

# МЕТАМАТЕРИАЛ С ПОВЫШЕННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТЬЮ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ, БЛИЗКОЙ К ЕДИНИЦЕ. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

К.М. Басков \* <sup>1</sup>, И.И. Краснолобов<sup>1</sup>, В.Н. Семенов<sup>1</sup>, Т.А. Фурманова<sup>1</sup>, В.А. Чистяев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, Москва, Россия*

Статья поступила в редакцию 20.12.2023

Одобрена после рецензирования 21.12.2023

Принята к публикации 28.12.2023

## Аннотация

Статья является продолжением работы, в которой были исследованы электродинамические свойства механически прочного метаматериала с диэлектрической проницаемостью, близкой к единице. В предыдущей работе было показано, что этот материал может быть эффективным при создании радиопрозрачных укрытий. При этом такой метаматериал имеет существенный недостаток для использования его в радиопрозрачных укрытиях, а именно, он обладает пространственной дисперсией магнитной проницаемости при падении на слой из такого материала  $E$  поляризованной электромагнитной волны. Настоящая статья посвящена исследованиям, направленным на устранение этого недостатка и, как следствие, повышение радиотехнического качества такого метаматериала. В статье показано, что включение в состав метаматериала дополнительной периодической решётки из тонких спиралей, установленных перпендикулярно его поверхности, позволяет существенно уменьшить зависимость от угла падения магнитной проницаемости, которая наблюдается при падении на метаматериал  $E$  поляризованной волны.

**Ключевые слова:** метаматериал, антенна, радиопрозрачное укрытие, коэффициент пропускания, диэлектрическая проницаемость

EDN GRDDNI

doi:[10.24412/2949-0553-2023-57-30-38](https://doi.org/10.24412/2949-0553-2023-57-30-38)

## 1. Введение

Для защиты бортовых антенных систем от внешних воздействующих факторов перед ними устанавливаются радиопрозрачные укрытия (РПУ), которые являются неотъемлемой частью этих антенных систем. Наличие РПУ перед антеннами приводит к изменению их излучательных характеристик и часто не в лучшую сторону.

Обычно установленное перед антенной РПУ приводит к уменьшению её коэффициента усиления, к увеличению уровня бокового излучения, с которым связана помехозащищённость антенны. Одним из серьёзных изменений излучательных характеристик высоконаправленной антенны, связанных с наличием перед ней РПУ, является изменение направления излучения антенны, т.е. РПУ вносит ошибки пеленга при сканировании пространства с помощью антенны. Все эти изменения характеристик излучения антенны являются радиотехническими характеристиками (РТХ) РПУ. Для улучшения РТХ РПУ ещё с середины двадцатого века специалисты применяли различные способы. В первую очередь, для хорошей работы антенны с установленным перед ней РПУ разрабатывались различные конструкции его стенки, при которых обеспечивался наилучший режим прохождения фронта волны излучения антенны [1]: тонкостенные, полуволновые, многослойные, стенки с металлическими включениями. Такие конструкции стенки должны были обеспечивать достаточные прочностные и эксплуатационные характеристики РПУ, с одной стороны, и минимальное влияние на характеристики излучения антенны, с другой.

\* Автор, ответственный за переписку: Константин Михайлович Басков, [kokofech@rambler.ru](mailto:kokofech@rambler.ru)

Для увеличения ширины полосы частот, при которой РПУ обладает высоким уровнем радиопрозрачности, необходимо приближать к единице значение диэлектрической проницаемости материала, из которого он выполнен. Для этого в конструкции стенок РПУ включают различные конструкционные материалы: пенопласты или сотопласты. В работе [2] предложен конструкционный материал: радиационно-модифицированный политетрафторэтилен (фторопласт), который обладает высокой прочностью, с одной стороны, и диэлектрической проницаемостью, равной 2.1, т.е. достаточно низкой, при которой обеспечивается достаточно широкая полоса радиопрозрачности полуволновой стенки РПУ.

В 1953 г. была опубликована работа [3], в которой представлены исследования, показывающие, что решётка из тонких проводов является искусственным диэлектриком с диэлектрической проницаемостью меньше нуля. Это означало, что с помощью такого включения в обычный диэлектрик возможно скомпенсировать отражение от него электромагнитной волны (ЭМВ) и добиться высокого уровня радиопрозрачности стенки РПУ. В работах [1, 4] приведены теоретические выкладки, с помощью которых возможно рассчитать параметры стенки РПУ с компенсационными решётками. Такие решётки, включённые в состав РПУ, позволяют осуществлять электродинамическое согласование его стенки практически произвольной толщины. Появились патенты конструкций стенки РПУ, в которых для улучшения его радиотехнического качества используются компенсационные решётки из проводов [5, 6]. В [7, 8] отмечалось, что использование в компенсационных решётках искривлённых проводов позволяет существенно увеличить радиотехническое качество стенок РПУ по сравнению со стенками с решётками из прямых проводов, особенно в дециметровом и в длинноволновой части сантиметрового диапазона длин волн.

В [6] отмечалось, что у стенок РПУ с компенсационными решётками наблюдается большая разность фаз коэффициентов пропускания (КП) при разной (Е и Н) поляризации падающей ЭМВ, что приводит к существенному ухудшению характеристик излучения укрываемой антенны при установке перед ней РПУ в виде тела вращения, а именно это приводит к увеличению ошибок пеленга и к увеличению поляризационных потерь. Для уменьшения разности амплитуд и фаз КП стенки РПУ при падении ЭМВ при разной поляризации в [6] предлагается способ расчёта параметров стенок с минимальным отличием КП при разной поляризации падающей волны. Если обратить внимание на результаты расчёта параметров предложенных вариантов стенок, то можно заметить, что меньшее отличие их КП при разной поляризации падающей ЭМВ требует меньшего уровня их радиопрозрачности. Таким образом, предложенные в [6] варианты стенки нельзя считать оптимальной конструкцией.

В [9, 10] сильное отличие модуля и фазы КП стенки РПУ с компенсационными решётками при падении на неё ЭМВ при разной поляризации объясняется тем, что материал в такой стенке можно описывать эффективными материальными параметрами некоторого метаматериала. У такого метаматериала на частоте настройки диэлектрическая и магнитная проницаемости равны единице при нормальном падении ЭМВ и при наклонном падении при Н поляризации (когда вектор магнитного поля лежит в плоскости падения волны). При наклонном падении Е поляризованной волны (когда вектор электрического поля лежит в плоскости падения волны) у такого метаматериала наблюдается пространственная дисперсия магнитной проницаемости (зависимость магнитной проницаемости от угла падения волны), что и приводит к существенному увеличению у метаматериала фазы КП с увеличением угла падения. В [10] отмечалось, что уменьшить пространственную дисперсию магнитной проницаемости при наклонном падении Е поляризованной волны возможно с помощью дополнительной решётки из резонансных элементов с ярко выраженным электрическим моментом, направленным перпендикулярно к плоскости этой решётки. Решётки из таких элементов могут быть также использованы в качестве угловых фильтров [11], которые отражают ЭМВ только при наклонном падении Е поляризованной волны. Настоящая работа посвящена исследованию свойств решёток из элементов с ярко выраженным электрическим моментом, которые позволяют существенно уменьшить пространственную дисперсию магнитной проницаемости метаматериала с диэлектрической проницаемостью, близкой к единице, и тем самым улучшить радиотехническое качество РПУ, изготовленного из такого метаматериала.

### **Электродинамические свойства метаматериала с диэлектрической проницаемостью, близкой к единице, с уменьшенной пространственной дисперсией магнитной проницаемости**

В [9] представлен метаматериал с эффективной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_{\text{Э}}$ , близкой к единице, который может быть использован при создании РПУ с высоким радиотехническим качеством. Метаматериал представляет собой тонкие по отношению к длине волны слои диэлектрика с толщинами, равными  $d$ , с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ , между которыми установлены решётки с индуктивной эквивалентной поверхностной проводимостью  $Y_P$ , индуктивность в которой равна  $L_{\Sigma}$ . Структура одного слоя метаматериала представлена на рисунке 1. На рисунке 2 представлена эквивалентная схема [12]

для расчёта S-параметров этого метаматериала в приближении тонкого слоя. Эквивалентная схема на рисунке 2 представлена для случая падения ЭМВ при E поляризации.

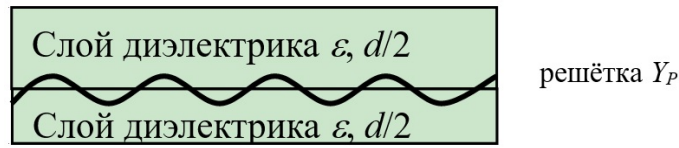


Рисунок 1 – Структура одного слоя метаматериала с  $\varepsilon_{\text{Э}} \approx 1$

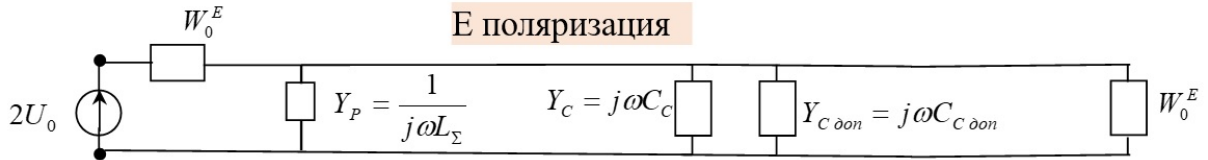


Рисунок 2 – Эквивалентная схема метаматериала с  $\varepsilon_{\text{Э}} \approx 1$

В [9] отмечалось, что метаматериал для РПУ с диэлектрической проницаемостью, близкой к единице, состоящий из тонких слоёв диэлектрической матрицы, между которыми расположены компенсационные решётки из проводов, обладает пространственной дисперсией (зависимостью от угла падения) магнитной проницаемости при падении на этот материал E поляризованной ЭМВ. Эта дисперсия приводит к существенному увеличению уровня коэффициента отражения (КО) от него и увеличению фазы КП. Пространственная дисперсия магнитной проницаемости у метаматериала связана с тем, что компенсационные решётки, состоящие из планарных элементов, позволяют скомпенсировать рассеянное поле диэлектрика, которое формируется токами поляризации, направленными вдоль плоскости слоя метаматериала (продольные токи [10]). Рассеянное поле токами поляризации, направленными перпендикулярно плоскости слоя метаматериала и возбуждаемыми падающей E поляризованной ЭМВ (поперечные токи), остаётся некомпенсированным.

В эквивалентной схеме на рисунке 2  $W_0^E$  – волновое сопротивление свободного пространства при наклонном падении E поляризованной волны. Источник напряжения  $U_0$  – амплитуда электрического поля падающей волны. Тонкий слой диэлектрика описывается проводимостью  $Y_C$ , которая с учётом формулы (8) из работы [9] определяется выражением:

$$Y_C = j\omega\varepsilon_0 d \frac{\gamma_0^2 \varepsilon^2 - \gamma_a^2}{\varepsilon \gamma_0^2} = j\omega C_C + j\omega C_{C\text{доп}}, \quad (1)$$

где  $\gamma_a = k_0 \sqrt{\sin^2 \theta - \varepsilon}$ ;  $\gamma_0 = jk_0 \cos \theta$ ;  $\omega$  – круговая частота;  $k_0$  – волновое число;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость матрицы;  $d$  – толщина слоёв диэлектрической матрицы метаматериала;  $\theta$  – угол падения волны;  $C_C = \varepsilon_0 d (\varepsilon - 1)$ ;  $C_{C\text{доп}} = \varepsilon_0 d \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \tan^2 \theta$ ;  $j$  – мнимая единица.

Ёмкость  $C_C$  связана с продольным током поляризации, направленным вдоль слоя диэлектрика, а  $C_{C\text{доп}}$  – с поперечным током, который перпендикулярен слою диэлектрика. С учётом того, что толщина слоя невелика, параллельное соединение проводимости, связанной с отрицательной ёмкостью  $C_{C\text{доп}}$ , может быть пересчитано в индуктивное сопротивление  $j\omega L_{C\text{доп}}$ , включённое последовательно сопротивлению свободного пространства, как показано в схеме на рисунке 3, аналогичной схеме на рисунке 2. При этом индуктивность, которая описывает поперечный ток поляризации в слое диэлектрика, определяется формулой:

$$L_{C\text{доп}} \approx -(W_0^E)^2 C_{C\text{доп}}, \quad (2)$$

где  $W_0^E = 120\pi \cos \theta$ ,  $C_{C\text{доп}} = -\varepsilon_0 d \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \tan^2 \theta$  при E поляризации и  $C_{C\text{доп}} = 0$  при H поляризации.

Ёмкость  $C_C$  может быть компенсирована некоторой планарной решёткой с эквивалентным индуктивным поверхностным сопротивлением. В схемах на рисунках 2 и 3 такая решётка соответствует индуктивному сопротивлению  $Z_P$  или проводимости  $Y_P$  с индуктивностью  $L_{\Sigma}$ . Такой планарной решёткой может быть не только сетка из проводов прямых или искривлённых, но и решётка из дискретных резонансных элементов при частотах выше резонансной частоты такой решётки. Скомпенсировать  $L_{C\text{доп}}$  с помощью тонких планарных решёток невозможно.

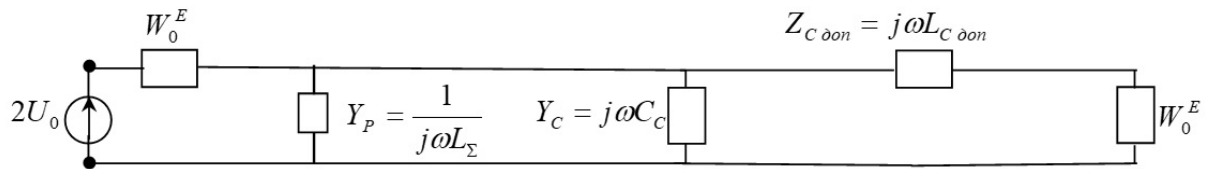


Рисунок 3 – Эквивалентная схема метаматериала с  $\epsilon_\exists \approx 1$ , аналогичная схеме на рисунке 2

Для компенсации отрицательной индуктивности  $L_{C\text{доп}}$  в [10] предлагалось использовать дополнительную решётку из реактивных элементов, обладающих ярко выраженным электрическим моментом, направленным перпендикулярно поверхности слоя метаматериала. Такими реактивными элементами могут быть маленькие по сравнению с длиной волны спирали, длина которых много больше их диаметра (далее по тексту – спирали). Электродинамические свойства такой дополнительной решётки описаны в [11].

Как было указано в [11], при расположении спиралей параллельно плоскости решётки (далее плоская решётка) при определении её свойств используется схема, приведённая на рисунке 4, в которой такая решётка описывается последовательным колебательным контуром из ёмкости  $C_P$  и индуктивности  $L_P$ , включёнными параллельно сопротивлению свободного пространства. В итоге при частотах выше резонансной  $\omega_P$  эквивалентная проводимость  $Y_P$  такой решётки является индуктивной, а значит, решётка может быть использована при создании метаматериала с диэлектрической проницаемостью, равной единице, при круговой частоте настройки этого метаматериала  $\omega_{00}$ .

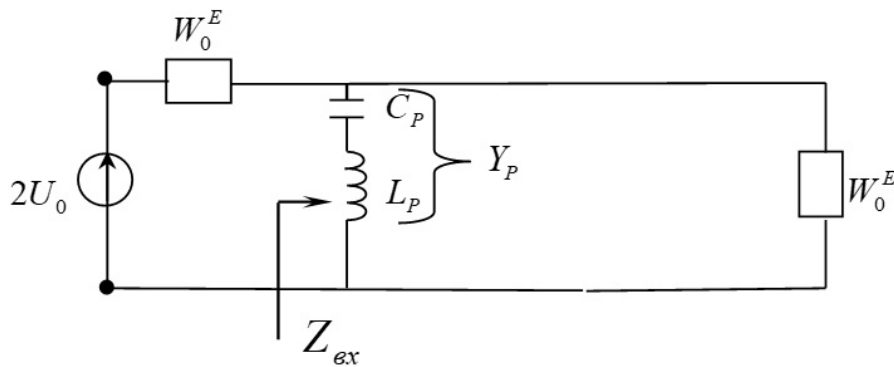


Рисунок 4 – Эквивалентная схема плоской решётки

Если элементы решётки расположить перпендикулярно её плоскости (далее объёмная решётка), то в эквивалентной схеме, представленной на рисунке 5, такая решётка будет описываться сопротивлением  $Z_{PZ}$  (или проводимостью  $Y_{PZ}$ ) параллельного колебательного контура, состоящего из ёмкости  $C_{PZ}$  и индуктивности  $L_{PZ}$ , который включён последовательно сопротивлению свободного пространства. Величины ёмкости и индуктивности определяются выражениями, вытекающими из формулы (5) в [11]:

$$C_{PZ} = \frac{L_P}{(W_0^E)^2 \tan^2 \theta}, \tag{3}$$

$$L_{PZ} = C_P (W_0^E)^2 \tan^2 \theta. \tag{4}$$

В результате при частотах выше  $\omega_P$  сопротивление  $Z_{PZ}$  является ёмкостным, а значит, может быть использовано для компенсации индуктивного сопротивления  $Z_{C\text{доп}}$ , связанного с поперечным током поляризации слоя диэлектрика.

На рисунке 6 представлены вычисленные частотные зависимости модуля КО и фазы КП объёмной решётки с периодом  $20 \times 20$  мм из спиралей длиной 10 мм и диаметром 1.4 мм с 21 витком при угле падения ЭМВ  $60^\circ$  при Е поляризации. Вычисления, результаты которых представлены на рисунке 6, были проведены методом интегральных уравнений с помощью пакета программ электродинамического моделирования FEKO и по эквивалентной схеме на рисунке 5. Можно заметить, что зависимости на рисунке 6, вычисленные двумя способами, практически совпадают, что означает справедливость изложенных выше утверждений. Кроме этого, на рисунке 6б видно, что фаза КП при частотах больше резонансной частоты решётки положительная, тогда как пространственная дисперсия магнитной

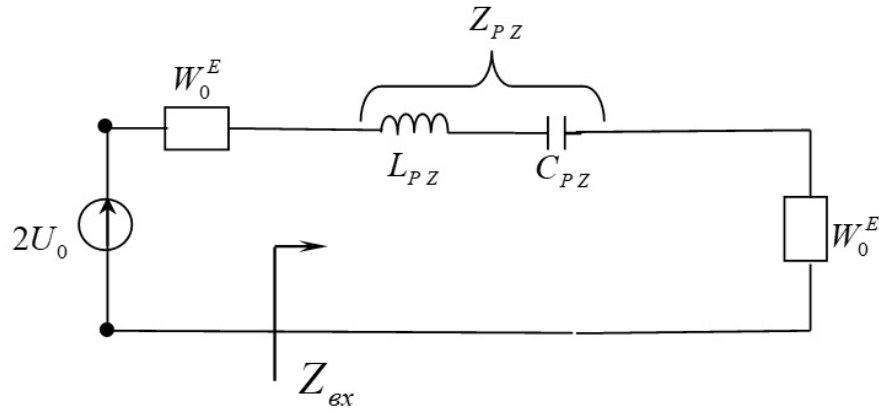


Рисунок 5 – Эквивалентная схема объёмной решётки

проницаемости в метаматериале приводит к увеличению по модулю отрицательной фазы КП слоя из этого метаматериала при увеличении угла падения. В итоге объёмная решётка из спиралей будет компенсировать увеличение по модулю отрицательной фазы КП слоя из метаматериала в области его частоты настройки  $\omega_{00}$ .

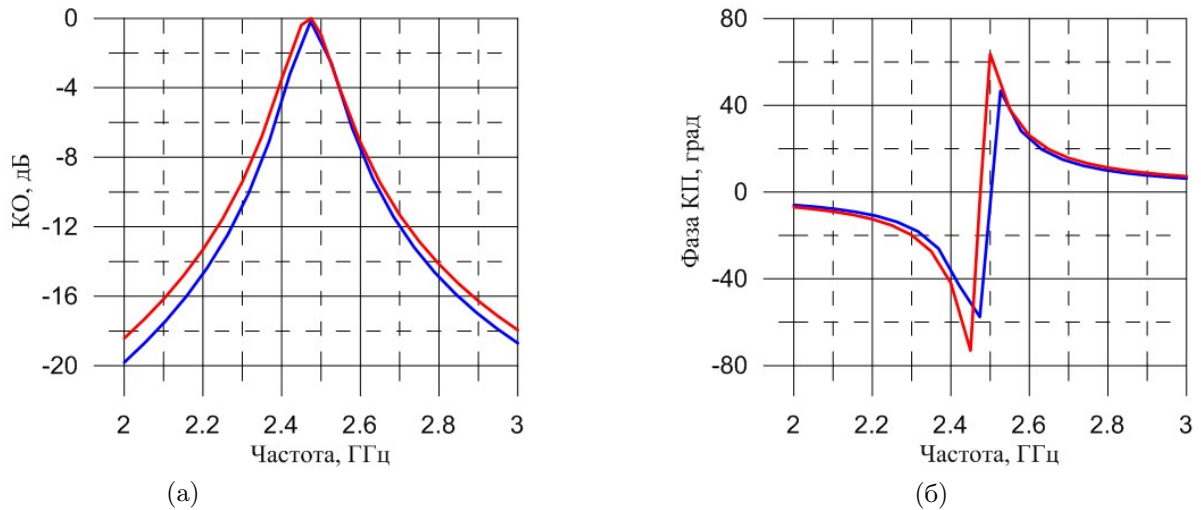


Рисунок 6 – Вычисленные двумя способами частотные зависимости модуля КО (а) и фазы КП (б) объёмной периодической решётки из тонких спиралей

Структурная схема метаматериала без пространственной дисперсии магнитной проницаемости и его эквивалентная схема представлены на рисунке 7. Легко показать, что для обеспечения компенсации сопротивления  $Z_{C_{доп}}$  необходимо использовать объёмную решётку такую, чтобы соответствующая ей плоская решётка (решётка, состоящая из таких же спиралей с такой же плотностью их установки) обладала при частоте  $\omega_{00}$  проводимостью  $Y_P$ , соответствующей индуктивности  $L_\Sigma$ :

$$L_\Sigma = \frac{1}{\omega_{00}^2 \varepsilon_0 d \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}}. \quad (5)$$

Отсюда следует вывод, что для устранения пространственной дисперсии магнитной проницаемости необходимо использовать объёмную решётку из спиралей с плотностью установки элементов в  $\varepsilon$  раз меньше, чем плоскую решётку, которая формирует этот метаматериал с диэлектрической проницаемостью, равной единице.

Как было показано в [9], эффективная магнитная проницаемость метаматериала при падении на него Е поляризованной волны вычисляется по формуле:

$$\mu_\Theta = \left( \frac{1}{\varepsilon_\Theta} - \frac{1}{\varepsilon} \right) \sin^2 \theta + 1, \quad (6)$$

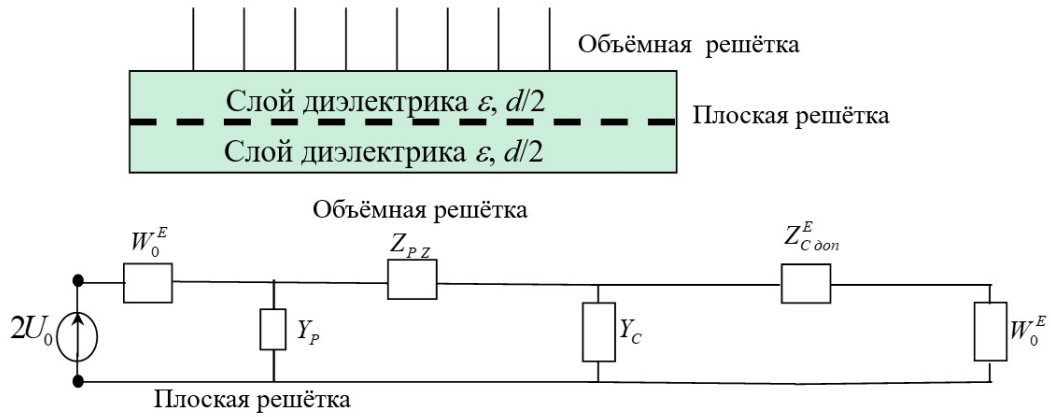


Рисунок 7 – Структура одного слоя метаматериала с  $\varepsilon_{\text{Э}} \approx 1$  без пространственной дисперсии эффективной магнитной проницаемости и его эквивалентная схема

где  $\varepsilon_{\text{Э}} = 1 + (\varepsilon - 1) \left(1 - \frac{\omega_{00}^2}{\omega^2}\right) + j \frac{\omega_{00}^2}{\omega^2} \varepsilon''$  - эффективная диэлектрическая проницаемость метаматериала,  $\varepsilon''$  - мнимая часть диэлектрической проницаемости диэлектрической матрицы метаматериала.

Используя такие же принципы вывода формулы для расчёта эффективной магнитной проницаемости, как и в [9], формула для вычисления эффективной магнитной проницаемости метаматериала с дополнительной объёмной решёткой получается следующей:

$$\mu_{\text{Э}} = \frac{\sin \theta}{\varepsilon_{\text{Э}}} - \left(\frac{\sin \theta}{\varepsilon} - 1\right) \frac{1}{B} + \frac{C}{B} (j \cos \theta), \quad (7)$$

где  $B = \frac{W_0}{Z_P} \tan^2 \theta + 1$ ;  $C = \frac{W_0}{k_0 d Z_P} \tan^2 \theta$ ;  $Z_P$  - сопротивление, описывающее плоскую решётку из спиралей, которая соответствует объёмной решётке.

При выполнении условия (5) и при малых электрических потерях при частоте  $\omega_{00}$  эффективная магнитная проницаемость метаматериала при всех углах падения  $E$  поляризованной волны будет равна единице, а вблизи частоты  $\omega_{00}$  её пространственная дисперсия будет существенно уменьшена.

## Эксперимент

Для экспериментальной проверки эффективности применения дополнительной решётки из спиралей для уменьшения пространственной дисперсии магнитной проницаемости метаматериала был использован образец метаматериала, исследование свойств которого приведено в [9, 10]. Его частота настройки  $f_{00}$  равна 2,8 ГГц. Для того, чтобы пространственная дисперсия такого метаматериала снизилась, необходимо изготовить дополнительную объёмную решётку такую, чтобы у соответствующей ей плоской решётки величина  $L_{\Sigma}$  составляла 150 нГн при частоте настройки. Резонансная частота  $\omega_p$  у дополнительной решётки должна быть ниже частоты настройки  $\omega_{00}$  на 25–35 процентов, т.е. около 2 ГГц.

Была изготовлена дополнительная объёмная решётка из спиралей длиной 12 мм с двадцатью пятью витками. Диаметр спиралей в ней составляет 1,3 мм. Спирали устанавливались в слой пенопласта с диэлектрической проницаемостью 1,03 толщиной около 20 мм с периодом  $18 \times 18$  мм. Измеренная резонансная частота изготовленной решётки получилась равной 2,1 ГГц. Изготовленная решётка из спиралей была установлена на поверхность образца метаматериала таким образом, чтобы спираль располагалась максимально близко к образцу. Внешний вид метаматериала из [9, 10] и спиралей, из которых была изготовлена дополнительная объёмная решётка, представлен на рисунке 8.

На рисунке 9 представлены измеренные частотные зависимости модуля и фазы КП образца метаматериала при нормальном падении ЭМВ и при наклонном падении ЭМВ под углом  $50^\circ$  при  $E$  поляризации. Измерения проводились по аттестованной методике измерений S-параметров плоских образцов материалов на измерительном стенде. Подробное описание методики и измерительного стенда представлено в [13]. Зависимости КП метаматериала представлены для двух комплектаций: без дополнительной решётки и с установленной на поверхность образца метаматериала дополнительной объёмной решёткой из спиралей.

Из графиков на рисунке 9 можно заметить, что разность фаз КП метаматериала с дополнительной решёткой при нормальном и наклонном падении волны существенно меньше, чем при отсутствии



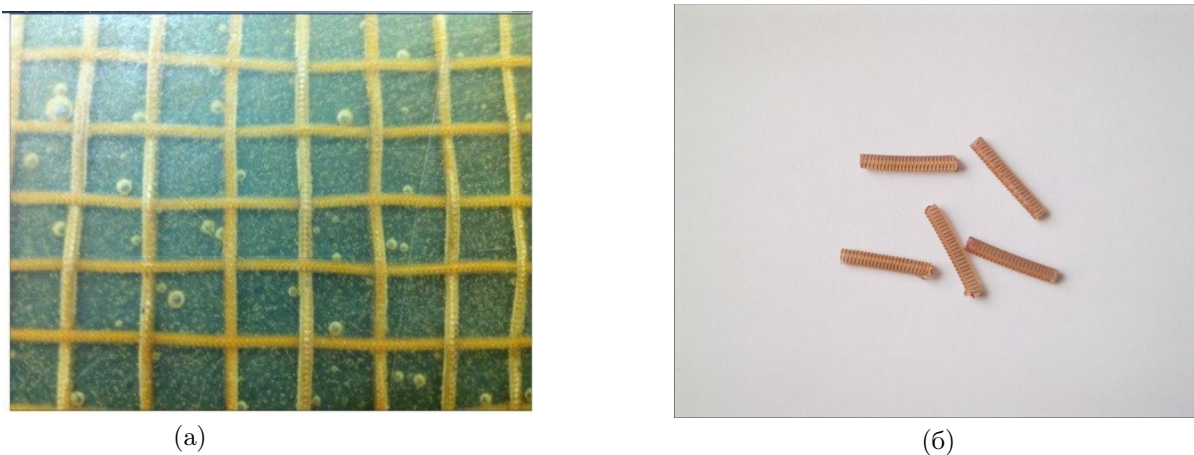


Рисунок 8 – Внешний вид метаматериала (а) и спиралей, из которых была изготовлена дополнительная объёмная решётка (б)

дополнительной решётки. Это означает, что пространственная дисперсия магнитной проницаемости, которая наблюдается у обычного метаматериала, существенно уменьшена с помощью дополнительной объёмной решётки. Уровень КП образца метаматериала как без, так и с дополнительной решёткой остаётся высоким – не меньше минус 0,3 дБ при частоте настройки. Отличие частотных зависимостей фазы КП образца метаматериала при нормальном падении волны в двух комплектациях связано с наличием достаточно толстого слоя пенопласта в дополнительной решётке.

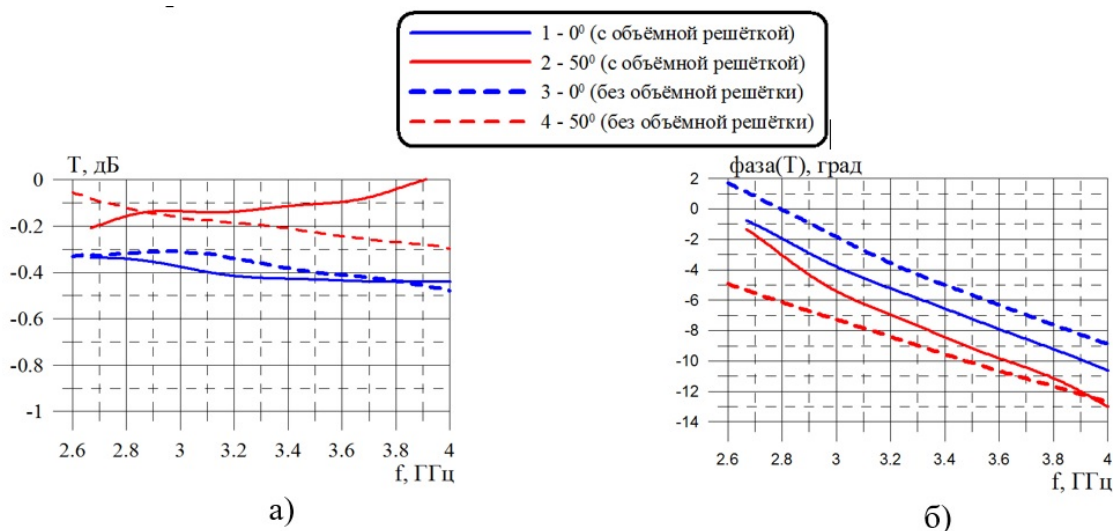


Рисунок 9 – Измеренные частотные зависимости модуля (а) и фазы (б) образца метаматериала в двух комплектациях при нормальном падении волны и при угле падения 50° при E поляризации

При H поляризации падающей ЭМВ спирали практически не влияют на радиотехнические характеристики образца метаматериала, поэтому частотные зависимости КП метаматериала при H поляризации не приводятся.

## Заключение

С середины двадцатого века в антенных РПУ использовались компенсационные решётки, которые позволяли проводить электродинамическое согласование стенок обтекателей в случае, когда эти стенки имели малые толщины по отношению к рабочим длинам волн антенн. Существенным недостатком в таких конструкциях стенок РПУ является большое отличие значений фазы КП при разной поляризации падающей волны. Это приводило как к поляризационным потерям в РПУ, так и к увеличению ошибок пеленга при сканировании. Применение представленного в данной работе метаматериала решает указанные проблемы.

В представленном метаматериале с эффективной диэлектрической проницаемостью, близкой к единице в отличие от метаматериала, описанного в [9], практически отсутствует пространственная

дисперсия магнитной проницаемости при падении на него  $E$  поляризованной волны. Это означает, что вблизи частоты настройки метаматериала значения КП изготовленной из него стенки РПУ практически не зависят от угла падения и поляризации падающей волны. В результате РПУ, изготовленный из представленного метаматериала, практически не будет вносить искажения в излучательные характеристики укрываемой им антенны.

## Список литературы

- [1] Каплун В.А. “Обтекатели антенн СВЧ”, М.: Советское радио, 1974, с. 240.
- [2] Патент RU 2 420 838 C1 Сверхширокополосный антенный обтекатель / Опубликовано 10.06.2011 г. бюлл. № 16. Изобретатели: Иванова Любовь Николаевна (RU), Кохнюк Данил Данилович (RU), Коробейников Герман Васильевич (RU), Дель Валентина Альбертовна (RU), Тимкин Александр Васильевич (RU), Абрамов Сергей Петрович (RU), Хатинов Сергей Амерзянович (RU). Заявка: 2010119087/07, 11.05.2010 г. Патентообладатель: Открытое акционерное общество "Центральное конструкторское бюро автоматики"(RU).
- [3] John Brown Artificial dielectrics having refractive indices less than unity // London: Proc. Inst. Elect. Eng. Part IV, vol. 100, Monograph № 62R, 1953, p.p. 51-62.
- [4] Гуртовник И.Г., Соколов В.И., Трофимов Н.Н., Шалгунов С.И. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков / М.: Мир, 2003. – 368 с.
- [5] Патент DE102008036012(A1), Германия. Radome for radar sensor in a motor vehicle / Опубликовано 2010-02-11. Изобретатели: PFEIFFER FLORIAN [DE], BIEBL ERWIN [DE]. Заявитель: AUDI NSU AUTO UNION AG [DE].
- [6] Патент RU 2168816C1 Радиопрозрачная стенка обтекателя / Опубликовано 10.06.2001 г. Изобретатели: Акоюн И.Г. [RU], Мгарков Е.А. [RU], Сухов А.М. [RU], Турко А.С. [RU]. Заявитель: Федеральное государственное унитарное предприятие – Московский научно-исследовательский институт «Агат» [RU].
- [7] Патент № 2459323, 04.05.2010. Россия. Стенка радиопрозрачного укрытия / Опубликовано: 20.08.2012. Изобретатель: К.М. Басков. Заявитель: ИТПЭ РАН.
- [8] Басков К.М. Стенка радиопрозрачного укрытия, состоящая из диэлектрических слоев и компенсационных металлических решеток [Электронный ресурс] // Журнал радиоэлектроники, 2011, № 12. – 23 с. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec11/14/text.html>.
- [9] Басков К.М. Метаматериал с повышенной механической прочностью и диэлектрической проницаемостью близкой к единице // Журнал радиоэлектроники, № 9, сентябрь 2013. – Электронный ресурс: <http://jre.cplire.ru/jre/sep13/14/text.html>.
- [10] Басков К.М. Современное электродинамическое сопровождение проектирования и изготовления систем антенна – радиопрозрачное укрытие: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.12.07 – Москва, 2016. – 191 с.
- [11] Семененко В.Н., Басков К.М., Краснолобов И.И., Фурманова Т.А., Акимов Д.И. Радиопрозрачные укрытия со свойствами угловой фильтрации для параболической зеркальной антенны. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 5 (DOI 10.30898/1684-1719.2018.5.7). Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may18/7/text.pdf>.
- [12] Бодров В.В., Сурков В.И. Математическое моделирование устройств СВЧ и антенн / Москва, Издательство МЭИ, 1994. – 96 с.
- [13] Семененко В.Н., Чистяев В.А., Политико А.А., Басков К.М. Стенд для измерений в свободном пространстве радиофизических параметров материалов в сверхширокой полосе сверхвысоких частот. Измерительная техника, № 2, 2019, с. 55–59 (doi:10.32446/0368-1025it.2019-2-55-59).



**METAMATERIAL WITH MECHANICAL STRENGTH AND  
DIELECTRIC PERMITTIVITY IS CLOSE TO UNITY.  
IMPROVED CONSTRUCTION**

**K.M. Baskov<sup>\*1</sup>, I.I. Krasnolobov<sup>1</sup>, V.N. Semenenko<sup>1</sup>, T.A. Furmanova<sup>1</sup>,  
V.A. Chistyayev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics of RAS, Moscow, Russia  
\* kokofech@rambler.ru

**Abstract**

The article is a continuation of the work in which the electrodynamic properties of a mechanically strong metamaterial with a dielectric constant close to unity were investigated. In previous work, it was shown that such a material can be effective in creating radomes shelters. At the same time, such a metamaterial has a significant drawback, namely, it has a spatial dispersion of magnetic permeability when a E polarized electromagnetic wave falls on a layer of such material. This article is devoted to research aimed at eliminating this shortcoming and, as a result, improving the radio engineering quality of such a metamaterial. The article shows that the inclusion in the composition of the metamaterial of an additional periodic lattice of thin spirals installed perpendicular to its surface makes it possible to significantly reduce the dependence on the angle of incidence of magnetic permeability, which is observed when a E polarized wave falls on the metamaterial.

**Key words:** Metamaterial, Antenna, Radome, Transmission Coefficient, Permittivity

---