

Радиолокация и радионавигация

УДК 537.874.2

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-4-57-67>

Экспериментальные и численные исследования диаграмм обратного рассеяния блоков маскирующих цифровых двухбитных метапокрытий

А. И. Семенихин¹, Д. В. Семенихина¹, Ю. В. Юханов¹,
П. В. Благовисный^{1, 2✉}, И. В. Ильин¹

¹Институт радиотехнических систем и управления
Южного федерального университета, Таганрог, Россия

²Центр фотоники и двумерных материалов Московского
физико-технического института, Долгопрудный, Россия

✉ pavelblagvisnyy@gmail.com

Аннотация

Введение. Диаграммы рассеяния непоглощающих кодированных шахматно-подобных метапокрытий (МП) для снижения эффективной площади рассеяния (ЭПР) металлических поверхностей объектов неизбежно содержат боковые дифракционные лепестки. В связи с этим актуальна разработка МП с низким уровнем дифракционных лепестков. С этой целью предложено использовать шахматно-подобные МП в виде набора нескольких основных плоских блоков с одинаковыми размерами. В статье рассмотрены 2 таких основных блока МП с разными матрицами кодирования. Ячейки метаповерхности содержат связанные эллиптические кольцевые резонаторы и отличаются двухбитным кодированием угла наклона оси анизотропии. Матрицы кодирования блоков МП построены по блочному принципу.

Цель работы. Экспериментально и численно исследовать диаграммы обратного рассеяния (ДОР) на согласованной (ко-) и ортогональной (кросс-) поляризациях двух разработанных плоских блоков двухбитных цифровых непоглощающих анизотропных МП для различных плоскостей и поляризаций облучения.

Материалы и методы. Полноволновое моделирование блоков МП выполнено в программе HFSS методом конечных элементов. Измерения ДОР изготовленных макетов МП проведены на автоматизированном информационно-вычислительном комплексе АИВК-ТМСА-1.0-40.0-ДБЗ/ТД,FD в безэховой камере ЦКП "Прикладная электродинамика и антенные измерения" Южного федерального университета.

Результаты. Снижение моностатических ЭПР двух блоков при нормальном облучении примерно одинаково и составляет не менее 12 дБ в полосе от 9.8 до 21 ГГц. Отмечено хорошее совпадение результатов полноволнового моделирования и измерения ДОР блоков разработанных метапокрытий в области центральных лепестков для различных плоскостей и поляризаций облучения. В главных плоскостях блоки гасят центральные лепестки ДОР на 10...25 дБ; в секторе углов около $\pm 40^\circ$ обратная ЭПР блоков ниже, чем у эталона. В диагональных плоскостях наблюдается гашение ЭПР на 13...15 дБ и расширение центрального лепестка ДОР на кополяризациях, а также раздвоение этого лепестка на кроссполяризациях в секторе углов $\pm 9^\circ$. Вне этого сектора ЭПР блоков соизмерима с ЭПР эталона.

Заключение. Разработанные блоки двухбитных цифровых непоглощающих анизотропных МП могут применяться для широкополосного гашения ЭПР металлических поверхностей.

Ключевые слова: метапокрытие, цифровая метаповерхность, диаграмма обратного рассеяния, снижение ЭПР, твист-эффект, матрица кодирования

Для цитирования: Экспериментальные и численные исследования диаграмм обратного рассеяния блоков маскирующих цифровых двухбитных метапокрытий / А. И. Семенихин, Д. В. Семенихина, Ю. В. Юханов, П. В. Благовисный, И. В. Ильин // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 4. С. 57–67. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-57-67

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена в ЦКП "Прикладная электродинамика и антенные измерения" Южного федерального университета по гранту Российского научного фонда. Проект № 16-19-10537-П.

Статья поступила в редакцию 06.04.2021; принята к публикации после рецензирования 18.05.2021; опубликована онлайн 29.09.2021

© Семенихин А. И., Семенихина Д. В., Юханов Ю. В., Благовисный П. В., Ильин И. В., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License

Experimental and Numerical Investigations of Backscatter Patterns of the Blocks of Masking Digital Two-Bit Meta-covers

Andrey I. Semenikhin¹, Diana V. Semenikhina¹, Yury V. Yukhanov¹,
Pavel V. Blagovisnyy^{1,2✉}, Igor V. Ilyin¹

¹Institute of radio engineering systems and control of Southern
Federal University, Taganrog, Russia

²Center for Photonics and 2D Materials of Moscow Institute
of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

✉pavelblagvisnyy@gmail.com

Abstract

Introduction. The scattering patterns of non-absorbing coded checkerboard-like meta-coatings (MCs) applied for reducing the radar cross section (RCS) of metal surfaces inevitably contain side diffraction lobes. Therefore, the development of MCs with a low level of diffraction lobes is relevant. For this purpose, it is proposed to use checkerboard-like MCs in the form of a set of several basic flat blocks with the same dimensions. The paper discusses two such basic MC blocks with different coding matrices. The cells of the metasurface contain two coupled elliptical ring resonators and are distinguished by a 2-bit coding of the tilt angle of the anisotropy axis. Coding matrices of the MC blocks are built according to the block principle.

Aim. To investigate experimentally and numerically backscatter patterns (BSP) for consonant (co-) and orthogonal (cross-) polarizations of the two developed flat blocks of the 2-bit digital nonabsorbing anisotropic MCs for different planes and polarizations of irradiation.

Materials and methods. Full-wave simulation of the MC blocks was carried out using the HFSS software by the finite element method. BSP measurements of the fabricated MC layouts were performed in an anechoic chamber of the Center for Collective Usage "Applied Electrodynamics and Antenna Measurements" of the Southern Federal University using an automated information and computing complex.

Results. The RCS reduction for the two blocks under normal irradiation is approximately the same and not less than 12 dB over the 9.8...21 GHz band. A good matching between the simulation and measurement results of backscattering patterns of the blocks in the region of the central lobes for various planes and polarizations of the irradiation is noted. In the principal planes, the blocks cancel the central lobes of the BSP by 10...25 dB; in the sector of angles of around $\pm 40^\circ$, the backward RCS of the blocks is lower than that of the reference. In the diagonal planes, there is a cancellation of the RCS by 13...15 dB and an expansion of the central lobe of the BSP for copolarizations, as well as a bifurcation of this lobe for crosspolarizations in the sector of angles $\pm 9^\circ$; outside of this sector the RCSs of the blocks are commensurate with the RCS of the reference.

Conclusion. The developed blocks of the 2-bit digital nonabsorbing anisotropic MCs can be used for broadband cancellation of the RCS of metal surfaces.

Keywords: meta-cover, digital metasurface, backscatter pattern, RCS reduction, twist-effect, coding matrix

For citation: Semenikhin A. I., Semenikhina D. V., Yukhanov Yu. V., Blagovisnyy P. V., Ilyin I. V. Experimental and Numerical Investigations of Backscatter Patterns of the Blocks of Masking Digital Two-Bit Meta-covers. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 4, pp. 57–67. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-4-57-67

Conflict of interest. Authors declare no conflicts of interest.

Source of financing. The work was performed at the Center for Collective Usage "Applied Electrodynamics and Antenna Measurements" of the Southern Federal University, Russia, and was financially supported by the Russian Science Foundation, Project no. 16-19-10537-P.

Submitted 06.04.2021; accepted 18.05.2021; published online 29.09.2021

Введение. Непоглощающие кодированные шахматно-подобные метапокрытия (МП) интенсивно исследуются в последние десятилетия с целью оценки возможностей и ограничений сверхширокополосного снижения эффективной площади рассеяния (ЭПР) плоских маскируемых поверхностей в различных диапазонах длин волн [1–5]. Концепция кодированных цифровых покрытий предложена в [6–8]. Такие МП состоят из элементарных ячеек различных видов. Однобитные (бинарные) МП состоят из ячеек двух видов, условно обозначаемых битами "0" и "1". Как правило, эти коды соответствуют различным дискретным состояниям фаз коэффициентов отражения волн от элементарных ячеек метапокрытий. Данная концепция расширяется до двухбитного (или мультибитного) кодирования МП [7, 8]. При этом метапокрытие состоит из четырех (или более) видов элементарных ячеек, условно обозначаемых цифровыми двоичными кодами "00", "01", "10", "11". Двухбитное кодирование МП обеспечивает большие возможности управления рассеянным полем в сравнении с однобитным [8].

Физическими механизмами снижения ЭПР являются деструктивная интерференция, поляризационное преобразование и диффузное рассеяние волн различными противофазными участками (модулями) МП. Как следствие, моно- и бистатистические диаграммы рассеяния (ДР) однобитных шахматно-подобных МП неизбежно содержат интенсивные боковые дифракционные лепестки (в главных, диагональных и других плоскостях) [9–15]. Они зависят от формы, размеров и кодирования модулей МП. Результаты измерений характеристик бистатистического рассеяния от МП при разных углах падения и рассеяния (в секторе $\pm 60^\circ$) приведены в [1]. Снижение дифракционных максимумов бистатистических диаграмм рассеяния шахматных МП из изотропных метачастиц подробно исследовано при различных поляризациях и углах облучения [2, 3].

Сравнение экспериментальных и расчетных диаграмм обратного рассеяния (ДОР) анизотропных шахматных МП выполнено в [4, 5]. Показано хорошее совпадение результатов симуляции и измерений в главных плоскостях в области трех центральных лепестков ДОР. В этой области ЭПР обратного рассеяния МП ниже ЭПР эталона для кополяризованных ТЕ- и ТМ-волн. В остальных направлениях моностатическая ЭПР метапокрытия превышает ЭПР эталона. Отмечено влияние

разнесения в пространстве приемной и передающей антенн экспериментальной установки на результаты измерений [4, 5]. Снижение моно- и бистатистических ЭПР в более широких угловых областях облучения и рассеяния можно улучшить с помощью различных процедур оптимизации метаповерхностей [16].

Кривизна маскируемой поверхности снижает эффективность применения даже однобитных матриц кодирования, разработанных для плоских протяженных МП [17, 18]. Гашение рассеянного поля криволинейного МП приближенно определяется законом кодирования модулей лишь на "блестящем" участке метапокрытия, а также влиянием соседних зон Френеля.

Понятие "матрицы кодирования" плоских протяженных цифровых МП теряет смысл в случае криволинейных МП. Авторы настоящей статьи предлагают использовать МП в виде набора нескольких основных плоских блоков с одинаковыми размерами и разными матрицами кодирования. При этом актуальным становится вопрос о выборе модулей и матриц кодирования основных блоков МП [19, 20].

В настоящей статье предложены 2 основных блока широкополосных анизотропных двухбитных тонких МП (далее обозначенные как блоки I и II). Численно и экспериментально исследованы ДОР блоков и снижение бистатистической и моностатической ЭПР на ко- и кроссполяризациях при облучении блоков в главных и в диагональных плоскостях.

Методы исследования. Симуляция моно- и бистатистических диаграмм рассеяния блоков проводилась в HFSS методом конечных элементов. Полноволновые модели разработанных метачастиц и эскизы основных блоков I и II тонких двухбитных МП показаны на рис. 1 и 2. Блоки содержат экранированную подложку F4B ($\epsilon = 2.65$; $\tan \delta = 0.009$) толщиной 3 мм квадратной формы (192×192 мм) и верхнюю метаповерхность с единичными ячейками размером и шагом размещения 8×8 мм. В ячейках находятся 4 типа метачастиц (МЧ) толщиной 35 мкм (рис. 1, а–г), которые представляют собой 2 связанных эллиптических кольцевых резонатора с разной ориентацией оси анизотропии: 0° (далее обозначается "00"), 45° ("01"), 90° ("10") и 135° ("11") [19]. Большая и малая полуоси внешнего эллипса МЧ "00", "10" равны 1.9 и 1 мм соответственно, внутреннего – 1.615 и 0.85 мм. Для МЧ "01", "11" аналогичные

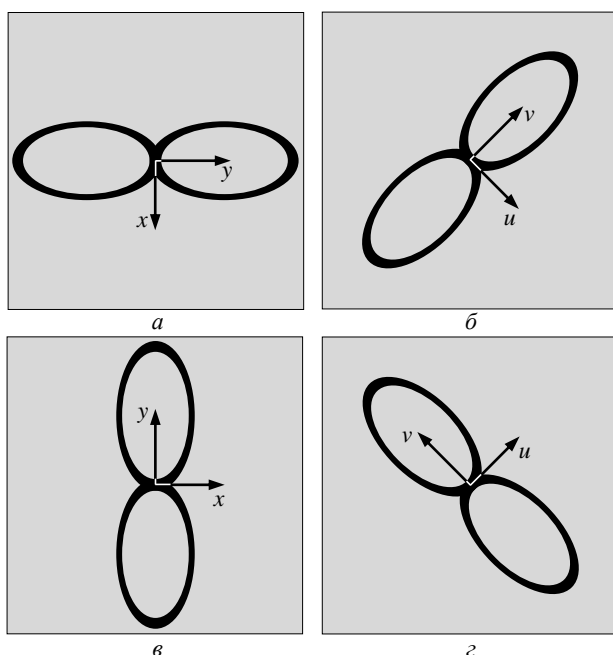


Рис. 1. Метачастицы: а – "00"; б – "01"; в – "10"; г – "11"

Fig. 1. Metaparticles: a – "00"; б – "01"; в – "10"; г – "11"

полуоси внешнего эллипса равны 2.07 и 0.9 мм, внутреннего – 1.84 и 0.8 мм [19].

Блоки I и II состоят из 16 модулей с номерами $n=1, \dots, 4$ (по оси Y), $m=1, \dots, 4$ (по оси X) размером 48×48 мм (рис. 2). Каждый модуль содержит 36 метачастиц одного типа. Матрицы кодирования $\|\varepsilon_{nm}\|$ блоков I и II строились по блочному принципу [20]:

$$\|\varepsilon_{nm}\| = \begin{pmatrix} 00 & 01 & 11 & 10 \\ 11 & 10 & 00 & 01 \\ 10 & 11 & 01 & 00 \\ 01 & 00 & 10 & 11 \end{pmatrix} \quad \text{– для блока I;}$$

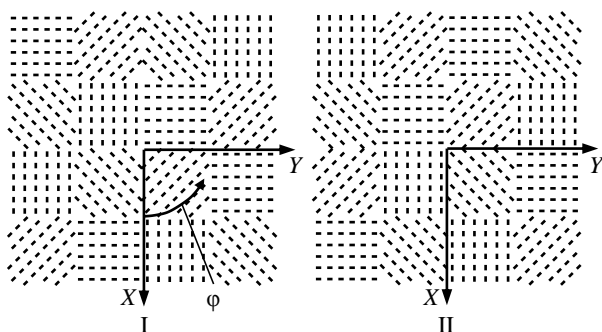


Рис. 2. Эскизы основных блоков

Fig. 2. Schematic representation of the main blocks

$$\|\varepsilon_{nm}\| = \begin{pmatrix} 10 & 01 & 00 & 11 \\ 11 & 00 & 01 & 10 \\ 01 & 10 & 11 & 00 \\ 00 & 11 & 10 & 01 \end{pmatrix} \quad \text{– для блока II.}$$

Изготовленные макеты блоков I и II показаны на рис. 3. Штриховыми линиями P1, P2 и D1, D2 (рис. 3) обозначены проекции главных ($\varphi_1 = 0^\circ$, $\varphi_2 = 90^\circ$) и диагональных ($\varphi_3 = 45^\circ$, $\varphi_4 = 135^\circ$) плоскостей соответственно на поверхность блоков МП. Угол φ отсчитывается от оси X против часовой стрелки (рис. 2). Далее символы P1, P2 и D1, D2 распространены на обозначения главных и диагональных плоскостей, имеющих указанные проекции.

Измерения ЭПР блоков проводились в безэховой камере ЦКП "Прикладная электродинамика и антенные измерения" ЮФУ на автоматизированном информационно-вычислительном комплексе АИВК-ТМСА-1.0-40.0-ДБЗ/TD, FD на квазиоднопозиционной установке (угол базы 7°) в полосе от 7 до 17.5 ГГц на согласной (ко-ЭПР) и крсовой (кросс-ЭПР) поляризациях. Блоки устанавливались на опорно-поворотном устройстве в радиопрозрачном лонжероне в двух положениях – П0 и П45 (рис. 4). Измерялись частотные характеристики моностатической ЭПР при облучении блоков вблизи нормали, а также диаграммы обратного рассеяния при изменении угла облучения. Угол облучения изменялся в плоскостях P2 и D2 (рис. 3). Блоки облучались волной параллельной поляризации (волна ТМ, вектор напряженности электрического поля E параллелен плоскости P2 или D2) или перпендикулярной поляризации (волна ТЕ, вектор напряженности электрического поля параллелен P1 или D1). В качестве эталона при оценке снижения ЭПР использовалась металлическая пластина аналогичных размеров.

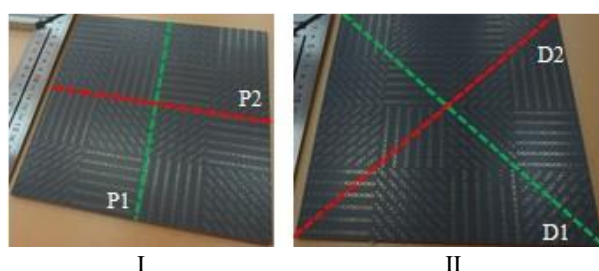


Рис. 3. Макеты разработанных блоков анизотропных МП

Fig. 3. Prototypes of the developed blocks of anisotropic meta-covers

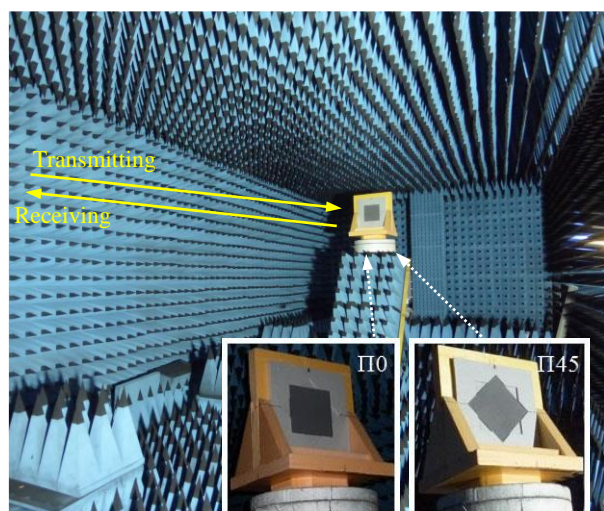


Рис. 4. Расположение макета в безэховой камере в позициях П0 и П45

Fig. 4. Disposition of a prototype in an anechoic chamber at positions П0 and П45

Результаты исследований. Результаты измерений и симуляции частотных характеристик снижения моностатических ЭПР блоков относительно эталона на кополяризации представлены на рис. 5 (для блока I) и 6 (для блока II) при различных плоскостях поляризации. Из рисунков следует хорошее соответствие измеренных и рассчитанных уровней снижения ЭПР для различных поляризаций облучения. Снижение ЭПР для двух блоков примерно одинаково и составляет не менее 12 дБ в по-

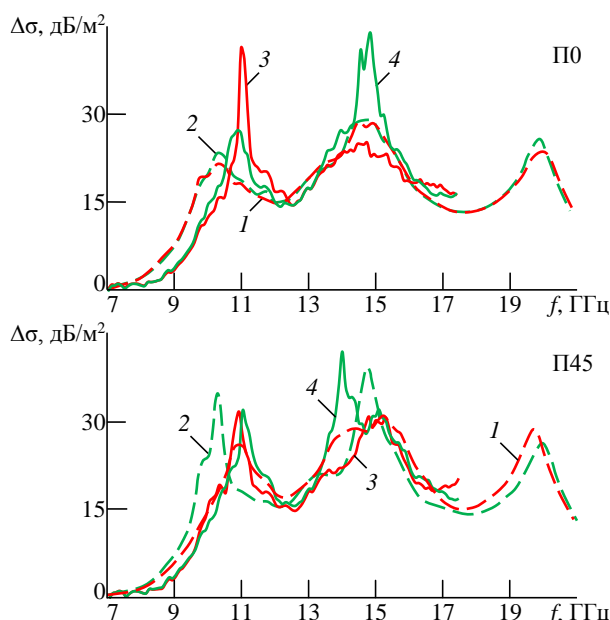


Рис. 5. Верификация снижения ЭПР блока I:
1 – плоскость P1, симуляция; 2 – P2, симуляция;
3 – P1, эксперимент; 4 – P2, эксперимент

Fig. 5. Verification of RCS reduction for block I:
1 – plane P1, simulation; 2 – P2, simulation;
3 – P1, experiment; 4 – P2, experiment

лосе от 10 до 17.5 ГГц (эксперимент) и от 9.8 до 21 ГГц (симуляция).

На рис. 7 и 8 приведены результаты измерения ДОР эталона (кривые 1) в сравнении с результатами симуляции (кривые 2) и экспериментального определения (кривые 3) ДОР блока I на кополяризации и блока II на кроссполяризации на средней частоте 12 ГГц. Несимметрия ДОР эталона объясняется небольшим разнесением приемной и передающей антенн в пространстве. ДОР блока I на кроссполяризации и блока II на кополяризации аналогичны представленным.

ЭПР блоков в главной плоскости P2 меньше, чем ЭПР эталона на кополяризации, в секторах углов облучения $\pm 30^\circ$ (на кополяризации) и $\pm 40^\circ$ (на кроссполяризации) (рис. 7). Металпокрытия гасят центральные лепестки ДОР (по сравнению с эталоном) на 10...25 дБ на ко- и кроссполяризациях.

Центральный лепесток ДОР в диагональной плоскости D2 на кополяризациях уменьшается на 13...15 дБ и расширяется примерно в 2 раза, занимая сектор углов облучения $\pm 9^\circ$ (рис. 8, а). Вне этого сектора ДОР блоков не имеют интенсивных дифракционных лепестков и ЭПР блоков сравнима с ЭПР эталона. На кроссполяризациях центральный лепесток раздваивается и имеет глубокий провал (до 35 дБ) при нормальном падении из-за противофазности полей модулей "00", "10" и "01", "11" (рис. 8, б).

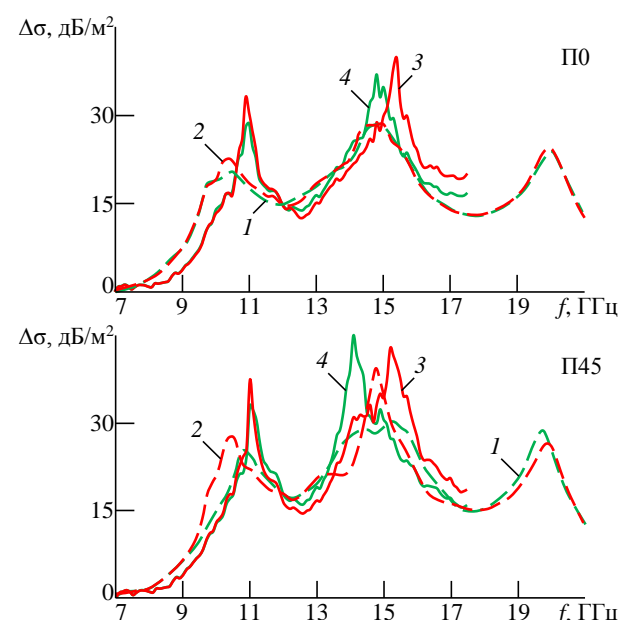


Рис. 6. Верификация снижения ЭПР блока II:
1 – плоскость P1, симуляция; 2 – P2, симуляция;
3 – P1, эксперимент; 4 – P2, эксперимент

Fig. 6. Verification of RCS reduction for the block II:
1 – plane P1, simulation; 2 – P2, simulation;
3 – P1, experiment; 4 – P2, experiment

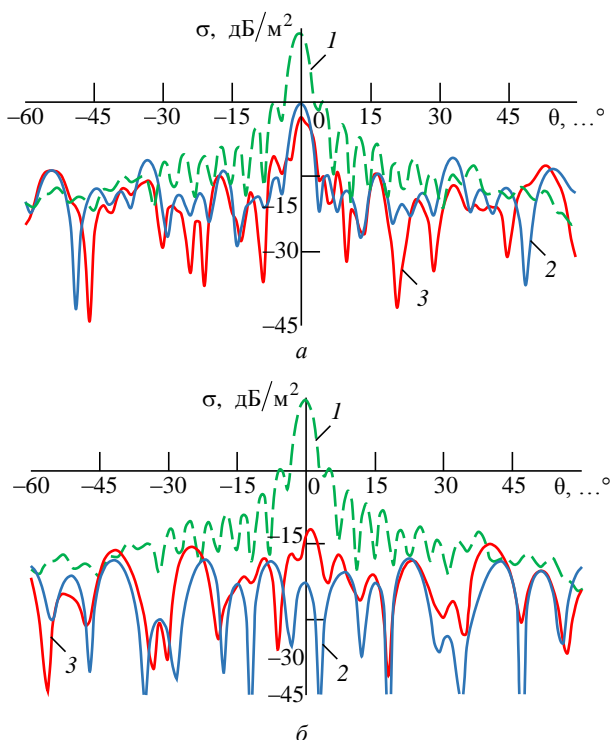


Рис. 7. ДОР эталона (1), блока I на кополяризации (а) и блока II на кроссполяризации (б) в главной плоскости P2 (вектор \mathbf{E} параллелен $\mathbf{P1}$). Результаты симуляции (2) и эксперимента (3)

Fig. 7. Backscatter diagram of the reference (1), block I on copolarization (a) and block II on crosspolarization (b) in the main plane P2 (vector \mathbf{E} is parallel to $\mathbf{P1}$). Results of simulation (2) and experiment (3)

Расширение центрального лепестка ДОР на кополяризациях и раздвоение этого лепестка на кроссполяризациях иллюстрируют рассчитанные диаграммы бистатического рассеяния двух блоков при изменении угла падения θ_{inc} и угла рассеяния θ_{scat} в диагональной плоскости (рис. 9). Штриховые линии на рис. 9 ограничивают области углов падения $\theta_{\text{inc}} = \pm 5^\circ$ и рассеяния $\theta_{\text{scat}} = \pm 5^\circ$ (относительно нормали к метапокрытию), соответствующие интенсивным лепесткам бистатической ДР. Видно формирование вблизи нормали широкой (рис. 9, а, б) или двухлепестковой (рис. 9, в, г) области рассеяния на ко- и кроссполяризациях соответственно.

Симуляция показала, что аналогичные ДОР наблюдаются при облучении блоков в других плоскостях и на других рабочих частотах. В качестве иллюстрации на рис. 10 и 11 изображены 3D-диаграммы рассеяния блока I на кополяризации и кроссполяризации соответственно при трех углах

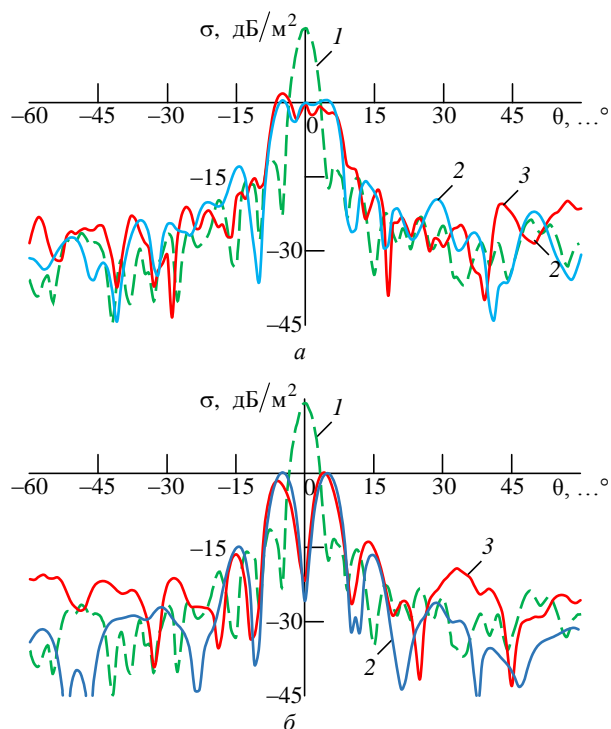


Рис. 8. ДОР эталона (1), блока I на кополяризации (а) и блока II на кроссполяризации (б) в диагональной плоскости D2 (вектор \mathbf{E} параллелен $\mathbf{D1}$). Результаты симуляции (2) и эксперимента (3)

Fig. 8. Backscatter diagram of the reference (1), block I on copolarization (a) and block II on crosspolarization (b) in the diagonal plane D2 (vector \mathbf{E} is parallel to $\mathbf{D1}$). Results of simulation (2) and experiment (3)

падения в плоскости XOZ (в плоскости $\mathbf{P1}$) на частоте 10 ГГц. Как следует из приведенных 3D-диаграмм, область глубокого гашения ДОР на обеих поляризациях с ростом угла падения смещается в направлении, противоположном направлению на источник.

Обсуждение. В настоящей статье предложено для снижения ЭПР использовать цифровые шахматно-подобные анизотропные метапокрытия в виде наборов нескольких основных плоских блоков с одинаковыми размерами и разными матрицами кодирования. Исследовано снижение моностатической и бистатической ЭПР на ко- и кроссполяризациях для двух разработанных плоских блоков МП.

Симуляция показала, что уровень снижения ЭПР двух блоков при нормальном облучении примерно одинаков и составляет не менее 12 дБ в полосе от 9.8 до 21 ГГц. Измерения на частотах от 7 до 17.5 ГГц показали это же значение снижения ЭПР в полосе от 10 до 17.5 ГГц.

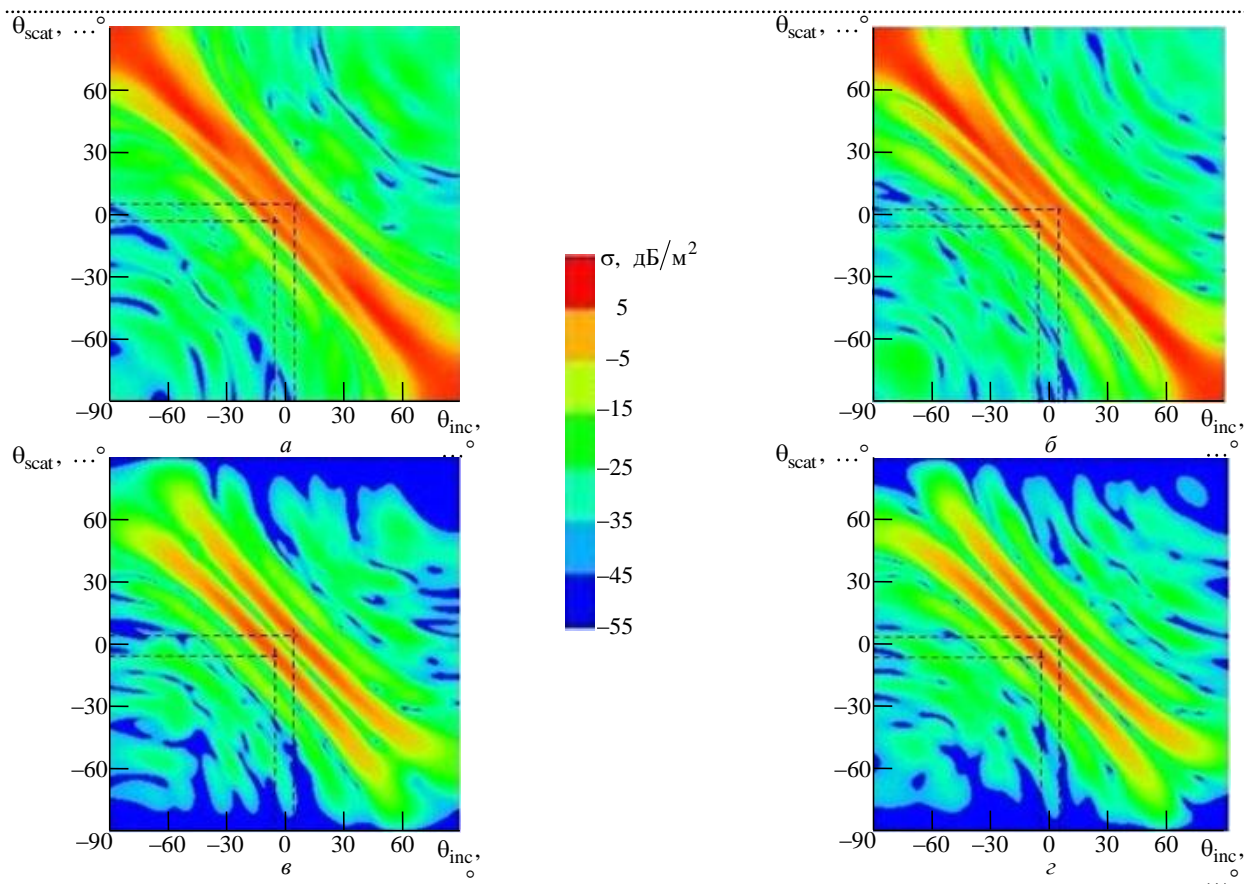


Рис. 9. 2D-диаграммы бистатического рассеяния для блоков I (а, в) и II (б, г) на кополяризации (а, б) и кроссполяризации (в, г) при изменении углов падения θ_{inc} и рассеяния θ_{scat} в диагональной плоскости D2 (вектор \mathbf{E} параллелен D1)

Fig. 9. 2D-patterns of bistatic scattering for blocks I (a, c) and II (b, d) for copolarization (a, b) and crosspolarization (c, d) when the incidence θ_{inc} and scattering θ_{scat} angles are changing in the diagonal plane D2 (vector \mathbf{E} is parallel to D1)

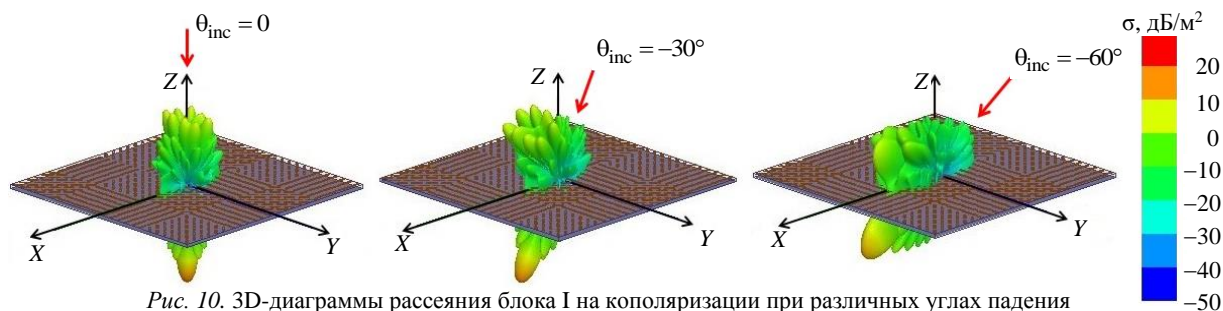


Рис. 10. 3D-диаграммы рассеяния блока I на кополяризации при различных углах падения в плоскости P1 (вектор \mathbf{E} параллелен P2)

Fig. 10. 3D-scattering patterns of block I for copolarization with different angles of incidence in the plane P1 (vector \mathbf{E} is parallel to P2)

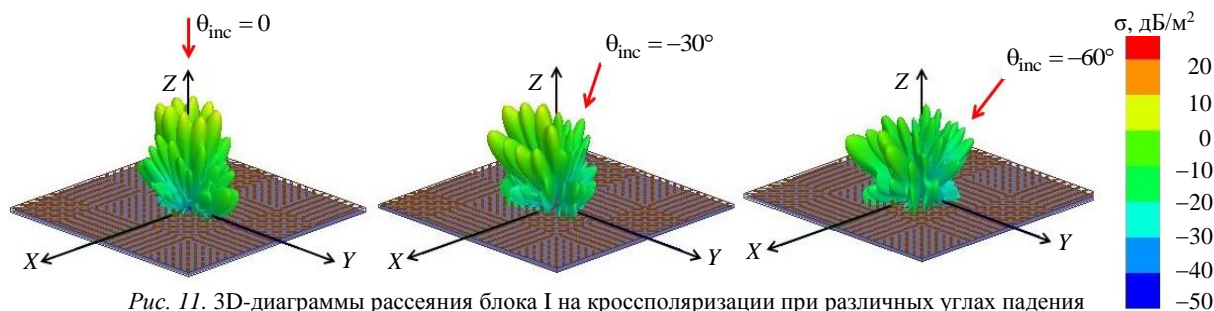


Рис. 11. 3D-диаграммы рассеяния блока I на кроссполяризации при различных углах падения в плоскости P1 (вектор \mathbf{E} параллелен P2)

Fig. 11. 3D-scattering patterns of block I for crosspolarization with different angles of incidence in the plane P1 (vector \mathbf{E} is parallel to P2)

Получено хорошее совпадение результатов симуляции и измерения ДОР блоков в области центральных лепестков для различных плоскостей и поляризаций облучения. В главных плоскостях блоки гасят центральные лепестки ДОР на 10...25 дБ; в секторе углов около $\pm 40^\circ$ обратная ЭПР блоков ниже, чем у эталона. В диагональных плоскостях наблюдается гашение на 13...15 дБ и расширение (примерно в 2 раза) центрального лепестка ДОР на кополяризациях, а также раздвоение этого лепестка на кроссполяризациях в секторе углов $\pm 9^\circ$ (вне этого сектора ЭПР блоков

сравнима с ЭПР эталона). Обнаруженное расширение центрального лепестка ДОР на кополяризации и раздвоение этого лепестка на кроссполяризации проиллюстрированы диаграммами бистатического рассеяния блоков при изменении углов падения и рассеяния. Область глубокого гашения ЭПР на обеих поляризациях с ростом угла падения синхронно смещается в зеркальном направлении.

Разработанные блоки цифровых МП могут применяться для широкополосного гашения ЭПР металлических поверхностей.

Авторский вклад

Семенихин Андрей Илларионович – полноволновое моделирование блока I.

Семенихина Диана Викторовна – полноволновое моделирование блока II.

Юханов Юрий Владимирович – постановка исследований, обсуждение результатов.

Благовисный Павел Вадимович – полноволновое моделирование метачастиц, расчет ДОР, обработка результатов измерений ДОР.

Ильин Игорь Васильевич – проведение измерений ЭПР блоков.

Author's contribution

Andrey I. Semenikhin, full-wave simulation of the block I.

Diana V. Semenikhina, full-wave simulation of the block II.

Yury V. Yukhanov, setting the researches, discussion of the results.

Pavel V. Blagovisnyy, full-wave simulation of the metaparticles, calculation of the BSP, results processing of the BSP measurements.

Igor V. Ilyin, measurements implementation of the blocks' RCS.

Список литературы

1. Thin AMC Structure for Radar Cross-Section Reduction / M. Paquay, J.-C. Iriarte, I. Ederra, R. Gonzalo, P. de Maagt // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 2007. Vol. 55, iss. 12. P. 3630–3638. doi: 10.1109/tap.2007.910306

2. Chen W., Balanis C. A., Birtcher C. R. Checkerboard EBG Surfaces for Wideband Radar Cross Section Reduction // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 2015. Vol. 63, iss. 6. P. 2636–2645. doi: 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 Trans. on Ant. and Prop. 2016. Vol. 64, iss. 9. P. 4133–4138. doi: 10.1109/tap.2016.2583505

4. Jiang W., Xue Y., Gong S.-X. Polarization Conversion Metasurface for Broadband Radar Cross Section Reduction // Progress In Electromagnetics Research Lett. 2016. Vol. 62. P. 9–15. doi: 10.2528/pierl16060504

5. Broadband Radar Cross-Section Reduction using Polarization Conversion Metasurface / Q. Zheng, C. Guo, H. Li, J. Ding // Intern. J. of Microwave and Wireless Technologies. 2018. Vol. 10, iss. 2. P. 197–206. doi: 10.1017/s1759078717001477

6. Петров Б. М., Семенихин А. И. Управляемые импедансные покрытия и структуры // Зарубежная радиоэлектроника. 1994. № 6. С. 9–16.

7. Giovampaola C. D., Engheta N. Digital metamaterials // Nature Materials. 2014. Vol. 13, iss. 12. P. 1115–1121. doi: 10.1038/nmat4082

8. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials / T. J. Cui, M. Q. Qi, X. Wan, J. Zhao, Q. Cheng // Light: Science & Applications. 2014. Vol. 3, iss. 10. P. e218–e218. doi: 10.1038/lsa.2014.99

9. Broadband Radar Cross-Section Reduction Using AMC Technology / J. C. I. Galarregui, A. T. Pereda, J. L. M. de Falcon, I. Ederra, R. Gonzalo, P. de Maagt // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 2013. Vol. 61, iss. 12. P. 6136–6143. doi: 10.1109/tap.2013.2282915

10. Edalati A., Sarabandi K. Wideband, Wide Angle, Polarization Independent RCS Reduction Using Nonabsorptive Miniaturized-Element Frequency Selective Surfaces / IEEE Trans. on Ant. and Prop. 2014. Vol. 62, iss. 2. P. 747–754. doi: 10.1109/tap.2013.2291236

11. A Wideband and Polarization-Independent Metasurface Based on Phase Optimization for Monostatic and Bistatic Radar Cross Section Reduction / J. Su, Y. Lu, Z. Li, R. Zhang, Y. Yang // Intern. J. of Ant. and Prop. 2016. Vol. 2016. Art. ID 7595921. P. 1–9. doi: 10.1155/2016/7595921
12. Zhuang Y.-Q., Wang G.-M., Xu H.-X. Ultra-Wideband RCS Reduction using Novel Configured Chessboard Metasurface // Chinese Physics B. 2017. Vol. 26, iss. 5. Art. ID 054101. 7 p. doi: 10.1088/1674-1056/26/5/054101
13. Libi Mol V. A. H., Aanandan C. K. Wideband Radar Cross Section Reduction using Artificial Magnetic Conductor Checkerboard Surface // Progress In Electromagnetics Research M. 2018. Vol. 69. P. 171–183. doi: 10.2528/PIERM18030303
14. Design of a Low Scattering Metasurface for Stealth Applications / T. A. Khan, J. Li, J. Chen, M. U. Raza, A. Zhang // Materials. 2019. Vol. 12, iss. 18. Art. ID 3031. doi: 10.3390/ma12183031
15. Taher Al-Nuaimi M. K., Hong W. Monostatic RCS Reduction at mmWaves // Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC), Nanjing, China, 6–9 Dec. 2015. Acc. № 15803186. doi: 10.1109/apmc.2015.7413385
16. Ultrawideband Monostatic and Bistatic RCS Reductions for Both Copolarization and Cross Polarization Based on Polarization Conversion and Destructive Interference / Y. Lu, J. Su, J. Liu, Q. Guo, H. Yin, Z. Li, J. Song // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 2019. Vol. 67, iss. 7. P. 4936–4941. doi: 10.1109/tap.2019.2911185
17. Cylindrically Curved Checkerboard Surfaces for Radar Cross-Section Reduction / W. Chen, C. A. Balanis, C. R. Birtcher, A. Y. Modi // IEEE Ant. and Wireless Prop. Lett. 2018. Vol. 17, iss. 2. P. 343–346. doi: 10.1109/lawp.2018.2789906
18. Reduction and Cancellation of the RCS of Cylindrical Surfaces using Conformal Digital 1-bit Meta-covers / A. I. Semenikhin, D. V. Semenikhina, Yu. V. Yukhanov, P. V. Blagovisnyy // Intern. Symp. ELMAR. Zadar, Croatia, 23–25 Sept. 2019. P. 167–170. doi: 10.1109/elmar.2019.8918812
19. Broadband RCS Reduction using Digital Impedance Metasurfaces with 2-bit Coding of Axes of Anisotropy and Eigen Reactances / A. I. Semenikhin, D. V. Semenikhina, Yu. V. Yukhanov, P. V. Blagovisnyy // Progress in Electromagnetics Research Symp. (PIERS). Toyama, Japan, 1–4 Aug. 2018. doi: 10.23919/piers.2018.8597701
20. Block Principle of Constructing and Estimating of the RCS Reduction of Nonabsorbing Broadband 2 Bit Anisotropic Digital Meta-Coatings / A. I. Semenikhin, D. V. Semenikhina, Yu. V. Yukhanov, P. V. Blagovisnyy // 7th All-Russian Microwave Conf. (RMC), Moscow, 25–27 Nov. 2020. P. 132–134. doi: 10.1109/rmc50626.2020.9312245

Информация об авторах

Семенихин Андрей Илларионович – кандидат технических наук (1984), доцент (1987) кафедры антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета (ИРСУ ЮФУ). Почетный работник высшего профессионального образования РФ (2006). Автор более 270 научных и учебно-методических работ. Сфера научных интересов – электродинамика анизотропных структур и метаповерхностей, управление характеристиками рассеяния, интеллектуальные покрытия.
Адрес: ИРСУ ЮФУ, Некрасовский пер., д. 44, Таганрог, Ростовская область, 347922, Россия
E-mail: anilsem@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0601-7263>

Семенихина Диана Викторовна – доктор технических наук (2000), доцент (1993), профессор кафедры антенн и радиопередающих устройств ИРСУ ЮФУ. Автор более 200 научных и учебно-методических работ. Сфера научных интересов – электродинамика нелинейных структур и метаповерхностей, управление спектральными характеристиками рассеяния.
Адрес: ИРСУ ЮФУ, Некрасовский пер., д. 44, Таганрог, Ростовская область, 347922, Россия
E-mail: d_semenikhina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1899-5961>

Юханов Юрий Владимирович – доктор технических наук (1997), профессор (2000), заведующий кафедрой антенн и радиопередающих устройств ИРСУ ЮФУ. Почетный работник высшего профессионального образования РФ (2007). Автор более 300 научных и учебно-методических работ. Сфера научных интересов – прямые и обратные задачи электродинамики, синтез импедансных структур по заданным характеристикам излучения и рассеяния.
Адрес: ИРСУ ЮФУ, Некрасовский пер., д. 44, Таганрог, Ростовская область, 347922, Россия
E-mail: yu_yukhanov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8448-5508>

Благовисный Павел Вадимович – дипломированный инженер-механик (2010, Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина), аспирант кафедры антенн и радиопередающих устройств ИРСУ ЮФУ, инженер центра фотоники и двумерных материалов Московского физико-технического института (национального исследовательского университета). Автор 14 научных работ. Сфера научных интересов – рассеяние электромагнитных волн импедансными анизотропными структурами.

Адрес: Центр фотоники и двумерных материалов Московского физико-технического института, Институтский пер., д. 9, Долгопрудный, Московская область, 141701, Россия

E-mail: pavelblagvisnyy@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3170-2617>

Ильин Игорь Васильевич – младший научный сотрудник Центра коллективного пользования "Прикладная электродинамика и антенные измерения" ЮФУ. Окончил Таганрогский радиотехнический институт (1975) по специальности "Радиотехника". Автор 27 научных работ, обладатель 24 авторских свидетельств. Сфера научных интересов – общая схемотехника, устройства управления и автоматики на микроконтроллерах и микропроцессорах.

Адрес: ИРСУ ЮФУ, Некрасовский пер., д. 44, Таганрог, Ростовская область, 347922, Россия

E-mail: ivi.igor@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8585-4256>

References

1. Paquay M., Iriarte J.-C., Ederra I., Gonzalo R., de Maagt P. Thin AMC Structure for Radar Cross-Section Reduction. *IEEE Trans. on Antenn. and Propag.* 2007, vol. 55, iss. 12, pp. 3630–3638. doi: 10.1109/tap.2007.910306
2. Chen W., Balanis C. A., Birtcher C. R. Checkerboard EBG surfaces for wideband radar cross section reduction. *IEEE Trans. on Antenn. and Propag.* 2015, vol. 63, iss. 6, pp. 2636–2645. doi: 10.1109/tap.2015.2414440
3. Chen W., Balanis C. A., Birtcher C. R. Dual wideband checkerboard surfaces for radar cross section reduction. *IEEE Trans. on Antenn. and Propag.* 2016, vol. 64, iss. 9, pp. 4133–4138. doi: 10.1109/tap.2016.2583505
4. Jiang W., Xue Y., Gong S.-X. Polarization conversion metasurface for broadband radar cross section reduction. *Progress In Electromagnetics Research Lett.* 2016, vol. 62, pp. 9–15. doi: 10.2528/pier116060504
5. Zheng Q., Guo C., Li H., Ding J. Broadband radar cross-section reduction using polarization conversion metasurface. *Intern. J. of Microwave and Wireless Technologies.* 2018, vol. 10, iss. 2, pp. 197–206. doi: 10.1017/s1759078717001477
6. Petrov B. M., Semenikhin A. I. Controlled impedance coatings and structures. *Foreign radio-electronics.* 1994, no. 6, pp. 9–16. (In Russ.)
7. Giovampaola C. D., Engheta N. Digital metamaterials. *Nature Materials.* 2014, vol. 13, iss. 12, pp. 1115–1121. doi: 10.1038/nmat4082
8. Cui T. J., Qi M. Q., Wan X., Zhao J., Cheng Q. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. *Light: Science & Applications.* 2014, vol. 3, iss. 10, pp. e218–e218. doi: 10.1038/lsa.2014.99
9. Galarregui J. C. I., Pereda A. T., de Falcon J. L. M., Ederra I., Gonzalo R., de Maagt P. Broadband Radar Cross-Section Reduction Using AMC Technology. *IEEE Trans. on Ant. and Prop.* 2013, vol. 61, iss. 12, pp. 6136–6143. doi: 10.1109/tap.2013.2282915
10. Edalati A., Sarabandi K. Wideband, Wide Angle, Polarization Independent RCS Reduction Using Nonabsorptive Miniaturized-Element Frequency Selective Surfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation.* 2014, vol. 62, iss. 2, pp. 747–754. doi: 10.1109/tap.2013.2291236
11. Su J., Lu Y., Li Z., Zhang R., Yang Y. A Wideband and Polarization-Independent Metasurface Based on Phase Optimization for Monostatic and Bistatic Radar Cross Section Reduction. *Intern. J. of Antennas and Propagation.* 2016, vol. 2016, pp. 1–9. doi: 10.1155/2016/7595921
12. Zhuang Y.-Q., Wang G.-M., Xu H.-X. Ultra-wideband RCS reduction using novel configured chessboard metasurface. *Chinese Physics B.* 2017, vol. 26, iss. 5, art. ID 054101, 7 p. doi: 10.1088/1674-1056/26/5/054101
13. Libi Mol V. A. H., Aanandan C. K. Wideband Radar Cross Section Reduction Using Artificial Magnetic Conductor Checkerboard Surface. *Progress In Electromagnetics Research M.* 2018, vol. 69, pp. 171–183. doi: 10.2528/pierm18030303
14. Khan T. A., Li J., Chen J., Raza M. U., Zhang A. Design of a Low Scattering Metasurface for Stealth Applications. *Materials.* 2019, vol. 12, iss. 18, p. 3031. doi: 10.3390/ma12183031
15. Taher Al-Nuaimi M. K., Hong W. Monostatic RCS reduction at mmWaves. *Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC), Nanjing, China, 6–9 Dec. 2015.* doi: 10.1109/apmc.2015.7413385
16. 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 Trans. on Antenn. and Propag.* 2019, vol. 67, iss. 7, pp. 4936–4941. doi: 10.1109/tap.2019.2911185
17. Chen W., Balanis C. A., Birtcher C. R., Modi A. Y. Cylindrically curved checkerboard surfaces for radar cross-section reduction. *IEEE Anten. and Wireless Propag. Lett.* 2018, vol. 17, iss. 2, pp. 343–346. doi: 10.1109/lawp.2018.2789906

18. Semenikhin A. I., Semenikhina D. V., Yukhanov Yu. V., Blagovisnyy P. V. Reduction and Cancellation of the RCS of Cylindrical Surfaces Using Conformal Digital 1-bit Meta-covers. Intern. Symp. ELMAR, Zadar, Croatia, 23–25 Sept. 2019, pp. 167–170. doi: 10.1109/elmar.2019.8918812

19. Semenikhin A. I., Semenikhina D. V., Yukhanov Yu. V., Blagovisnyy P. V. Broadband RCS Reduction Using Digital Impedance Metasurfaces With 2-bit Coding of Axes of

Anisotropy and Eigen Reactances. Progress in Electromagnetics Research Symp. (PIERS), Toyama, Japan, 1–4 Aug. 2018. doi: 10.23919/piers.2018.8597701

20. Semenikhin A. I., Semenikhina D. V., Yukhanov Yu. V., Blagovisnyy P. V. Block Principle of Constructing and Estimating of the RCS Reduction of Nonabsorbing Broadband 2 Bit Anisotropic Digital Meta-Coatings. 7th All-Russian Microwave Conf. (RMC), Moscow, Russia, 25–27 Nov. 2020, pp. 132–134. doi: 10.1109/rmc50626.2020.9312245

Information about the authors

Andrey I. Semenikhin, Cand. Sci. (Eng.) (1984), docent (1987) of the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices of Institute of Radio Engineering Systems and Control of Southern Federal University (IRESC SFU). Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation (2006). The author of more than 270 scientific and educational-methodical publications. Area of expertise: electrodynamics of anisotropic structures and metasurfaces, control of scattering characteristics, smart coatings.

Address: IRESC SFU, 44 Nekrasovsky Ln., Taganrog, Rostov Region 347922, Russia

E-mail: anilsem@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0601-7263>

Diana V. Semenikhina, Dr. Sci. (Eng.) (2000), Professor (1993) of the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices of IRESC SFU. The author of more than 200 scientific and educational-methodical publications. Area of expertise: electrodynamics of nonlinear structures and metasurfaces, control of spectral scattering characteristics.

Address: IRESC SFU, 44 Nekrasovsky Ln., Taganrog, Rostov Region 347922, Russia

E-mail: d_semenikhina@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1899-5961>

Yury V. Yukhanov, Dr. Sci. (Eng.) (1997), Professor (2000), the Head of the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices of IRESC SFU. Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation (2007). The author of more than 300 scientific and educational-methodical publications. Area of expertise: direct and inverse problems of electrodynamics, synthesis of impedance structures according to given characteristics of radiation and scattering.

Address: IRESC SFU, 44 Nekrasovsky Ln., Taganrog, Rostov Region 347922, Russia

E-mail: yu_yukhanov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8448-5508>

Pavel V. Blagovisnyy, mechanical engineer (2010, Russian state university of oil and gas named after I. M. Gubkin), post-graduate student of the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices of IRESC SFU, engineer of the Center for Photonics and 2D Materials of Moscow Institute of Physics and Technology. The author of 14 scientific publications. Area of expertise: electromagnetic waves scattering by impedance anisotropic structures.

Address: Center for Photonics and 2D Materials of Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy Ln., Dolgoprudny, Moscow Region 141701, Russia

E-mail: pavelblagvisnyy@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3170-2617>

Igor V. Ilyin, junior researcher of the Share Scientific Center "Applied Electrodynamics and Antenna Measurements" of the IRESC SFU. The author of 27 scientific publications, obtained 24 patents. Area of expertise: general circuit design, control and automation devices on microcontrollers and microprocessors.

Address: IRESC SFU, 44 Nekrasovsky Ln., Taganrog, Rostov Region 347922, Russia

E-mail: ivi.igor@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8585-4256>