

ПОЛНОВОЛНОВЫЕ И ИМПЕДАНСНЫЕ МОДЕЛИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ТОНКИХ ТВИСТ- МЕТАПОЛЯРИЗАТОРОВ ДЛЯ РАДИОМАСКИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

П. В. Благовисный, А. И. Семенихин

Южный Федеральный Университет, Институт радиотехнических систем и управления,
347922, Таганрог, пер. Некрасовский, 44

Статья поступила в редакцию 7 июля 2020 г., после доработки – 19 августа 2020 г.

Аннотация. Современные малоотражающие непоглощающие покрытия основываются на принципах твист-эффекта, интерференционного гашения и диффузного рассеяния электромагнитных волн. Такие шахматно-подобные покрытия состоят из анизотропной метаповерхности на диэлектрической экранированной подложке и представляют собой распределенные по покрытию метаполяризаторы. Преимуществом данных структур являются: применимость в различных диапазонах длин волн (от микроволновых до терагерцового и оптического), отсутствие поглощения электромагнитной энергии и излучения в инфракрасном диапазоне. Однако разработка полноволновых моделей малозаметных анизотропных покрытий требует больших вычислительных ресурсов и затрат времени. Поэтому на практике параллельно используют более простые импедансные модели кодированных метаполяризаторов. В настоящей работе исследуются модели двух видов поляризаторов, отличающихся топологией метачастиц. Метаповерхность первого поляризатора состоит из метачастиц в форме «восьмёрки» (оригинальная топология), второго – из метачастиц в форме симметричных сплит-ринг резонаторов (усовершенствованная известная топология). Целью работы является исследование полноволновых и импедансных моделей более эффективных (по сравнению с известными) сверхширокополосных тонких однослойных метаполяризаторов применительно к созданию радиомаскирующих кодированных покрытий.

Для построения импедансных моделей взаимных метаполяризаторов применяются гомогенизация полей в канале Флоке и метод эквивалентных схем. Критериями применимости импедансных недиссипативных моделей являются удовлетворение теореме Фостера и тождественность частотных характеристик коэффициентов отражения для импедансных и полноволновых моделей поляризаторов. Электродинамическое моделирование выполняется в HFSS. Разработанные полноволновые и импедансные модели первого и второго метаполяризаторов обеспечивают твист-эффект, соответственно, по уровню минус 17 дБ и 15 дБ в полосе частот 67,1% и 70,9% (при нормальном падении). При увеличении угла падения волны до 20° наблюдается ухудшение твист-эффекта на 1-2 дБ и уменьшение рабочей полосы частот на 5,8÷7,9%. На основании полученных результатов делается вывод о применимости предлагаемых метаполяризаторов и их импедансных моделей при создании радиомаскирующих кодированных покрытий.

Ключевые слова: метаполяризатор, анизотропная метаповерхность, метод эквивалентных схем, гомогенизация, твист-эффект, метачастица, метапокрытие.

Abstract. Modern low reflective non-absorptive coatings are based on the principles of the twist-effect, the interference cancellation and the diffuse scattering of electromagnetic waves. Such chess-like coatings consist of an anisotropic metasurface on a shielded dielectric substrate. They represent metapolarizers distributed over a coating. Advantages of these structures are: the applicability in different wavelength ranges (from microwave to terahertz and optics), the electromagnetic energy absorptionless and the absence of radiation in the infra-red range. However, the development of full-wave models of low observable anisotropic metasurfaces requires large computational resources and time consumption. In practice, therefore, simpler impedanced models of coded metapolarizers are used simultaneously. Two types of metapolarizers' models, differed by metaparticles topology, are studied in this paper. The metasurface of the first MP consists of metaparticles in the form of "eights" (an original topology), the second one - of

metaparticles in the form of symmetric split ring resonators (an improved know topology). The aim of the work is to investigate the full-wave and impedance models of more effective (compared with known ones) ultra-wide-band thin single-layer metapolarizers as applied to the creation of radio masking coded coatings. To construct impedance models of reciprocal metapolarizers, fields homogenization in the Floquet channel and the equivalent circuits method are used. The applicability criterion for impedance dissipationless models of metapolarizers is the satisfaction of the Foster's theorem and the identity of the frequency characteristics of the reflection coefficients for the impedance and full-wave MP models. Electrodynamics simulation is performed in HFSS. Designed full-wave and impedance models of the first and second metapolarizers provide a twist effect at the level of minus 17 dB and 15 dB in the frequency bands of around 67,1% and 70,9% respectively (under normal incidence). When increasing the wave incidence angle up to 20 degrees the twist-effect decreasing on 1-2 dB and the working frequency band narrowing on 5-7% are observed. Applicability conclusion of using the proposed metapolarizers in the designs of cloaking coded covers is drawn based on the results obtained.

Key words: metapolarizer, anisotropic metasurface, equivalent circuits' method, homogenization, twist-effect, metaparticle, metacovering.

Введение

Современные малоотражающие непоглощающие покрытия основываются на принципах твист-эффекта, интерференционного гашения и диффузного рассеяния электромагнитных волн [1 - 6]. Применение этих механизмов малой заметности впервые описано в 1994 году в специальном выпуске «Проблемные вопросы уменьшения радиолокационной заметности объектов» в журнале «Зарубежная радиоэлектроника» в статье [7].

Такие шахматно-подобные покрытия состоят из диэлектрической экранированной подложки, анизотропной кодированной метаповерхности и представляют собой распределенные по покрытию метаполяризаторы (МП).

Конструктивно анизотропная метаповерхность, как $2-D$ аналог метаматериала, реализуется в виде двумерной решётки резонаторов – метачастиц (МЧ), расположенных на подложке. Метаповерхность разбивается (кодируется) на противофазные участки (модули), отличающиеся углами наклона осей анизотропии МЧ, например, 0° , 45° , 90° , 135° [8]. Это обеспечивает эффективную маскировку для различных линейных наклонных и круговых поляризаций облучения не только за счет твист-эффекта, но и за счет интерференционного гашения и диффузного рассеяния полей [8, 9]. С целью повышения эффективности маскировки на согласной (ко-) и перекрестной (кросс-) поляризациях предложен блочный принцип построения кодированных покрытий [7]. В настоящее время численным и экспериментальным исследованиям малозаметных непоглощающих кодированных анизотропных метаповерхностей посвящено большое число публикаций (см., например, [1-6, 8-10]).

Преимуществом данных покрытий являются: применимость в различных диапазонах длин волн (от микроволновых до терагерцового и оптического), отсутствие поглощения электромагнитной энергии и излучения в инфракрасном диапазоне. Широкая полоса рабочих частот кодированных покрытий обеспечивается за счёт использования мультрезонансных МЧ и увеличения числа слоёв [1 - 6, 10-13].

Востребованность новых технологий снижения радиолокационной заметности объектов, основанных на применении кодированных метаполяризаторов, вызвала большой интерес к поляризационным преобразованиям электромагнитных волн (ЭМВ) при отражении от метаповерхностей и к проектированию тонких широкополосных МП [10 – 26]. Например, в работах [24 – 26] описаны метаполяризаторы с широкой рабочей полосой, соответственно: 48,9% (13,9 ГГц), 50% (15,6 ГГц), 46,5% (11,4 ГГц); в скобках указана центральная частота. Метачастицы этих МП имеют форму двух концентрических сплит-ринг резонаторов, сдвоенной стрелки и V-образного резонатора и реализуют твист-эффект (поворот плоскости

поляризации на 90° при отражении).

Известные двухслойные поляризаторы с анизотропно-проводящими решетками внутри [12] должны иметь толщину $d > 0,25 \lambda_n$ относительно длины волны λ_n в слоях на нижней рабочей частоте. В работах [5, 6] описаны результаты численных и экспериментальных исследований таких радиомаскирующих бинарных твист-покрытий толщиной $d=8\text{мм}$ ($d=0,34 \lambda_n$) для работы в диапазоне $8 \div 16$ ГГц.

Однослойные поляризаторы с входной метаповерхностью могут иметь толщину около $0,1 \lambda_n$ и меньше. Такие метаполяризаторы называют тонкими или сверхтонкими [10, 13, 14, 26]. Например, поляризаторы толщиной 3мм [10] и 2мм [13, 14] имеют $d=0,12 \lambda_n$ и названы авторами этих работ сверхтонкими. Однослойные метаполяризаторы, предложенные в [27 – 33], работают в сверхширокой полосе (СШП) частот. Функциональные и геометрические параметры этих МП представлены в табл.1. Относительная рабочая полоса МП традиционно указана по уровню поляризационных потерь минус 10 дБ (уровню твист-эффекта).

Таблица 1. Характеристики тонких СШП метаполяризаторов.

Номер ссылки	Отн. рабочая полоса, %	Центр. частота, ГГц	Толщина МП, мм	Форма метачастиц
27	68,5	14,3	3	шестигранная
28	69,8	10,6	3	U – образная
29	75,9	11,2	3	лестничная
30	82	26,6	1,45	H – образная с двумя прямоугольными патчами
31	83	11,2	3	полосковая
32	83,6	29,8	1,5	сдвоенная стрелка с V – образными резонаторами
33	87,7	11,9	3,5	два концентрических сплит-ринг резонатора

Отметим, что разработка полноволновых моделей малозаметных анизотропных кодированных СШП метапокрытий требует больших вычислительных ресурсов и затрат времени. Поэтому на практике часто используют более простые импедансные модели кодированных метаполяризаторов, применяя гомогенизацию полей в канале Флоке. Критериями применимости тех или иных импедансных недиссипативных моделей МП являются удовлетворение теореме Фостера и тождественность частотных характеристик (ЧХ) коэффициентов отражения для полноволновых и импедансных моделей.

В настоящей работе исследуются полноволновые и импедансные модели более эффективных (по сравнению с известными) тонких однослойных метаполяризаторов, обеспечивающих твист-эффект не хуже минус 15 дБ в полосе частот более октавы. Метаполяризаторы отличаются топологией и кодированием анизотропии метачастиц. Они имеют форму «восьмёрки» (оригинальная топология) и форму усовершенствованных симметричных сплит-ринг резонаторов с осями анизотропии, повернутыми на углы 0° и 45° .

1. Метод эквивалентных схем анизотропных метаповерхностей

Для оперативного определения электромагнитных свойств анизотропных взаимных метаповерхностей, входящих в состав МП, широко применяется метод эквивалентных схем (ЭС) [34 - 36]. По этому методу вначале определяются поверхностные импедансы отражательного поляризатора для двух ортогонально поляризованных собственных мод, т.е. для падающих волн, поляризованных вдоль осей анизотропии МЧ, например x , y . При таком возбуждении деполяризация мод отсутствует, свойства МП описываются двумя коэффициентами отражения S_{xx} и S_{yy} .

Эквивалентная схема поляризатора упрощается и представляет собой две несвязанных закороченных линии передачи – два двухполюсника. Каждый из них содержит два параллельно включенных импеданса [36] – входной изотропный импеданс экранированной подложки Z_{sub} и собственный импеданс метаповерхности $Z_{ms,x}$ или $Z_{ms,y}$ (вдоль осей x , y). Результирующий импеданс

эквивалентен входному поверхностному импедансу поляризатора $Z_{in,x}$ или $Z_{in,y}$ в собственном поляризационном базисе (вдоль осей x, y).

Далее по методу ЭС двум собственным импедансам $Z_{ms,x}$ или $Z_{ms,y}$ недиссипативной метаповерхности ставятся в соответствие две эквивалентные цепи в виде двухполюсников с отличающимися сосредоточенными LC -элементами. Для различных топологий МЧ в работе [34] проведено сравнение ЧХ коэффициентов отражения, полученных методом ЭС и методом моментов. Результаты хорошо согласуются до частот возбуждения мод высших типов.

В [35] с помощью метода ЭС описываются свойства высокоимпедансной поверхности. Метаповерхность заменяется эквивалентной бесконечно тонкой плоскостью с поверхностным импедансом, равным импедансу параллельного LC -контура. Полученные результаты подтверждены расчетами методом конечных элементов.

Метод ЭС упрощает анализ и синтез собственных импедансов бесконечных периодических решеток метачастиц по заданным электродинамическим характеристикам. Существует два способа получения параметров эквивалентных LC -схем. В первом – эти параметры приближенно определяют в явном виде, исходя из известной простой топологии решетки метачастиц, как, например, в [34, 35]. Во втором - применяют вычислительную процедуру гомогенизации метаповерхности с помощью анизотропных импедансных граничных условий [36].

Ниже использован второй подход. Параметры эквивалентных LC -схем взаимных МП определяются с помощью полноволнового моделирования в канале Флоке. Последующая гомогенизация полей дает два эквивалентных входных полноволновых *собственных импеданса поляризатора* $Z_{in,x}$, $Z_{in,y}$ и входной импеданс подложки Z_{sub} .

Тогда две схемы замещения поляризатора в виде параллельно включенных импедансов метаповерхности и подложки [36], однозначно определяют два *собственных импеданса метаповерхности* по известным $Z_{in,x}$, $Z_{in,y}$ и Z_{sub} :

$$Z_{ms,x,y} = \frac{Z_{in,x,y} Z_{sub}}{Z_{sub} - Z_{in,x,y}} \quad (1)$$

Численный анализ гомогенизированных импедансов метаповерхности $Z_{ms,x}$, $Z_{ms,y}$ (1) позволяет найти плазменные и резонансные частоты метаповерхности и допустимую топологию ее эквивалентных LC-схем в двух ортогональных направлениях x , y .

После этого осуществляется синтез LC-параметров ЭС метаповерхности. Составляется система уравнений в виде равенства реактансов, рассчитанных для схем замещения и по формуле (1), в нескольких точках ЧХ. Количество уравнений выбирается, исходя из числа искоемых реактивностей. Решение уравнений должно обеспечивать максимальное совпадение ЧХ собственных реактансов полноволновой и импедансной моделей МП. В противном случае меняется топология ЭС и повторяется процедура синтеза.

Описанный алгоритм применен ниже для метаповерхностей на основе метачастиц в виде «восьмёрок» и усовершенствованных сплит-ринг резонаторов. Для оценки твист-эффекта моделей МП на основе эквивалентных схем рассчитывались ЧХ коэффициента отражения на ко-поляризации S_{co} путем пересчета коэффициентов отражения S_{xx} , S_{yy} МП из собственного поляризационного базиса в базис, повернутый на 45° : $S_{co} = (S_{xx} + S_{yy})/2$.

2. Метаполяризаторы из метачастиц в виде «восьмёрок»

Учтем, что радиомаскирующие непоглощающие анизотропные покрытия содержат шахматно-подобные метаповерхности, у которых углы наклона осей анизотропии МЧ в различных модулях кодируются. В случае 2-битных покрытий углы равны 0° , 45° , 90° , 135° [8]. Рассмотрим поляризаторы из метачастиц новой топологии МЧ-1 и МЧ-2 в форме «восьмёрок» с осями анизотропии x , y (МЧ-1) и u , v (МЧ-2) (рис.1). Поворот этих МЧ на 90° дает в итоге требуемый 2-битный набор углов наклона осей анизотропии четырех МЧ.

Элементарные ячейки МП содержат тонкую экранированную подложку F4B толщиной 3мм (проницаемость $\varepsilon_{sub}=2,65$; $tg\delta=0.009$) и метачастицу (рис.1в).

Размер ячеек 8x8 мм. МЧ состоит из двух связанных эллиптических колец. Большая и малая полуоси внешнего эллипса МЧ-1 (рис.1а) равны 1,9мм и 1мм, внутреннего эллипса - 1,615мм и 0,85мм, соответственно. Для МЧ-2 (рис.1б) большая и малая полуоси внешнего эллипса равны 2,07мм и 0,9мм, внутреннего эллипса - 1,84мм и 0,8мм, соответственно.

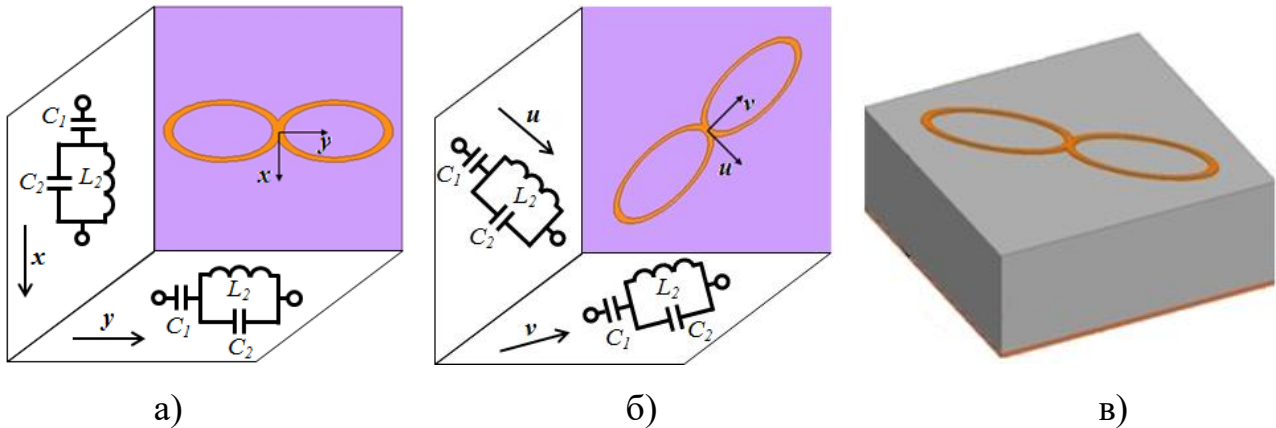


Рис.1. Ориентация метачастиц - «восьмёрки» и эквивалентные схемы метаповерхностей:
а) МЧ-1, б) МЧ-2, в) элементарная ячейка МП (канал Флоке).

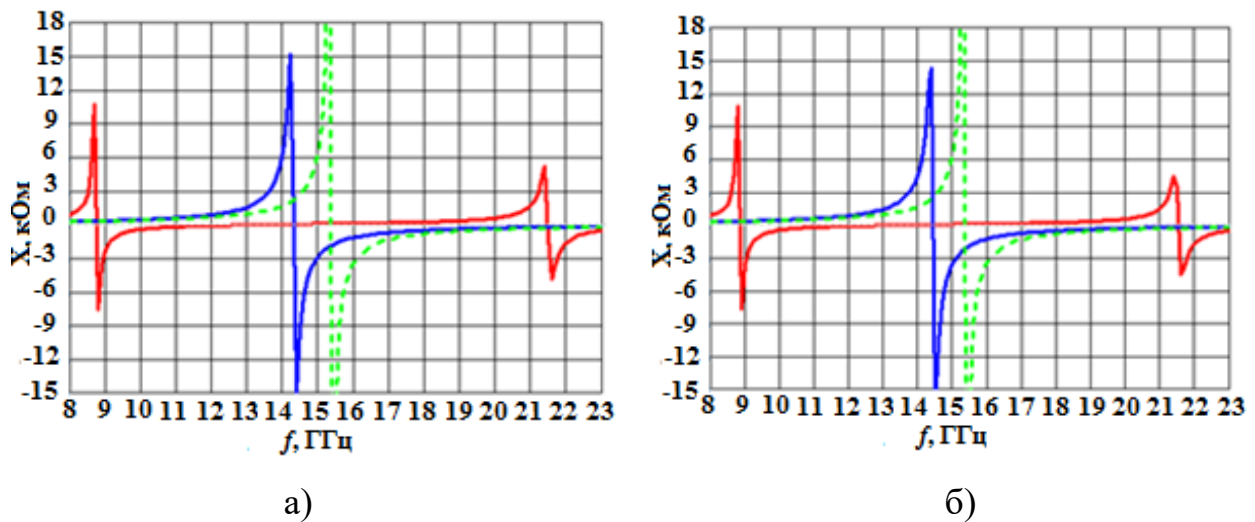


Рис.2. ЧХ входных собственных реактансов поляризаторов МЧ-1 (а) и МЧ-2 (б):

синие линии – реактансы по осям x, u ; красные линии – реактансы по осям y, v ; зеленые линии – реактанс подложки.

На рис. 2 приведены частотные характеристики входных собственных полноволновых реактансов поляризаторов. Они получены в HFSS с помощью периодических граничных условий в канале Флоке и характеризуют

импедансные свойства системы «метаповерхность-экранированная подложка» для собственных мод. Для сравнения на рис.2 также изображена ЧХ реактанса подложки (зелёные пунктирные линии). Из рис.2 следует, что метаповерхности на основе метачастиц МЧ-1 и МЧ-2 понижают частоту высокоимпедансного резонанса поляризатора на 1 ГГц для собственных мод, поляризованных вдоль осей x , u , и на 6,5 ГГц для мод, поляризованных вдоль осей y , v .

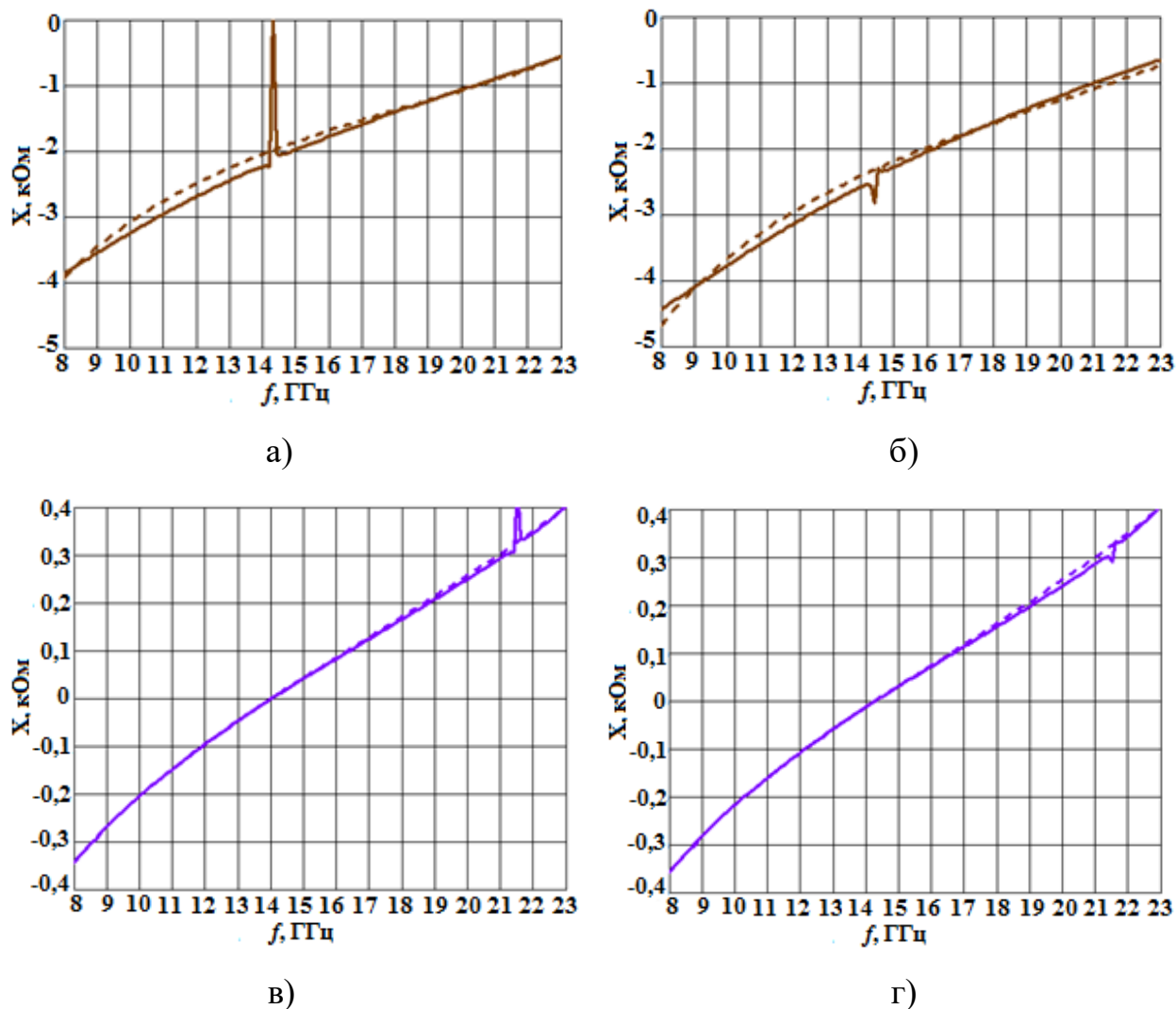


Рис.3. ЧХ собственных реактансов метаповерхностей для полноволновой (сплошные линии) и импедансной (пунктирные линии) моделей по осям x (а) и y (в) МЧ-1 и по осям u (б) и v (г) МЧ-2.

На рис.3 сплошными линиями изображены ЧХ полноволновых реактансов метаповерхностей для мод, поляризованных вдоль осей анизотропии МЧ. ЧХ рассчитаны по формуле (1) и характеризуют импедансные свойства метаповерхности вдоль осей анизотропии. Нефостеровские всплески

реактансов обусловлены погрешностью расчетов на резонансных частотах.

Далее эти ЧХ аппроксимировались реактансами эквивалентных схем метаповерхности в виде последовательного соединения ёмкости и параллельного колебательного контура (см. рис.1а, б). Неизвестные ёмкости C_1 , C_2 и индуктивность L_2 определялись из системы трёх уравнений, составленных для трёх частот ЧХ: f_{min} - начальной частоты, f_{max} - конечной частоты и f_p - плазменной частоты (на ней реактанс метаповерхности равен нулю). ЧХ собственных реактансов схемных импедансных моделей метаповерхностей представлены на рис.3 пунктирными линиями.

Результаты расчетов, приведенные на рис.3, показали хорошее совпадение реактансов полноволновой и импедансной моделей метаповерхностей.

Это обеспечивает незначительное отличие ЧХ коэффициентов отражения S_{co} двух рассмотренных моделей МП на ко-поляризациях. Данные ЧХ представлены на рис.4 (случай нормального падения), из которого видно, что поляризаторы на основе метачастиц МЧ-1 и МЧ-2 обеспечивают твист-эффект по уровню минус 17дБ в полосе 9,95÷20,2 ГГц и 10,1÷20,3 ГГц, соответственно.

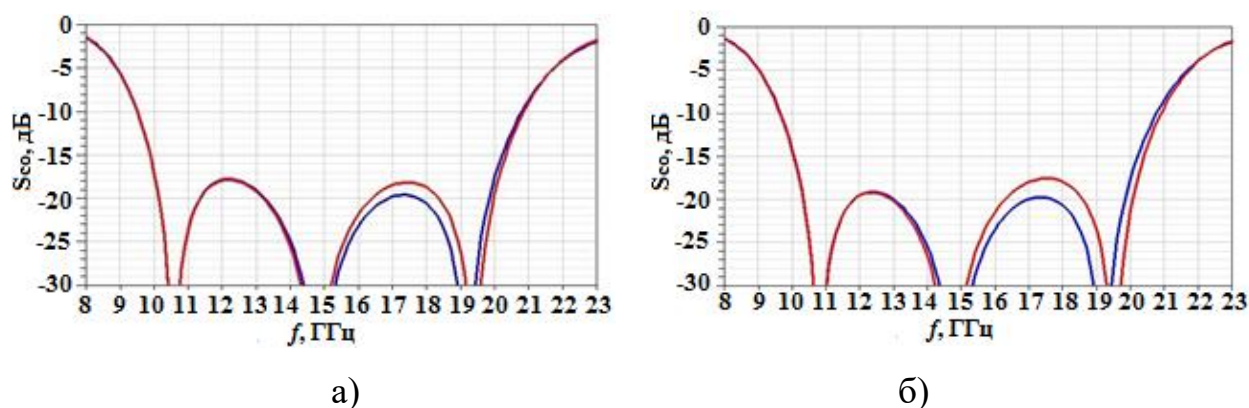


Рис.4. ЧХ коэффициентов отражения S_{co} МП на ко-поляризациях: а) МЧ-1; б) МЧ-2; красные линии – полноволновая модель, синие – импедансная модель.

На рис.5 и рис.6 представлены результаты расчетов влияния углов падения волны на твист-эффект полноволновых моделей МП. Рассчитаны ЧХ коэффициентов отражения S_{co} на ко-поляризациях при увеличении угла падения $\theta = 0 \div 20^\circ$ с шагом 5° (относительно нормали) в двух плоскостях падения $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$.

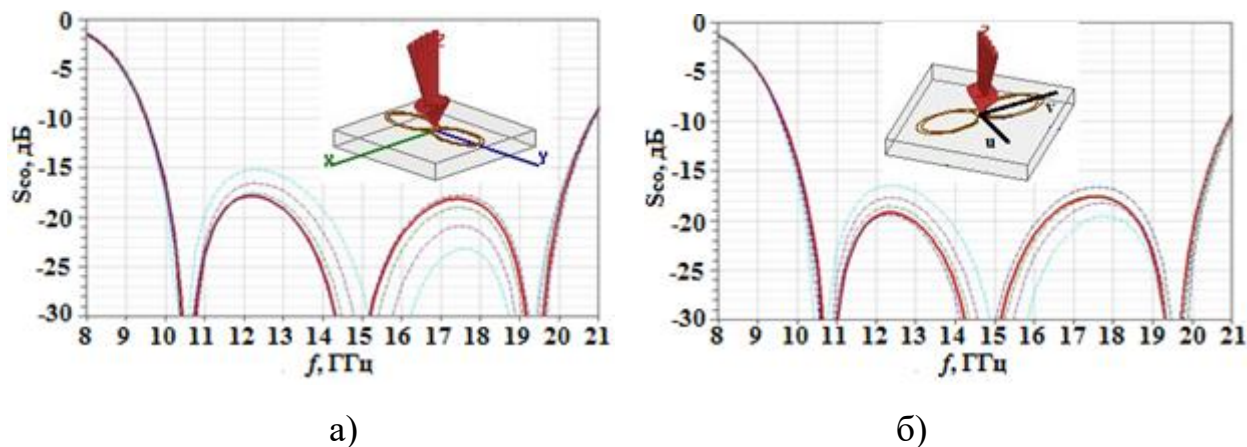


Рис.5. Влияние угла падения θ на ЧХ коэффициентов отражения на кополяризациях полноволновой модели МП в плоскости падения $\varphi = 0^\circ$:
а) МЧ-1, б) МЧ-2.

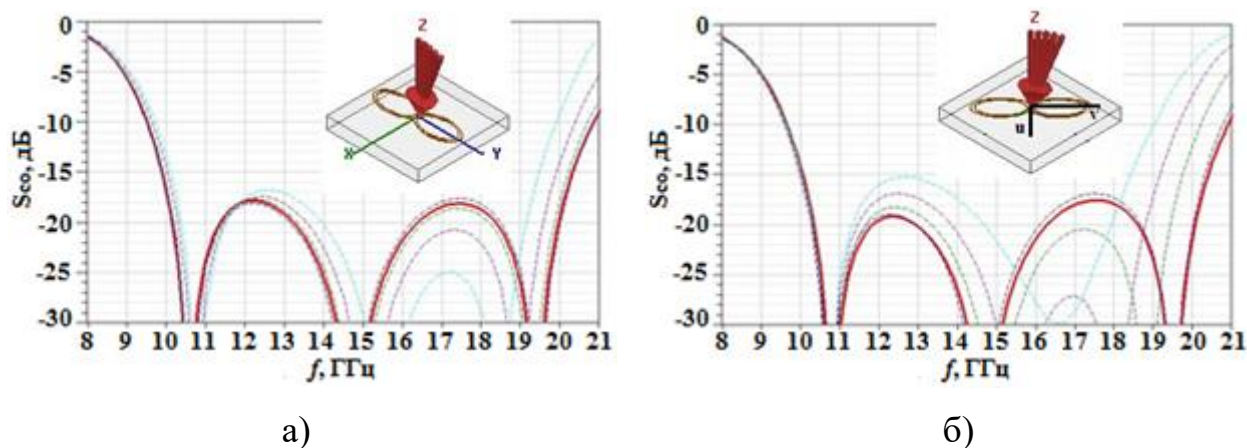


Рис.6. Влияние угла падения θ на ЧХ коэффициентов отражения на кополяризациях полноволновой модели МП в плоскости падения $\varphi = 90^\circ$:
а) МЧ-1, б) МЧ-2.

Угол ориентации плоскости падения φ отсчитывается от оси x для МЧ-1 и от оси u для МЧ-2 против часовой стрелки. Вектор электрического поля падающей волны ориентировался под углом 45° к плоскости падения. На рис.5 и рис.6 сплошные красные линии соответствуют нормальному падению $\theta = 0^\circ$, синие пунктирные – $\theta = 5^\circ$, зелёные пунктирные – $\theta = 10^\circ$, фиолетовые пунктирные – $\theta = 15^\circ$, бирюзовые пунктирные – $\theta = 20^\circ$. Красные стрелки на вставках показывают направления падения волны и лежат в плоскости падения.

С ростом угла θ твист-эффект ухудшается в плоскости $\varphi = 0^\circ$, а в плоскости $\varphi = 90^\circ$ наблюдается и сужение рабочей полосы частот. При этом ЧХ коэффициентов отражения более стабильны с ростом θ в плоскости $\varphi = 0^\circ$;

уровень твист-эффекта не хуже минус 15дБ в полосе 9,9÷20,35 ГГц (МЧ-1, рис.5а) и минус 16дБ в полосе 10÷20,5 ГГц (МЧ-2, рис.5б). В плоскости $\varphi = 90^\circ$ твист-эффект не хуже минус 16дБ в полосе 10÷19,5 (МЧ-1, рис.6а) и минус 15дБ в полосе 10÷18,4 ГГц (МЧ-2, рис.6б).

3. Метapoляризаторы из метачастиц в виде усовершенствованных симметричных сплит-ринг резонаторов

Прототипом таких МП служит конструкция, предложенная в [37], обеспечивающая твист-эффект по уровню минус 10дБ в полосе 10,25÷18,55 ГГц. Для улучшения твист-эффекта усовершенствованы параметры метачастиц: период ячейки уменьшен с 8мм до 6мм, форма разрыва кольца изменена с трапецеидальной на прямоугольную, ширина полоска заужена по отношению к ширине кольца. Это снизило плазменные и резонансные частоты метаповерхности. Элементарные ячейки МП (рис.7в) состоят из экранированной подложки *F4В* толщиной 3мм и метачастиц в форме симметричного сплит-ринг резонатора (ССРР) двух видов - МЧ-3 и МЧ-4.

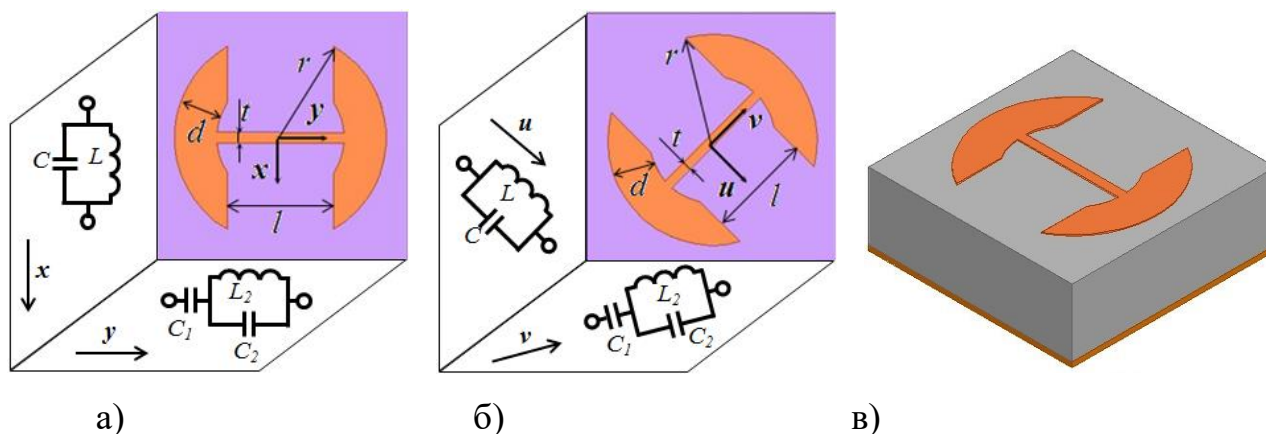


Рис.7. Ориентация МЧ – симметричных сплит-ринг резонаторов и эквивалентные схемы метаповерхностей:
а) МЧ-3, б) МЧ-4, в) элементарная ячейка МП.

Размер ячеек 6х6 мм. Параметры МЧ-3 (рис.7а): $r = 2,5\text{мм}$, $l = 2,5\text{мм}$, $d = 1\text{мм}$, $t = 0,25\text{мм}$. Параметры МЧ-4 (рис.7б): $r = 2,5\text{мм}$, $l = 2,5\text{мм}$, $d = 1\text{мм}$, $t = 0,22\text{мм}$.

В результате синтеза эквивалентных схем метаповерхностей из ССРР, получены схемы замещения в виде параллельных колебательных контуров

вдоль осей x (МЧ-3, рис.7а) и u (МЧ-4, рис.7б) и в виде последовательного соединения ёмкости и параллельного колебательного контура вдоль осей y (МЧ-3, рис.7а) и v (МЧ-4, рис.7б).

ЧХ коэффициентов отражения на ко-поляризациях S_{co} полноволновых и импедансных моделей МП из ССРР приведены на рис.8. Метаполяризаторы на основе МЧ-3 и МЧ-4 обеспечивают твист-эффект не хуже минус 15дБ в полосе 8,65÷18,25 ГГц и 8,55÷17,95 ГГц, соответственно (при нормальном падении).

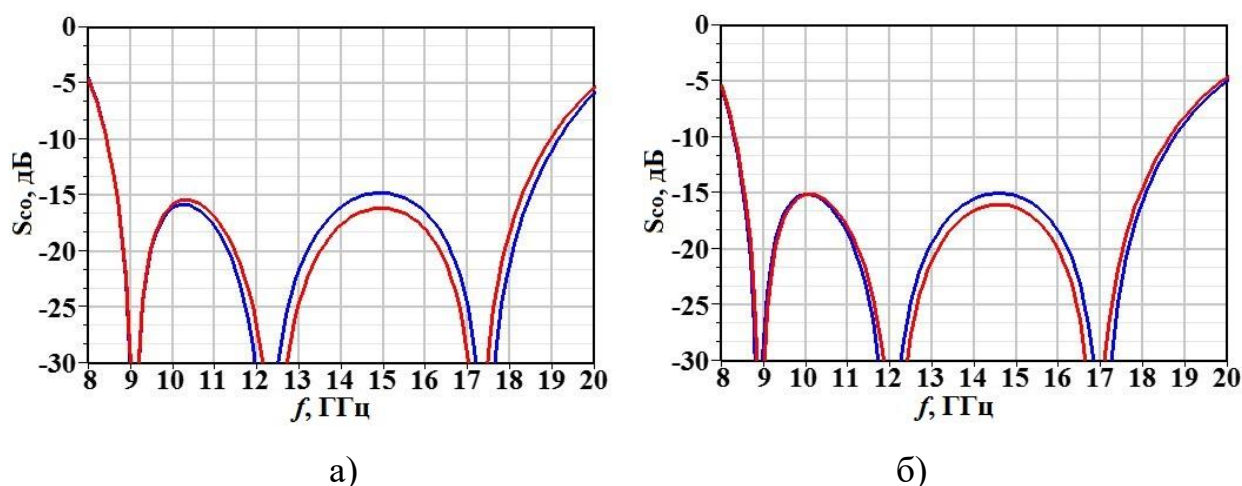


Рис.8. ЧХ коэффициентов отражения S_{co} МП на ко-поляризациях: а) МЧ-3; б) МЧ-4; красные линии – полноволновая модель, синие – импедансная модель.

Заключение

В статье исследованы полноволновые и импедансные модели более эффективных (по сравнению с известными) тонких однослойных метаполяризаторов, обеспечивающих твист-эффект не хуже минус 15дБ в полосе частот более октавы. Поляризаторы состоят из метачастиц в виде «восьмёрок» или усовершенствованных симметричных сплит-ринг резонаторов и отличаются ориентацией осей анизотропии и периодом элементарных ячеек. Показано, что частотные характеристики коэффициентов отражения данных моделей на ко-поляризациях хорошо согласуются, что свидетельствует о применимости импедансных моделей.

Поляризаторы из «восьмёрок» с осями анизотропии, повернутыми на углы 0° и 45° , обеспечивают твист-эффект не хуже минус 17дБ в полосе 68% (15,1 ГГц) и 67,1% (15,2 ГГц), соответственно (при нормальном падении; в скобках

указана центральная частота). При увеличении угла падения волны до 20° наблюдается ухудшение твист-эффекта на 1-2дБ и уменьшение рабочей полосы частот на 5,8÷7,9%. Поляризаторы из ССРР с осями анизотропии, повернутыми на углы 0° и 45° , обеспечивают твист-эффект не хуже минус 15дБ в полосе 71,4% (13,45 ГГц) и 70,9% (13,25 ГГц), соответственно. Усовершенствованные МП из ССРР превосходят оригинал [34], как по глубине твист-эффекта (на 5дБ), так и по рабочей полосе (на 13,3%).

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать вывод о применимости предлагаемых метаполяризаторов и их импедансных моделей при решении задач анализа характеристик и оптимизации матриц кодирования радиомаскирующих непоглощающих покрытий.

Работа выполнена по гранту Российского научного фонда - проект № 16-19-10537.

Литература

1. Chen J., Cheng Q., Zhao J. Reduction of radar cross section based on a metasurface // Prog. Electromagn. Res. 2014. No.146. 71–6. <https://doi.org/10.2528/pier14022606>
2. 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. No.10. 25 p. <https://doi.org/0.1038/lsa.2014.99>
3. Gao L.H., Cheng Q., Yang J., et al. Broadband Diffusion of Terahertz Waves by Multi-bit Coding Metasurfaces // Light: Science & Applications. 2014. No.4. e324. <https://doi.org/10.1038/lsa.2015.97>
4. 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. Oct. 2017. Vol.65. No.10. P.5406–5417. <https://doi.org/10.1109/tap.2017.2734069>

5. 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>
6. Semenikhina D.V., Semenikhin A.I., Yukhanov Y.V. and Klimov A.V. Binary structures similar to checkerboard, with anisotropic impedance metasurface for RCS reduction // 2016 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). Cairns, Australia. 2016. P.307-310.
<https://doi.org/10.1109/iceaa.2016.7731382>
7. Петров Б.М., Семенихин А.И. Управляемые импедансные покрытия и структуры // Зарубежная радиоэлектроника. 1994. № 6. С.9-16.
8. Semenikhin A.I., Semenikhina D.V., Yukhanov Y.V., Blagovisnyy P.V. Digital 2-bit Metasurfaces with Coding Orientation of Anisotropy for RCS Reduction // 2017 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)., Verona, Italy. 2017. P.360-363.
<https://doi.org/10.1109/iceaa.2017.8065250>
9. Mohammad A., Samadi F., Sebak A.-R., Denidni T.A. Superbroadband Diffuse Wave Scattering Based on Coding Metasurfaces. Polarization conversion metasurfaces // IEEE Antennas & Propagation Magazine. Apr.2019. P.40-52.
<https://doi.org/10.1109/map.2019.2896218>
10. Kong C., Li Z., Wu Z. Ultra-wideband Polarization Conversion Metasurface // 11th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). 2016. P.210-212. <https://doi.org/10.1109/ISAPE.2016.7833918>
11. Semenikhina D.V., Klimov A.V., Semenikhin A.I., Yukhanov Y.V. Metamaterial-Inspired Model of Broadband Twist-Polarizer // IEEE Explore 2015 57th International Symposium ELMAR (ELMAR). 2015. P.149-152.
<https://doi.org/10.1109/ELMAR.2015.7334518>
12. Климов А.В., Семенихин А.И. Модели сверхширокополосных двухслойных отражательных поляризаторов // Телекоммуникации. 2016. №.5. С.8-13.

13. Zhang L., Zhou P., Lu H., Chen H., Xie J., Deng L. Ultra-Thin Reflective Metamaterial Polarization Rotator Based on Multiple Plasmon Resonances // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2015. Vol.14. P.1157-1160. <https://doi.org/10.1109/lawp.2015.2393376>
14. Zhang L., Luo J., Zhou P., Chen H., Xie J., Deng L. Dual-band Polarization Converter Based on Reflective Metamaterial at Microwave Frequencies // 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). 2016. 4 p. <https://doi.org/10.1109/piers.2016.7735417>
15. Zhou Y., Cao X., Gao J., Li S. A C/X Dual-band Wide-angle Reflective Polarization Rotation Metasurface // Radioengineering. 2017. Vol.26. No.3. P.699-704. <https://doi.org/10.13164/re.2017.0699>
16. Yang D., Lin H., Huang X. Dual Broadband Metamaterial Polarization Converter in Microwave Regime // Progress In Electromagnetics Research Letters. 2016. Vol.61. P.71-76. <https://doi.org/10.2528/pierl16033004>
17. Li M., Lan F., Yang Z., Zhang Y., Shi Z., Shi M., Su H., Luo F. Broadband and Highly Efficient sub-THz Reflective Polarization Converter based on Z-shaped Metasurface // 6th International Conference on Mechatronics, Materials, Biotechnology and Environment (ICMMBE 2016). 2016. P.427-432. <https://doi.org/10.2991/icmmbe-16.2016.80>
18. Wei Z., Huang J., Li J., Xu G., Ju Z. Dual-broadband and near-perfect polarization converter based on anisotropic metasurface // Optical and Quantum Electronics. 2017. Vol.49. № No.9. 12 p. <https://doi.org/10.1007/s11082-017-1121-5>
19. Mao C., Yang Y., He X., Zheng J., Zhou C. Broadband reflective multi-polarization converter based on single layer double-L-shaped metasurface // Applied Physics A. 2017. Vol.123. No.12. P.767-762. <https://doi.org/10.1007/s00339-017-1322-6>
20. Zhang Z., Cao X., Gao J., Li S. Broadband Metamaterial Reflectors for Polarization Manipulation based on Cross/Ring Resonators // Radioengineering. 2016. Vol.25. No.3. P.436-441. <https://doi.org/10.13164/re.2016.0436>

21. Shi H., Li J., Zhang A., Wang J., Xu Z. Broadband cross polarization converter using plasmon hybridizations in a ring/disk cavity // Optics express. 2014. Vol.22. No.17. 9 p. <https://doi.org/10.1364/oe.22.020973>
22. Zhang L., Zhou P., Chen H., Lu H., Xie J., Deng L. Broadband and wide-angle reflective polarization converter based on metasurface at microwave frequencies // Applied Physics B. 2015. Vol.120. No.4. P.617-622. <https://doi.org/10.1007/s00340-015-6173-2>
23. Lin B.-Q., Guo J.-X., Chu P., Huo W.-J., Xing Z., Huang B.-G., Wu L. Multiple-Band Linear-Polarization Conversion and Circular Polarization in Reflection Mode Using a Symmetric Anisotropic Metasurface // Physical Review Applied. 2018. Vol.9. No.2. 10 p. <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.9.024038>
24. Chen H., Wang J., Ma H., Qu S., Zhang J.-Q., Xu Z., Zhang A. Broadband perfect polarization conversion metasurfaces // Chinese Physics B. 2015. Vol.24. No.1. 5 p. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/24/1/014201>
25. Chen H., Wang J., Ma H., Qu S., Xu Z., Zhang A., Yan M., Li Y. Ultra-wideband polarization conversion metasurfaces based on multiple plasmon resonances // Journal of Applied Physics. 2014. Vol.115. No.15. 4 p. <https://doi.org/10.1063/1.4869917>
26. Gao X., Han X., Cao W.P., Li H.O., Ma H.F., Cui T.J. Ultra-Wideband and High-Efficiency Linear Polarization Converter Based on Double V-Shaped Metasurface // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2015. Vol.63. No.8. P.3522-3530. <https://doi.org/10.1109/tap.2015.2434392>
27. Lin B.-Q., Da X.-Y., Wu J.-L., Li W., Fang Y.-W., Zhu Z.-H. Ultra-Wideband and High-Efficiency Cross Polarization Converter Based on Aisotropic Metasurface // Microwave and optical technology letters. 2003. Vol.58. No.10. P. 2402-2405. <https://doi.org/10.1002/mop.30056>
28. Mei Z.L., Ma X.M., Lu C., Zhao Y.D. High-efficiency and wide-bandwidth linear polarization converter based on double U-shaped metasurface // AIP Advances. 2017. Vol.7. No.12. 6 p.

Available at: <https://aip.scitation.org/-doi/pdf/10.1063/1.5003446>
<https://doi.org/10.1063/1.5003446>

29. Fang C., Cheng Y., He Z., Zhao J., Gong R. Design of a wideband reflective linear polarization converter based on the ladder-shaped structure metasurface // Optic – International Journal for Light and Electron Optics. 2017. Vol.137. P.148-155. <https://doi.org/0.1016/j.ijleo.2017.03.002>
30. Dong G.-X., Shi H., Xia S., Li W., Zhang A., Xu Z., Wei X.-Y. Ultra-broadband and high-efficiency polarization conversion metasurface with multiple plasmon resonance modes // Chinese Physics B. 2016. Vol.25. No.8. 6 p. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/25/8/084202>
31. Zhang L., Zhou P., Chen H., Lu H., Xie J., Deng L. Adjustable wideband reflective converter based on cut-wire metasurface // Journal of Optics. 2015. Vol.17. No.10. 7 p. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/17/10/105105>
32. Sun H., Gu C., Chen X., Li Z., Liu L., Martin F. Ultra-wideband and broad-angle linear polarization conversion metasurface // Journal of applied physics. 2017. Vol.121. No.17. 6 p. <https://doi.org/10.1063/1.4982916>
33. Xu J., Li R., Wang S., Han T. Ultra-broadband linear polarization converter based on anisotropic metasurface // Optics Express. 2018. Vol.26. No.20. 7 p. <https://doi.org/10.1364/oe.26.026235>
34. Costa F., Monorchio A., Manara G. Efficient Analysis of Frequency-Selective Surfaces by a Simple Equivalent-Circuit Model // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2012. Vol.54. No.4. P.35-48. <https://doi.org/10.1109/map.2012.6309153>
35. Sievenpiper D., Lijun Z., Broas R.F.J., Alexopolous N.G., Yablonovitch E., High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band // Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on. 1999. Vol.47. P.2059-2074. <https://doi.org/10.1109/22.798001>
36. Tretyakov S.A. Metasurfaces for general transformations of electromagnetic fields // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2015. Vol.373. No.2049. P.1-10. Available at:

<https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/-10.1098/rsta.2014.0362>

<https://doi.org/0.1098/rsta.2014.0362>

37. Su P., Zhao Y., Jia S., Shi W., Wang H. An ultra-wideband and polarization independent metasurface for RCS reduction // Scientific Reports. 2016. Vol.6. No.1. 8 p. Available at: <https://www.nature.com/articles/srep20387.pdf>
<https://doi.org/10.1038/srep20387>

Для цитирования:

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>