

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.874;621.396

РЕЗОНАНСНЫЙ РАДИОПОГЛОТИТЕЛЬ, СОГЛАСОВАННЫЙ
СО СВОБОДНЫМ ПРОСТРАНСТВОМ НА ЗАДАННОЙ ЧАСТОТЕ

© 2020 г. Ю. Н. Казанцев^{а, *}, Г. А. Крафтмахер^а, В. П. Мальцев^а, В. С. Солосин^а

^аФрязинский 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 22.04.2019 г.

После доработки 22.04.2019 г.

Принята к публикации 25.05.2019 г.

Предложен резонансный радиопоглотитель, обеспечивающий теоретически согласование со свободным пространством на уровне не более -40 дБ по коэффициенту отражения на заранее заданной частоте. Конструкция поглотителя представляет собой решетку из электропроводящих квадратов, которая располагается на слое диэлектрика с потерями, металлизированного с противоположной от решетки стороны. При этом в конструкции поглотителя используется заранее заданный диэлектрик, а размеры квадратных элементов решетки во много раз превышают толщину диэлектрического слоя. Относительное изменение резонансной частоты при изменении угла падения волн TE - и TM -поляризации в угловом интервале $0^\circ \dots 45^\circ$ не превышает 1%.

DOI: 10.31857/S0033849420060157

ВВЕДЕНИЕ

Интерес научной общественности к радиопоглощающим материалам (РПМ) и радиопоглотителям (РП) сохраняется на протяжении многих десятилетий, что обусловлено постоянным прогрессом как в гражданской, так и в военной электронике и подтверждается большим числом научных публикаций [1–10]. Этим обусловлено многообразие конструкций РП, отвечающих различным, и часто противоречивым, требованиям. Однако однослойные РП, так называемые РП Далленбаха, как диэлектрические, так и магнитные, всегда оставались в центре внимания ввиду их надежности и большей простоты их реализации. Основное внимание исследователей в этой области было направлено на расширение рабочего диапазона путем использования либо материалов с частотной дисперсией диэлектрической и магнитной проницаемости [3–5], либо корректирующих решеток из металлических и резистивных элементов [6–10]. Рациональным выбором материала и его толщины можно минимизировать коэффициент отражения в середине рабочего диапазона, однако достигнуть идеального согласования даже на центральной (резонансной) частоте обычно не удавалось. Это объясняется тем, что для такого согласования, например диэлектрического РП, необходимо обеспечить управление в отдельности значениями действительной и мнимой ча-

стей диэлектрической проницаемости материала, что практически невозможно.

В данной работе была сделана попытка решить эту проблему при заранее заданных резонансной частоте и диэлектрике с потерями с помощью решетки из электропроводящих квадратов, которая располагается на слое диэлектрика, металлизированного с противоположной от решетки стороны. Размеры квадратов существенно превышают толщину слоя диэлектрика. Область между квадратом решетки и экраном представляет собой резонатор с волной, близкой к TEM -типу, которая резонирует, отражаясь от открытых концов этого резонатора. Как известно, полное поглощение мощности падающей волны в таком резонаторе имеет место в случае, когда потери на излучение равны тепловым потерям при двойном пробеге волны в резонаторе [11]. Изменяя размеры резонатора, всегда можно обеспечить указанное условие на заданной частоте и для различных материалов.

Целью статьи является исследование отражательных характеристик РП, построенного указанным образом.

1. СТРУКТУРА РАДИОПОГЛОТИТЕЛЯ

Структура радиопоглотителя (рис. 1а) представляет собой периодическую решетку с периодом P из квадратных электропроводящих элементов размером $2a \times 2a$, расположенную на диэлек-

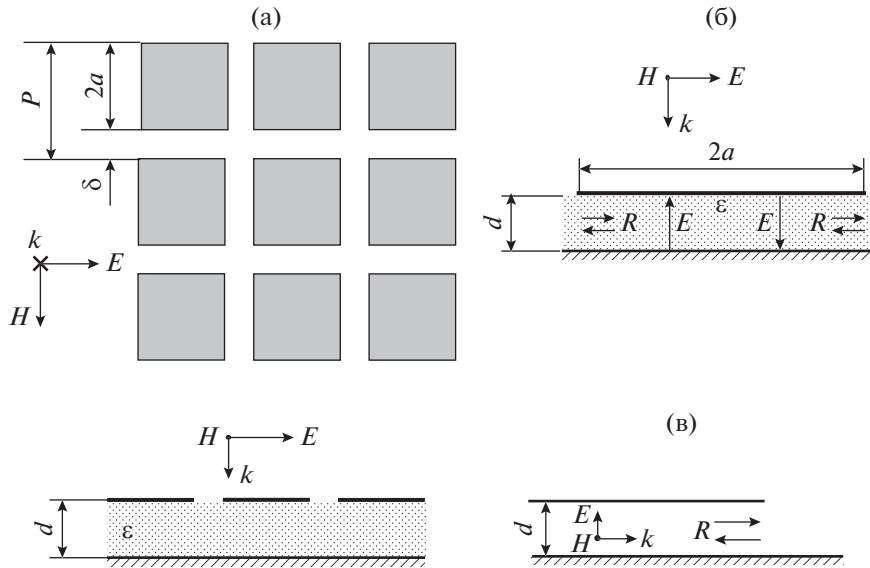


Рис. 1. Структура РП: а – вид сверху и вид сбоку, б – фрагмент РП в пределах одного элемента решетки, в – открытый конец плоского волновода.

трическом слое толщиной d , металлизированном с противоположной от решетки стороны. Размер d мал по сравнению как со стороной квадратного элемента, так и с длиной волны λ ($d \ll 2a, d \ll \lambda$), а зазор между соседними элементами решетки $\delta = P - 2a$ – порядка или больше d ($\delta \geq d$). На рис. 1б выделен фрагмент РП в пределах одного элемента решетки $2a$. При указанном соотношении размеров структура поля в объеме между элементом решетки и электропроводящим экраном имеет вид плоской *ТЕМ*-волны, которая может резонировать, переотражаясь от боковых границ выделенного объема с близким по величине к единице коэффициентом отражения r . Частотная зависимость амплитуды поля U в таком резонаторе имеет вид

$$U = \frac{A_b}{1 - r^2 \exp(-j4ka\sqrt{\epsilon})}, \quad (1)$$

где $k = 2\pi f/c$ – волновое число (f – частота, c – скорость света), $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ – диэлектрическая проницаемость слоя диэлектрика, A_b – некоторая величина, зависящая от условий возбуждения.

Величину r для случая $\epsilon = 1$ оценим с помощью работы [12] как коэффициент отражения от открытого конца плоского волновода толщиной d (рис. 1в):

$$r = \exp(-kd). \quad (2)$$

Величина $r^2 = \exp(-2kd)$ в формуле (1) определяет потери на излучение при двойном пробеге волны в резонаторе, а мнимая часть диэлектрической проницаемости ϵ'' определяет тепловые по-

тери, которые при условии $\epsilon'' \ll 1$ выражаются формулой $\exp(-2ka\epsilon'')$. Мощность падающей волны, поглощаемая в резонаторе на резонансной частоте, максимальна в случае, когда при двойном пробеге волны тепловые потери равны потерям на излучение, т.е.

$$\exp(-2kd) = \exp(-2ka\epsilon''). \quad (3)$$

Отсюда следует

$$\epsilon'' = d/a. \quad (4)$$

Волновое число k вблизи резонансного значения k_p представим в виде

$$k = k_p + \Delta k, \quad (5)$$

где $k_p = \pi/2a, \Delta k/k_p \ll 1$. Для этого случая с помощью формул (1), (2) и (5) можно получить следующее выражение для амплитуды U поля в резонаторе, нормализованное на ее резонансное значение U_p :

$$\frac{U}{U_p} = \frac{1 - \exp(-2\pi d/a)}{1 - \exp(-2\pi d/a - (d + j4a)\Delta k)}. \quad (6)$$

Для предварительной оценки частотной зависимости коэффициента отражения R от РП при нормальном падении на него плоской волны используем следующее выражение:

$$|R|^2 = 1 - \left| \frac{U}{U_p} \right|^2, \quad (7)$$

в котором учитывается, что мощность, поглощенная в диэлектрике, наполняющем резонатор,

пропорциональна квадрату напряженности электрического поля и что коэффициент отражения R на резонансной частоте равен нулю в рассматриваемом здесь случае максимального поглощения мощности падающей волны.

С помощью частотной зависимости коэффициента отражения, рассчитанной по формулам (6) и (7), легко оценить ширину рабочего диапазона РП, в пределах которого коэффициент отражения не превышает величину -10 дБ. В качестве примера такой оценки возьмем структуру РП с параметрами: $P = 34$ мм, $2a = 26$ мм, $d = 2$ мм. По этой оценке, ширина рабочего диапазона такого РП составляет около 10%.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА

Цель численных расчетов – получить частотно-угловые характеристики отражения, позволяющие оценить как угловую устойчивость, так и полосу рабочих частот РП.

В качестве расчетных моделей РП примем структуры со следующими размерами (в мм):

$$1) P = 34, d = 2, \delta = 2, 4, 8,$$

$$2) P = 34, d = 4, \delta = 4, 8, 12,$$

и диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 1 - j\epsilon''$.

Приближенное значение $\epsilon'' = d/a$ уточняется по максимальной глубине резонансного провала на частотной зависимости коэффициента отражения при нормальном падении волны на РП.

Частотные зависимости коэффициента отражения от моделей РП толщиной 2 и 4 мм при нормальном падении волны приведены на рис. 2а и 2б соответственно. Из приведенных зависимостей следует, что полосы рабочих частот, в которых коэффициент отражения не превышает уровня -10 дБ, составляют 9 и 19% для моделей РП с размерами $d = 2$ мм, $\delta = 8$ мм и $d = 4$ мм, $\delta = 8$ мм соответственно, что не противоречит предварительным оценкам по формулам (6) и (7).

При расчете частотно-угловых зависимостей коэффициента отражения от РП использованы характерные значения комплексных диэлектрических проницаемостей диэлектрических материалов с потерями: $\epsilon = 1.8 - j0.5$ (углеродсодержащий пенополиуретан), $\epsilon = 3.4 - j0.2$ (углеродсодержащий полиуретан), $\epsilon = 3.6 - j0.3$ (гетинакс). При этом задавалось значение резонансной частоты $f = 3.2$ ГГц, на которой коэффициент отражения не должен превышать определенного значения. Поставленную таким образом задачу решали подбором параметров a , d и P с учетом того, что резонансная частота в основном зависит от a , а коэффициент отражения на резонансной частоте – от d .

На рис. 3–5 представлены частотные зависимости коэффициента отражения при углах паде-

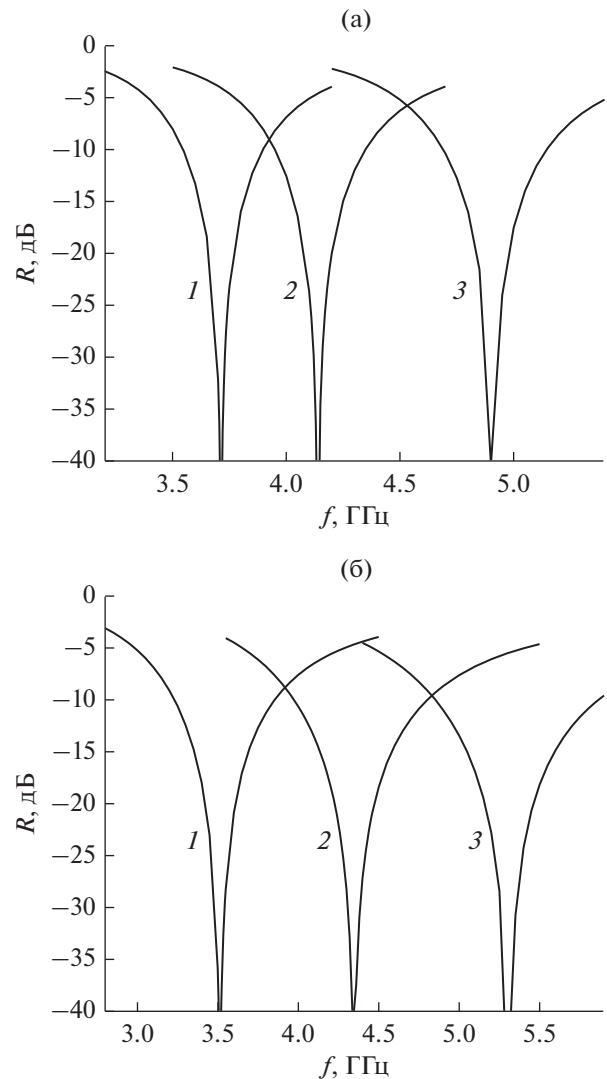


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента отражения от моделей РП с $P = 34$ мм при нормальном падении волны: а – при $d = 2$ мм, $\delta = 2; 4; 8$ мм и $\epsilon'' = 0.19, 0.19, 0.18$ (кривые 1; 2 и 3 соответственно), б – при $d = 4$ мм, $\delta = 4; 8; 12$ мм и $\epsilon'' = 0.42, 0.42, 0.4$ (кривые 1; 2 и 3, соответственно).

ния 0° и 45° волн TE - и TM -поляризации для приведенных выше значений комплексной диэлектрической проницаемости. Значения a и d для зависимостей на рис. 3–5 выбраны из условия реализации коэффициента отражения $R < -40$ дБ на заданной резонансной частоте при нормальном падении волны. Эти зависимости демонстрируют сравнительно высокую угловую устойчивость резонансной частоты для обеих поляризаций ($< 1\%$). Однако величина коэффициента отражения волн TM - и, особенно, TE -поляризации при угле падения 45° существенно возрастает.

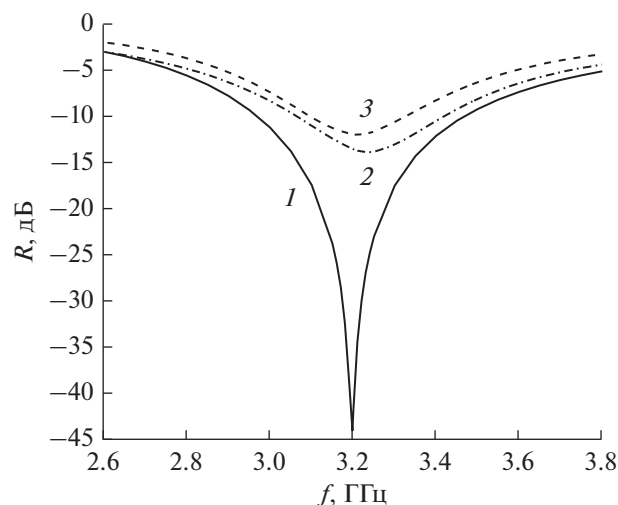


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента отражения от модели РП с $P = 40.5$ мм, $\delta = 12$ мм, $d = 5$ мм, $\epsilon = 1.8 - j0.5$ при углах падения волн 0° (кривая 1) и 45° для TE - (кривая 2) и TM -поляризаций (кривая 3).

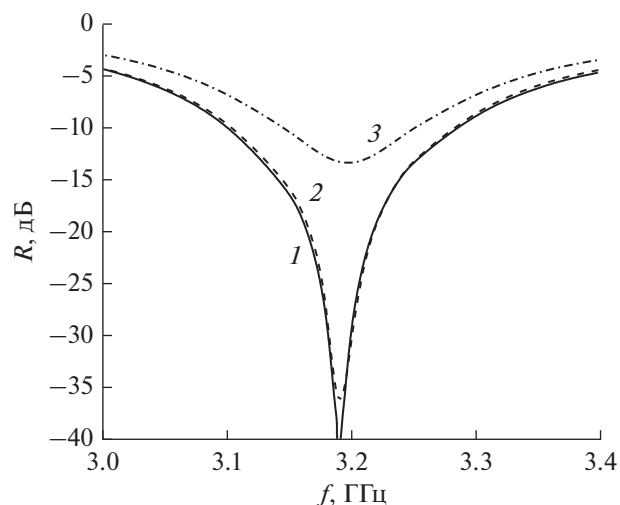


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента отражения от модели РП с $P = 34$ мм, $\delta = 11.44$ мм, $d = 2.4$ мм, $\epsilon = 3.6 - j0.3$ при углах падения волн 0° (кривая 1) и 45° для TE - (кривая 2) и TM -поляризаций (кривая 3).

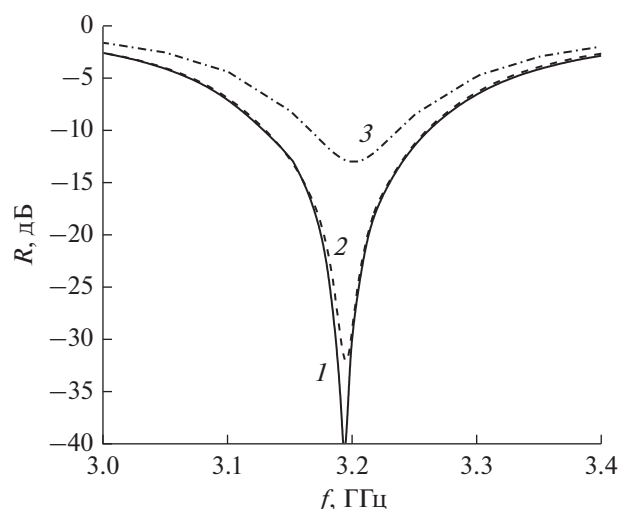


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента отражения от модели РП с $P = 34$ мм, $\delta = 10$ мм, $d = 1.65$ мм, $\epsilon = 3.4 - j0.2$, при углах падения волн 0° (кривая 1) и 45° для TE - (кривая 2) и TM -поляризаций (кривая 3).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Целью эксперимента — оценить характер изменения частотных зависимостей коэффициента отражения от РП при изменении зазора δ между квадратными элементами решетки. Измерение коэффициента отражения проводили в условиях волноводной передачи на модели РП в форме диэлектрического параллелепипеда, металлизированного по всем граням, размером $A \times B \times D$, где A и B — размеры поперечного сечения волновода

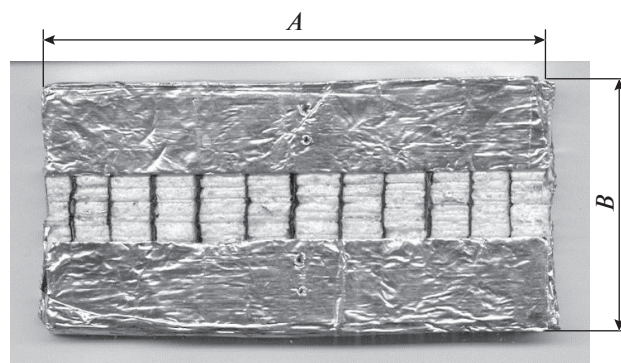


Рис. 6. Внешний вид волноводной модели РП для эксперимента.

72×34 мм, в который модель плотно вкладывалась. На передней грани параллелепипеда прорезана щель шириной δ и длиной A . Внешний вид модели представлен на рис. 6. Диэлектрический материал модели, который виден в щели на рис. 6, представляет собой композит из чередующихся слоев пенополистирола толщиной 6 мм и углеродсодержащей бумаги толщиной 0.07 или 0.14 мм. Комплексная диэлектрическая проницаемость бумаги, измеренная на частоте 4 ГГц, составила $\epsilon = 20 - j15$. Комплексная диэлектрическая проницаемость композита, рассчитанная для такого значения, приблизительно составила $\epsilon_k = 1.2 - j0.25$ и $\epsilon_k = 1.4 - j0.5$ при толщине слоя углеродсодержащей бумаги 0.07 и 0.14 мм соответственно.

Такая модель, вставленная в волновод, является приближенной имитацией РП с одномерной

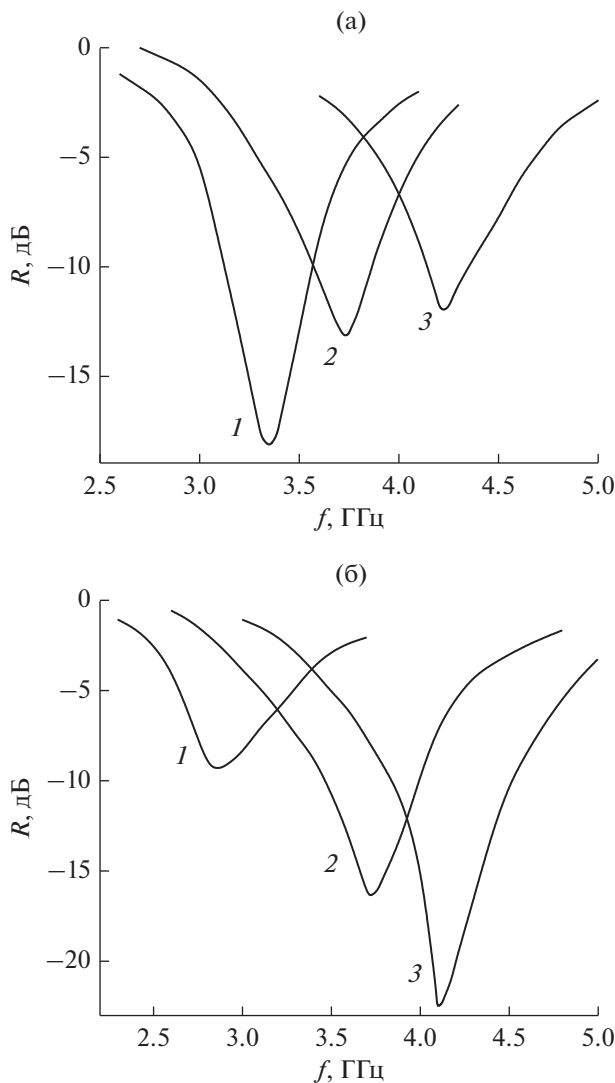


Рис. 7. Частотные зависимости коэффициента отражения от волноводной модели РП с параметрами: а) $d = 4$ мм, $\epsilon = 1.2 - j0.25$ и $\delta = 1.5$ (1), 4 (2), 8 мм (3); б) $d = 4$ мм, $\epsilon = 1.4 - j0.5$ и $\delta = 2$ (1), 4 (2), 8 мм (3).

решеткой с периодом B и шириной щелей δ в металлическом экране.

На рис. 7а и 7б представлены два семейства частотных зависимостей коэффициента отражения от волноводной модели РП для двух указанных выше значений диэлектрической проницаемости композита. Как видно из рисунков, семейства кривых различаются «направлением» углубления минимумов коэффициента отражения при изменении ширины щели δ , что обусловлено различием в соотношении тепловых потерь в резонаторе и величины связи резонатора с волноводом. Максимальная ширина полосы рабочих частот волноводной модели РП составила 15% (по уровню отра-

жения -10 дБ) при толщине структуры $1/20$ длины волны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная конструкция РП позволяет обеспечить коэффициент отражения, теоретически меньший -40 дБ, на заданной частоте при использовании в конструкции различных диэлектриков с потерями только путем управления структурой РП, а именно размерами решетки и толщиной диэлектрического слоя.

Численный расчет коэффициента отражения от РП для волн TE - и TM -поляризации при углах падения 0° и 45° показал достаточно высокую угловую устойчивость резонансной частоты (отклонение $< 1\%$).

Измерение частотных зависимостей коэффициента отражения от волноводной модели РП позволило оценить ширину полосы рабочих частот (по уровню отражения -10 дБ), которая составила около 15% при толщине структуры $1/20$ длины волны.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания по теме 0030-2019-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stergiou C.A., Koledintseva M.Y., Rozanov K.N.* Hybrid Polymer Composite Materials: Applications /Eds. by Thakur V.K., Thakur M.K., A. Pappu. Cambridge: Woodhead Publ., 2017. P. 53.
2. *Kong L.B., Li Z.W., Liu L. et al.* // Intern. Mater. Rev. 2013. V. 58. № 4. P. 203.
3. *Старостенко С.Н., Виноградов А.П., Кибец С.Г.* // РЭ. 1999. Т. 44. № 7. С. 817.
4. *Лопатин А.В., Казанцева Н.Е., Казанцев Ю.Н. и др.* // РЭ. 2008. Т. 53. № 5. С. 517.
5. *Казанцев Ю.Н., Бабаян В.А., Казанцева Н.Е. и др.* // РЭ. 2013. Т. 58. № 3. С. 264.
6. *Лопатин А.В., Казанцева Н.Е., Казанцев Ю.Н. и др.* // РЭ. 2008. Т. 53. № 9. P. 1176.
7. *Kazantsev Y.N., Lopatin A.V., Kazantseva N.E. et al.* // IEEE Trans. 2010. V. AP-58. № 4. С. 1227
8. *Бабаян В.А., Казанцев Ю.Н., Лопатин А.В. и др.* // РЭ. 2011. Т. 56. № 11. С. 1377.
9. *Xu H., Bie Sh., Jiang J. et al.* // J. Electromagn. Waves Appl. 2015. V. 29. № 1. P. 60.
10. *Zhang L., Zhou P., Zhang H. et al.* // IEEE Trans. 2014. V. Magn-50. № 5. P. 4004305-1.
11. *Казанцев Ю.Н.* // РЭ. 1959. Т. 4. № 9. С. 1480.
12. *Вайнштейн Л.А.* Теория дифракции и метод факторизации. М.: Сов. радио, 1966.