

БЛОЧНЫЙ ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ И ОЦЕНКИ СНИЖЕНИЯ ЭПР НЕПОГЛОЩАЮЩИХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ 2-БИТНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ ЦИФРОВЫХ МЕТАПОКРЫТИЙ

А. И. Семенихин, Д. В. Семенихина, Ю. В. Юханов, П. В. Благовисный

**Южный Федеральный Университет, Институт радиотехнических систем и управления,
347928, Таганрог, пер. Некрасовский, 44**

Статья поступила в редакцию 4 декабря 2020 г.

Аннотация. Рассмотрен блочный принцип построения матриц кодирования непоглощающих плоских цифровых анизотропных метапокрытий (МП), применяемых для снижения моностатических ЭПР объектов. Сущность данного принципа состоит в 2-битном кодировании углов наклона осей анизотропии модулей МП таким образом, чтобы произвольные соседние четыре модуля МП образовывали две пары противофазных модулей. Применение блочного принципа при разработке МП обеспечивает снижение моностатической ЭПР на кроссовой поляризации благодаря интерференционному гашению волн. Снижение моностатической ЭПР МП на согласованной поляризации (ко-ЭПР) обусловлено твист-эффектом. Одновременно с гашением и твист-эффектом в разработанных цифровых МП реализовано диффузное рассеяние волн. Предложенные 2-битные анизотропные МП позволяют достичь более эффективного снижения моностатических ко-ЭПР (по отношению к традиционно принятому уровню минус 10 дБ) в широкой полосе частот, для различных плоскостей поляризации падающей волны. Разработаны импедансные и полноволновые модели двух основных блоков цифровых анизотропных МП. Для импедансной модели блока МП с помощью метода физической оптики получено асимптотическое представление поляризационной матрицы рассеяния. Алгоритм расчёта частотных характеристик (ЧХ) моностатических ко-ЭПР импедансных моделей

блоков МП реализован в программе Octave. Полноволновые модели блоков МП построены в программе HFSS. Изготовлены макеты двух основных блоков МП. Измерены моностатические ко-ЭПР блоков в полосе частот 7÷17.5 ГГц для различных поляризаций падающей волны. Показано хорошее совпадение рассчитанных и измеренных ЧХ моностатических ЭПР моделей и макетов блоков 2-битных анизотропных МП. Рассчитанные и измеренные уровни снижения моностатической ЭПР основных блоков составили не менее 12,5 – 13,5дБ на разных ко-поляризациях в полосе от 10,2 до 17,5 ГГц и выше (по результатам расчетов).

Ключевые слова: анизотропные цифровые метапокрытия, метаповерхности, измерение ЭПР, твист-эффект, метод физической оптики, матрицы кодирования, полноволновое моделирование.

Abstract. The block principle of constructing of coding matrices for non-absorbing flat digital anisotropic meta-coatings (MC) used to reduce monostatic RCS of objects is considered. The essence of this principle consists in 2-bit coding of the tilt angles of the anisotropy axes of the MC modules so that four arbitrary adjacent modules of the MC form two pairs of antiphase modules. The use of the block principle in the development of a MC provides a reduction of monostatic RCSs on cross polarization due to cancellation of interference waves. The reduction of the monostatic RCS of a MC at matched polarization (co-RCS) is due to the twist-effect. Simultaneously with cancellation and twist-effect, diffuse wave scattering is implemented in the developed digital MCs. The proposed 2-bit anisotropic MCs make it possible to achieve a more effective reduction of monostatic co-RCS (in relation to the traditionally accepted level of minus 10 dB) in a wide frequency band, for different polarization planes of the incident wave. The impedance and full-wave models of the two main blocks of digital anisotropic MCs are developed. An asymptotic representation of the polarization scattering matrix is obtained for the impedance model of the MC block using the method of physical optics. The algorithm for calculating the frequency characteristics (FC) of monostatic co-RCS of impedance models of MC blocks is implemented in the Octave program. Full-wave models of MC blocks are built using

the HFSS program. Layouts of two main MC blocks were made. Monostatic co-RCSs of the blocks are measured in the 7÷17.5 GHz frequency band for different polarizations of the incident wave. It is shown that the calculated and measured frequency characteristics of monostatic RCS of the models and layouts of blocks of 2-bit anisotropic MCs are in good agreement. The calculated and measured levels of monostatic RCS reduction of the main blocks are at least 12.5 – 13.5 dB at different co-polarizations in the band from 10.2 to 17.5 GHz and higher (based on the results of calculations).

Key words: anisotropic digital meta-coatings, metasurfaces, measurement of RCS, twist-effect, physical optics method, coding matrices, full-wave simulation.

Введение

Снижение ЭПР плоских металлических поверхностей с помощью шахматных, диффузных и цифровых метапокрытий (МП) обеспечивается, прежде-всего, благодаря интерференционному гашению волн, отражённых соседними противофазными модулями МП [1-5]. Одними из первых экспериментальное снижение ЭПР шахматных МП из искусственных магнитных проводников получили авторы [1, 2]. Измеренные рабочие полосы МП составили 42% (18,75 ГГц) [1] и 60% (5,9 ГГц) [2]. Методом «роя частиц» авторы [4] синтезировали МП с рабочей полосой 95% (7,25 ГГц). Здесь относительные рабочие полосы указаны по уровню снижения обратной ЭПР минус 10дБ; в скобках указана центральная частота.

В [6, 7] исследованы анизотропные шахматные 1-битные МП. Они реализуют твист-эффект, что приводит к снижению ЭПР на согласованной (ко-) поляризации (ко-ЭПР). Кроссовая (кросс-) ЭПР снижается за счёт гашения волн, отражённых от противофазных модулей. По результатам измерений рабочие полосы МП равны 48% (5,1 ГГц) [6] и 82% (12,75 ГГц) [7].

В цифровых МП расположение модулей кодируется в соответствии с матрицей кодирования [8, 9]. В таких покрытиях вместе с гашением и деполяризацией волн проявляется диффузное рассеяние, что позволяет

эффективнее снижать ЭПР. В [8, 9] с помощью алгоритма «роя частиц» реализованы сверхширокополосные МП. В [10] предложен блочный принцип построения бинарных (1-битных) МП.

Целью настоящей работы является рассмотрение блочного принципа построения и моделей более эффективных по снижению ЭПР (>10дБ) цифровых МП с 2-битным кодированием угла наклона осей анизотропии и собственных реактансов, а также численная и экспериментальная оценки снижения моностатической ко-ЭПР импедансных и полноволновых моделей разработанных основных блоков МП и макетов МП при облучении волной с различной линейной поляризацией.

1. Импедансная модель 2-битного метапокрытия

Геометрия задачи рассеяния плоской волны на импедансной модели блока анизотропного цифрового 2-битного МП показана на рис.1 [11].

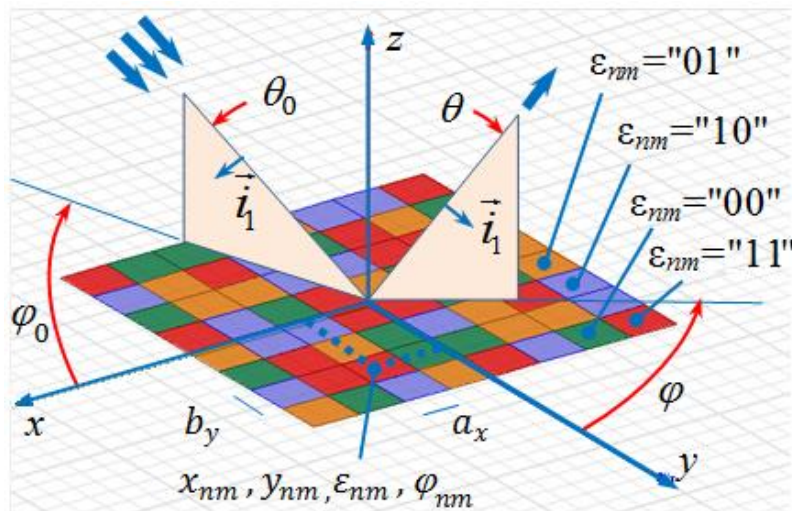


Рис.1. Импедансная модель блока 2-битного метапокрытия.

Блок МП состоит из $N \times M$ модулей с размерами a_x, b_y и номерами $n = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M$ (размеры блока $a = N \times a_x, b = M \times b_y$). Модули описываются цифровыми битами $\epsilon_{nm} = "pq"$, $p=0, 1; q=0, 1$ или соответствующим индексом $t=2p+q$ ($t=0, 1, 2, 3$). Каждый импедансный nm -модуль характеризуется координатами x_{nm}, y_{nm} , углами наклона осей анизотропии $\varphi_{nm} = (2p+q)\pi/4$ и тензором поверхностного импеданса при $z=0$:

$$\hat{Z}^{(nm)}(\varepsilon_{nm}) = \sum_{t=0}^3 \hat{Z}^{(t)}(\varphi_{nm}) \delta_t^{(2p+q)}, \quad (1)$$

где $\hat{Z}^{(t)}(\varphi_{nm})$ - нормированные (на 377 Ом) тензоры поверхностных импедансов t -модулей, δ_α^β - символ Кронекера; $\varphi_{nm} = 0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$.

Поляризационная матрица рассеяния (ПМР) описанной импедансной модели МП в приближении метода физической оптики (МФО) в линейных поляризационных базисах с первыми ортами \vec{i}_1 (рис. 1) имеет вид [11]:

$$\hat{S}(\theta, \varphi) \approx k^2 ab \frac{\sin A}{A} \frac{\sin B}{B} \mathbf{U} + \frac{k^2 ab}{NM} \frac{\sin A'}{A'} \frac{\sin B'}{B'} \mathbf{T} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \hat{S}'(\varepsilon_{nm}) \exp(-iksx_{nm} + ikcy_{nm}), \quad (2)$$

$$\hat{S}'(\varepsilon_{nm}) = \sum_{t=0}^3 \hat{S}'^{(t)} \delta_t^{(2p+q)}, \quad (3)$$

где $A=kas/2$, $A'=A/M$, $B=kbc/2$, $B'=B/N$, $k=2\pi/\lambda$, λ – длина волны в свободном пространстве, параметры s , c и элементы матриц \mathbf{U} , \mathbf{T} определяются углами облучения и наблюдения [11].

Алгоритм расчёта ПМР (2) реализован в программе Octave [12] и применен ниже для расчёта частотных характеристик (ЧХ) обратных ко-ЭПР импедансных моделей разработанных блоков МП.

Матрицы рассеяния t -модулей в (3) рассчитывались с использованием гомогенизированных в пакете HFSS [13] входных собственных реактансов единичных ячеек, входящих в состав модулей МП.

2. Блочный принцип построения 2-битных анизотропных МП

В работе предложен блочный принцип формирования матрицы кодирования $\|\varepsilon_{nm}\|$ анизотропных 2-битных МП. Рассмотрим его на примере фрагмента метапокрытия, который состоит из 4-х блоков - основных 4x4-блоков C , D и вспомогательных 4x4-блоков E , F (рис.2; рис.3,а-г).

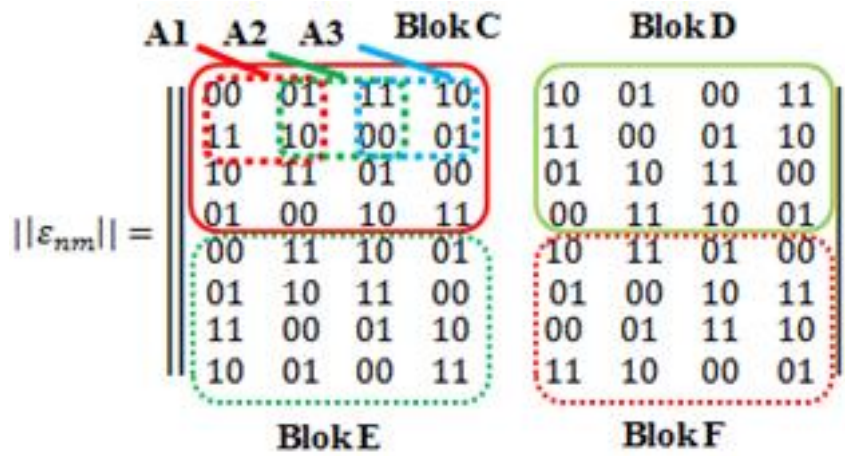


Рис.2. Пример матрицы кодирования фрагмента МП из четырех 4x4-блоков.

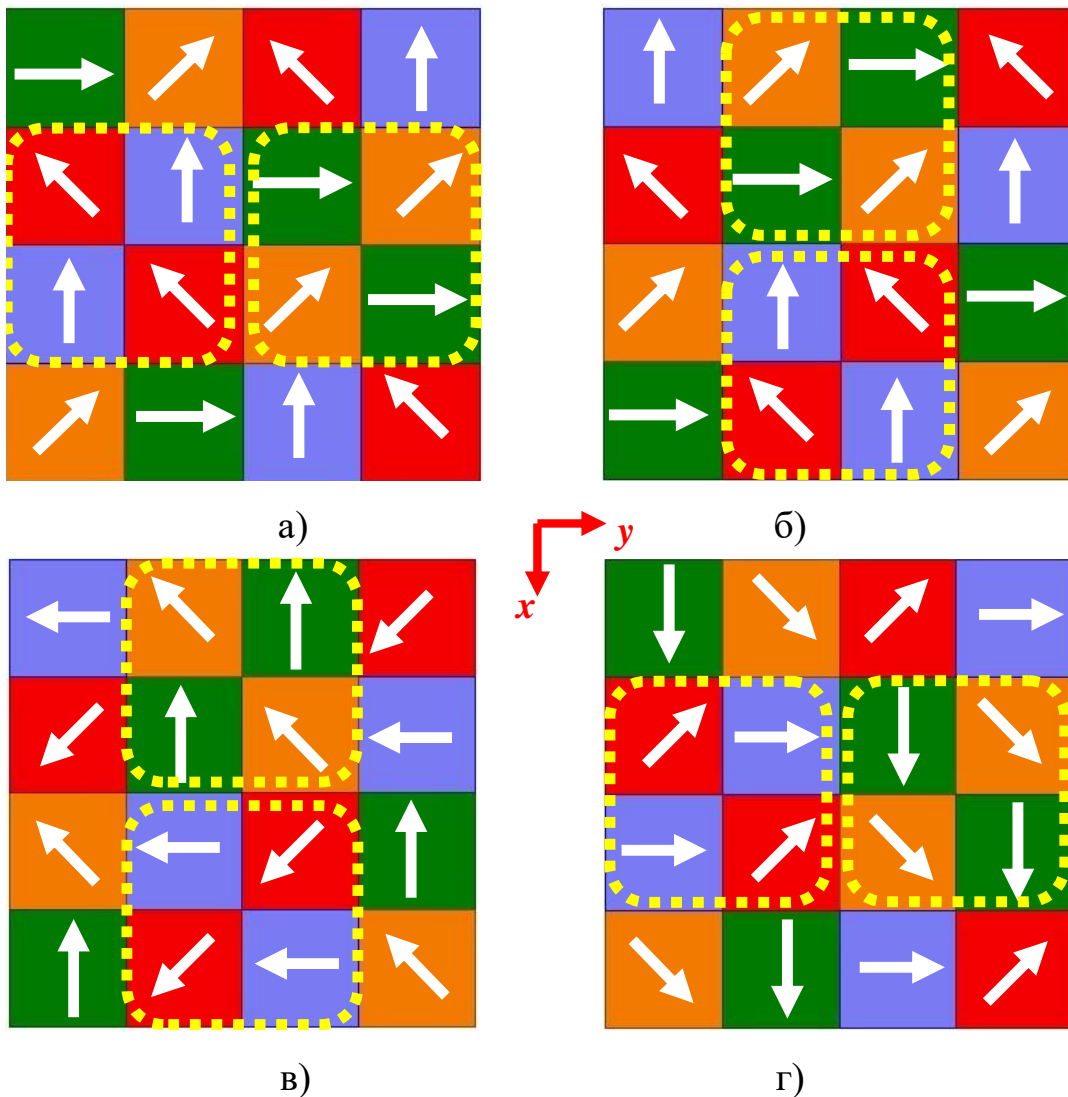


Рис.3. Оси анизотропии четырех блоков: C (а), D (б), E (с), F (д).

Блок C строится так, чтобы коды любых (по возможности) соседних четырех модулей образовывали наименьший сбалансированный 2x2-субблок,

например, субблоки A1, A2, A3 (рис.2). Сбалансированные субблоки состоят из двух пар кодов "00"/"10" и "01"/"11". Они характеризуют две пары «противофазных» модулей МП. Матрица кодирования блока *D* отличается поворотом на угол минус 90° всех элементов матрицы блока *C*.

Каждый блок содержит 16 модулей, оси анизотропии модулей показаны на рис.3 стрелками. Метапокрытия в виде вспомогательных блоков *E* и *F* получаются физическим поворотом на $\pm 90^\circ$ блоков *C* и *D*.

Таким образом, каждый рассмотренный блок будет содержать лишь по 2 разбалансированных 2x2-субблока. Они выделены пунктирными линиями на рис.3.

3. Полноволновые модели блоков 2-битных анизотропных МП

Полноволновые модели основных блоков *C* и *D* МП разработаны на основе метачастиц в виде «восьмёрок» толщиной 35 мкм [14], расположенных на экранированной подложке F4В толщиной 3мм (см. врезки на рис.4,а).

Каждая метачастица представляет собой два связанных эллиптических кольцевых резонатора. Полуоси внешнего эллипса метачастиц с углами наклона осей анизотропии 0° и 90° равны 1,9мм и 1мм, внутреннего – 1,615мм и 0,85мм. Для метачастиц с углами наклона осей анизотропии 45° и 135° полуоси внешнего эллипса равны 2,07мм и 0,9мм, внутреннего – 1,84мм и 0,8мм. Размер единичных ячеек 8x8 мм, размер модулей 48x48 мм. Матрицы кодирования блоков ($N=4$, $M=4$) соответствуют выше описанному блочному принципу.

Полноволновые модели основных блоков *C* и *D* показаны на рис.4. Блоки содержат по 576 метачастиц. Расчёт ЭПР полноволновых моделей проводился методом конечных элементов [13]. Численные результаты для гомогенизированных импедансных и полноволновых моделей блоков и их сравнение с экспериментальными данными обсуждаются ниже.

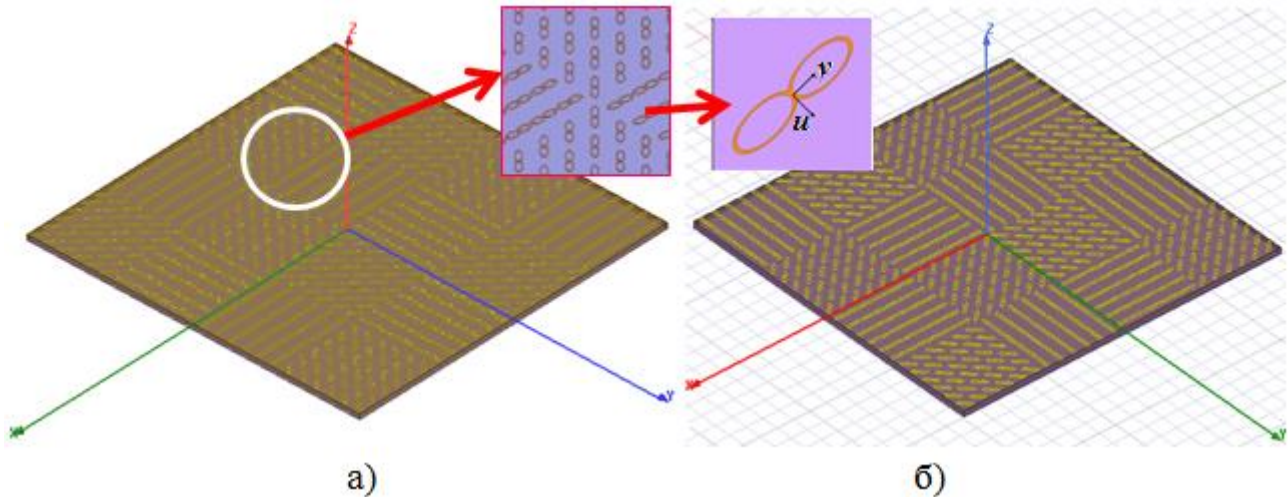


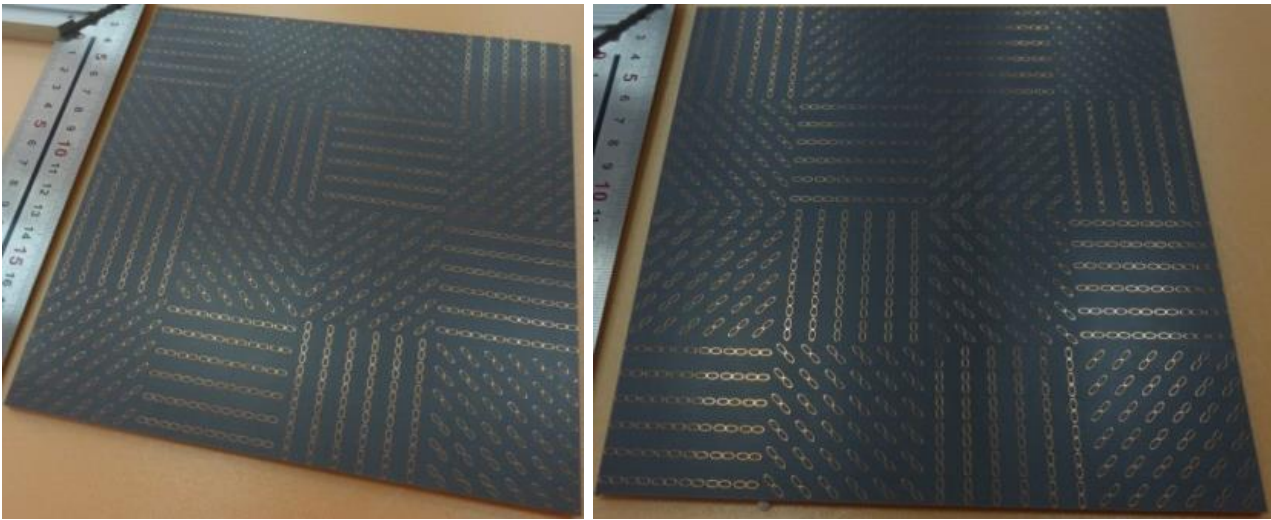
Рис.4. Полноволновые модели основных блоков C (а) и D (б) метапокрытий.

4. Результаты численных и экспериментальных исследований ЭПР блоков метапокрытий

Изготовленные макеты двух основных блоков МП имели размер 192x192 мм и показаны на рис.5,а,б. Измерения моностатической ЭПР макетов проводились в безэховой камере (БЭК) центра коллективного пользования «Прикладная электродинамика и антенные измерения» ЮФУ (рис.5,в,г) на автоматизированном информационно-вычислительном комплексе АИВК-ТМСА-1.0-40.0-ДБЗ/TD,FD.

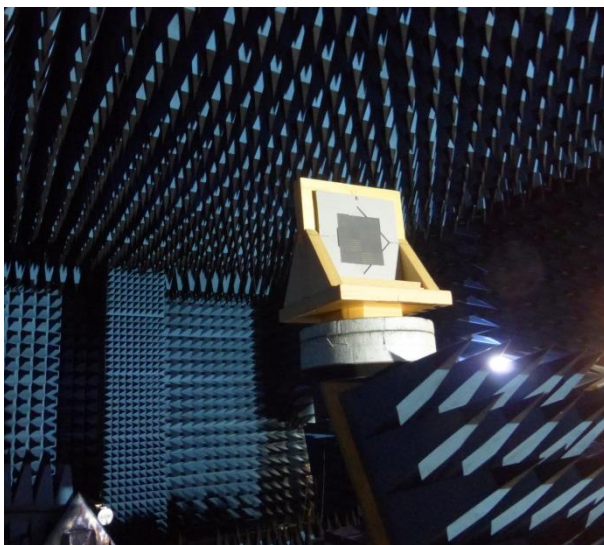
При измерениях фиксировались два положения макетов П0 (рис.5,в) и П45 (рис.5,г) и четыре плоскости поляризации падающей волны $\mathbf{E} \parallel \mathbf{P1}$, $\mathbf{E} \parallel \mathbf{P2}$, $\mathbf{E} \parallel \mathbf{D1}$, $\mathbf{E} \parallel \mathbf{D2}$. Плоскости поляризации P1, P2, D1, D2 показаны на вставках на рис.6.

Измерялись ЧХ моностатической ко-ЭПР макетов в полосе $7 \div 17,5$ ГГц при их облучении вблизи нормали волной вертикальной или горизонтальной поляризации. Эталоном служила обратная сторона макета в виде металлической пластины того же размера. Калибровка ЭПР осуществлялась по измеренному уровню сигнала, отраженного от эталона на этих частотах.

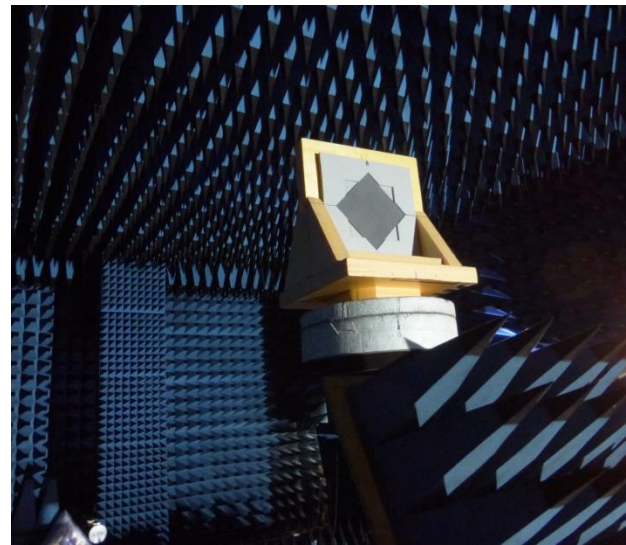


а)

б)



в)



г)

Рис.5. Фотографии изготовленных макетов блоков *C* (а), *D* (б) и радиопрозрачных ложементов с фиксацией двух положений макетов П0 (в) и П45 (г) в безэховой камере.

На рис.6 приводятся и сравниваются рассчитанные и измеренные ЧХ моностатических ко-ЭПР импедансных и полноволновых моделей и макетов блоков *C* и *D* для различных поляризаций падающей волны. Значения ЭПР указаны в дБ относительно 1 м^2 . Сплошные красные линии соответствуют экспериментальным данным, пунктирные голубые линии – результатам расчета для полноволновых моделей (HFSS), фиолетовые точки – результатам расчета для импедансных моделей (МФО), пунктирные зеленые линии – ЧХ ЭПР эталона.

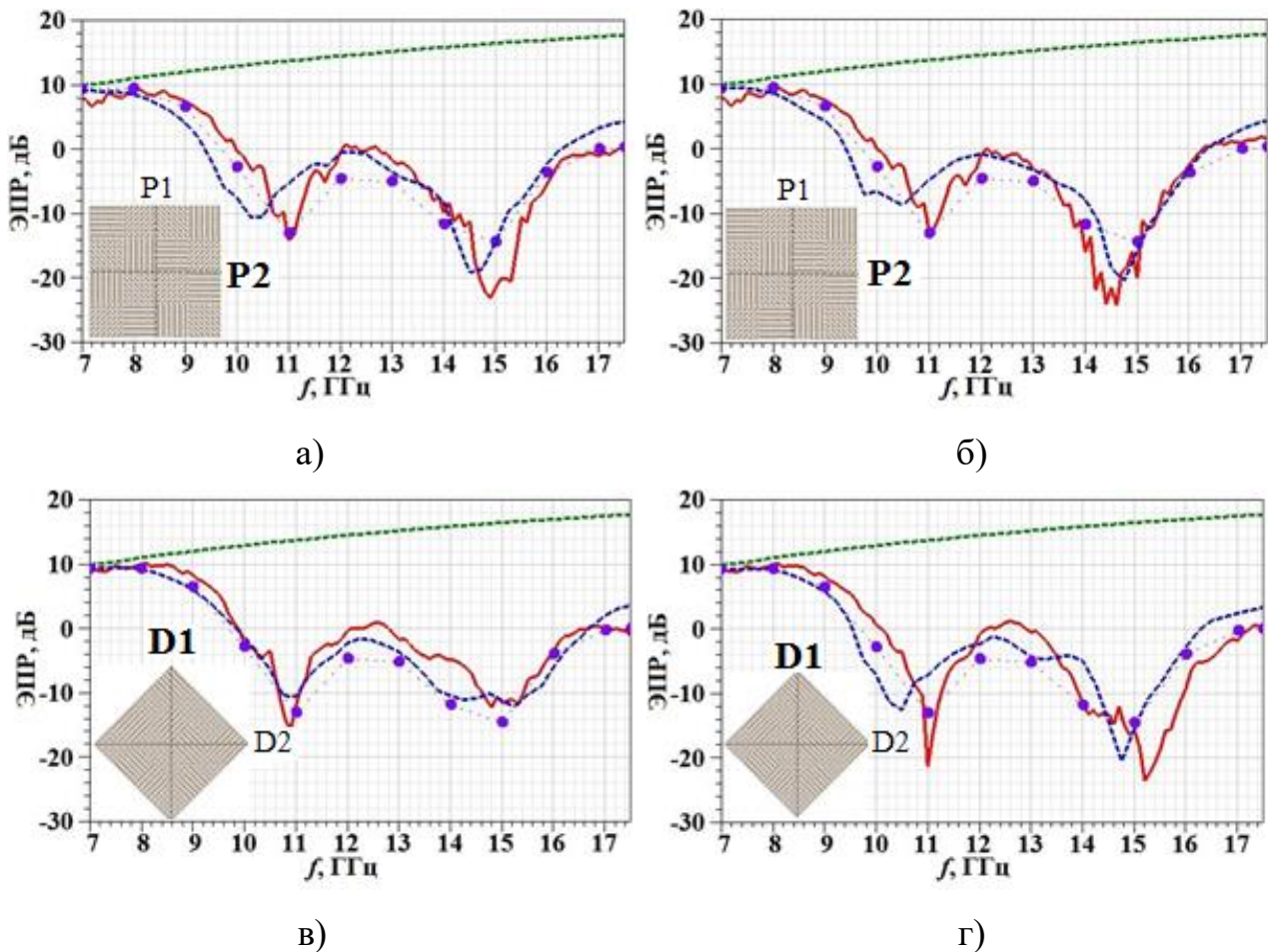


Рис. 6. ЧХ моностатических ко-ЭПР блоков *C* (а, в) и *D* (б, г) в положении П0 при $E \parallel P2$ (а, б) и в положении П45 при $E \parallel D1$ (в, г).

Из приведенных рисунков следует хорошее совпадение измеренных и рассчитанных ЧХ ЭПР для различных поляризаций падающей волны, что говорит об адекватности предложенных моделей МП.

Экспериментальная оценка эффективности снижения моностатических ко-ЭПР макетов *C* и *D* (относительно эталона) приведена на рис.7. Видно, что снижение ко-ЭПР макета *C* примерно одинаково для всех плоскостей поляризации падающей волны *P1*, *P2*, *D1*, *D2* и составляет 14 дБ в полосе 10,2÷17,5 ГГц (52% с центральной частотой 13,85 ГГц). Снижение ко-ЭПР макета *D* в этой же полосе частот равно 12,5 дБ, 14,5 дБ, 13,5 дБ и 14 дБ для плоскостей поляризации *P1*, *P2*, *D1*, *D2*, соответственно. Расчеты показывают, что оба макета обеспечивают снижение ко-ЭПР и на частотах выше 17,5 ГГц (до 21 ГГц).

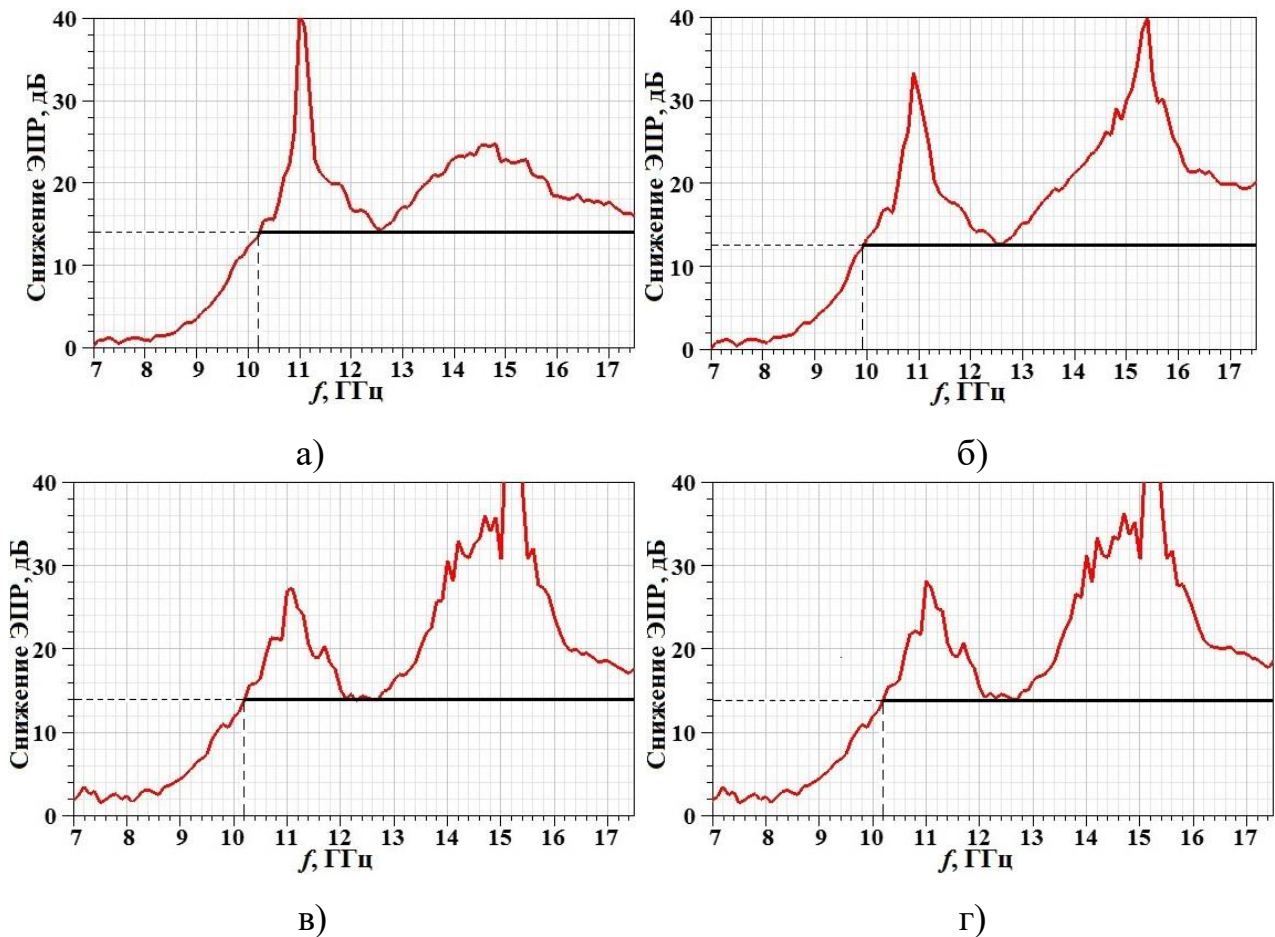


Рис. 7. Снижение моностатических ко-ЭПР макетов *C* (а, в) и *D* (б, г) в положении П0 при $E||P1$ (а, б) и в положении П45 при $E||D2$ (в, г).

Заключение

В статье рассмотрен блочный принцип построения 2-битных цифровых анизотропных метапокрытий. Приведены и сравниваются результаты численных и экспериментальных исследований моностатических ко-ЭПР импедансных и полноволновых моделей, а также изготовленных макетов двух разработанных основных блоков МП. Показано хорошее совпадение измеренных и рассчитанных ЧХ ко-ЭПР для различных поляризаций падающей волны, что говорит об адекватности предложенных импедансной и полноволновой моделей МП. Эффективность снижения ко-ЭПР двух основных блоков МП примерно одинакова и не менее 12,5 – 13,5 дБ для различных плоскостей поляризации падающей волны в полосе от 10,2 до 17,5 ГГц. Блоки обеспечивают снижение ко-ЭПР и на частотах выше 17,5 ГГц. Таким образом, разработанные блоки 2-битных цифровых метапокрытий могут применяться

для широкополосного снижения ко-ЭПР плоских участков металлических объектов.

Работа выполнена в ЦКП «Прикладная электродинамика и антенные измерения» Южного федерального университета по гранту Российского научного фонда - проект № 16-19-10537-П. Авторы выражают благодарность И.В. Ильину за проведение измерений ЭПР.

Литература

1. Iriarte J.C., Pereda A.T., de Falcon J.L.M., Ederra I., Gonzalo R. Broadband Radar Cross-Section Reduction using AMC Technology // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2013. Vol.61. No.12. P.6136-6143. <https://doi.org/10.1109/tap.2013.2282915>
2. Chen W., Balanis C.A., Birtcher C.R. Checkerboard EBG Surfaces for Wideband Radar Cross Section Reduction // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015. Vol.63. No.6. P.2636-2645. <https://doi.org/10.1109/tap.2015.2414440>
3. Chen W., Balanis C.A., Birtcher C.R. Dual Wide-Band Checkerboard Surfaces for Radar Cross Section Reduction // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2016. Vol.64. No.9. P.4133-4138. <https://doi.org/10.1109/tap.2016.2583505>
4. Haji-Ahmadi M.-J., Nayyeri V., Soleimani M., Ramahi O.M. Pixelated Checkerboard Metasurface for Ultra-Wideband Radar Cross-Section Reduction // Scientific Reports. 2017. Vol.7. No.1. 12 p. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-11714-y>
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-11714-y>
5. Modi A.Y., Balanis C.A., Birtcher C.R., Shaman H. Novel Design of Ultrabroadband Radar Cross Section Reduction Surfaces using Artificial Magnetic Conductors // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2017. Vol.65. No.10. P.5406-5417. <https://doi.org/10.1109/tap.2017.2734069>

6. Yang J.J., Cheng Y.Z., Ge C.C., Gong R.Z. Broadband Polarization Conversion Metasurface Based on Metal Cut-Wire Structure for Radar Cross Section Reduction // Materials. 2018. Vol.11. No.4. 12 p. Available at:
<https://www.mdpi.com/1996-1944/11/4/626/htm>
<https://doi.org/10.3390/ma11040626>
7. Jiang W., Xue Y., Gong S.-X. Polarization Conversion Metasurface for Broadband Radar Cross Section Reduction // Progress In Electromagnetics Research Letters. 2016. Vol.62. P.9-15. Available at:
<http://www.jpier.org/PIERL/pier.php?paper=16060504>
<https://doi.org/10.2528/pierl16060504>
8. Su J., Lu Y., Liu J., Yang Y., Li Z., Song J. A Novel Checkerboard Metasurface Based on Optimized Multielement Phase Cancellation for Superwideband RCS Reduction // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. Vol.66. No.12, P.7091-7099. <https://doi.org/10.1109/tap.2018.2870372>
9. Lu Y., Su J., Liu J., Guo Q., Yin H., Li Z., Song J. Ultrawideband Monostatic and Bistatic RCS Reductions for Both Copolarization and Cross Polarization Based on Polarization Conversion and Destructive Interference // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019. Vol.67. No.7. P.4936-4941. <https://doi.org/10.1109/tap.2019.2911185>
10. Семенихин А.И., Семенихина Д.В., Юханов Ю.В., Климов А.В. Снижение ЭПР с помощью непоглощающих бинарных покрытий с анизотропной импедансной метаповерхностью // Антенны, 2019. №1. С.65-72
<https://doi.org/10.18127/j03209601-201901-09>
11. Semenikhin A.I., Semenikhina D.V., Yukhanov Y.V., Blagovisnyy P.V. Broadband RCS Reduction Using Digital Impedance Metasurfaces with 2-bit Coding of Axes of Anisotropy and Eigen Reactances // 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama). 2018. 8 p. <https://doi.org/10.23919/piers.2018.8597701>
12. GNU Octave: Scientific Programming Language. Available online: <https://www.gnu.org/software/octave/> (Дата обращения: 27.09.2020)

13. Ansys HFSS: 3D Electromagnetic Field Simulator for RF and Wireless Design.
Available online: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss/> (Дата обращения: 27.09.2020)
14. Благовисный П.В., Семенихин А.И. Полноволновые и импедансные модели сверхширокополосных тонких твист-метаполяризаторов для радиомаскирующих покрытий. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.8.12>

Для цитирования:

Семенихин А.И., Семенихина Д.В., Юханов Ю.В., Благовисный П.В. Блочный принцип построения и оценки снижения ЭПР непоглощающих широкополосных 2-битных анизотропных цифровых метапокрытий. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.4>