

Семенихин Андрей Илларионович, канд. тех. наук, доцент,

Институт Радиотехнических Систем и Управления

Южного Федерального Университета

E-mail: anilsem@mail.ru

Еременко Павел Андреевич, магистр,

Институт Радиотехнических Систем и Управления

Южного Федерального Университета

E-mail: Eremenko_p_a@mail.ru

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ МЕТАПОЛЯРИЗАТОРЫ НА СВЕРХТОНКОЙ ЭКРАНИРОВАННОЙ ПОДЛОЖКЕ

Аннотация: В работе исследуются широкополосные поляризаторы на сверхтонкой подложке с метаповерхностью, реализующей твист-эффект – поворот плоскости поляризации электромагнитной волны при отражении. Метаповерхность состоит из решетки метачастиц в виде симметрично разорванных кольцевых резонаторов с дополнительным внутренним эллиптическим вибратором. Выполнен анализ частотных характеристик двух таких метаполяризаторов, отличающихся кодированием осей анизотропии метачастиц. Рассчитана угловая дисперсия твист-эффекта. Анализ результатов проведен применительно к использованию поляризаторов в непоглощающих малозаметных метапокрытиях.

Ключевые слова: твист-эффект, твист-поляризатор, метаполяризатор, метаповерхность, снижение ЭПР.

Abstract: In this work, we study broadband polarizers on an ultrathin substrate with a metasurface that implements a twist effect — rotation of the plane of polarization of the electromagnetic wave upon reflection. The metasurface consists of

a lattice of meta-particles in the form of symmetrically torn ring resonators with an additional internal elliptical vibrator. An analysis of the frequency characteristics of two such metapolarizers, differing in coding of the anisotropy axes of the metaparticles, is made. The angular dispersion of the twist effect is calculated. The analysis of the results was carried out in relation to the use of polarizers in non-absorbing subtle metacoatings

Keywords: twist-effect, twist-polarizer, metapolarizer, metasurface, reduction of RCS.

При развитии средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ), всегда оставалась актуальной проблема создания пассивных устройств, изменяющих эффективную площадь рассеяния (ЭПР) объектов. Значительное достоинство таких устройств состоит в том, что их использование не требует дополнительных затрат энергии и ресурсов. К минусам пассивных средств РЭБ относятся их большие массогабаритные характеристики и низкая эффективность по сравнению с активными средствами, особенно в более низкочастотных диапазонах радиомаскировки. Однако на определенном этапе развития пассивных средств РЭБ целые группы экспериментов и устройств вышли из разряда теоретических. Одними из таких устройств стали метаматериалы и их 2D-аналоги — метаповерхности.

Развитие метаповерхностей привело к тому, что их стали использовать для повышения качества малозаметности всего объекта. Один из примеров — нанесение метаповерхностей на различные антенны с целью изменения их электромагнитных характеристик [1]. Несмотря на большой потенциал использования метаповерхностей в комплексе с антеннами, в последние годы их стали интенсивно исследовать как дополнительное пассивное средство радиомаскировки в виде малозаметных непоглощающих мепокровтий в самых различных диапазонах длин волн — от микроволнового до терагерцового и оптического.

Непоглощающие метопокрытия, как пассивные средства РЭБ, чаще всего представляют собой распределенные по покрытию кодированные метаполяризаторы отражательного типа. Как правило, они используют дешевую однослойную (желательно тонкую) подложку и сформированную сверху анизотропную метаповерхность. Единичные ячейки метаповерхности содержат одну или несколько метачастиц определенной формы [2; 3; 4; 5]. Ориентация осей анизотропии и форма метачастиц обычно кодируются для реализации соседних противофазных участков (модулей) малозаметных покрытий [3; 4; 6].

В настоящей работе исследуются сверхтонкие (толщиной $0,05 \lambda_n$ относительно длины волны λ_n на нижней рабочей частоте) широкополосные метаполяризаторы на основе метачастиц с двумя разными (кодированными) ориентациями осей анизотропии. Толщина подложки уменьшена вдвое по сравнению с известными проектами, например [7]. Основной задачей метаполяризаторов, как элементов непоглощающих кодированных метапокрытий, является широкополосное снижение ЭПР (не менее 10 дБ) на согласной поляризации (ко-поляризации) за счет твист-эффекта - перевода энергии падающей волны на кросс-поляризацию. Расчеты проводились в полосе частот 8 – 18 ГГц в пакете HFSS.

Единичная ячейка исследуемого метаполяризатора показана на рисунке 1 и содержит проводящую метачастицу в виде симметрично разорванного кольцевого резонатора с дополнительным внутренним эллиптическим вибратором. В качестве подложки использован материал Arlon AD350A (tm) толщиной 1,5 мм (диэлектрическая проницаемость $\epsilon=3,5$). Размер единичной ячейки – 8x8 мм. Толщина медной метачастицы 35 мкм. Внешний радиус кольцевого резонатора 3,9 мм, внутренний - 2,2 мм. Величина разрыва (зазора с параллельными кромками) в кольцевом резонаторе – 3 мм. Эллиптический вибратор имеет большую полуось 2,625 мм и малую полуось 1,75 мм.

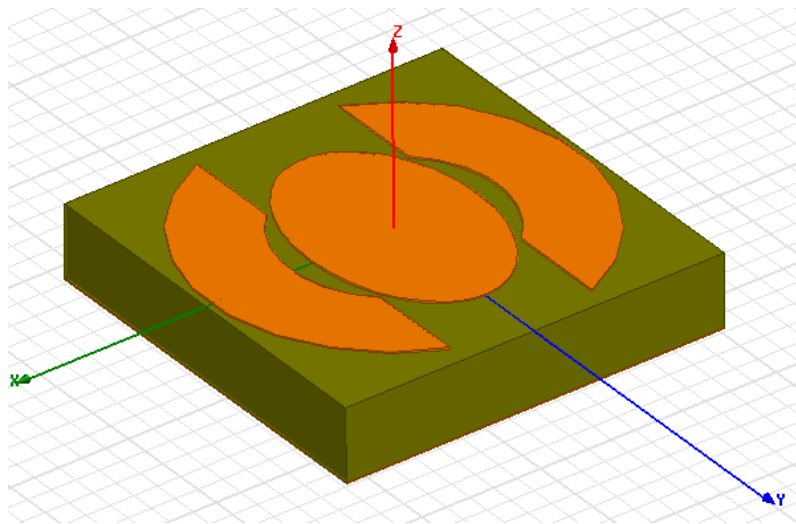


Рисунок 1 — Внешний вид исследуемой непернутой метачастицы с осями анизотропии x , y в канале Флоке

Размеры непернутых метачастиц получены после оптимизации твист-эффекта по уровню поляризационных потерь минус 10 дБ в максимально широкой полосе частот. При этом оптимизировались фазовые характеристики коэффициентов отражения двух собственных мод, поляризованных вдоль осей анизотропии y (мода 1) и x (мода 2). Отраженные моды имеют разность фаз $180^\circ \pm 37^\circ$ в полосе частот от 10,05 ГГц до 16,6 ГГц (рисунок 2), что гарантирует в этой полосе твист-эффект по уровню минус 10 дБ.

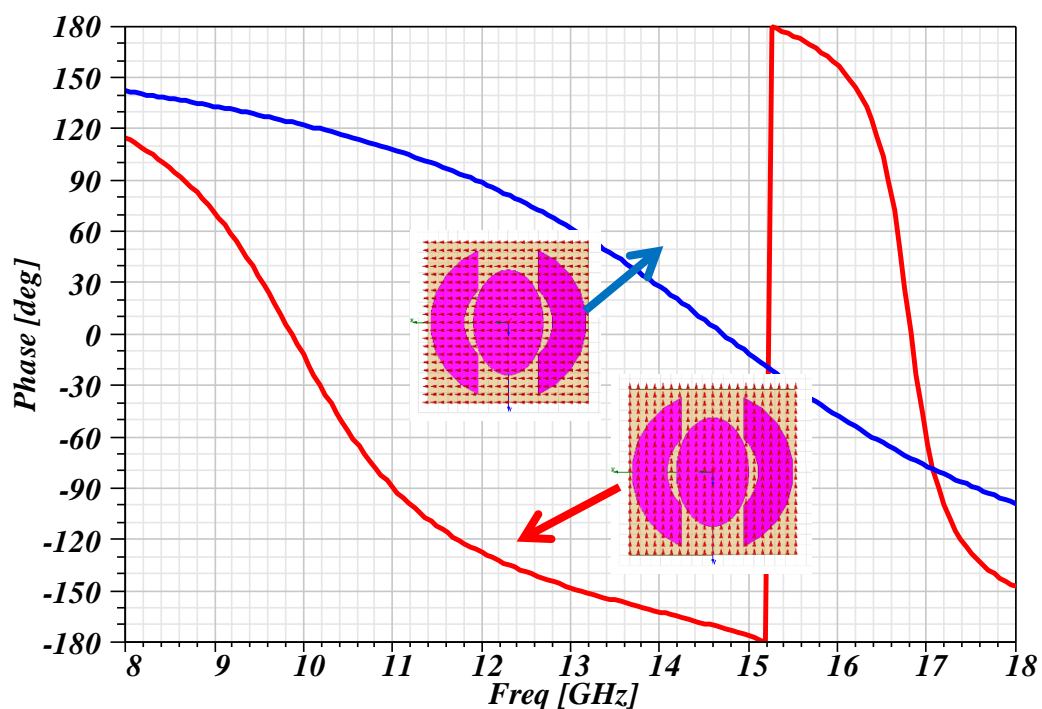


Рисунок 2 — Фазы коэффициентов отражения собственных мод метаповерхности: красная линия – мода 1; голубая линия – мода 2
(нормальное падение; на врезках показаны линии поля E мод 1 и 2)

Из рисунка 2 следует, что несмотря на электрически малую толщину подложки, метаповерхность реализует высокоимпедансный резонанс моды 1 на частоте 9,85 ГГц. Фаза коэффициента отражения моды при этом равна нулю. Резонансное распределения плотности тока по поверхности метачастицы на частоте 10 ГГц вблизи высокоимпедансного резонанса иллюстрирует рисунок 3.

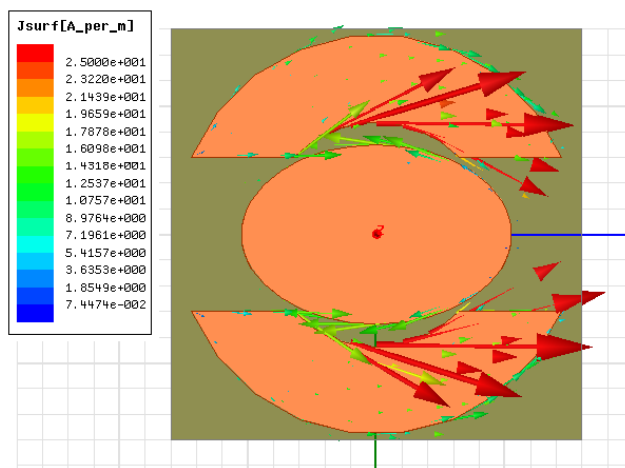


Рисунок 3 — Картина распределения плотности тока по поверхности метачастицы на частоте 10 ГГц вблизи высокоимпедансного резонанса моды 1

Приведенные фазовые характеристики поляризатора однозначно (при заданной подложке) обуславливаются характером частотной дисперсии двух собственных реактансов анизотропной метаповерхности (рисунок 4). Вдоль оси x реактанс для моды 2 соответствует дисперсии последовательного колебательного контура с высокой плазменной частотой (свыше 18 ГГц). Вдоль оси y дисперсия реактанса метаповерхности эквивалентна последовательному соединению емкости и параллельного колебательного контура. Метаповерхность для моды 1 имеет плазменную частоту 15 ГГц и резонансную частоту 16,4 ГГц (рисунок 4).

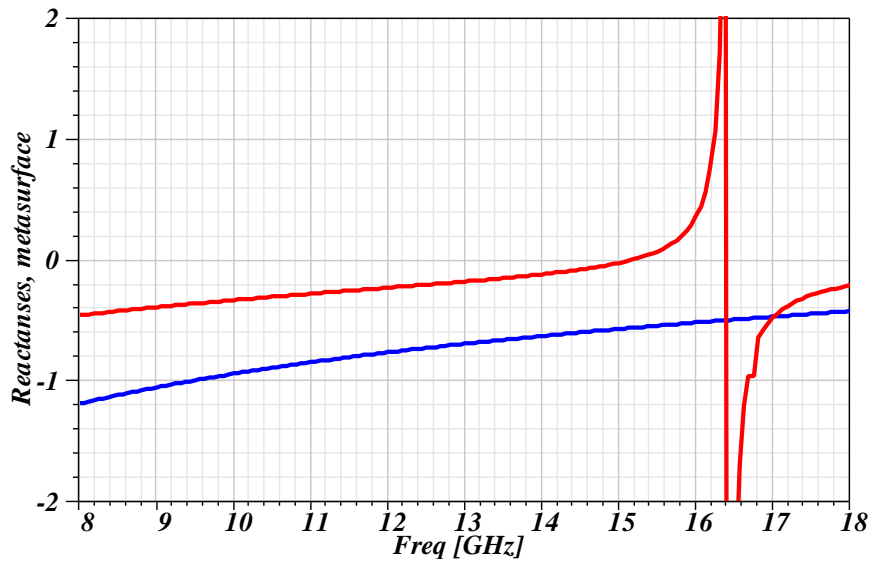


Рисунок 4 — Частотная дисперсия собственных реактансов метаповерхности для моды 1 (красная линия) и моды 2 (синяя линия)

Как следствие, получаем рассчитанную частотную зависимость твист-эффекта (рисунок 5). Видим, что он наблюдается в широкой полосе частот от 10,05 ГГц до 16,6 ГГц, что составляет 49,2 % относительно центральной частоты.

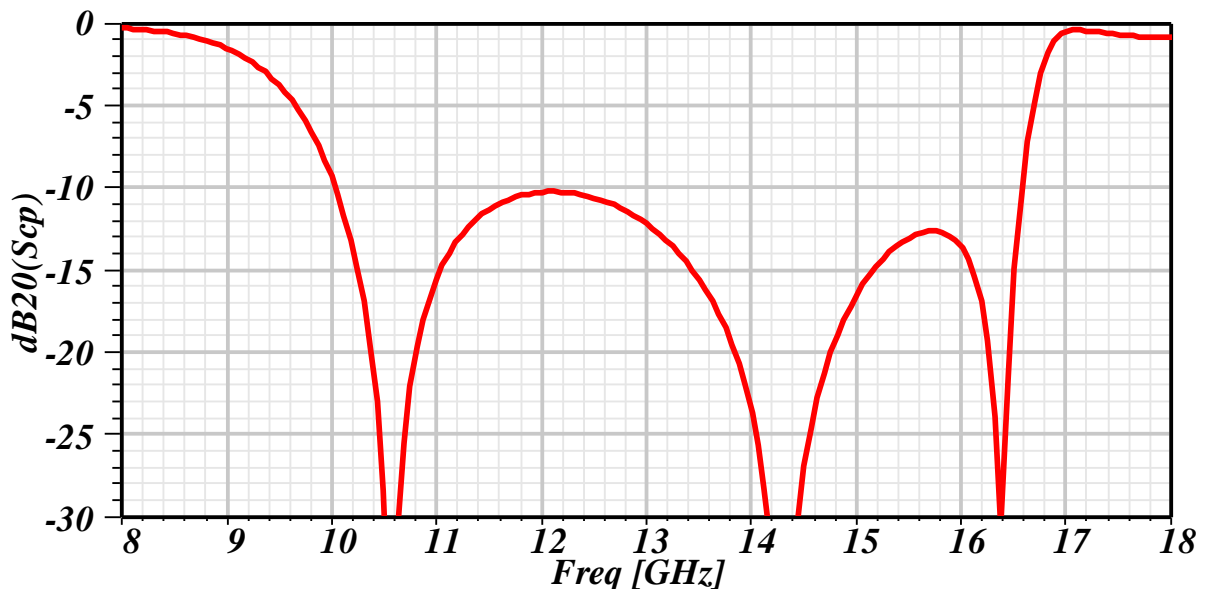


Рисунок 5 — Частотная зависимость твист-эффекта для неповернутых метачастиц и падающей волны, поляризованной под углом 45° к оси x

Рассмотрим характеристики поляризатора из метачастиц той же топологии, повернутых на угол 45° в том же канале Флоке. Для реализации

заданного твист-эффекта параметры повернутых метачастиц пришлось изменить. На рисунке 6 изображена частотная характеристика реализованного твист-эффекта. Видно, что он наблюдается в более широкой полосе от 9,92 ГГц до 17,66 ГГц (56,1 % относительно центральной частоты) с небольшим ростом поляризационных потерь (не хуже 8,4 дБ).

Исследуем теперь угловую дисперсию твист-эффекта при изменении угла падения электромагнитной волны в двух главных плоскостях xOz и yOz . Полученные частотные характеристики поляризатора с неповернутыми метачастицами представлены на рисунках 7 и 8. Видим, что с ростом угла падения в секторе $\pm 30^\circ$ твист-эффект незначительно ухудшается по уровню (до минус 8,4 дБ) и по рабочей полосе частот в двух плоскостях падения.

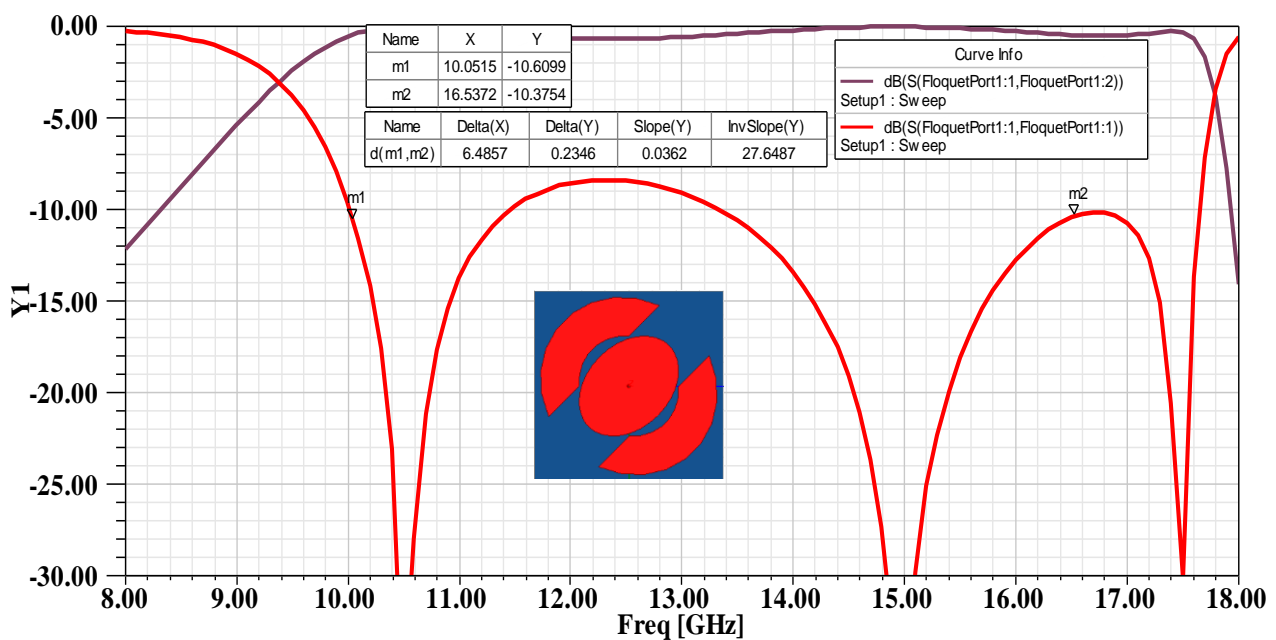


Рисунок 6 — Частотная зависимость коэффициентов отражения на ко-поляризации (красная линия) и кросс-поляризации (черная линия) для повернутых метачастиц и падающей волны, поляризованной вдоль оси x

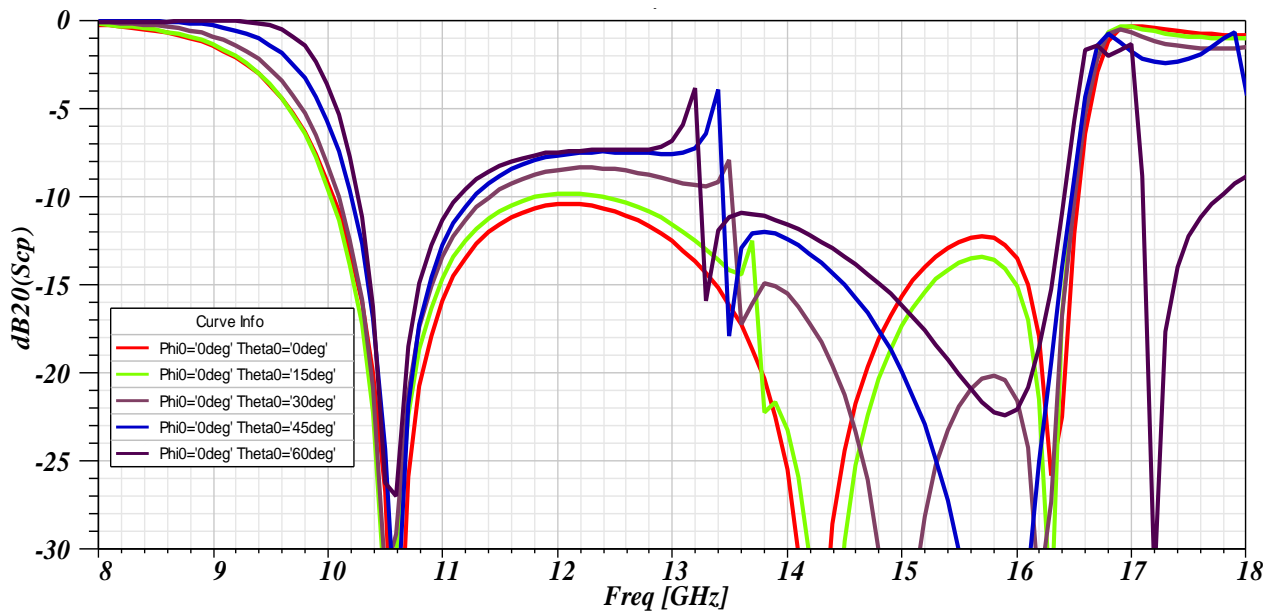


Рисунок 7 – Частотные характеристики твист-эффекта при различных углах падения 0° , 15° , 30° , 45° , 60° в плоскости xOz

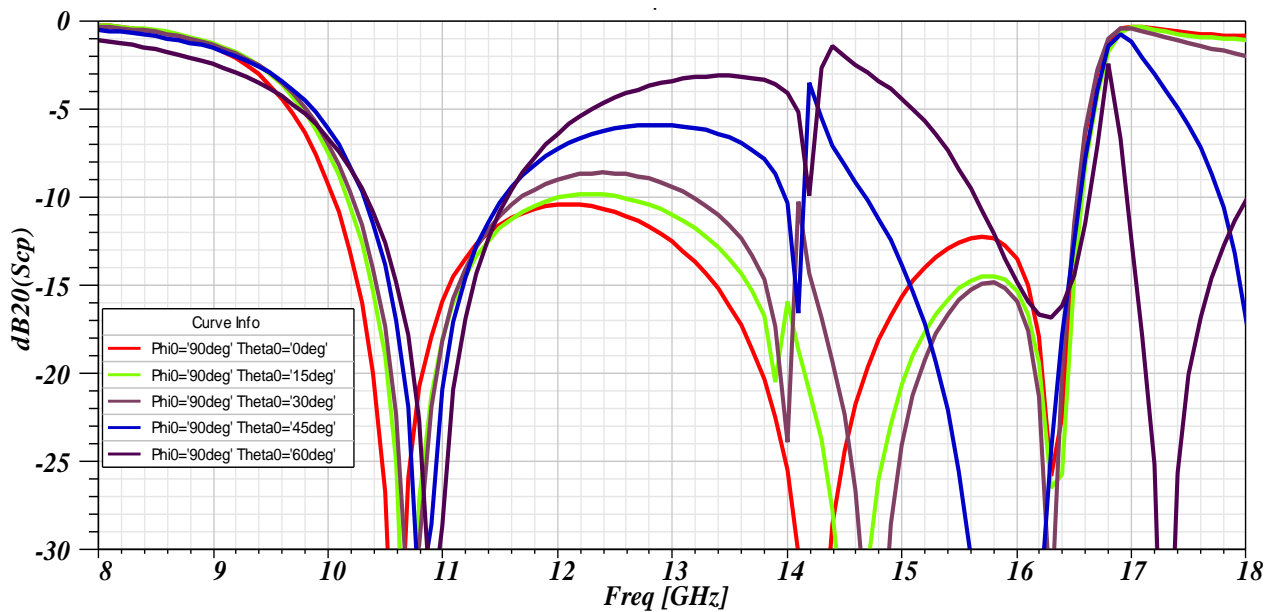


Рисунок 8 – Частотные характеристики твист-эффекта при различных углах падения 0° , 15° , 30° , 45° , 60° в плоскости yOz

Таким образом, в данной работе исследованы сверхтонкие (толщиной $0,05 \lambda_n$ относительно длины волны λ_n на нижней рабочей частоте) широкополосные метаполяризаторы с двумя кодированными ориентациями осей анизотропии метачастиц 0° и 45° . Метачастицы имеют форму симметрично разорванных кольцевых резонаторов с внутренним

эллиптическим вибратором. Метаполяризаторы реализуют полосу рабочих частот 49,2 % и 56,1 % по уровню поляризационных потерь не хуже минус 10 дБ и минус 8,4 дБ, соответственно (при нормальном падении). С ростом угла падения в секторе $\pm 30^\circ$ твист-эффект незначительно ухудшается по уровню (до минус 8,4 дБ) и по рабочей полосе частот.

Достоинством разработанных поляризаторов является то обстоятельство, что топология предложенных метачастиц допускает кодирование осей анизотропии без существенного ухудшения твист-эффекта. Поэтому метаполяризаторы можно использовать в качестве элементов непоглощающих кодированных малозаметных метапокрытий металлических объектов.

Библиографический список:

1. P Pramodh Kumar, K Sreelakshmi, Sangeetha B and Shiv Narayan. Metasurface based low profile reconfigurable antenna// 2017 International Conference On Communication and Signal Processing – DOI: 10.1109/ICCSP.2017.8286770.
2. Ramiz Izhar, Meraj-E-Mustafa, M. S. Wahidi, Farooq A. Tahir. An anisotropic dual-broadband reflective polarization converter metasurface// 2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM) – DOI: 10.1109/COMPEN.2019.8779072.
3. Anuj Y. Modi, Constantine A. Balanis, and Craig Birtcher. Investigation of Checkerboard Metasurfaces on Flexible Curvilinear Structure for RCS Reduction // 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, DOI: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8609066.
4. Tomohiro Masaki, Yuka Ishii, Naobumi Michishita, Hisashi Morishita, and Hideki Hada. Bistatic RCS Reduction Characteristics of Flat and Curved Metasurfaces // 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). – DOI: 10.1109/ISANP.2017.8228991.

5. Mohammed Kalaagi, Divitha Seetharamdoo. Eleven Channel Retrodirective Metasurface Based on the Combination of the Generalized Phase Law and Impedance Modulation// 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) – INSPEC Accession Number: 18775425.

6. A. I. Semenikhin, D.V. Semenikhina, Y.V. Yukhanov, A.V. Klimov. RCS Reduction Using Nonabsorptive Binary Structures with Anisotropic Impedance Metasurface// 2016 17th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics – DOI: 10.1109/ANTEM.2016.755012.

7. Семенихин А.И., Еременко П.А. Широкополосный метаполяризатор с однослойной экранированной подложкой и анизотропной импедансной метаповерхностью // COLLOQUIUM-JOURNAL, 2019 –выпуск 8-3(32) – С. 50-55.