

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.874;621.396

ИСКУССТВЕННЫЕ МАГНИТНЫЕ ПРОВОДНИКИ НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

© 2023 г. Ю. Н. Казанцев^а, *, О. А. Дьяконова^а

^а Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация

*E-mail: yukazantsev@mail.ru

Поступила в редакцию 20.05.2020 г.

После доработки 20.03.2023 г.

Принята к публикации 27.03.2023 г.

Предложены и исследованы новые полосно-пропускающие частотно-селективные поверхности (ЧСП). Получены формулы для расчета модуля и фазы коэффициента отражения искусственных магнитных проводников, на основе предложенных ЧСП. Проведено сопоставление результатов электродинамического моделирования и расчета по формулам. Показана возможность расширения рабочей полосы частот.

DOI: 10.31857/S0033849423060062, EDN: XMDXPR

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–9] были исследованы частотно-селективные поверхности (ЧСП). В работе [10] показано, что ЧПС при падении на нее плоской электромагнитной волны ведет себя как искусственный магнитный проводник (ИМП), коэффициент отражения от которого на резонансной частоте равен +1.

Аналогичным образом ведут себя ЧСП-структуры на основе емкостных решеток [11–17]. В работе [14] было показано, что в ИМП-структуре могут быть использованы как полосно-отражающие, так и полосно-пропускающие ЧСП, а в работе [17] проведено исследование функциональных связей между характеристиками ЧСП (резонансная частота и Q -фактор) и характеристиками ИМП (положение и ширина полосы рабочих частот). При этом было показано, что применение в ИМП-структуре полосно-пропускающей ЧСП позволяет обеспечить более широкую полосу рабочих частот, чем применение полосно-отражающей ЧСП.

Цель данной работы — исследовать характеристики ИМП на основе полосно-пропускающих ЧСП и провести сравнительный анализ при тех же значениях периода решетки и диэлектрической проницаемости, что и в работе [6].

1. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИХ ЧСП И ИМП НА ИХ ОСНОВЕ

На рис. 1а представлен общий вид ИМП, включающий в свой состав ЧСП 1, расположен-

ную на слое диэлектрика 2 толщиной D и с диэлектрической проницаемостью ϵ . Диэлектрический слой с противоположной стороны от ЧСП покрыт слоем металла 3. Эквивалентная схема рис. 1б дана для ЧСП в случае однородного пространства с диэлектрической проницаемостью ϵ , а на рис. 1в — ЧСП расположена на границе двух полупространств с диэлектрическими постоянными, равными 1 и ϵ .

На рис. 2 показаны модели шести полосно-пропускающих ЧСП с одинаковым периодом 3 мм. Эти модели содержат щели в электропроводящей поверхности. В качестве базовой выбрана модель М1 структуры, впервые представленной в работе [6]. Общим в этих моделях является то, что на резонансных частотах их импеданс стремится к бесконечности.

На рис. 3 приведены частотные зависимости коэффициента отражения от ЧСП с моделями, показанными на рис. 2, а в табл. 1 приведены значения резонансных частот f_p и Q -факторов.

Соответствующая толщина D диэлектрической подложки ИМП определяется по следующей формуле [18]:

$$D = \left[\left(\arctg \frac{2.5}{Q} \sqrt{\frac{2\epsilon}{\epsilon + 1}} \right) / \left(k_p \sqrt{\frac{2\epsilon}{\epsilon + 1}} \right) \right]. \quad (1)$$

В табл. 1 указаны также толщины D диэлектрических подложек ИМП, рассчитанные по формуле (1) на основе моделей М1...М6 (см. рис. 2) при условии $\epsilon = 10.2$.

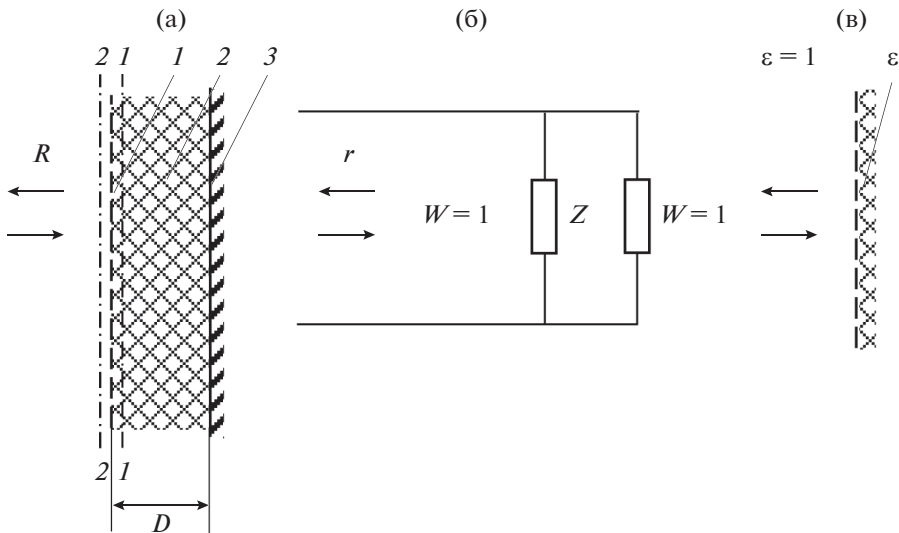


Рис. 1. ИМП на основе полосно-пропускающей ЧСП: а – схема ИМП, б – эквивалентная схема ЧСП в свободном пространстве, в – ЧСП на границе полупространств с диэлектрическими постоянными 1 и ϵ .

Как следует из рис. 2 и табл. 1, значения резонансных частот f_p и Q -факторов ЧСП с М1...М6 меньше, чем с М1. Так, например, с М1 резонансные частоты и Q -факторы для ЧСП равны $f_p = 28$ ГГц, $Q = 2$, а с М2 $f_p = 18$ ГГц, $Q = 1.4$. Отношение периода решетки 3 мм к резонансной длине волны $\lambda_p = 23.3$ мм для М6 равно 0.129, т.е. около 1/8. Соответствующее отношение для М1 равно 0.28, т.е. несколько больше 1/4. При этом величина Q -фактора для обеих моделей приблизительно одинакова.

В состав расчетных структур ИМП входил ЧСП с моделями всех шести типов, (с М1 по М6), расположенных на слоях диэлектрика ($\epsilon = 10.2$), металлизированных с противоположных сторон. Толщины диэлектрических слоев взяты в соот-

ветствии с результатами оценок, приведенными в табл. 1.

На рис. 4 представлены частотные зависимости фазы коэффициента отражения от ИМП на основе полосно-пропускающих ЧСП с моделями всех шести типов.

Фаза коэффициента отражения ИМП определяется по следующей формуле [18]:

$$\varphi = 2 \arctg \left[\frac{\sqrt{\epsilon}}{\operatorname{tg} k D \sqrt{\epsilon}} - 2 Q t \left(\frac{k t}{k_p} - \frac{k_p}{k t} \right) \right], \tag{2}$$

где $k = 2\pi f/c$, $k_p = 2\pi f_p/c$ – волновые числа, c – скорость света, $t^2 = (\epsilon + 1)/2$.

В табл. 2 приведены резонансные частоты f_0 , частоты f_{+90} и f_{-90} , при которых фаза коэффициента отражения равна $+90^\circ$ либо -90° соответственно, и относительная ширина рабочей полосы ИМП

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_{-90} - f_{+90}}{f_0}.$$

Нумерация ИМП определяется моделями, представленными на рис. 2: 1...6 соответственно М1...М6.

Из данных табл. 2 видно, что результаты численного моделирования значений f_0 и $\Delta f/f_0$ близки к результатам расчета по формуле (2). Основным в этих результатах является то, что рабочие частоты ИМП на основе моделей М2...М6 расположены существенно ниже рабочей частоты ИМП на основе модели М1 при одинаково малых значениях их периодов.

Таблица 1. Резонансные частоты и Q -факторы ЧСП			
Модель	f_p , ГГц	Q -фактор ЧСП	D , мм
М1	28.0	2.0	1.3
М2	18.0	1.36	2.3
М3	15.0	1.75	2.6
М4	14.6	1.82	2.6
М5	13.6	1.86	2.8
М6	12.9	1.98	2.9

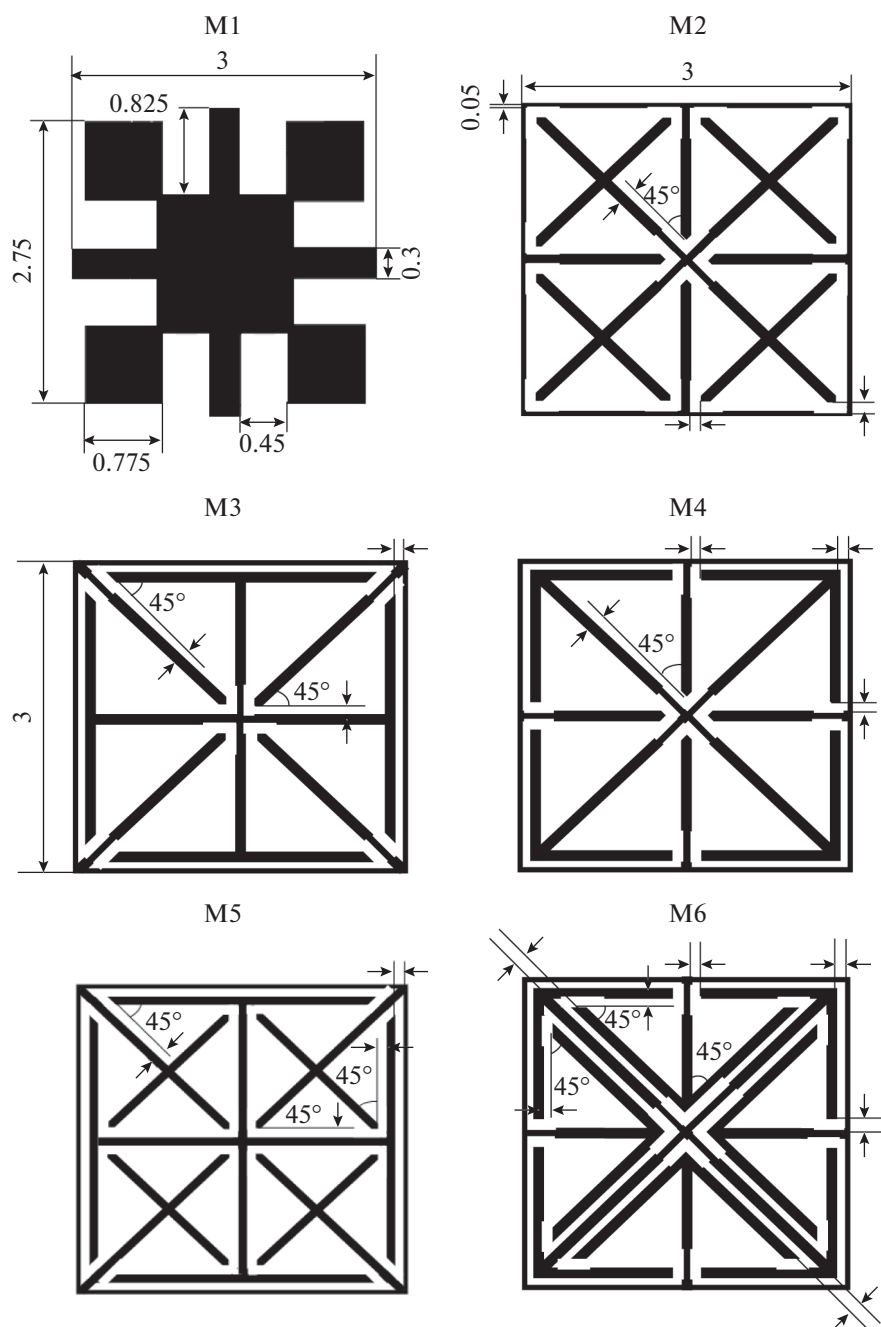


Рис. 2. Модели M1...M6 полосно-пропускающих ЧСП; ширина проводников 0.1 мм, ширина зазоров, отмеченных стрелками, 0.1 мм; остальные значения в мм.

Частотная зависимость коэффициента отражения R от полосно-пропускающей ЧСП в свободном пространстве рассчитывается по следующей формуле [19]:

$$R = \frac{-1}{1 + j[Q(f/f_p - f_p/f)]}, \quad (3)$$

где f – частота, f_p – резонансная частота, Q – фактор ЧСП.

2. ИЗМЕНЕНИЕ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ ИМП

В работе рассмотрен вариант изменения рабочей частоты ИМП на примере модели M1. Целью численного моделирования частотной зависимости фазы коэффициента отражения от ИМП являлось исследование путей модификации структуры в сторону низких частот.

Резонансные частоты ЧСП и ИМП существенно различны и определяются минимумом

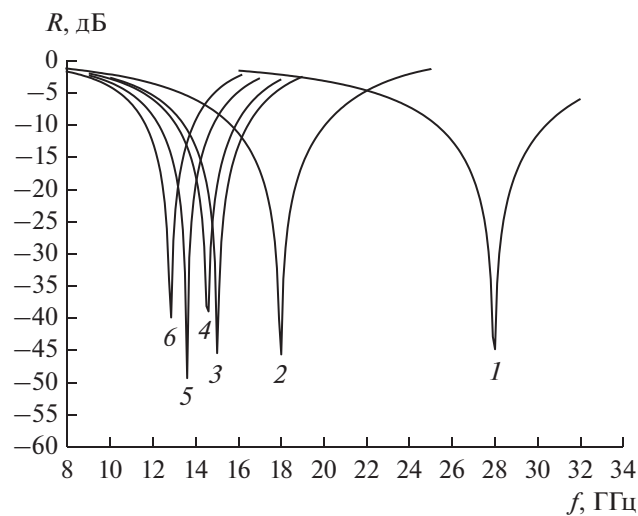


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента отражения R от ЧСП для М1...М6 (см. рис. 2) соответственно кривые 1...6.

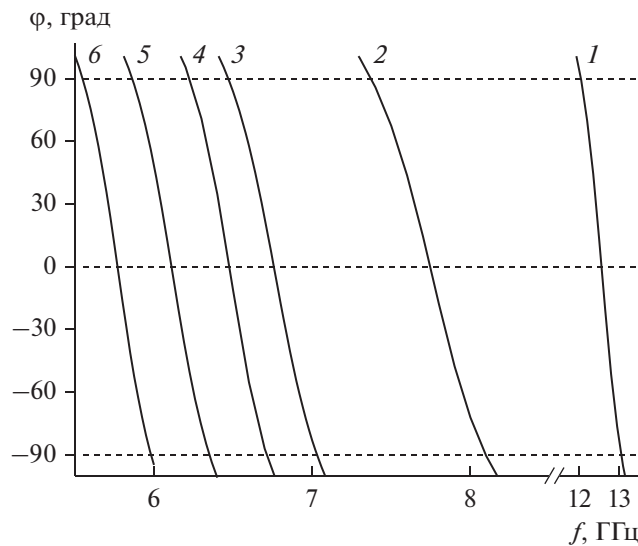


Рис. 4. Частотные зависимости фазы коэффициента отражения φ от ИМП для моделей М1...М6 (соответственно кривые 1...6).

коэффициента отражения и нулевой фазой коэффициента отражения соответственно. Любая возможность изменения рабочей частоты представляет существенный интерес. Наличие функциональных связей между характеристиками ИМП, параметрами ЧСП и диэлектрического слоя позволяют решить эту задачу. По приближенным формулам (1)–(3) сделана предварительная оценка ЧСП модифицированной модели М1 и проведено численное моделирование. Все размеры модифицированной модели (см. рис. 2, М1) увеличены в 1.75 раза, таким образом, период решетки увеличился до 5.25 мм.

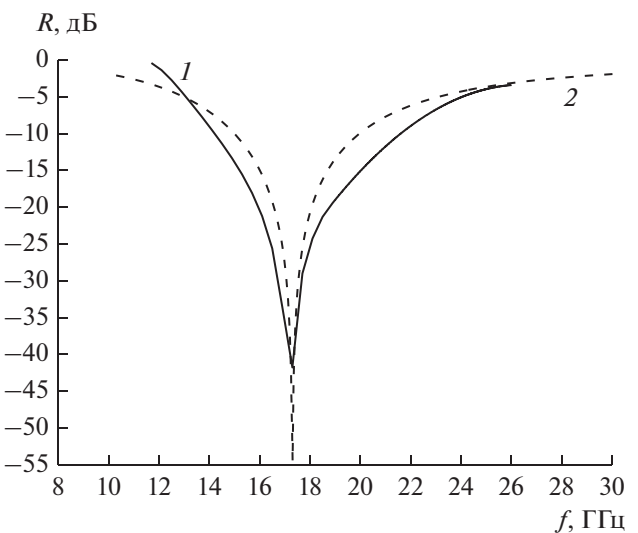


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента отражения R от ЧСП с модифицированной моделью: 1 – численное моделирование, 2 – расчет по формуле (3).

Также были рассчитаны значения резонансной частоты f_p , Q -фактора ЧСП с модифицированной моделью М1 и толщины D диэлектрической подложки ИМП. Толщина D рассчитана по формуле (1) при условии $\epsilon = 10.2$. $f_p = 17.3$ ГГц, $Q = 1.35$, $D = 2.5$ мм.

На рис. 5 приведены частотные зависимости от ЧСП с модифицированной моделью М1 в свободном пространстве: 1 – получена численным моделированием, 2 – рассчитана по формуле (3). Как видно из сравнения рис. 5 с рис. 3 (кривая 1) резонансная частота ЧСП понизилась с 28 до 17.3 ГГц.

На рис. 6 представлены частотные зависимости фазы коэффициента отражения от ИМП с модифицированной моделью М1 ЧСП: 1 – получена численным моделированием, 2 – рассчитана

Таблица 2. Резонансные частоты f_0 и полосы рабочих частот ИМП

Номер ИМП	f_0 , ГГц		f_{+90} , ГГц	f_{-90} , ГГц	$\Delta f / f_0$ %	
	ЧМ	Р	ЧМ	ЧМ	ЧМ	Р
1	12.5	12.0	12.0	13.0	8.0	9.5
2	7.75	8.35	7.37	8.1	9.4	12.0
3	6.76	6.96	6.47	7.02	8.3	11.0
4	6.48	6.77	6.22	6.71	7.6	10.0
5	6.11	6.31	5.89	6.36	7.7	10.0
6	5.77	5.99	5.55	5.08	7.5	9.5

Примечание: ЧМ – численное моделирование, Р – расчет по формулам.

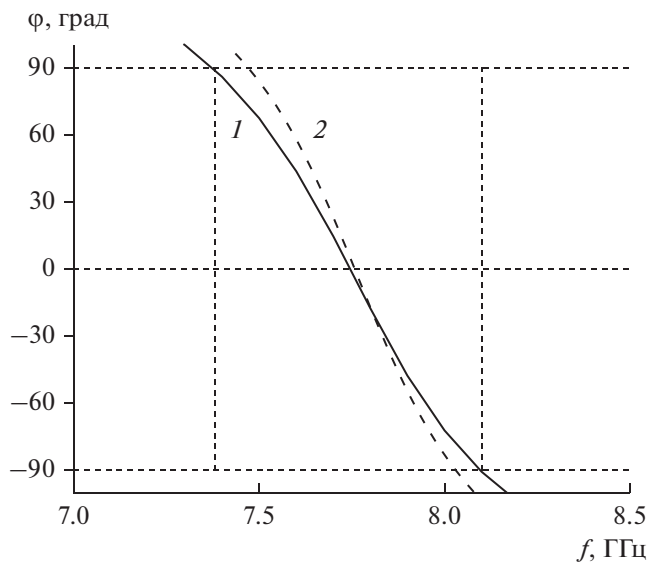


Рис. 6. Частотные зависимости фазы коэффициента отражения φ от ИМП с модифицированной моделью ЧСП: 1 – численное моделирование, 2 – расчет по формуле (2).

по формуле (2). Из сравнения рис. 6 с рис. 4 (кривая 1) видно, что резонансная частота ИМП уменьшилась с 12.5 до 7.76 ГГц, а рабочая полоса частот осталась 9%.

Приближенный расчет по формулам хорошо согласуется с численным моделированием. Отличие составляет порядка 10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, получены следующие результаты.

1. Путем численного моделирования частотной зависимости коэффициента отражения от предложенных типов полосно-пропускающих ЧСП структур найдены значения их резонансных частот и Q -факторов. Эти частоты и Q -факторы меньше, чем у базовой структуры, причем отношение периода к резонансной длине волны снизилась с $1/4$ до $1/8$.

2. Построены новые структуры ИМП на основе полосно-пропускающих ЧСП (М2...М6) с периодом решетки 3 мм и диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 10.2$, как и у базовой модели М1. Резонансные частоты новых моделей лежат в пределах 5.77...7.75 ГГц, а рабочая полоса ИМП изменяется от 7.5 до 9.4%. При этом базовая модель имеет более высокую резонансную частоту в 12.5 ГГц с рабочей полосой ИМП 8%.

3. Показано на примере структуры ИМП с ЧСП базовой модели (М1), что при увеличении в 1.75 раза толщины диэлектрического слоя с $\epsilon = 10.2$

и всех размеров решетки происходит сдвиг резонансной частоты ИМП в область низких частот.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания ИРЭ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Qian Y., Radisic V., Itoh T. // Proc. 1997 Int. Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC). Hong-Kong. 2–5 Dec. 1997. N.Y.: IEEE, 1997. V. 2. P. 585.
2. Qian Y., Yang F-R., Itoh T. // Proc. 1998 Int. Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC) Yokohama. 08–11 Dec. Tokyo: IEICE, 1998. P. 589.
3. Yang F-R., Qian Y., Coccioli R., Itoh T. // IEEE Trans. 1998. V. MW-8. P. 372.
4. Yang F-R., Qian Y., Itoh T. // Proc. 1998 Int. Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC) Yokohama. 08–11 Dec. Tokyo: IEICE, 1998. P. 593.
5. Yang F-R., Coccioli R., Qian Y., Itoh T. // Dig. 1999 IEEE Antennas and Propagation Soc. Int. Symp. Orlando. 11–16 Jul. N.Y.: IEEE, 1999. V. 3. P. 1920.
6. Coccioli R., Yang F-R., Ma R. P., Itoh T. // IEEE Trans. 1999. V. MTT-47. № 11. P. 2123.
7. Yang F-R., Qian Y., Itoh T. // Dig. 1999 IEEE Microwave Theory and Techniques Soc. (MTT-S) Int. Microwave Symp. Anaheim. 13–19 Jun. N.Y.: IEEE, 1999. V. 3. P. 919.
8. Yang F-R., Ma R.P., Qian Y., Itoh T. // IEEE Trans. 1999. V. MTT-47. № 8. P. 1509.
9. Yang F-R., Coccioli R., Qian Y., Itoh T. // Dig. 2000 IEEE Microwave Theory and Techniques Soc. (MTT-S) Int. Microwave Symp. 11–16 Jun. Boston. N.Y.: IEEE, 2000. V. 3. P. 1529.
10. Chang Q.C., Qian Y., Itoh T. // Progress in Electromagnetics Research. PIER. 2003. V. 41. P. 211.
11. Sievenpiper D., Zhang L., Broas R.J. et al. // IEEE Trans. 1999. V. MTT-47. № 11. P. 2059.
12. Broas R.J., Sievenpiper D., Yablonovitch E. // IEEE Trans. 2001. V. MTT-49. № 7. P. 1262.
13. Broas R.J., Sievenpiper D., Yablonovitch E. // IEEE Trans. 2005. V. AP-53. № 4. P. 1377.
14. Hiranandani M.A., Yakovlev A.B., Kishk A.A. // IEEE Proc. Microw. Antennas Propag. 2006. V. 153. № 5. P. 487.
15. Kern D.J., Werner D.H., Monorchio A. et al. // IEEE Trans. 2005. V. AP-53. № 1. P. 8.
16. Sohn J.R., Kim K.Y., Lee J.-H., Tae H.-S. // Progress in Electromagnetics Research (PIER). 2006. V. 61. P. 27.
17. Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А., Мальцев В.П. // РЭ. 2019. Т. 64. № 9. С. 874.
18. Дьяконова О.А., Казанцев Ю.Н. // Журн. радиоэлектроники. 2018. № 8. <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/10/text.pdf>.
19. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.