

УДК 621.371, 621.372

ВОЗМОЖНОСТЬ РАСШИРЕНИЯ ПОЛОСЫ РАБОЧИХ ЧАСТОТ ИСКУССТВЕННОГО МАГНИТНОГО ПРОВОДНИКА НА ОСНОВЕ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩЕЙ ЧАСТОТНО СЕЛЕКТИВНОЙ СТРУКТУРЫ

О. А. Дьяконова, Ю. Н. Казанцев

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
РАН, 141120, Московская область, Фрязино, пл. академика Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 31 июля 2018 г.

Аннотация. С помощью представленных аналитических выражений проведена оценка способов расширения диапазона рабочих частот искусственного магнитного проводника на основе полосно-пропускающих частотно селективных структур. На примере UC-PBG-структуры численный расчет подтвердил, что снижение диэлектрической проницаемости слоя между частотно селективной поверхностью и электропроводящим экраном при одновременном увеличении толщины этого слоя и размеров элемента частотно селективной структуры позволяет увеличить полосу рабочих частот искусственного магнитного проводника с 9% до 16%.

Ключевые слова: искусственный магнитный проводник, частотно селективная поверхность, численный расчёт, полоса рабочих частот, резонансная частота.

Abstract. The presence of functional connections between the characteristics of an artificial magnetic conductor, the parameters of structures with frequency selective surfaces and the dielectric layer determine the possibility of expanding the range of operating frequencies. An analytical expression for such relationships is the formula for estimating the phase of the reflection coefficient from an artificial magnetic conductor obtained using the theory of electrical circuits and long lines. With the help of the presented analytical expressions the estimation of ways of expansion of a range of operating frequencies of an artificial magnetic conductor on the basis of band-pass frequency selective structures is carried out. UC-PBG structure was chosen as the

basic calculation model. The purpose of numerical calculations of the frequency dependence of the phase of the reflection coefficient on the artificial magnetic conductor was to study ways of modifying the basic model of the artificial magnetic conductor, which provides an extension of the operating frequency band while maintaining the value of the resonant, i.e., the Central frequency of this band. Two variants of such modification are considered. The numerical calculation confirmed that the decrease in the dielectric permeability of the layer between the frequency selective surface and the conductive screen while increasing the thickness of the layer and the element size of the frequency selective structure allows to increase the band of the operating frequencies of the artificial magnetic conductor. Reduction of the dielectric permeability of the layer from 10.2 to 1.2 with doubling the layer thickness and the size of the lattice element allowed to expand the band of operating frequencies from 9% to 16%. The numerical calculation showed that the increase in the thickness of the dielectric layer without reducing the dielectric permeability does not allow to expand the range of operating frequencies of the artificial magnetic conductor (in contrast to the artificial magnetic conductor based on capacitive grids).

Key words: artificial magnetic conductor, frequency selective surface, numerical calculation, band of operating frequencies, resonant frequency.

Введение

Искусственные магнитные проводники (ИМП), известные также как поверхности с высоким импедансом, привлекают последние 15-20 лет постоянное внимание исследователей. Конструкция ИМП включает в свой состав ёмкостную решетку [1-3] либо частотно селективную поверхность (ЧСП) [4-8], которые расположены на слое диэлектрика, металлизированном с противоположной стороны. ЧСП представляет собой периодическую решетку либо из резонансных металлических элементов на диэлектрической плёнке (полосно-отражающие ЧСП), либо из резонансных отверстий различной формы (полосно-пропускающие ЧСП) в тонком металлическом экране.

В 1998 году была опубликована одна из пионерских работ, в которой ИМП был представлен как uniplanar compact photonic bandgap UC-PBG structure [4]. Предложенная конструкция выполнена на основе полосно-пропускающей ЧСП на тонком слое диэлектрика с относительно высокой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon \approx 10$), металлизированном с противоположной стороны. Через год вышла другая важная статья [1], в которой был предложен ИМП в форме ёмкостной решётки из грибовидных элементов на металлическом экране. Позднее появились работы по характеристикам ИМП, в конструкции которых использовались как ёмкостные решётки, так полосно-отражающие и полосно-пропускающие ЧСП. Так в работе [5] было показано, что при одинаковых размерах элементов в используемых ЧСП обоих классов резонансные частоты и, следовательно, полосы рабочих частот ИМП существенно различаются. Обычно полоса рабочих частот ИМП определяется двумя крайними частотами, на которых фаза коэффициента отражения равна $+90^\circ$ и -90° . Оказалось, что определённым недостатком ИМП на основе ЧСП является сравнительная узость полосы рабочих частот. Так, например, относительная полоса рабочих частот ИМП, описанных [4] не превышала 9 %. Поэтому проблема расширения рабочей полосы таких ИМП является весьма актуальной. В настоящей работе рассмотрен вариант решения этой проблемы путём управления диэлектрической проницаемостью и толщиной слоя диэлектрика между ЧСП и экраном при одновременном изменении размера элемента ЧСП.

1. Базовая модель ИМП

В качестве базовой расчётной модели выбрана UC-PBG структура [4]. Отдельный элемент этой структуры (unit cell) показан на рис. 1 (все размеры даны в мм).

Элемент собственно ЧСП (1) отделён от проводящего экрана (2) слоем диэлектрика (3) с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 10.2$.

На рис. 2 дана частотная зависимость модуля коэффициента прохождения через ЧСП в условиях свободного пространства, а на рис.3 – частотная зависимость фазы коэффициента отражения от ИМП.

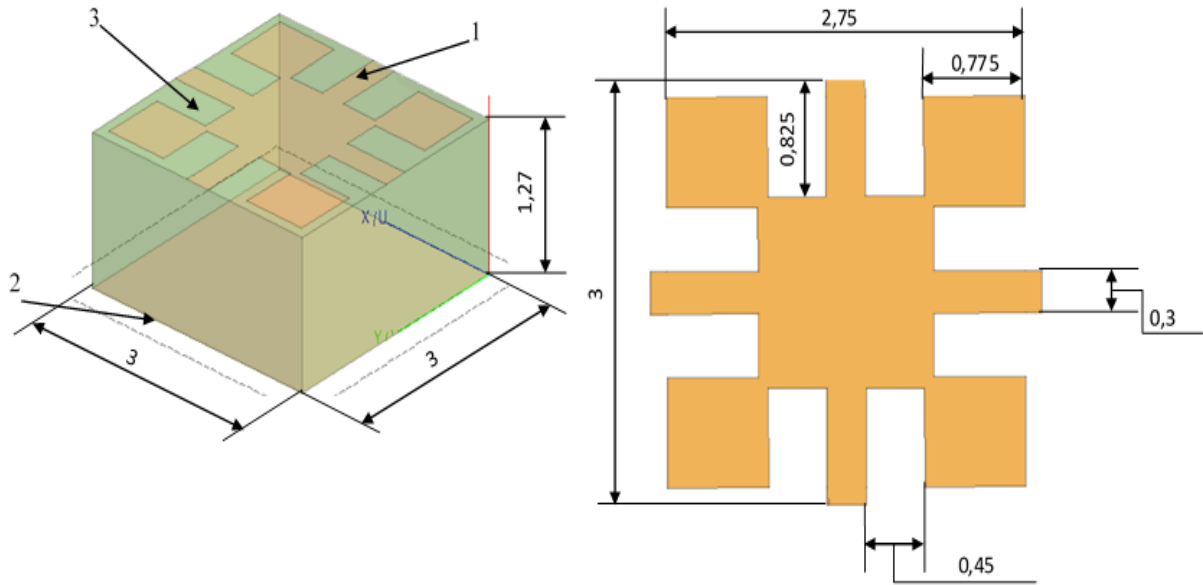


Рис. 1. Элемент UC-PBG структуры.

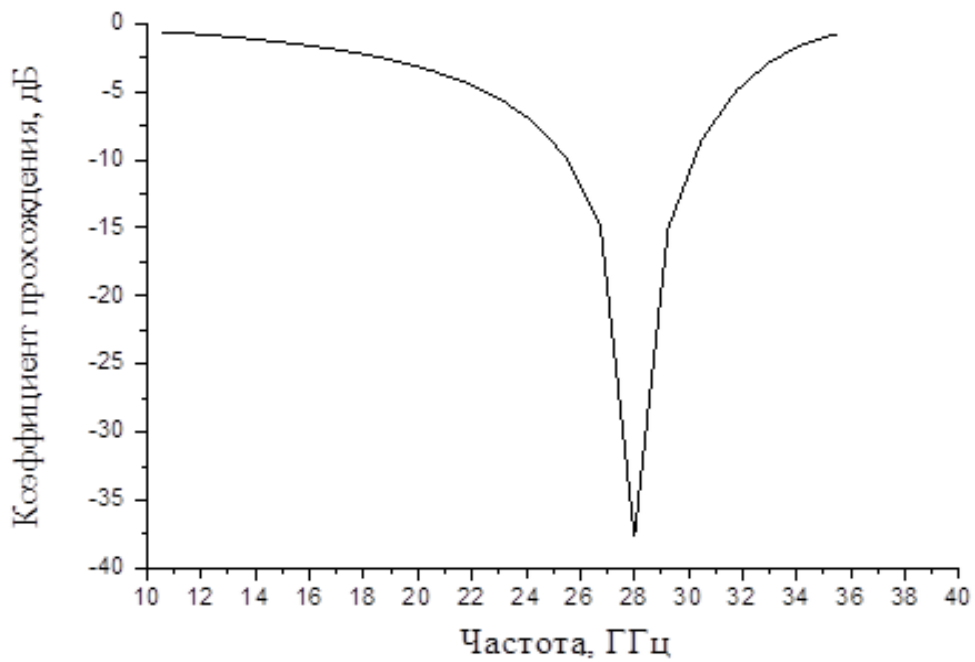


Рис.2. Частотная зависимость коэффициента прохождения через ЧСП UC-PBG структуры.

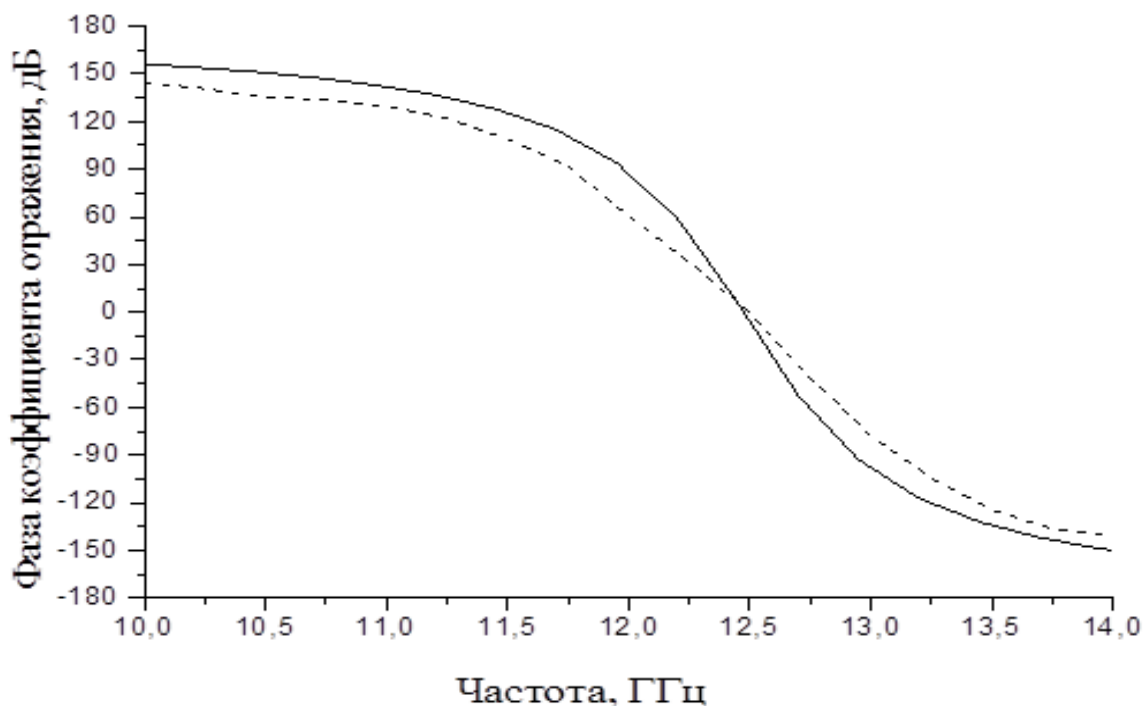


Рис.3. Частотная зависимость фазы коэффициента отражения от UC-PBG структуры (численный расчёт – сплошная линия, по формуле (1) – пунктирная линия).

Резонансные частоты ЧСП и ИМП существенно различны и определяются минимумом коэффициента отражения на рис. 2 и нулевой фазой коэффициента отражения на рис.3, соответственно. Как следует из рис. 3, полоса рабочих частот ИМП, внутри которой фаза коэффициента отражения изменяется в пределах $\pm 90^\circ$, составляет всего около 9% от резонансной (центральной) частоты. Поэтому любая возможность расширения этой полосы представляет существенный интерес. Такая возможность определяется наличием функциональных связей между характеристиками ИМП, параметрами ЧСП и диэлектрического слоя.

Аналитическим выражением таких связей является формула для оценки фазы коэффициента отражения от ИМП, полученная с использованием теории электрических цепей и длинных линий.

2. Фаза коэффициента отражения от ИМП

Для оценки частотной зависимости фазы коэффициента отражения от ИМП на основе полосно-пропускающей ЧСП может использоваться следующая формула, которая приводится здесь (без вывода):

$$\varphi = 2 \operatorname{arctg} \left[\frac{\sqrt{\varepsilon}}{\operatorname{tg} k D \sqrt{\varepsilon}} - 2 Q t \left(\frac{k t}{k_0} - \frac{k_0}{k} \right) \right] \quad (1).$$

$$k = \frac{2\pi f}{c}; \quad k_0 = \frac{2\pi f_0}{c}; \quad t = \sqrt{\frac{\varepsilon + 1}{2}};$$

c - скорость света; f_0 и Q - резонансная частота и добротность ЧСП в условиях свободного пространства соответственно; f - частота; ε и D - диэлектрическая проницаемость и толщина диэлектрического слоя соответственно.

Из частотной зависимости коэффициента отражения от ЧСП базовой модели ИМП следует: $f_0 = 28$ ГГц, $Q = 2$. При изменении структуры ЧСП путём масштабирования с коэффициентом n резонансная частота f_0 меняется как $\frac{1}{n}$, а добротность Q остаётся неизменной. Поскольку формула (1) является приближённой, она использовалась для предварительных оценок, которые подтвердились численным расчётом.

3. Численный расчет

Целью численных расчётов частотной зависимости фазы коэффициента отражения от ИМП являлось исследование путей модификации базовой модели ИМП, обеспечивающей расширение полосы рабочих частот при сохранении значения резонансной, т.е. центральной частоты этой полосы. Будут рассмотрены два варианта такой модификации.

Первый вариант – уменьшение диэлектрической проницаемости слоя и, затем масштабирование структуры ИМП, т.е. пропорциональное изменение всех размеров структуры ИМП, включая толщину слоя, для приближения к первоначальной резонансной частоте ИМП.

Второй вариант – увеличение толщины диэлектрического слоя при сохранении первоначальной диэлектрической проницаемости и, затем

масштабирование структуры ЧСП для приближения к первоначальной резонансной частоте.

3.1. Первый вариант модификации ИМП

Выберем новое значение диэлектрической проницаемости слоя $\varepsilon = 1.2$ (диэлектрическая проницаемость достаточно плотного пенополистирола). На рис. 4 дана частотная зависимость фазы коэффициента отражения от ИМП, единственным отличием которого от базовой модели является уменьшенная диэлектрическая проницаемость.

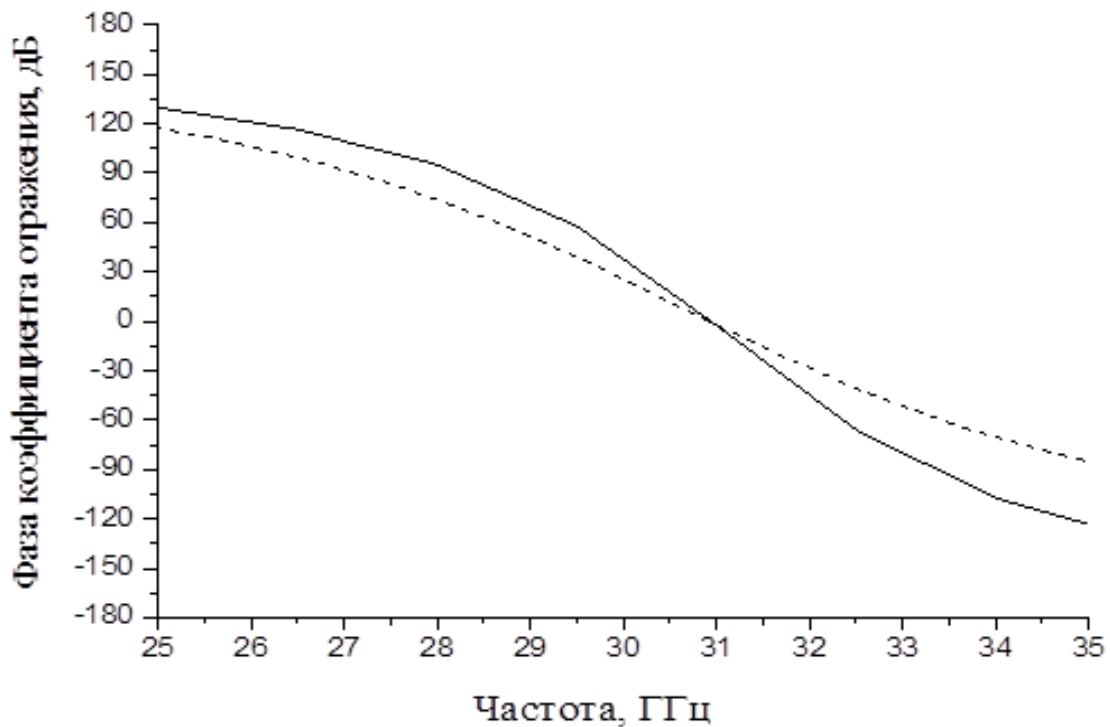


Рис.4. Частотная зависимость фазы коэффициента отражения от ИМП с уменьшенной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 1.2$ слоя между ЧСП и экраном (численный расчёт – сплошная линия, по формуле (1) – пунктирная линия).

Как видно из сравнения этого рисунка с рис.3 резонансная частота ИМП увеличилась более чем в 2 раза, а полоса рабочих частот возросла с 9% до 16%. Для возвращения (приближения) резонансной частоты к первоначальному значению проделано масштабирование структуры ИМП т.е. увеличение всех размеров в 2.25 раза. На рис. 5 показан элемент структуры модифицированного

ИМП, а на рис. 6 приведена частотная зависимость фазы коэффициента отражения от этого ИМП.

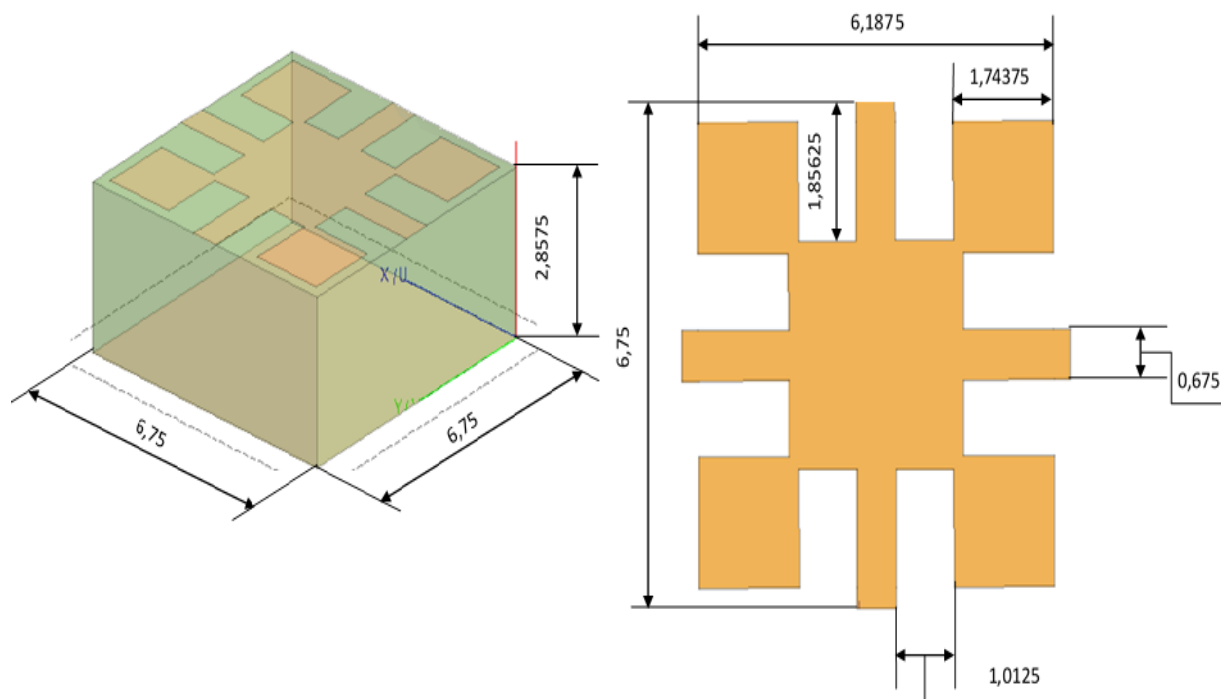


Рис.5. Элемент модифицированного ИМП.

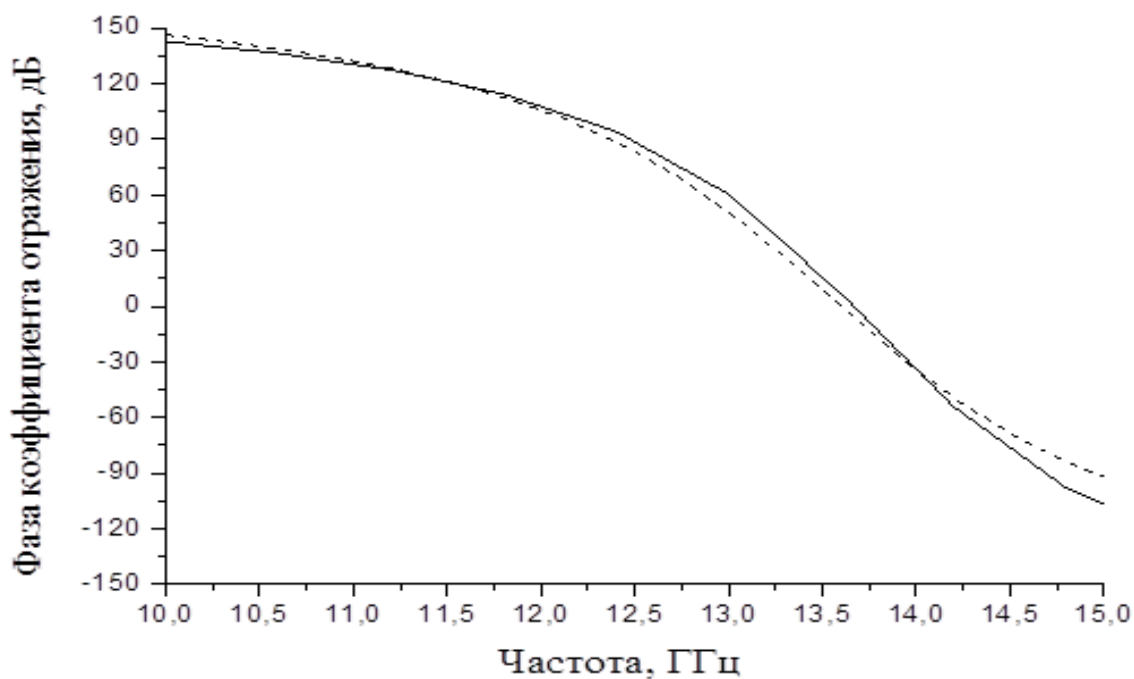


Рис.6. Частотная зависимость фазы коэффициента отражения от модифицированного ИМП (численный расчёт – сплошная линия, по формуле (1) – пунктирная линия).

Как и следовало ожидать ширина полосы рабочих частот осталась прежней (16%), а резонансная частота уменьшилась в 2.25 раза и приблизилась к резонансной частоте базовой модели. Таким образом, максимальное уменьшение диэлектрической проницаемости при более чем двукратном увеличении толщины диэлектрического слоя позволяет увеличить полосу рабочих частот ИМП типа UC-PBG с 9% до 16%. Далее по этому варианту модификации был проведен поиск по направлению: возможно ли увеличить полосу рабочих частот, не увеличивая толщины ИМП? Для этого толщина диэлектрического слоя, модифицированного ИМП была уменьшена до толщины базовой модели и, затем проведено масштабирование структуры ЧСП для приближения резонансной частоты к первоначальному значению. Оказалось, что полоса рабочих частот такого «тонкого» ИМП с малой диэлектрической проницаемостью слоя между ЧСП и экраном не превосходит полосу рабочих частот базовой модели.

3.2. Второй вариант модификации ИМП

Выберем новое значение толщины диэлектрического слоя в 2.25 раза больше, чем в базовой модели (такое же, как и в первом варианте модификации). Размеры элемента структуры – те же, что и на рис. 1. Частотная зависимость фазы коэффициента отражения дана на рис. 7.

Из сравнения этой зависимости с аналогичной для базовой модели (рис. 3) следует, что резонансная частота несколько понизилась, в то время как ширина полосы рабочих частот осталась прежней (9%). Для приближения резонансной частоты к резонансной частоте базовой модели проведено масштабирование структуры ЧСП с коэффициентом $\frac{1}{1.15}$. На рис.8 приведена частотная зависимость фазы коэффициента отражения для модифицированной модели, из которой следует, что полоса рабочих частот не изменилась и осталась равной 9%.

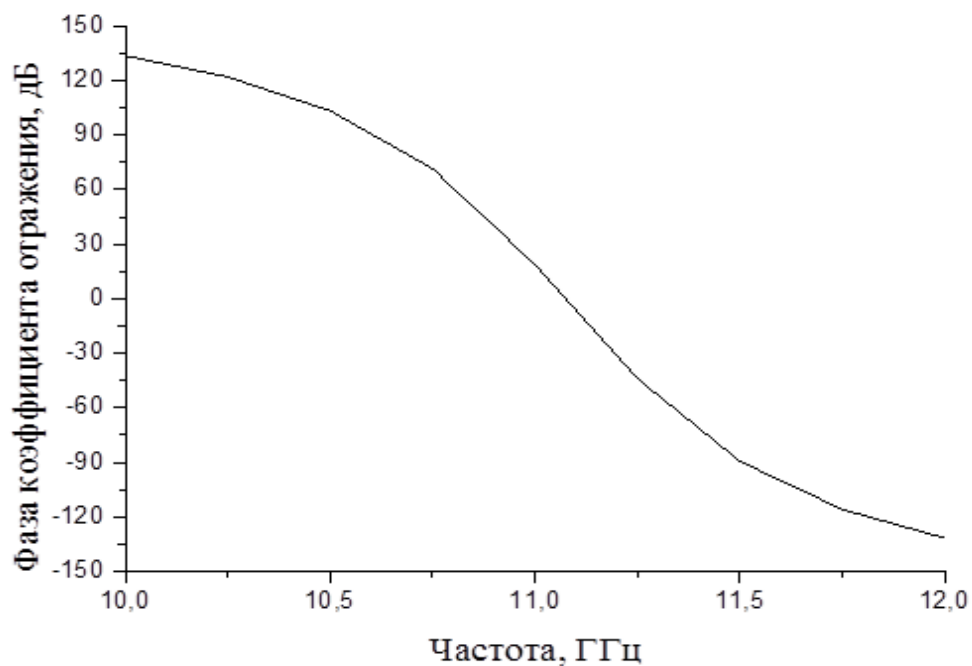


Рис.7. Частотная зависимость фазы коэффициента отражения от UC-PBG структуры с увеличенной толщиной диэлектрического слоя.

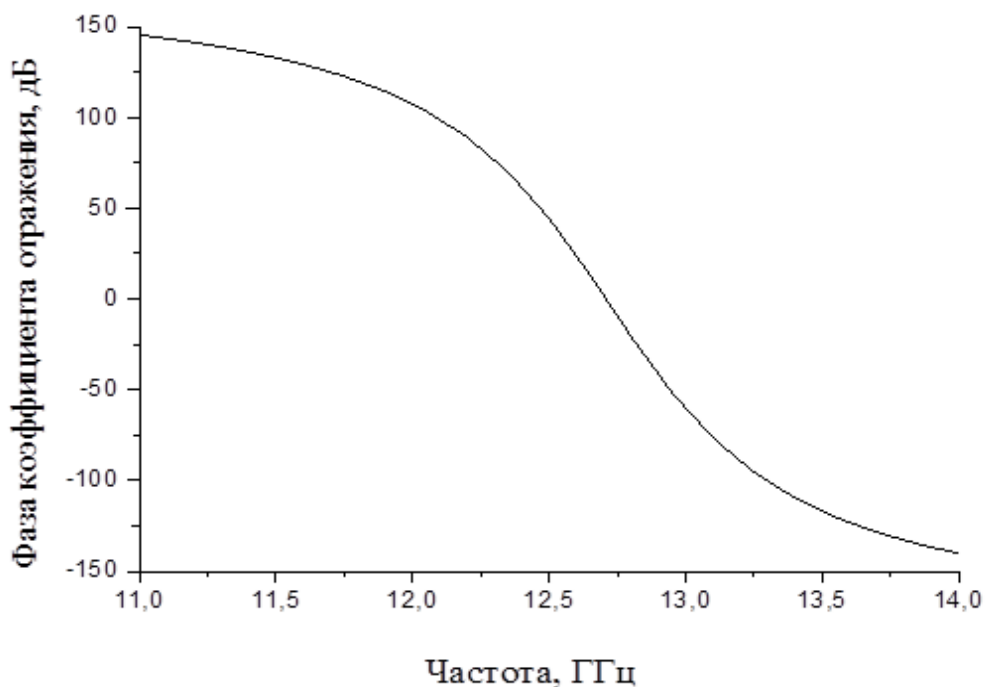


Рис.8. Частотная зависимость фазы коэффициента отражения от UC-PBG структуры с увеличенными толщиной диэлектрического слоя и размерами ЧСП.

Здесь следует указать на существенное отличие ИМП на основе полосно-пропускающих ЧСП от ИМП на основе ёмкостных решёток: расширение полосы рабочих частот ИМП на основе ёмкостных решёток возможно путём увеличения толщины диэлектрического слоя и без уменьшения его диэлектрической проницаемости.

Заключение

Аналитические выражения, представленные в статье, позволили оценить возможность расширения полосы рабочих частот ИМП на основе на основе полосно-пропускающих ЧСП. Численный расчёт подтвердил, что такая возможность реализуется путём снижения диэлектрической проницаемости слоя между решёткой (ЧСП) и электропроводящим экраном при одновременном увеличении толщины этого слоя и размеров элемента решётки. На примере известной UC-PBG структуры показано, что уменьшение диэлектрической проницаемости слоя с 10.2 до 1.2 при удвоении толщины слоя и размеров элемента решётки позволило расширить полосу рабочих частот с 9% до 16%. Численный расчёт показал, что увеличение толщины диэлектрического слоя без уменьшения диэлектрической проницаемости не позволяет расширить диапазон рабочих частот ИМП (в отличие от ИМП на основе ёмкостных решёток).

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. 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.
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. 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.
5. M. A. Hiranandani, A. B. Yakovlev, A. A. Kishk. Artificial magnetic conductors realised by frequency-selective surfaces on a grounded dielectric slab for antenna applications // IEE Proceedings - Microwaves, antennas and propagation, vol.153, no. 5, pp. 487-493, Oct. 2006.
6. J. R. Sohn, K. Y. Kim, J.-H. Lee, and H.-S. Tae. Comparative study on various artificial magnetic conductors for low-profile // Progress in electromagnetics Research, no. 61, pp. 27-37, 2006.
7. 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.
8. C.R.Simovski, P. de Maagt, and I. V. Melchakova. High-Impedance surfaces having stable resonance with respect to polarization and incidence angle // IEEE Transactions on antennas and propagation, vol.53, no. 3, pp. 908-914, march 2005.

Для цитирования:

О. А. Дьяконова, Ю. Н. Казанцев. Возможность расширения полосы рабочих частот искусственного магнитного проводника на основе полосо-пропускающей частотно селективной структуры. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/10/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.8.10