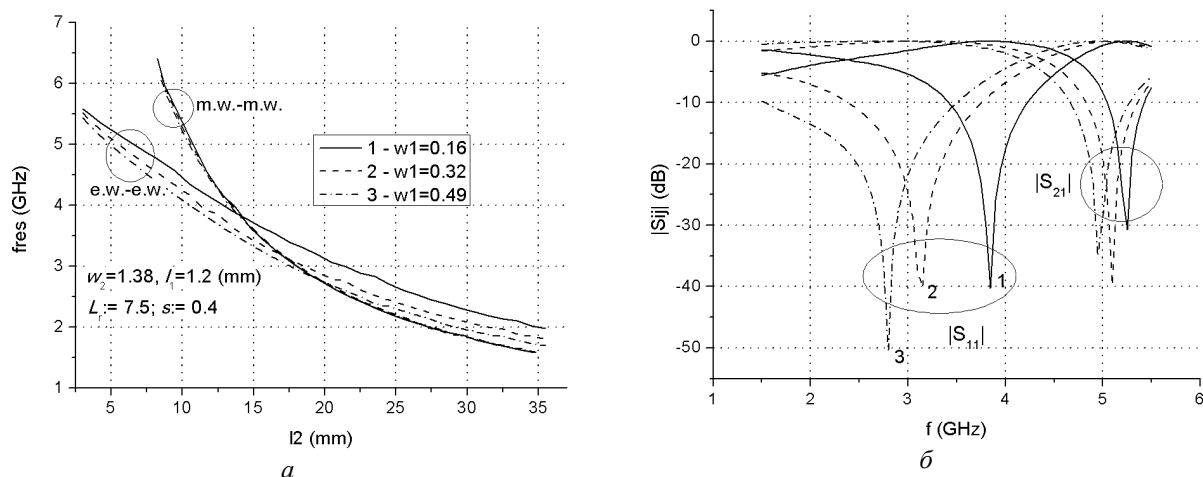


Рис. 5. *a* – спектр собственных частот резонатора, полученный из решения электрической и магнитной краевых задач, с комплексной индуктивной неоднородностью для различных значений w_1 (w_2 и l_1 , а также размер щелевого резонатора $L_r=7,5$, $s=0,4$ фиксированы); *б* – характеристики рассеяния на неоднородности

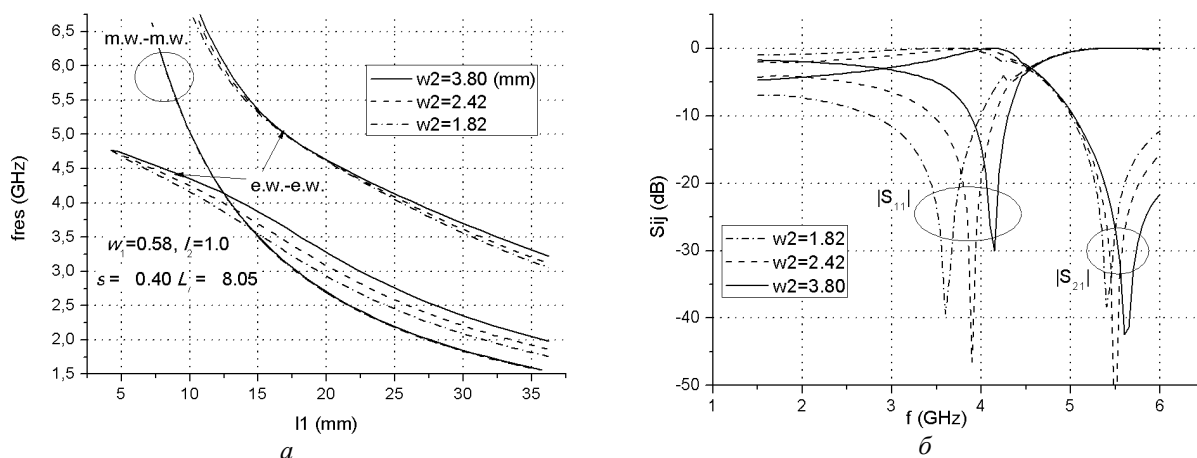


Рис. 6. *a* – спектр собственных частот резонатора, полученный из решения электрической и магнитной краевых задач, с комплексной емкостной неоднородностью для различных значений w_2 (w_1 и l_2 , а также размер щелевого резонатора $L_r=8,05$, $s=0,4$ – фиксированы); *б* – характеристики рассеяния на неоднородности в зависимости от отношения w_2/w_1

В качестве примеров на рис. 7, *a*, *б* приведены результаты расчета и экспериментальных измерений характеристик рассеяния на комплексной индуктивной и емкостной неоднородностях в микрополосковой линии передачи методом поперечного резонанса (рис. 2, *a*, *б*). Дополнительный резонанс на частоте 1,945 ГГц на экспериментальной кривой для емкостной неоднородности (рис. 7, *б*) связан с тем, что измерения выполнены для открытой структуры, в то время, как расчет проведен для экранированной структуры.

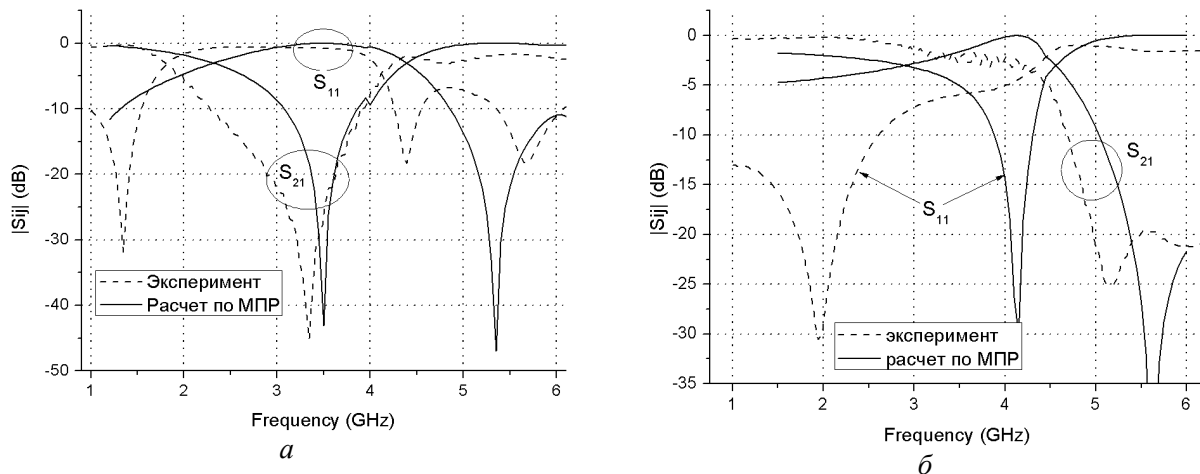
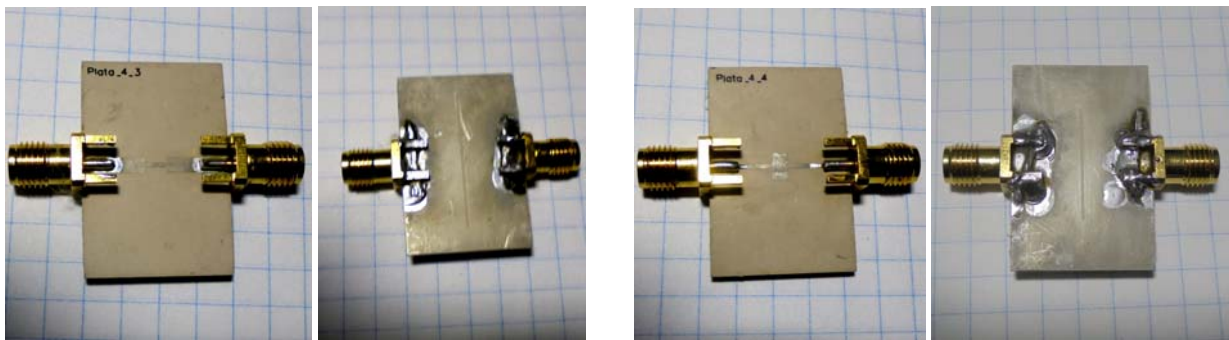


Рис. 7. Характеристики рассеяния на комплексной индуктивной (а) и емкостной (б) неоднородности. Параметры структур (мм): а – $w_1=0,58$, $w_2=2,0$, $2l_1=3,0$, размеры щелевого резонатора $L_r=11,4$, $s=0,4$; б – $w_1=0,58$, $w_2=3,80$, $2l_2=2,0$, размеры щелевого резонатора $L_r=8,05$, $s=0,4$

Заключение

Таким образом, построены алгоритмы анализа неоднородностей в виде скачка ширины в микрополосковой линии передачи конечной длины (индуктивной и емкостной неоднородности) с добавлением щелевого резонатора в заземляющую плоскость индуктивного и емкостного отрезков микрополосковой линии.

Особенностями разработанной методики анализа комплексных неоднородностей, включающих в себя скачок ширины в полосковой линии передачи, методом поперечного резонанса являются:

- быстрая сходимость алгоритма, достигаемая за счет описания функций плотности тока в неоднородной микрополосковой линии передачи через векторные потенциалы для них;
- использование аппроксимации спектра собственных частот резонатора с неоднородностью, в том числе и комплексной, степенными полиномами, что существенно сокращает машинное время, затрачиваемое на анализ неоднородности.

Результаты расчета характеристик рассеяния на комплексных (трехмерных) неоднородностях в микрополосковой линии передачи показали, что добавление в них щелевых резонаторов приводит к появлению дополнительных частот резонансного отражения и пропускания, по сравнению с традиционными ступенчатыми неоднородностями в ней. Это позволяет улучшить характеристики и расширить функциональные возможности проектируемых фильтров и согласующих цепей.

Список литературы: 1. Gao, C., Chen, Z. N., Wang, Y. Y., Yang, N., Qing, X. M. Study and Suppression of Ripples in Passbands of Series/Parallel Loaded EBG Filters // IEEE Trans. on Microw. Theory and Techn. – 2006. – V. 54, No. 4. – P. 1519–1526. 2. Guo, X., Zhu, L., Wu, W. Strip-loaded slotline resonators for differential wideband bandpass filters with intrinsic common-mode rejection // IEEE Trans. on Trans. on Microw. Theory and Techn. – 2016. – V.64, No. 2. – P. 450–458. 3. Рассохина, Ю.В., Крыжановский, В.Г. Метод

анализа неоднородностей в полосково-щелевых структурах. Ч. 1: Анализ скачка ширины в микрополосковой линии методом поперечного резонанса // Радиотехника. – 2016. – Вып. 187. – С. 91–99. 4. *Крыжановский, В.Г., Рассохина, Ю.В.* Модификация метода поперечного резонанса для анализа щелевых резонаторов в заземляющем слое микрополосковой линии передачи // 21-я междунар. Крымская конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". – Севастополь, 12-16 сентября 2011 г. : Материалы конф. – Севастополь : Вебер, 2011. – Т.2. – С. 1120 – 1121. 5. *Рассохина, Ю.В., Крыжановский, В.Г.* Эффекты взаимной связи между прямоугольными щелевыми резонаторами в заземляющем слое микрополосковой линии передачи // Прикладная радиоэлектроника. – 2014. – №4. – С. 420 – 425.

Донецкий национальный университет, Винница

Поступила в редколлегию 12.01.2017