

УДК 621.371, 621.372

## ТЕМ – ВОЛНОВОД НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО МАГНИТНОГО ПРОВОДНИКА ИЗ РЕШЁТОК ЁМКОСТНОГО ТИПА

О. А. Дьяконова, Ю. Н. Казанцев

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова  
РАН, 141190, Московская область, г. Фрязино, пл. академика Введенского, д.1

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2018 г.

**Аннотация.** Предложена новая реализация ТЕМ-волновода на основе искусственного магнитного проводника, выполненного из периодических решёток ёмкостного типа. Получены простые выражения для расчета структуры электромагнитного поля в таком волноводе. Показано, что вблизи резонансной частоты искусственного магнитного проводника структура поля во внутренней полости волновода близка к полю ТЕМ-волны. Экспериментально подтверждено, что полоса прохождения по ТЕМ - волноводу связана с величиной рабочей полосы искусственного магнитного проводника.

**Ключевые слова:** искусственный магнитный проводник, периодические решётки ёмкостного типа, структура электромагнитного поля, ТЕМ-волна, резонансная частота.

**Abstract.** A new realization of a TEM-waveguide based on an artificial magnetic conductor made of periodic grids of capacitive type is proposed. The paper considers a rectangular TEM-waveguide, in which two “narrow” walls are made of artificial magnetic conductor on the basis of two gratings made of metal elements of square shape. Simple expressions are obtained to calculate the structure of the electromagnetic field in such a waveguide. As a calculation model, a TEM-waveguide with an internal cavity size of 16x24 mm<sup>2</sup> (a=16mm, B =24mm) is taken. The approximate boundary conditions on the artificial magnetic conductor surface were used to calculate the main characteristics of the TEM-waveguide (transverse wave number, constant propagation, field distribution). The transmission frequency bands is evaluated in the case of a TEM-waveguide excited by a quasiuniform field. It is shown that near the resonant frequency of the artificial magnetic conductor the structure of the field in the internal cavity of the waveguide is close to the field of the

TEM-wave. It is experimentally confirmed that the passage band of the TEM-waveguide is determined by the value of the operating band of the artificial magnetic conductor.

**Key words:** artificial magnetic conductor, periodic gratings of capacitive type, electromagnetic field structure, TEM -wave, resonant frequency.

## Введение

В последнее двадцатилетие оформилось новое научное направление по материалам с необычными электромагнитными свойствами так называемым метаматериалам. Искусственные магнитные проводники (ИМП) или иначе материалы с высоким поверхностным импедансом обычно относят метаматериалам [1-5]. К числу известных применений ИМП относятся следующие:

- а) малогабаритные антенны, включая антенны с уменьшенным профилем [6-12];
- б) миниэкраны электромагнитного излучения [13-16];
- в) тонкие радиопоглотители [17];
- г) волноводы с однородной волной TEM [18-19].

Среди упомянутых здесь работ определённый интерес представляют статьи [18-19] по TEM-волноводам со стенками с высоким импедансом. Такие TEM- волноводы предлагались для эффективного сложения выходной мощности от большого числа активных устройств. В качестве других применений могут рассматриваться возможность уменьшения поперечного сечения полого волновода при увеличении длины волны передачи, а также возможность формирования однородного поля на выходной апертуре плавного рупора, например, в целях измерения полей рассеяния от различных физических тел.

В прямоугольном TEM-волноводе, описанном в работе [18], две широкие стенки - металлические, а две другие имеют свойства ИМП и представляют собой периодические решётки из резонансных  $C - L$  элементов сложной формы

на тонких диэлектрических подложках, металлизированных с внешней стороны.

Теоретически и экспериментально показано, что на резонансной частоте и вблизи неё фазовая скорость в волноводе близка к скорости в свободном пространстве, а структура поля в поперечном сечении к структуре плоской волны. Теоретически показана возможность масштабного моделирования для различных диапазонов частот, однако отсутствуют указания на возможность управления другими характеристиками волновода, например, шириной рабочей полосы. Поэтому определённый интерес представляет исследование эффективности применения других типов ИМП для реализации ТЕМ-волновода.

Так в настоящей работе будет рассмотрен прямоугольный ТЕМ-волновод, в котором две “узкие” стенки выполнены из ИМП на основе решёток ёмкостного типа [3].

## 1. Прямоугольный ТЕМ - волновод

Поперечное сечение прямоугольного ТЕМ-волновода показано на рис. 1а.

Две стенки волновода, параллельные  $\vec{E}$  вектору выполнены из ИМП на основе двух решёток из металлических элементов квадратной формы. Детальное изображение структуры ИМП дано на рис. 1б.

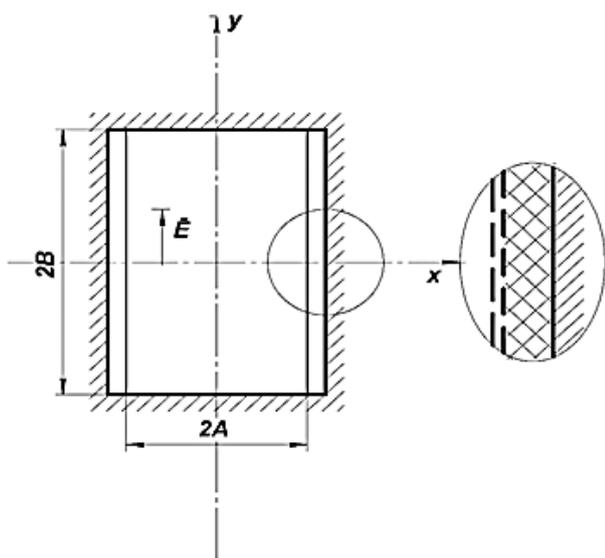


Рис. 1а

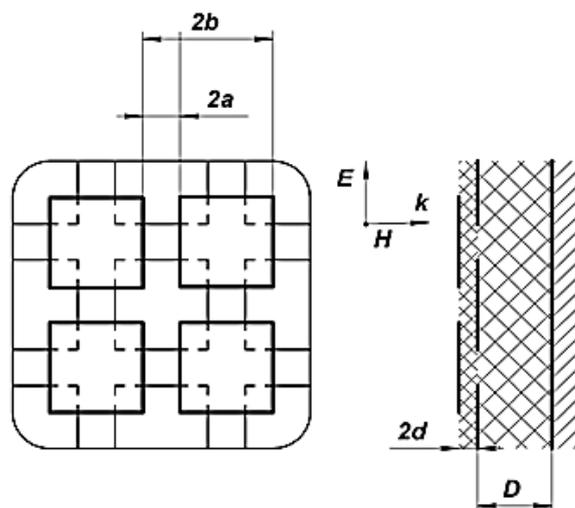


Рис. 1б.

Рис. 1. Структура искусственного магнитного проводника.

Характеристики такой структуры были изучены в работе [3], и там, в частности, было показано, что её эквивалентное сопротивление  $Z$  не зависит от угла падения волн ТЕМ-поляризации. Простая формула для эквивалентного сопротивления  $Z$  может быть легко получена из выражений, приведённых в [3]:

$$Z = j \frac{k(D + 2d)}{1 - \frac{k^2 D \varepsilon (b - 2a)b}{2d}}, \quad (1)$$

где размеры  $D$ ,  $d$ ,  $b$  и  $a$  показаны на рис.1б;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость плёнки между решётками;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  и  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве.

Величина  $Z$  определяет структуру поля во внутренней полости волновода:

$$\begin{aligned} E_y &= jkN \cos \alpha_x x e^{-jhZ}, \\ H_x &= -jhN \cos \alpha_x x e^{-jhZ}, \\ H_z &= \alpha N \sin \alpha_x x e^{-jhZ}, \\ k^2 &= \alpha^2 + h^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где поперечное волновое число удовлетворяет дисперсионному уравнению

$$j \frac{kA}{\alpha_x A} \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_x A} = Z \quad (3)$$

Подставив в уравнение (3) формулу для  $Z$ , получим выражение для вычисления  $\alpha_x$ :

$$\alpha_x A \operatorname{tg} \alpha_x A = \frac{A}{D + 2d} \left( 1 - \frac{k^2 D (b - 2a)b \varepsilon}{2d} \right), \quad (4)$$

При некотором резонансном значении  $k_p$  выражение в круглых скобках формулы (4), а, следовательно, и  $\alpha_x$  обращаются в нуль, т. е. поле во внутренней полости становится однородным и распространяется с фазовой постоянной  $k=k_p$ .

При  $k < k_p$   $\alpha_x$  – действительное число и волна – быстрая, как в обычном металлическом волноводе; при  $k > k_p$   $\alpha_x$  – мнимое число, волна становится

замедленной и описывается гиперболическими функциями. Резонансная частота

$f_p = \frac{k_p c}{2\pi}$  ( $c$  – скорость света) определяется следующей формулой:

$$f_p = \frac{c}{\pi\sqrt{2}\sqrt{\frac{\varepsilon D b(b-2a)}{d}}}. \quad (5)$$

Ширина  $2\Delta f$  рабочей полосы ИМП, в которой фаза коэффициента отражения меняется в интервале  $\pm \frac{\pi}{2}$ , вычисляется по формуле

$$2\Delta f = \frac{f_p}{Q}, \quad (6)$$

где добротность  $Q$  равна

$$Q = \sqrt{\frac{\varepsilon b(b-2a)}{2dD}}. \quad (7)$$

## 2. Результаты расчёта

В качестве расчётной модели взят ТЕМ-волновод с размерами внутренней полости  $16 \times 24 \text{ мм}^2$  ( $A=16\text{мм}$ ,  $B=24\text{мм}$ ), т. е. ширина составляет  $1/3$  от ширины стандартного прямоугольного волновода сечением  $48 \times 24 \text{ мм}^2$ , а высота равна высоте этого волновода. Две вертикальные стенки представляют собой ИМП - структуру со следующими размерами:  $D=1\text{мм}$ ,  $2d=0.07\text{мм}$ ,  $2b=4\text{мм}$ ,  $2a=0.3\text{мм}$ ; диэлектрическая проницаемость плёнки между решётками  $\varepsilon = 2.3$ .

Резонансная частота ИМП и относительная ширина рабочей полосы, рассчитанные по формулам (5) - (7) составляют  $4,5 \text{ ГГц}$  и  $0.1$  соответственно. В таблице 1 представлены результаты расчета  $k$ ,  $\alpha$ ,  $\alpha_A$ ,  $h$  в частотном диапазоне  $3.4 \dots 5.8 \text{ ГГц}$ .

На рис.2 даны частотные зависимости модулей этих же величин. Как следует из данных таблицы 1 и кривых рис.2, поперечное волновое число  $\alpha_x$  на частотах меньше  $f_p$  является действительной, а на частотах больше  $f_p$  -

мнимой величиной. Соответственно действительное значение постоянной распространения  $h$  на частотах меньше  $f_p$  не превосходит величину  $k$ , а на частотах больше  $f_p$  оказывается больше  $k$ , т.е. волна становится замедленной. На частотах ниже частоты отсечки  $f_0 = 4.3 ГГц$  постоянная распространения становится мнимой величиной, и волна затухает.

Таблица 1.

<i>№</i>	<i>f, ГГц</i>	<i>k, 1/см</i>	<i>α, 1/см</i>	<i>α A</i>	<i>h, 1/см</i>
1	3,4	0,712	1,516	1,213	1,338i
2	3,6	0,754	1,450	1,167	1,248i
3	3,8	0,796	1,355	1,103	1,126i
4	4,0	0,838	1,207	1,011	0,947i
5	4,2	0,880	0,943	0,865	0,628i
6	4,31982	0,905	0,905	0,724	0
7	4,4	0,922	0,728	0,582	0,565
8	4,51736	0,946	0	0	0,946
9	4,6	0,963	0,628i	0,502i	1,150
10	4,8	1,005	1,061i	0,849i	1,462
11	5,0	1,047	1,280i	1,024i	1,654
12	5,2	1,089	1,418i	1,134i	1,788
13	5,4	1,131	1,512i	1,21i	1,888
14	5,6	1,173	1,581i	1,265i	1,969
14	5,8	1,215	1,634i	1,307i	2,036

На рис.3 показано распределение электрического поля  $E$  в поперечном сечении волновода на пяти частотах  $f_1 = f_p$ ,  $f_2, f_3 < f_p$  и  $f_4, f_5 > f_p$ .

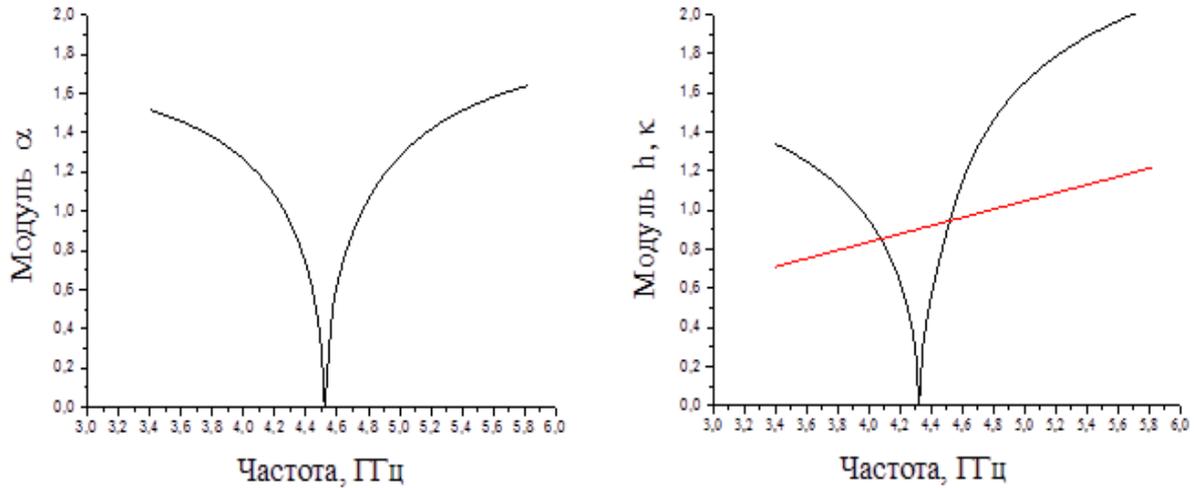


Рис.2. Частотные зависимости модулей  $\alpha$ ,  $h$  и  $k$  (красная линия).

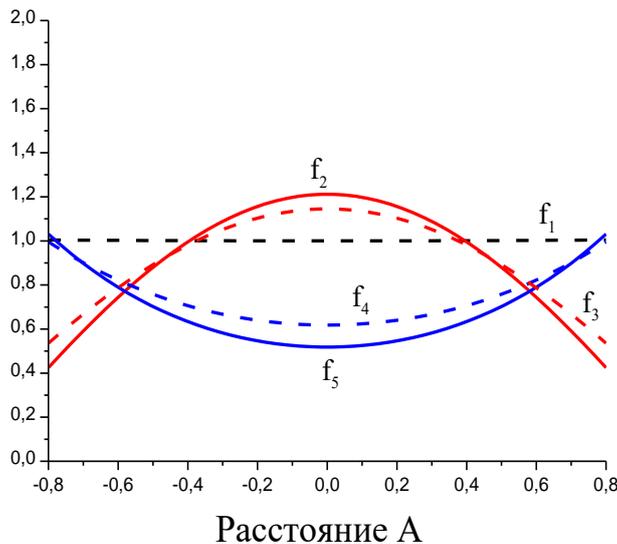


Рис.3. Распределение электрического поля  $E$  в поперечном сечении волновода.

Как и следует ожидать распределение поля на частотах  $f_2 = 3.4 \text{ ГГц}$  и  $f_3 = 3.8 \text{ ГГц}$  соответствует “быстрой” волне, на частоте  $f_1 = 4.5 \text{ ГГц}$  - ТЕМ-волне и на частотах  $f_4 = 5 \text{ ГГц}$ ,  $f_5 = 5.8 \text{ ГГц}$  - замедленной волне. Для интенсивностей  $\bar{E}$  на рис.3 принята нормировка, по которой мощности, передаваемые на

различных частотах одинаковы, а интенсивность электрического поля на резонансной частоте равна единице:

$$\begin{aligned}
 \text{при } f < f_p \quad N &= \sqrt{\frac{2A\alpha_x}{kh\left(\frac{1}{2}\sin 2\alpha_x A + \alpha_x A\right)}}, \\
 \text{при } f > f_p \quad N &= \sqrt{\frac{2A|\alpha_x|}{kh(\operatorname{sh}|\alpha_x|A \operatorname{ch}|\alpha_x|A + |\alpha_x|A)}}, \\
 \text{при } f = f_p \quad N &= \frac{1}{k}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

### 3. Результаты эксперимента

Целью эксперимента была оценка частотной полосы передачи при возбуждении ТЕМ-волновода полем стандартного волновода. Для этого были изготовлены 2 образца волновода длиной 50мм и 100мм с размерами внутренней полости  $A \times B=16 \times 24$ мм и теми же размерами ИМП-структуры, что и у расчётной модели. Каждый из образцов выполнен в виде стержня из пенополистирола ( $\epsilon = 1.05$ ), на узкие грани которого нанесена металлизация, а на широкие грани наклеена ИМП-структура.

Для измерения коэффициента прохождения образцы ТЕМ-волновода помещались в середину стандартного прямоугольного волновода сечением  $48 \times 24 \text{ мм}^2$  с волной так, как показано на рис.4.

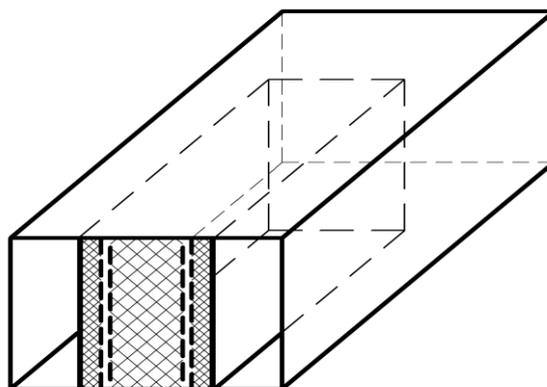


Рис. 4. Схематичное изображение расположения образца ТЕМ-волновода.

В такой конструкции прохождение сигнала возможно только через ТЕМ-волновод, поскольку каналы по обоим сторонам от образца являются

запредельными для рабочего диапазона частот. Коэффициент прохождения  $T$  через стандартный прямоугольный волновод с образцом ТЕМ-волновода внутри него измеряется на автоматизированном стенде, описанном в [20]. Измеренные частотные зависимости коэффициента прохождения для образцов ТЕМ-волноводов представлены на рис.5а (образец длиной 100мм) и 5б (образец длиной 50мм).

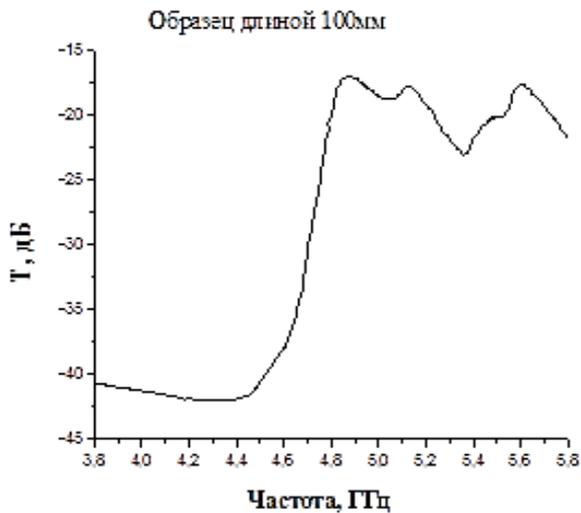


Рис.5а.

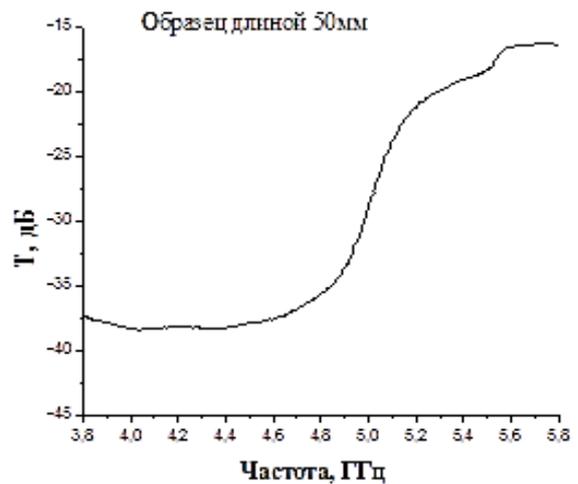


Рис.5а.

Рис.5. Частотные зависимости коэффициента прохождения образцов ТЕМ – волновода.

Как следует из этих зависимостей расположение полосы прохождения сигналов по ТЕМ-волноводу согласуется с предварительной теоретической оценкой рабочего диапазона ИМП.

## Заключение

Применение ИМП на основе двух близко расположенных ёмкостных решёток позволило реализовать новую модификацию прямоугольного ТЕМ-волновода, в котором две горизонтальные стенки - металлические, а две вертикальные - из ИМП. При расчёте основных характеристик ТЕМ-волновода (поперечного волнового числа, постоянной распространения, распределения поля) на поверхности ИМП были использованы приближенные граничные условия импедансного типа. Ширина расчётной модели волновода составляла

1/3 от ширины стандартного волновода сечением  $48 \times 24 \text{ мм}^2$ , а высота равна высоте этого волновода. Было показано, что по такому “узкому” волноводу в определенной полосе частот может распространяться волна, поле которой близко к однородному, а постоянная распространения к волновому числу свободного пространства. Измерение коэффициента прохождения в экспериментальных образцах показало, что расположение полосы прохождения сигналов по ТЕМ-волноводу согласуется с теоретической оценкой рабочего диапазона ИМП.

### Литература

1. D. Sievenpiper, L. Zhang, R. J. Broas, N. G. Alexopolous, E. Yablonovitch. High-Impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band // IEEE Transactions on microwave theory and techniques, vol.47, no. 11, pp. 2059-2074, Nov. 1999.
2. D.J. Kern, D.H. Werner, A. Monorchio, L. Lanuzza, M.J. Wilhelm. The design synthesis of multiband artificial magnetic conductors using high impedance frequency selective surfaces // IEEE Transactions on antennas and propagation, vol.53, no. 1, pp. 8-16, 2005.
3. Ю. Н. Казанцев, В. Н. Аплеталин. Искусственные магнитные проводники на основе решеток емкостного типа // Радиотехника и электроника, т.52, №4, с. 415-423, 2007.
4. В. Н. Аплеталин, Ю. Н. Казанцев, А.Д.Шатров. Тонкие экраны со свойствами магнитной стенки, основанные на мелкопериодных решетках из резонаторов Гельмгольца // Радиотехника и электроника, т.54, №3, с. 295-301, 2009.
5. C.R.Simovski, P. de Maagt, S.A. Tretyakov, M. Paquay, A.A.Sochava. Angular stabilization of resonant frequency of artificial magnetic conductors for TE-incidence // Electronics letters, vol.40, no. 2, pp. 92-93, 22<sup>nd</sup> January 2004.
6. R.F.J. Broas, D. Sievenpiper, E. Yablonovitch. High-impedance ground plane applied to a cellphone handset geometry // IEEE Transactions on microwave theory and techniques, vol.49, no. 7, pp. 1262-1265, July 2001.

7. R. Coccioli, F-R. Yang, K-P Ma, T. Itoh. Aperture-coupled patch antenna on UC-PBG substrate // IEEE Transactions on microwave theory and techniques, vol.47, no. 11, pp. 2123-2129, Nov. 1999.
8. F. Yang and Y. Rahmat-Samii. Reflection phase characterizations of the EBG ground plane for low profile wire antenna applications // IEEE Transactions on antennas and propagation, vol.51, no. 10, pp. 2691-2703, Oct. 2003.
9. Y. Zhang, J.von Hagen, M. Younis, C. Fischer, W. Wiesbeck. Planar artificial magnetic conductors and patch antennas // IEEE Transactions on antennas and propagation, vol.51, no. 10, pp. 2704-2711, Oct. 2003.
10. R.F.J. Broas, D. Sievenpiper, E.Yablonovitch. An applications of high-impedance ground planes to phased array antennas // IEEE Transactions on antennas and propagation, vol.53, no. 4, pp. 1377-1381, April 2005.
11. A.Erentok, P.L.Luljak, R.W. Ziolkowski. Characterization of a volumetric metamaterial realization of an artificial magnetic conductor for antenna applications // IEEE Transactions on antennas and propagation, vol.53, no. 1, pp. 160-172, January 2005.
12. A.P.Feresidis, G.Goussetis, S.Wang, C.Vardaxoglou. Artificial magnetic conductor surfaces and their application to low-profile high-gain planar antennas // IEEE Transactions on antennas and propagation, vol.53, no. 1, pp. 209-215, January 2005.
13. Ю. Н. Казанцев, В. Н. Аплеталин, В. С. Солосин. Мини-экраны электромагнитного излучения //Радиотехника и электроника, т.53, №3, с. 316-319, 2008.
14. Ю. Н. Казанцев, В. Н. Аплеталин, В. С. Солосин. Реализация электромагнитных экранов на частотах 0.9, 1.8 и 2.4 Гигагерц //Радиотехника и электроника, т.53, №8, с. 1-4, 2008.
15. Ю. Н. Казанцев, В. С. Солосин. Эффективная поверхность рассеяния и поверхностный импеданс резонатора со свойствами искусственного магнитного проводника //Радиотехника и электроника, т.59, №12, с. 1188-1194, 2014.

16. Ю. Н. Казанцев, В. Н. Аппеталин, В.А. Калошин. Электромагнитный экран с большим поверхностным импедансом. Патент RU 2379800 С2.
17. N. Engheta. Thin absorbing screens using metamaterial surfaces // IEEE Transactions on antennas and propagation, vol.2, pp. 392-395, January 2002.
18. F-R. Yang, K-P Ma, Y. Qian, T. Itoh. A novel TEM waveguide using uniplanar compact photonic-bandgap (UC-PBG) structure // IEEE Transactions on microwave theory and techniques, vol.47, no. 11, pp. 2092-2098, Nov. 1999.
19. M. Kim, J.B. Hacker, A.L.Sailer, S. Kim, D. Sievenpiper and J.A.Higgins. A rectangular TEM waveguide with photonic crystal Walls for Excitation of quasi-optical amplifiers // IEEE MTT –S Microwave Symp. Dig. Anaheim, CA. pp. 543-546, June 13-19 1999.
20. О. А. Дьяконова, Д. С. Каленов, Ю. Н. Казанцев. Автоматизированный измерительный комплекс на основе комплекта скалярных анализаторов // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал, №10, 2016.  
URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct16/7/text.pdf>

**Ссылка на статью:**

О. А. Дьяконова, Ю. Н. Казанцев. TEM-волновод на основе искусственного магнитного проводника из решеток емкостного типа. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb18/9/text.pdf>