

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.874;621.396

ЭКРАНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ИСКУССТВЕННЫМ МАГНИТНЫМ ПРОВОДНИКОМ
НА ОСНОВЕ АНИЗОТРОПНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
ИЗ ЕМКОСТНЫХ РЕШЕТОК

© 2022 г. Ю. Н. Казанцев^{а, *}, Г. А. Крафтмахер^а, В. П. Мальцев^а, В. С. Солосин^{а, б}

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

^бИнститут теоретической и прикладной электродинамики РАН,
ул. Ижорская, 13, Москва, 125412 Российская Федерация

*E-mail: yukazantsev@mail.ru

Поступила в редакцию 19.01.2021 г.

После доработки 17.03.2021 г.

Принята к публикации 25.05.2021 г.

Изучены характеристики искусственного магнитного проводника (ИМП) на основе анизотропного композиционного материала из емкостных решеток с металлическими элементами в форме квадратов либо полосок, каждая из которых сдвинута на полпериода относительно двух соседних. Даны аналитические выражения для оценки диэлектрической проницаемости композиционного материала и сформулировано условие их применимости, которое было апробировано путем численного расчета. Показана возможность применения такого ИМП как малогабаритного экрана с полосой экранирования до 30% при расположении дипольного излучателя практически на его поверхности.

DOI: 10.31857/S0033849422080071

ВВЕДЕНИЕ

Структуры с высоким поверхностным импедансом, или иначе искусственные магнитные проводники (ИМП), обычно относят к классу метаматериалов, т.е. материалов с необычными электромагнитными характеристиками. Особенностью искусственных магнитных проводников является то, что коэффициент отражения от их поверхности равен +1, а не –1 как в случае отражения от металлической поверхности.

Типичным примером ИМП является грибообразная структура, предложенная в [1, 2]. Там же было показано, что в определенном диапазоне частот вдоль поверхности этой структуры не могут распространяться поверхностные волны. Это обусловлено тем, что грибообразная структура образует решетку из большого числа резонаторов и в частотной полосе коллективного резонанса шириной до 10...15% резко возрастает поверхностный импеданс. Позже в ряде работ были исследованы различные реализации грибообразной структуры [3–5] и другие типы ИМП на основе емкостных решеток и частотно селективных поверхностей [6–8]. Достаточно ясно определились и области возможных применений ИМП, а именно: земляная плоскость низкопрофильных ан-

тенн в антенной технике [9–11], в радиопоглотителях для уменьшения толщины и улучшения частотно-угловых характеристик [12–14], в технике мобильной связи как малогабаритные экраны для защиты пользователей от электромагнитного излучения [3, 15, 16]. В последнем случае при использовании в мобильном устройстве малоразмерных антенн становится весьма важным уменьшение размеров экрана. Так, в работах [15, 16] был предложен и исследован экран в виде отдельного плоского минирезонатора с емкостной связью с окружающим пространством. Было показано, что в частотной полосе резонанса на поверхности резонатора создаются условия искусственного магнитного проводника [17]. Естественно, ширина полосы частот зависит от габаритов резонатора.

В работе [6] был предложен ИМП на основе композиционного материала с высокой анизотропией диэлектрической проницаемости, выполненного из емкостных решеток. Было показано, что на поверхности такого ИМП могут распространяться лишь слабозамедленные волны, которые слабо возбуждаются малоразмерными антеннами.

В данной работе изучена зависимость диэлектрических характеристик композиционного материала из емкостных решеток от размеров его

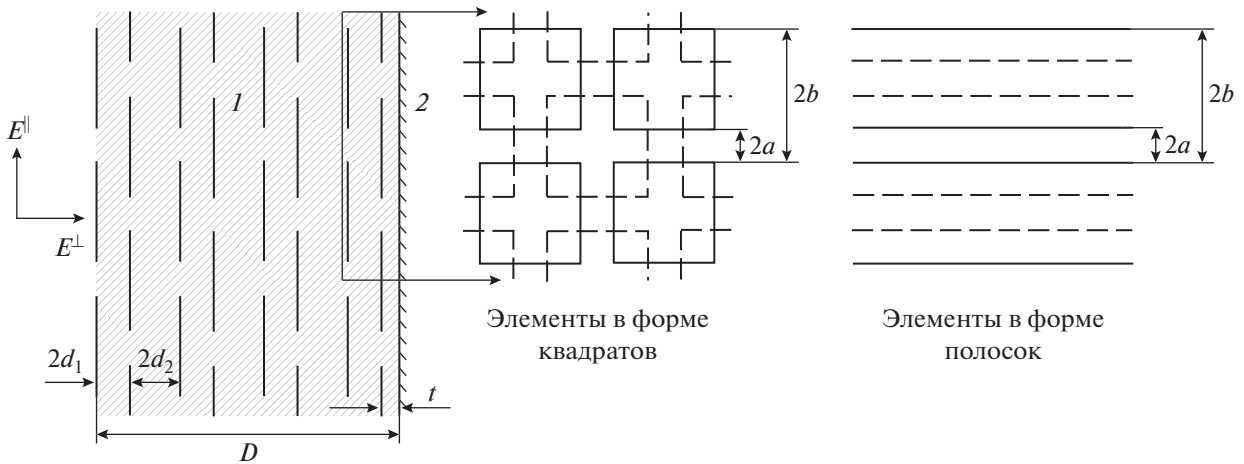


Рис. 1. Структура ИМП на основе композиционного материала: 1 – композит, 2 – металлический экран.

структуры, а также характеристики экранирования электромагнитного излучения ИМП-экранами на основе этого материала.

1. ИМП ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЕМКОСТНЫХ РЕШЕТОК

На рис. 1 представлена структура ИМП на основе композиционного материала с высокой анизотропией диэлектрической проницаемости, которая включает в себя слой 1 композиционного материала и металлический экран 2. Слой 1 состоит из множества емкостных решеток с металлическими элементами в форме квадратов либо полосок, причем каждая из решеток сдвинута на полпериода b относительно соседних по обеим поперечным координатам x и y . Расстояние между нечетной и следующей четной решетками равняется $2d_1$, а расстояние между четной и следующей нечетной равно $2d_2$. Размеры структур, указанные на рис. 1, удовлетворяют следующим условиям: $2b \ll \lambda$, $a \ll b$, $d_1 + d_2 \ll b$, где λ – длина волны. Эквивалентная диэлектрическая проницаемость композиционного материала для электрического поля E^{\parallel} , направленного вдоль решеток, велика и в частном случае, при $d_1 = d_2$, может быть оценена по следующей формуле [6]:

$$\epsilon^{\parallel} = \frac{\epsilon b(b - 2a)}{4d_1^2}, \tag{1}$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость материала между решетками. Для электрического поля E^{\perp} , перпендикулярного решеткам, эквивалентная диэлектрическая проницаемость равна проницаемости материала между решетками:

$$\epsilon^{\perp} = \epsilon. \tag{2}$$

Используя метод длинных линий и теорию электрических цепей несложно получить формулу для оценки ϵ^{\parallel} в другом частном случае, при $d_1 \ll d_2$ или $d_1 \gg d_2$:

$$\epsilon^{\parallel} = \frac{\epsilon b(b - 2a)}{4d_{1,2}(d_1 + d_2)}, \tag{3}$$

где индекс 1 или 2 в $d_{1,2}$ относится к слою меньшей толщины.

Отметим, что формулы (1) и (3) справедливы лишь при выполнении условия

$$\delta = \frac{\pi \epsilon (b - 2a)b}{2d_{1,2}\lambda} \ll 1, \tag{4}$$

которое означает, что коэффициент отражения от отдельной пары решеток мал по сравнению с единицей. В противном случае электромагнитные свойства анизотропного материала нельзя строго описать эквивалентной диэлектрической проницаемостью. Этот факт будет подтвержден численным расчетом коэффициента отражения от слоя анизотропного материала из большого, но конечного, числа емкостных решеток.

Слой анизотропного диэлектрика, расположенный на металлической плоскости, при нормальном падении на него плоской волны резонирует на частоте f_p , равной:

$$f_p = \frac{c}{4D\sqrt{\epsilon^{\parallel}}}, \tag{5}$$

где c – скорость света.

В окрестности резонансной частоты эта структура обладает свойствами ИМП, поскольку коэффициент отражения от нее на резонансной частоте равен +1. При этом, как было показано в работе [6], в окрестности резонансной частоты в рассматриваемой структуре могут распространяться лишь

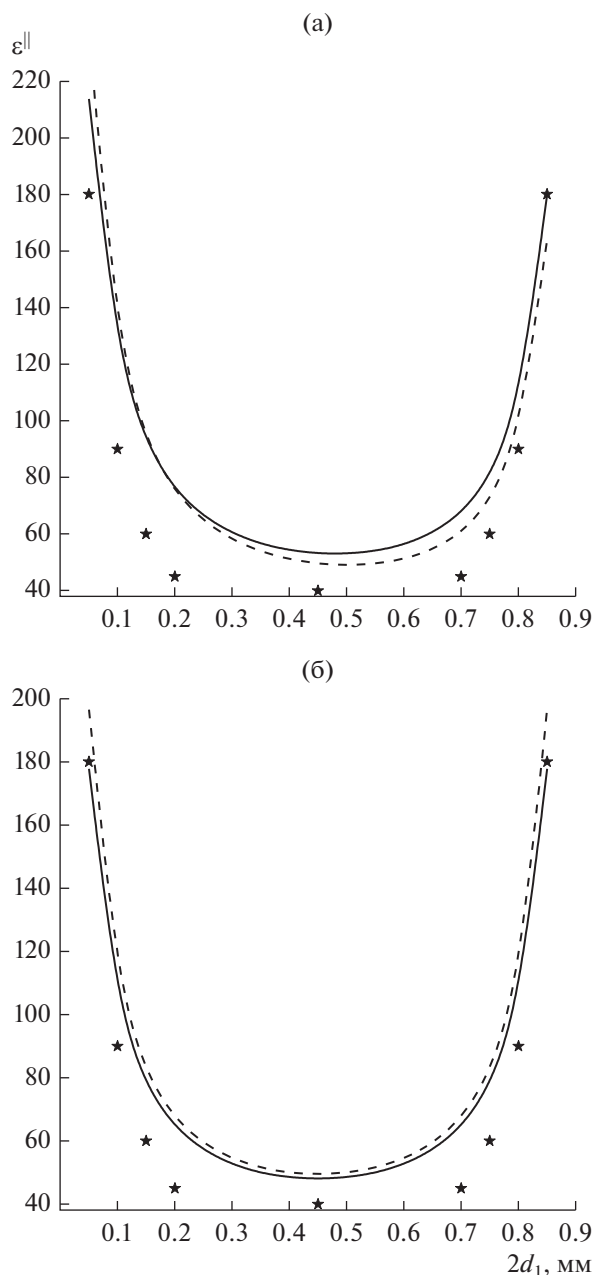


Рис. 2. Зависимость эквивалентной диэлектрической проницаемости ϵ^{\parallel} от $2d_1$ для композитов с элементами в виде квадратов (сплошные кривые) и в виде полосок (штриховые) из 20 (а) и 21 (б) решетки, звездочками отмечены расчеты, полученные по формулам (1) и (3).

слабозамедленные поверхностные волны, эффективность возбуждения которых малоразмерными источниками мала. Указанные свойства являются основанием для применения ИМП данного типа в качестве земляной плоскости и миниэкрана для малоразмерных антенн. Для реализации этой цели проведен численный расчет

зависимости диэлектрической проницаемости рассматриваемого анизотропного композиционного материала от расстояний между решетками для $\delta \ll 1$ и $\delta \geq 1$ и на конкретной модели ИМП малых размеров определены характеристики экранирования излучения антенны, расположенной вблизи поверхности ИМП.

2. ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ЗАВИСИМОСТИ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ АНИЗОТРОПНОГО КОМПОЗИТА ОТ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ РЕШЕТКАМИ

Эквивалентную диэлектрическую проницаемость ϵ^{\parallel} композита определяли на частотах f_m резонанса в слое конечной толщины L и бесконечных поперечных размеров при нормальном падении на слой плоской волны:

$$\epsilon^{\parallel} = \left(\frac{mc}{2Lf_m} \right)^2, \quad (6)$$

где m – номер резонанса, начиная с самой низкой резонансной частоты. Резонансные частоты слоя композита определяли по минимумам частотной зависимости коэффициента отражения.

Все результаты расчета эквивалентной диэлектрической проницаемости ϵ^{\parallel} , приведенные далее, получены для низшего резонанса ($m = 1$), однако следует указать, что они практически не отличаются от аналогичных результатов для $m = 2$ и 3.

Были рассчитаны диэлектрические проницаемости для двух случаев: четного ($n = 20$) и нечетного ($n = 21$) числа решеток. В случае $n = 20$ первая и последняя решетки в слое были сдвинуты по отношению друг к другу на полпериода, а в случае $n = 21$ сдвига не было. Композит состоял из решеток с элементами в форме квадратов или полосок с периодом $2b = 6$ мм при расстоянии между элементами $2a = 0.3$ мм. Расстояние $2(d_1 + d_2)$ между решетками одинакового типа (четные или нечетные) было взято равным 0.9 мм, а расстояние $2d_1$ между нечетной и следующей четной решетками менялось в интервале 0.05...0.85 мм. Диэлектрическая проницаемость среды между решетками принята равной 1.

В табл. 1 представлены рассчитанные резонансные частоты и соответствующие значения эквивалентной диэлектрической проницаемости ϵ^{\parallel} для 17-ти значений $2d_1$, а на рис. 2а даны графики зависимости ϵ^{\parallel} от $2d_1$ для композита из 20 решеток, как с квадратными элементами, так и с элементами в виде полосок.

В табл. 2 и на рис. 2б представлены аналогичные результаты для композита из 21 решетки.

Таблица 1. Резонансные частоты и значения эквивалентной диэлектрической проницаемости $\epsilon^{\parallel} = [c/(2Lf_1)]^2$ композита из 20 решеток

$2d_1$, мм	L , мм	Элементы в форме квадратов		Элементы в форме полосок		ϵ^{\parallel} аналитически
		f_1 , ГГц	ϵ^{\parallel} численно	f_1 , ГГц	ϵ^{\parallel} численно	
0.05	8.15	1.259	213.71	1.197	236.42	180
0.1	8.2	1.666	123.96	1.612	128.77	90
0.15	8.25	1.938	91.77	1.889	92.64	60
0.2	8.3	2.134	75.64	2.089	74.84	45
0.25	8.35	2.278	66.31	2.236	64.55	—
0.3	8.4	2.384	60.38	2.344	58.04	—
0.35	8.45	2.458	56.58	2.42	53.81	—
0.4	8.5	2.506	54.34	2.468	51.13	—
0.45	8.55	2.53	53.17	2.492	49.56	40
0.5	8.6	2.528	53.08	2.491	49.03	—
0.55	8.65	2.502	53.99	2.464	49.53	—
0.6	8.7	2.45	56.29	2.41	51.18	—
0.65	8.75	2.365	60.39	2.323	54.46	—
0.7	8.8	2.24	67.29	2.194	60.36	45
0.75	8.85	2.058	79.75	2.008	71.25	60
0.8	8.9	1.793	105.23	1.737	94.15	90
0.85	8.95	1.375	179.77	1.309	163.93	180

Примечание: $2(d_1 + d_2) = 0.9$ мм, $L = 18(d_1 + d_2) + d_1$.

Заметные различия в приведенных зависимостях для четного и нечетного числа решеток, которые увеличиваются при малых значениях $2d_1$ связаны с нарушением условия (4).

На рис. 2а и 2б представлены результаты расчета диэлектрической проницаемости ϵ^{\parallel} , полученные по формулам (1) и (3). Эти же результаты приведены в табл. 1 и 2. Заметим, что при $d_1 \ll d_2$ и при $d_1 \gg d_2$ условие (4) ($\delta \ll 1$) не выполнялось, а при $d_1 = d_2 = 0.45$ мм величина $\delta = 0.48$ тоже была меньше единицы. Тем не менее в последнем случае результаты обоих численных расчетов ($n = 20$ и $n = 21$) и оценка по аналитической формуле (1) достаточно близки.

Однако для реализации искусственного магнитного проводника выполнение условия (4) для композита необходимым не является.

Так, были рассчитаны частотные зависимости фазы коэффициента отражения плоской волны от ИМП на основе композита с теми же формами и размерами структуры, что и при расчете эквивалентной диэлектрической проницаемости, а именно при $2b = 6$ мм, $2a = 0.3$ мм, $2(d_1 + d_2) = 0.9$ мм;

расстояние t между последней решеткой композита и металлическим экраном было взято равным 0.2 мм, а число решеток равным 9. Толщина структуры составила $D = 3.8$ мм. На рис. 3а и 3б представлены частотные зависимости фазы коэффициента отражения R от ИМП при трех значениях $2d_1 = 0.45$; 0.2 и 0.05 мм для случаев $\epsilon = 1$ и $\epsilon = 2.55$ соответственно. На этих кривых имеются резонансные частоты f_0 , при которых фазы коэффициента отражения равны нулю, т.е. структура является идеальным магнитным проводником. В табл. 3 указаны эти частоты, а также частоты f_{90} и f_{-90} , при которых фаза коэффициента отражения равна 90° либо -90° соответственно.

Результаты, представленные на рис. 3а, 3б и в табл. 3 указывают на два пути снижения резонансной частоты, а именно: уменьшение промежутка d_1 , т.е. группировка решеток по парам, либо использование диэлектрика с большой диэлектрической проницаемостью в области между решетками.

Численные расчеты были проведены методом моментов в программе FEKO.

Таблица 2. Резонансные частоты и значения эквивалентной диэлектрической проницаемости $\epsilon^{\parallel} = [c/(2Lf_1)]^2$ композита из 21 решетки

$d_1, \text{мм}^2$	Элементы в форме квадратов		Элементы в форме полосок		ϵ^{\parallel} аналитически
	$f_1, \text{ГГц}$	ϵ^{\parallel} численно	$f_1, \text{ГГц}$	ϵ^{\parallel} численно	
0.05	1.25	177.78	1.189	196.49	180
0.1	1.643	102.90	1.59	109.88	90
0.15	1.898	77.11	1.852	80.99	60
0.2	2.078	64.33	2.0355	67.04	45
0.25	2.206	57.08	2.167	59.15	—
0.3	2.298	52.60	2.26	54.39	—
0.35	2.36	49.87	2.322	51.52	—
0.4	2.394	48.47	2.359	49.92	—
0.45	2.406	47.99	2.37	49.45	40
0.5	2.394	48.47	2.359	49.92	—
0.55	2.36	49.87	2.322	51.52	—
0.6	2.298	52.60	2.26	54.39	—
0.65	2.206	57.08	2.167	59.15	—
0.7	2.078	64.33	2.0355	67.04	45
0.75	1.898	77.11	1.852	80.99	60
0.8	1.643	102.90	1.59	109.88	90
0.85	1.25	177.78	1.189	196.49	180

Примечание: $2(d_1 + d_2) = 0.9 \text{ мм}$, $L = 20(d_1 + d_2) = 9 \text{ мм}$.

Таблица 3. Резонансные частоты и ширина полосы ИМП

$2d_1, \text{мм}$	ϵ	$f_0, \text{ГГц}$	$f_{90}, \text{ГГц}$	$f_{-90}, \text{ГГц}$	$(f_{90} - f_{-90})/f_0, \%$
0.45	1	2.82 (2.8)	2.56 (2.54)	3.07 (3.06)	18 (18.6)
	2.55	1.796 (1.78)	1.686 (1.678)	1.905 (1.884)	12.2 (11.6)
0.2	1	2.3 (2.28)	2.13 (2.103)	2.48 (2.459)	15.2 (15.6)
	2.55	1.463 (1.444)	1.388 (1.372)	1.534 (1.515)	10 (9.9)
0.05	1	1.33 (1.296)	1.265 (1.235)	1.385 (1.357)	9 (9.4)
	2.55	0.837 (0.816)	0.812 (0.791)	0.862 (0.840)	6 (6)

Примечание. Значения f без скобок относятся к элементам в форме квадратов, в скобках — в форме полосок.

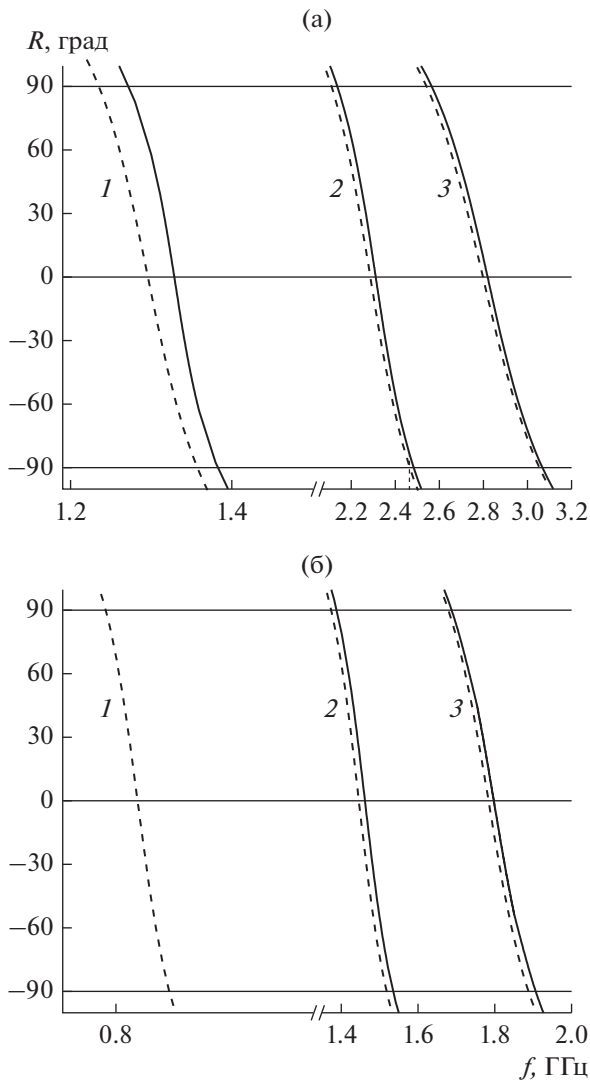


Рис. 3. Частотная зависимость фазы коэффициента отражения R от ИМП с элементами в виде квадратов (сплошные кривые) и в виде полосок (штриховые) при $2d_1 = 0.05$ (1), 0.2 (2) и 0.45 мм (3) для случаев $\epsilon = 1$ (а) и 2.55 (б).

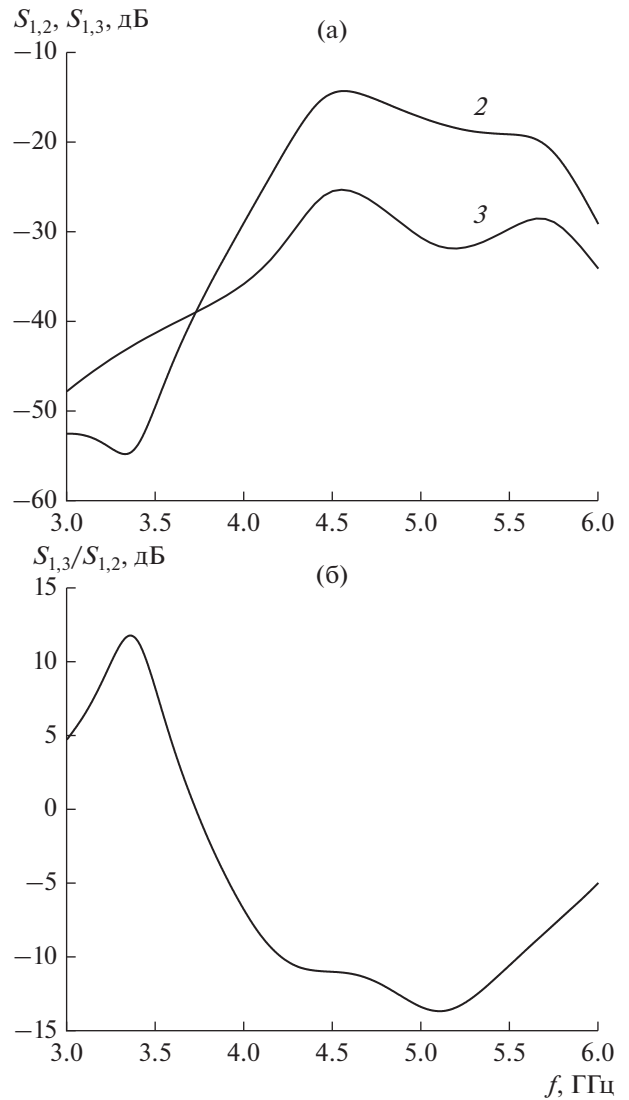


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента передачи $S_{1,2}$ и $S_{1,3}$ сигнала от антенны 1 к антеннам 2 и 3 (а) и отношение $S_{1,3}/S_{1,2}$ (б) для экрана с $\epsilon = 1$.

3. МАЛОГАБАРИТНЫЙ ЭКРАН НА ОСНОВЕ ИМП

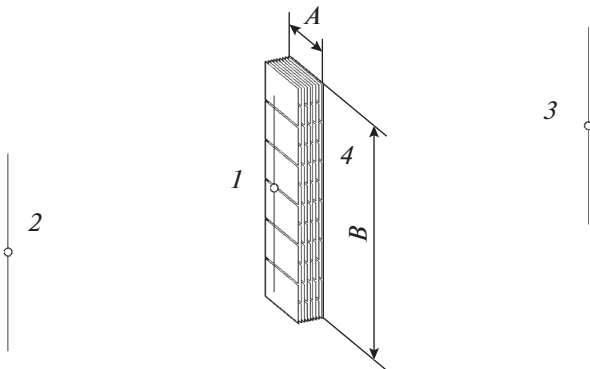


Рис. 4. Схема для определения полосы экранирования малогабаритного экрана: 1 – передающая антенна, 2 и 3 – приемные антенны, 4 – экран.

Малогабаритный экран 4, размер которого $A \times B$, показан на рис. 4 в схеме для определения характеристик экрана. Передающая антенна 1 расположена на расстоянии 1 мм от поверхности экрана, а приемные антенны 2 и 3 на расстоянии 70 мм от металлизированной грани экрана. В модели экрана был использован ИМП конечных размеров $A = 10$ мм и $B = 36.3$ мм, состоящий из девяти однопериодических решеток, сдвинутых на полпериода относительно друг друга и отстоящих друг от друга на расстоянии $2d_1 = 2d_2 = 0.45$ мм. Элементы решеток имели форму полосок, расположенных на расстоянии $2a = 0.3$ мм друг от друга с периодом $2b = 6$ мм. На рис. 5а для случая $\epsilon = 1$

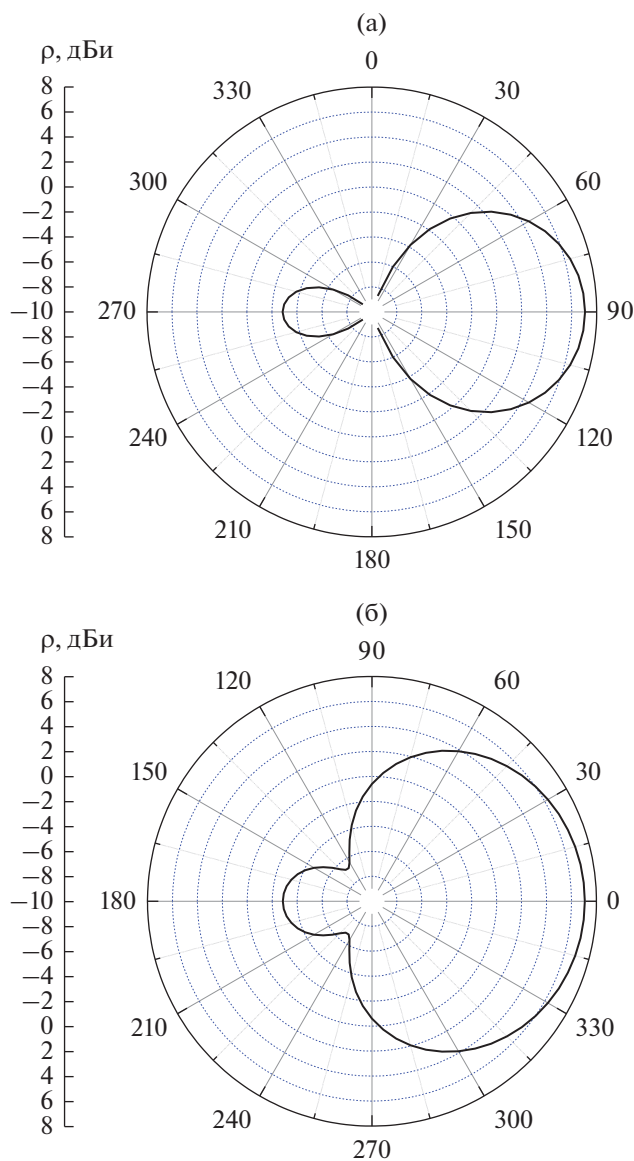


Рис. 6. Диаграммы направленности антенны с экраном при $\epsilon = 1$ на частоте 4.5 ГГц: а – в E -плоскости (зависимость от ϑ при $\varphi = 0$); б – в H -плоскости (зависимость от φ при $\vartheta = 90^\circ$).

представлены частотные зависимости коэффициента передачи $S_{1,2}$ и $S_{1,3}$ сигнала от антенны 1 к антеннам 2 и 3 соответственно, а на рис. 5б – отношение этих величин, показывающее эффект экранирования. Ширина полосы экранирования по уровню -10 дБ составила около 30%.

На рис. 6а и 6б даны диаграммы направленности антенны 1 с экраном на частоте 4.5 ГГц в плоскостях E и H в сферической системе координат ρ, ϑ, φ , подтверждающие эффект экранирования также и в дальней зоне. Центр системы координат совпадает с серединой антенны 1, а ось – с

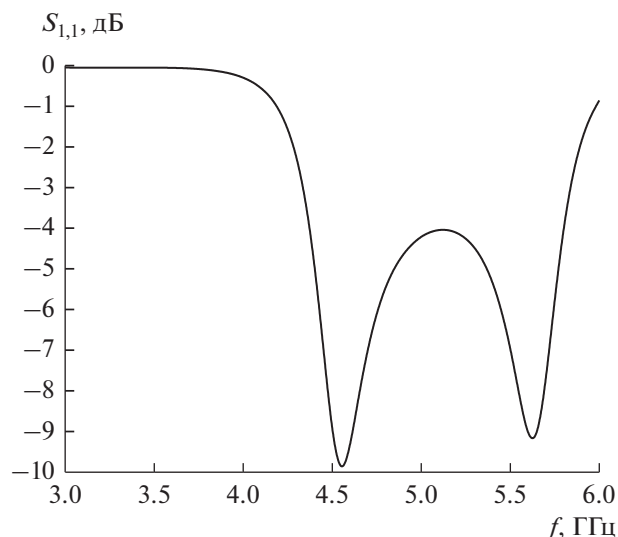


Рис. 7. Частотная зависимость коэффициента отражения в линию с волновым сопротивлением 50 Ом, питающую антенну 1.

осью антенны, причем угол φ отсчитывается от перпендикуляра к поверхности экрана.

На рис. 7 представлена частотная зависимость коэффициента отражения в линию с волновым сопротивлением 50 Ом, питающую антенну 1. Все три антенны представляли собой полуволновые диполи длиной 30 мм из провода диаметром 1 мм.

Из сравнения частотных зависимостей фазы коэффициента отражения от ИМП бесконечных поперечных размеров (см. рис. 3а) и характеристик экранирования малогабаритного экрана (см. рис. 5б) следует, что полоса рабочих частот ИМП и полоса экранирования не совпадают, причем вторая из них лежит по частоте существенно выше первой. Естественным способом уменьшения частот экранирования является понижение резонансной частоты структуры экрана путем использования диэлектрика с большой диэлектрической проницаемостью между решетками. Так, на рис. 8а дана частотная зависимость коэффициентов $S_{1,2}$ и $S_{1,3}$ для значения диэлектрической проницаемости среды между решетками $\epsilon = 2.55$. На рис. 8б представлена частотная кривая отношения этих коэффициентов. Из зависимостей, представленных на рис. 8а и 8б, следует, что область экранирования сместилась в сторону более низких частот, но полоса экранирования по уровню -10 дБ заметно не уменьшилась.

На рис. 9а и 9б представлены диаграммы направленности на частоте 3.5 ГГц в плоскостях E и H соответственно.

Следует указать, что рабочая полоса экрана может быть существенно уже полосы экранирования,

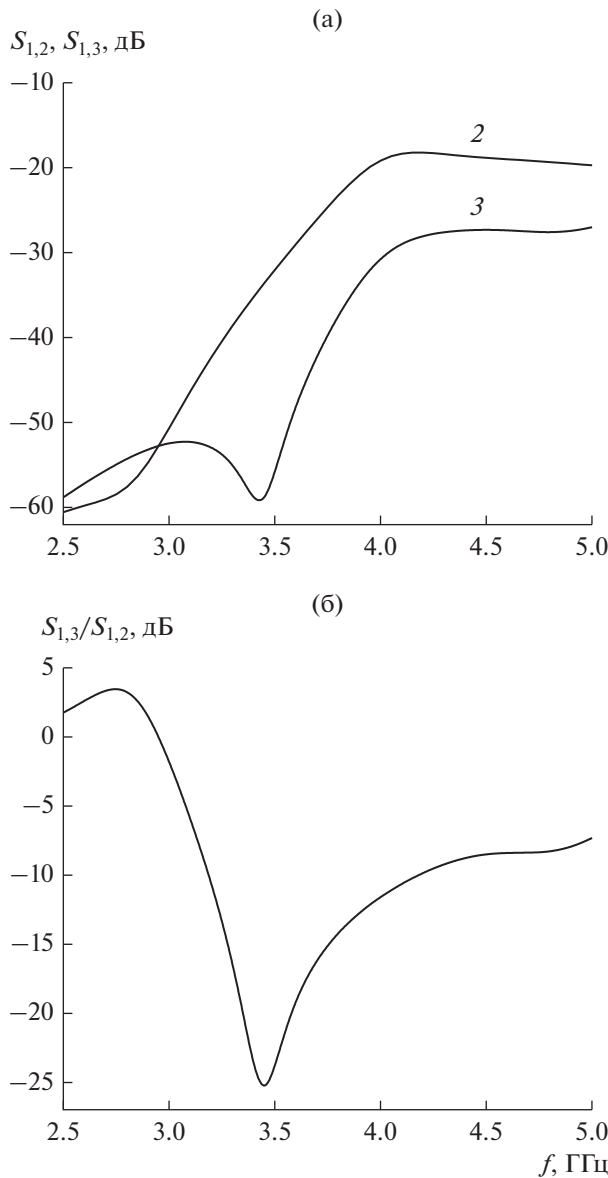


Рис. 8. Частотные зависимости коэффициента передачи $S_{1,2}$ и $S_{1,3}$ сигнала от антенны 1 к антеннам 2 и 3 (а) и отношение $S_{1,3}/S_{1,2}$ (б) для экрана с $\epsilon = 2.55$.

так как она зависит также от условий согласования антенны с питающей линией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен малогабаритный экран электромагнитного излучения, выполненный из анизотропного композитного материала, состоящего из ряда параллельных друг другу емкостных решеток, каждая из которых сдвинута по отношению к соседним на половину периода. Для оценки диэлектрической проницаемости композитного материала получены аналитические выражения и

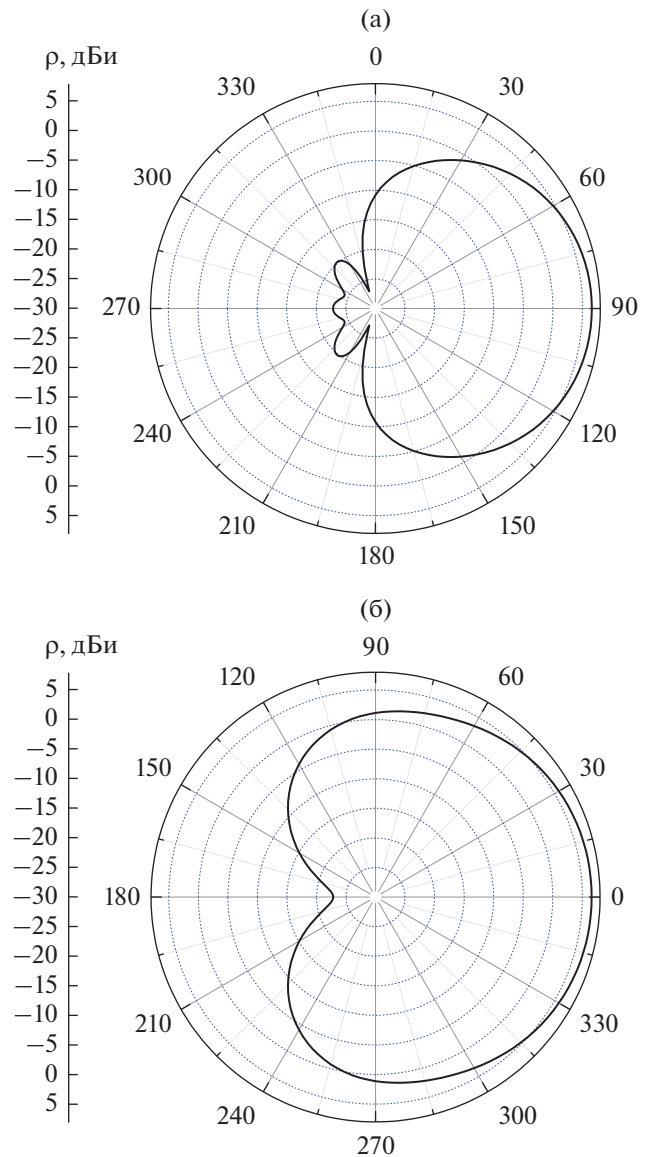


Рис. 9. Диаграммы направленности антенны с экраном при $\epsilon = 2.55$ на частоте 3.5 ГГц: а – в E -плоскости (зависимость от ϑ при $\varphi = 0$); б – в H -плоскости (зависимость от φ при $\vartheta = 90^\circ$).

сформулированы условия их применимости. Путем численного расчета диэлектрической проницаемости этого материала при различных расстояниях между решетками показано, что эти условия определяют и саму возможность использовать понятие эквивалентной диэлектрической проницаемости для строгого описания электромагнитных свойств материала. Результаты численного расчета частотной зависимости коэффициента отражения от безграничного слоя анизотропного материала на металлической плоскости показали, что эта структура в окрестности резонансной частоты обладает свойствами ИМП, причем существует возмож-

ность управления резонансной частотой, например ее понижения путем группировки решеток по параметрам. Экранирующие свойства ИМП были продемонстрированы на модели экрана малых поперечных размеров при расположении дипольного излучателя на его поверхности. Ширина полосы экранирования составила около 30% по уровню –10 дБ. Этот уровень экранирования подтверждается результатами расчета диаграмм направленности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yablonovich E., Sievenpiper D.* Circuit and Method Eliminating Surface Currents on Metals. US Pat. № 6 262 495. Publ July 17, 2001.
2. *Sievenpiper D., Zhang L., Broas R. F. J. et al.* // IEEE Trans. 1999. V. MTT-47. № 11. P. 2059.
3. *Broas R.F.J., Sievenpiper D.F., Yablonovitch E.* // IEEE Trans. 2001. V. MTT-49. № 7. P. 1262.
4. *Clavijo S., Diaz R.E., McKinzie W.E.* // IEEE Trans. 2003. V. AP-51. № 10. P. 2678.
5. *Broas R.F.J., Sievenpiper D.F., Yablonovitch E.* // IEEE Trans. 2005. V. AP-53. № 4. P. 1377
6. *Казанцев Ю.Н., Аплеталин В.Н.* // РЭ. 2007. Т. 52. № 4. С. 415.
7. *Luukkonen O., Simovski C., Granet G., Goussetis G.* // IEEE Trans. 2008. V. AP-56. № 6. P. 1624.
8. *Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А., Мальцев В.П.* // РЭ. 2019. Т. 64. № 9. С. 874.
9. *Feresidis A.P., Goussetis G., Wang Sh., Vardaxoglou J.C.* // IEEE Trans. 2005. V. AP-53. № 1. P. 209.
10. *Costa F., Monorchio A., Talarico S., Fabio M.V.* // IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2009. V. 7. P. 676.
11. *Yang F., Rahmat-Samii Y.* // IEEE Trans. 2003. V. AP-51. № 10. P. 2691.
12. *Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А., Мальцев В.П., Солосин В.С.* // РЭ. 2022. Т. 66. № 4. С. 339.
13. *McVay J., Hoorfar A., Engheta N.*, // Microwave Opt. Technol. Lett. 2009. V. 51. № 3. P. 785.
14. *Simms S., Fusco V.* // Electronics Lett. 2005. V. 41. № 24. P. 1311.
15. *Казанцев Ю.Н., Аплеталин В.Н., Солосин В.С.* // РЭ. 2008. Т. 53. № 3. С. 316.
16. *Казанцев Ю.Н., Аплеталин В.Н., Калошин В.А.* Электромагнитный экран с большим поверхностным импедансом. Пат. РФ № 2379800. Оpubл. офиц. бюл. “Изобретения. Полезные модели” № 2 от 20.01.2010.
17. *Казанцев Ю.Н., Солосин В.С.* // РЭ. 2014. Т. 59. № 10. С. 1194.