

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФАЗОВОГО МАНИПУЛЯТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МЕТАМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПАРНЫХ ПЛАНАРНЫХ СПИРАЛЕЙ****А.Л. Самофалов¹, И.А. Фаняев¹, П.В. Сомов¹,
И.В. Семченко², А.А. Ковалев¹, Хуэй Чу³**¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск³Нанкинский университет науки и технологии**DESIGNING A PHASE MANIPULATOR USING METAMATERIALS
BASED ON PAIRED PLANAR SPIRALS****A.L. Samofalov¹, I.A. Faniayeu¹, P.V. Somov¹,
I.V. Semchenko², A.A. Kovalev¹, Hui Chu³**¹Francisk Skorina Gomel State University²SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", Minsk³Nanjing University of Science and Technology

Аннотация. Проведено моделирование метаматериала, состоящего из парных планарных спиралей, для фазовой манипуляции электромагнитных волн в СВЧ диапазоне. Получены геометрические параметры метаматериала и значения фазы на резонаторах, оптимальные для управления диаграммой направленности. Изменение фазы волны, излучаемой планарным спиральным элементом, предложено реализовать путем изменения емкости варикапа при изменении напряжения на нем.

Ключевые слова: метаматериал, фазоманипулятор, парная планарная спираль, СВЧ диапазон.

Для цитирования: Проектирование фазового манипулятора с использованием метаматериалов на основе парных планарных спиралей / А.Л. Самофалов, И.А. Фаняев, П.В. Сомов, И.В. Семченко, А.А. Ковалев, Хуэй Чу // Проблемы физики, математики и техники. – 2024. – № 3 (60). – С. 32–37. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2024_3_60_32. – EDN: AZMISC

Abstract. A metamaterial consisting of paired planar spirals has been simulated for phase manipulation of electromagnetic waves in the microwave range. The optimal geometric parameters of the metamaterial and the phase values at the resonators were obtained to control the radiation pattern. It was proposed to realize the phase change of the wave emitted by a planar spiral element by changing the capacitance of the varicap when the voltage on it changes.

Keywords: metamaterial, phase manipulator, paired planar spiral, microwave range.

For citation: Designing a phase manipulator using metamaterials based on paired planar spirals / A.L. Samofalov, I.A. Faniayeu, P.V. Somov, I.V. Semchenko, A.A. Kovalev, Hui Chu // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2024. – № 3 (60). – P. 32–37. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2024_3_60_32 (in Russian). – EDN: AZMISC

Введение

В последние годы большое внимание уделяется метаповерхностям и метаматериалам [1], в том числе настраиваемым, режимами работы которых можно динамически управлять. Одним из способов динамического управления является цифровое кодирование [2]–[5]. Данный способ получил быстрое развитие и был предложен для цифрового управления электромагнитными волнами путем проектирования двух различных кодирующих элементов с противоположными фазами отраженных волн (например, 0° и 180°) в качестве цифровых битов «0» и «1» (двоичный регистр) [2]. Метаповерхности цифрового кодирования значительно упрощают процедуры проектирования и оптимизации функциональных режимов. Располагая кодирующие элементы на двумерной плоскости с заранее разработанными

последовательностями, полученные метаповерхности можно использовать для управления электромагнитными волнами простым и эффективным способом. При этом диапазон применения метаповерхностей кодирования не ограничивается микроволновыми частотами, он также может быть расширен до терагерцового диапазона [5].

В частности, в работе [6] путем включения активных компонентов в каждую элементарную ячейку метаповерхности была успешно достигнута электронная настройка фундаментальных свойств электромагнитной волны, например, регулируемого поглощения. Настройка фазы отраженной волны в пределах 360° описана в работе [7], отдельная регулировка амплитуды и фазы предложены в статье [8], манипуляции с поляризацией описаны в работе [9].

В статье [10] показаны динамические многофункциональные свойства метаповерхности с цифровым управлением с относительно большим размером апертуры (>20 длин волн). Предлагаемая метаповерхность строится путем соединения 5 идентичных субметаповерхностей, каждая из которых состоит из 320 активных элементарных ячеек. Путем интеграции одного PIN-диода в каждую элементарную ячейку реализуется реконфигурируемая фаза для волны одной поляризации. Используя это анизотропное свойство, в первую очередь можно реализовать реконфигурируемое преобразование поляризации. Различные функции, включая гибкое рассеяние, планарную фокусировку, управление лучом, а также формирование луча, также продемонстрированы при программировании матрицы кодирования с помощью генетического алгоритма и метода обратного преобразования Фурье. Более того, переключение между этими функциями в реальном времени достигается за счет использования программируемой пользователем матрицы. По сравнению с другими работами, в которых обычно внимание сфокусировано только на одном режиме управления, каждой элементарной ячейкой в предлагаемой метаповерхности можно управлять независимо, и, таким образом, можно добиться более универсальных функций.

В работе [11] многофункциональная реконфигурируемая передающая матрица была реализована путем периодической организации реконструкции частотных характеристик элементарной ячейки с использованием 1-битных атрибутов переключателя ВКЛ/ВЫКЛ PIN-диода. В данной работе показано, что реконфигурируемая передающая решетка, основанная на активных элементах, управляемых электромагнитным полем, может быть реализована двумя способами. Первый заключается в переключении поляризации волны с вертикальной на вертикальную или с вертикальной на горизонтальную путем управления направлением электрического тока

посредством создания периодической конфигурации элементарной ячейки с частотно-селективной характеристикой активного элемента [12]. Возможно также создание диаграммы направленности луча с высоким коэффициентом усиления и управление лучом с помощью изменения длины пути индуцированного тока с использованием переменного конденсатора [13], [14]. Второй метод состоит в концентрации падающей электромагнитной волны на участок, расположенный в периодической структуре, и делает возможной функцию управления лучем и преобразование поляризации за счет управления фазой и направлением электрического тока [15].

В данной работе предлагается метаматериал, состоящий из парных планарных спиралей, предназначенный для фазовой манипуляции электромагнитных волн в СВЧ диапазоне с функцией управления главным лепестком диаграммы направленности за счет использования в каждом излучающем элементе активного компонента – варикапа. Разработанный метаматериал способен динамически изменять направление основного луча без механического перемещения метаматериала и может быть использован в качестве «смарт-рефлектора».

1 Теория и моделирование

Предложена конструкция фазоманипулятора, состоящего из парных планарных спиральных элементов (рисунок 1.1). Каждый элемент можно характеризовать как пару планарных спиралей, при этом одна спираль в паре имеет правое направление закручивания, а вторая спираль – левое направление закручивания. Металлические полоски, из которых состоит планарная спираль, расположены на разных поверхностях печатной платы и соединены металлизированным отверстием в плате. Кроме пары планарных спиралей, каждый элемент метаповерхности содержит также варикап.

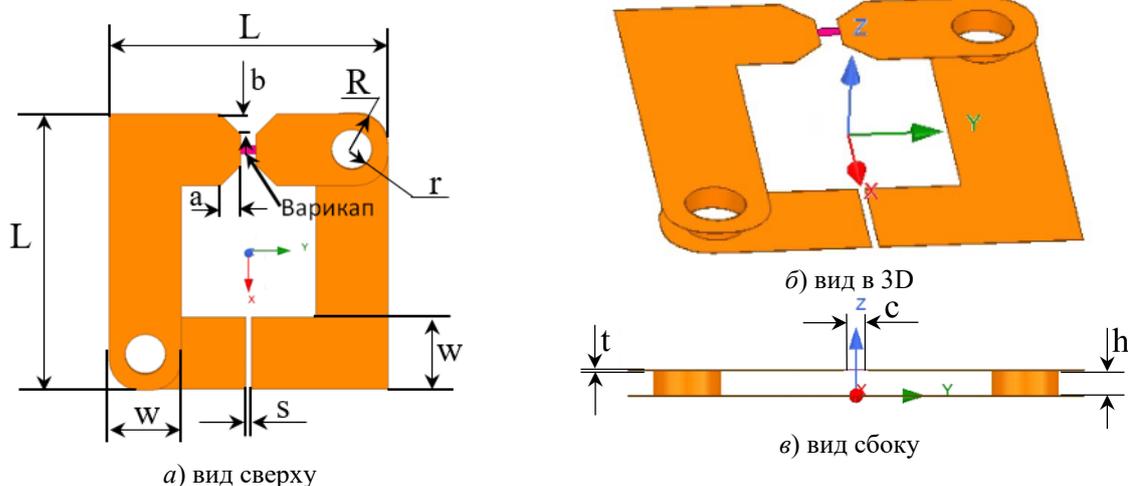


Рисунок 1.1 – Парная планарная спираль как элемент фазоманипулятора

Численные значения параметров парной планарной спирали (рисунок 1.1) приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Численные значения параметров парной планарной спирали

Параметр	L	w	s	a	b	c	r	R	t	h
Значение в мм	27	7	0,5	2	2	1,5	2	3,5	0,035	1,5

Возбуждение колебаний в таком элементе осуществляется за счет энергии падающей электромагнитной волны. Изменение фазы волны, излучаемой парным планарным спиральным элементом, осуществляется путем изменения емкости варикапа при изменении напряжения на нем. Как известно, варикап – это полупроводниковый диод, используемый в качестве переменной емкости с достаточно высокой добротностью.

В варикапе используется свойство $p-n$ перехода изменять барьерную ёмкость под действием внешнего обратного напряжения, при этом зависимость ёмкости варикапа от запирающего напряжения (вольтфарадная характеристика) носит нелинейный характер.

В работе проведено численное моделирование параметров одиночного элемента фазоманипулятора и найдена частотная зависимость фазы и относительной амплитуды электромагнитной волны, излучаемой таким резонатором при различных значениях электроемкости варикапа в пределах 0,2–2,2 пФ с шагом 0,01 пФ (рисунки 1.2 и 1.3).

На рисунках 1.2 и 1.3 численные значения фазы и относительной амплитуды излучаемой волны при различной емкости варикапа указаны для частоты 3,14 ГГц. Как видно из графиков на рисунке 1.2, именно вблизи частоты 3,14 ГГц имеет место наиболее широкий диапазон фазовых изменений для исследуемой структуры, чем и обусловлен выбор данной частоты.

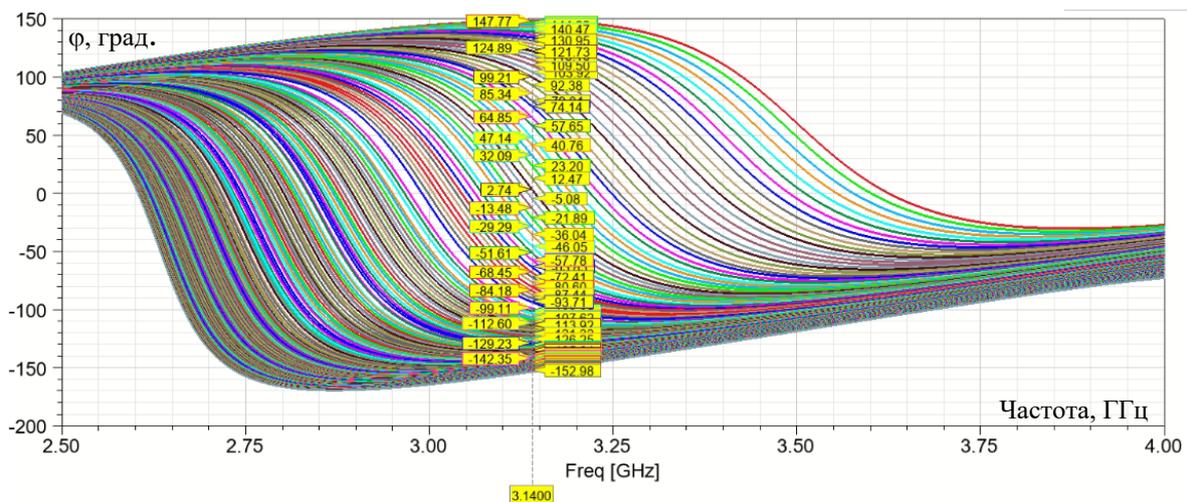


Рисунок 1.2 – Частотная зависимость фазы электромагнитной волны, излучаемой резонатором, при различных значениях электроемкости варикапа

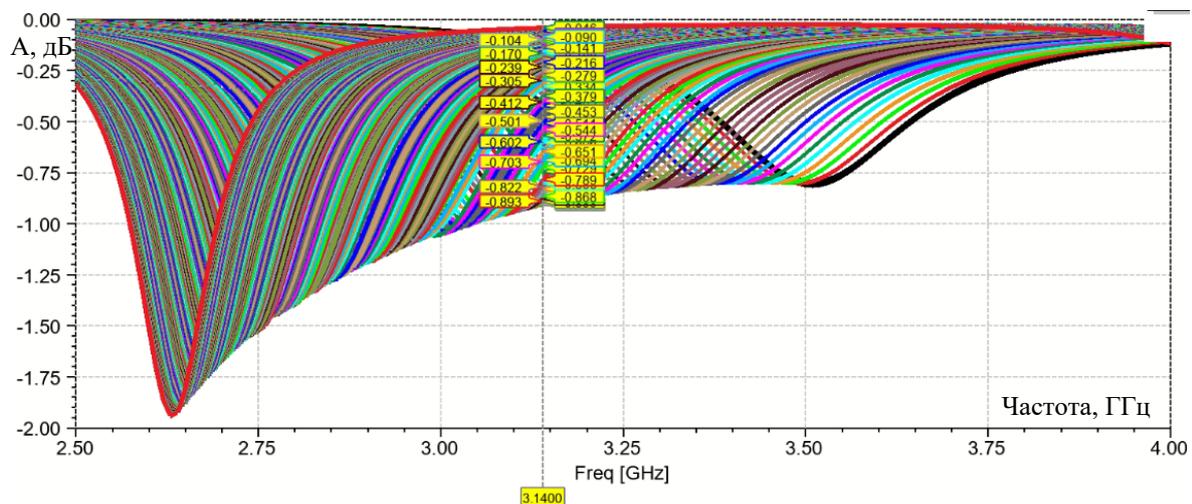


Рисунок 1.3 – Частотная зависимость относительной амплитуды электромагнитной волны, излучаемой резонатором, при различных значениях электроемкости варикапа

На рисунке 1.3 приведены резонансные кривые, анализ которых показывает, что относительные потери сигнала на частоте 3,14 ГГц незначительны и составляют менее 1 дБ, на частоте 2,63 ГГц потери сигнала составляют около 2 дБ, а в области 4 ГГц потери сигнала отсутствуют.

В данной работе исследуется случай нормального падения электромагнитной волны СВЧ диапазона на метаповерхность, в этом случае все элементы метаповерхности возбуждаются в одинаковой фазе. Для формирования волнового фронта волны, излучаемой метаповерхностью под определенным углом θ , необходимо на соседних элементах установить разность хода волны или смещение по фазе. На рисунке 1.4 показан принцип формирования такого наклонного излучения.

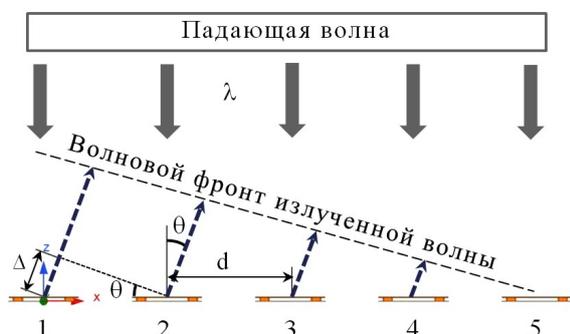


Рисунок 1.4 – Принцип формирования метаповерхностью наклонного излучения

Для формирования волны, излученной под углом θ относительно нормали метаматериала, необходимо задать разность хода волн Δ между соседними резонаторами:

$$\Delta = d \sin \theta,$$

где d – расстояние между резонаторами.

Разность фаз волн для соседних резонаторов можно выразить через эту величину как

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta, \text{ тогда}$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta, \quad (1.1)$$

отсюда

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda \Delta\varphi}{2\pi d}\right) = \arcsin\left(\frac{c \Delta\varphi}{2\pi v d}\right), \quad (1.2)$$

где c – скорость света в вакууме, v – частота.

Теоретические значения угла θ для нескольких значений разности фаз между элементами $\Delta\varphi$ (при $d = 30$ мм и $v = 3,14$ ГГц) приведены в таблице 1.2.

Чтобы задать необходимую разность фаз излучаемых волн для соседних элементов, необходимо из графиков на рисунке 1.2 выбрать кривую и определить соответствующее этой кривой значение емкости варикапа. Затем это значение емкости задаем первому элементу (рисунок 1.4)

или первому ряду метаматериала (рисунок 2.1). Далее выбираем другую кривую, значение фазы волны для которой на частоте 3,14 ГГц отличается от фазы для предыдущей кривой на $\Delta\varphi$. Значение емкости, соответствующее второй кривой, задаем второму элементу или ряду метаматериала и т. д. Таким образом, мы задаем одинаковую разность фаз излучаемых волн для соседних элементов (рядов), что обеспечивает формирование наклонного излучения под заданным углом θ .

Таблица 1.2 – Значение угла θ для различных значений разности фаз $\Delta\varphi$ (при $d = 30$ мм и $v = 3,14$ ГГц)

$\Delta\varphi$, град	30	45	60	70
θ , град	15,4	23,5	32	38,3

2 Результаты и их обсуждение

Для проверки приведенных выше рассуждений смоделирован метаматериал фазоманипулятора, состоящий из 25 парных планарных спиральных резонаторов (рисунок 2.1). Метаматериал смоделирован на основе двустороннего стеклотекстолита FR4 с толщиной ядра 1,5 мм и медными слоями толщиной 35 мкм. В качестве экрана за метаматериалом вплотную расположен односторонний стеклотекстолит FR4 с такой же толщиной ядра и медного слоя.

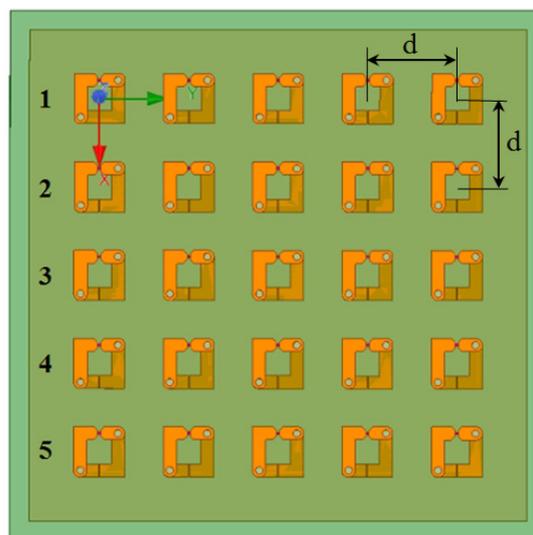


Рисунок 2.1 – Метаматериал, состоящий из 25 парных планарных спиральных резонаторов

Задавая значение электроемкости варикапов C в первом ряду (поскольку в каждом ряду C одинаково), а затем в следующем ряду – в соответствии с требуемой разностью фаз (как это описано выше), можно добиться управления наклоном главного лепестка диаграммы направленности метаматериала в плоскости XOZ .

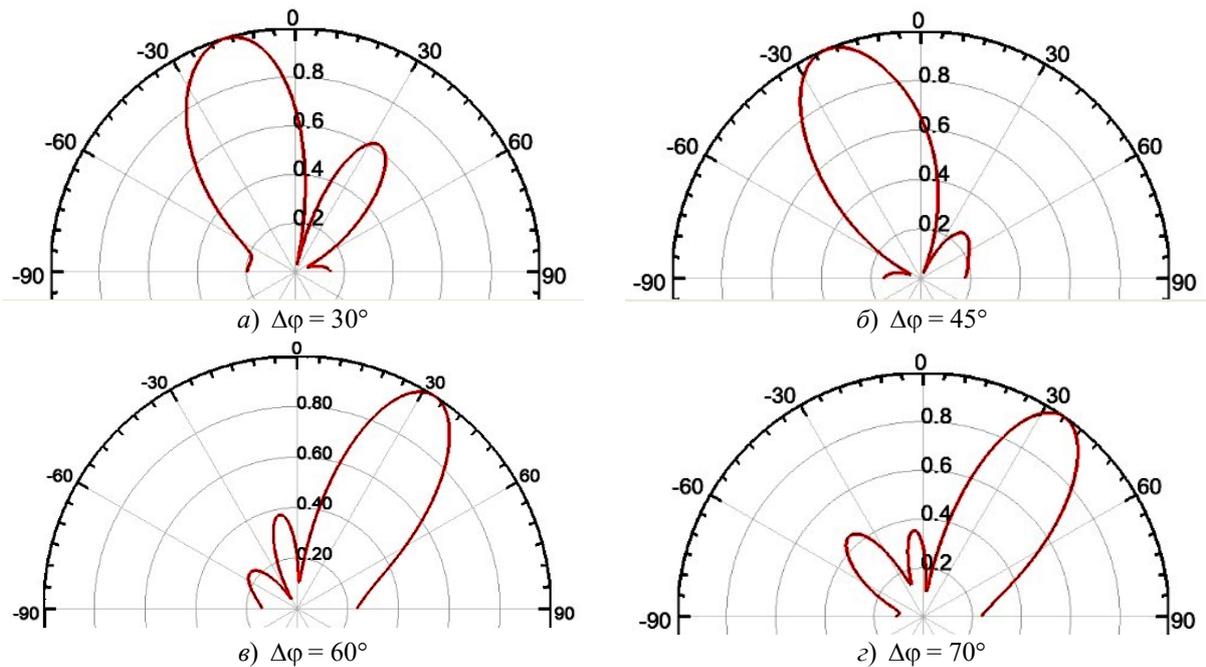


Рисунок 2.2 – Примеры формирования угла наклона главного лепестка диаграммы направленности при различных значениях разности фаз волн для соседних рядов метаматериала

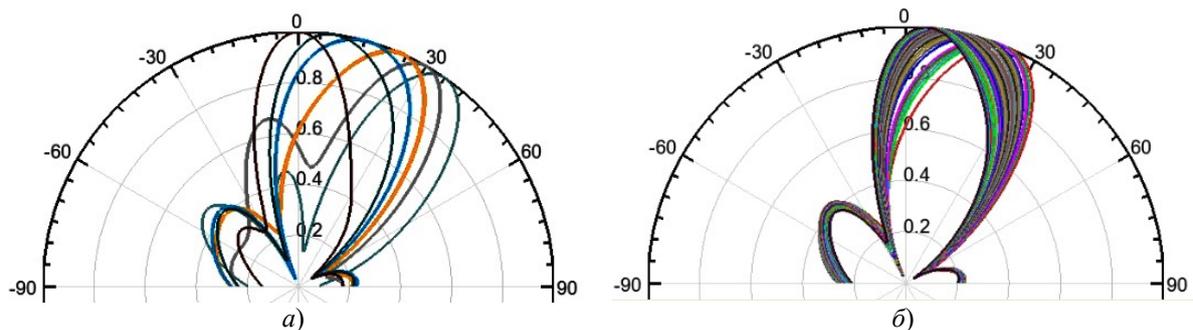


Рисунок 2.3 – Примеры управления наклоном главного лепестка диаграммы направленности в полярных координатах (при $d = 31$ мм)

На рисунке 2.2 приведены примеры формирования угла наклона главного лепестка диаграммы направленности при различных значениях разности фаз волн для соседних элементов (при $d = 30$ мм и $\nu = 3,14$ ГГц) (в соответствии с таблицей 1.2).

На рисунке 2.2 продемонстрирована возможность управления главным лепестком диаграммы направленности как влево (рисунки 2.2 а, 2.2 б), так и вправо (рисунки 2.2 в, 2.2 з). Направление поворота лепестка зависит от порядка задания емкости варикапов по рядам (по возрастанию или по убыванию емкости). Отметим, что значение угла наклона главного лепестка на рисунке б не всегда в точности соответствует теоретическому значению (таблица 1.2), что связано в первую очередь с невозможностью из графиков на рисунке 1.2 выделить кривые, разность фаз волн для которых в точности соответствует выбранному значению. В этом случае выбирается кривая со значением фазы волны, наиболее близким к необходимому.

Исследован и другой способ управления диаграммой направленности: задав значение емкости варикапов C в первом ряду (в каждом ряду она одинакова, емкость в следующем ряду задается путем умножения номера ряда на C) и изменяя емкость варикапа с шагом $0,01$ пФ, можно управлять поворотом главного лепестка диаграммы направленности с шагом 5° (рисунке 2.3 а) при определенных значениях d . Для плавного качания луча с малым углом отклонения емкость изменялась с шагом $0,001$ пФ (рисунке 2.3 б).

При определенных значениях расстояния между резонаторами и емкости варикапа C можно получить двух- и трехлучевую диаграмму направленности (рисунке 2.4).

Результаты моделирования (рисунки 2.2–2.4) демонстрируют широкие возможности по управлению диаграммой направленности путем изменения емкости варикапов при изменении напряжения на них. На практике подача напряжения на соответствующие варикапы и управление ими

могут быть реализованы с использованием микросхем ПЛИС (программируемые логические интегральные схемы) в связке с микросхемами цифро-аналоговых преобразователей или цифровыми потенциометрами, что вместе с микропрограммой в ПЛИС осуществляет изменение емкости варикапа. Такая реализация может обеспечить плавное и непрерывное качание лепестка диаграммы направленности.

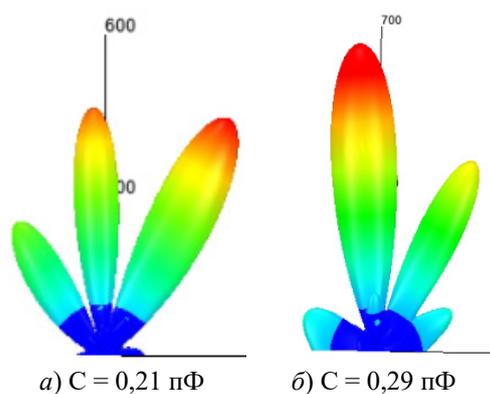


Рисунок 2.4 – Примеры реализации многолучевой диаграммы направленности в трехмерном виде при $d = 47,7$ мм, что соответствует половине длины волны падающего излучения на частоте 3,14 ГГц

Заключение

Проведено исследование возможности фазовой манипуляции электромагнитных волн при их взаимодействии с метаповерхностью на основе парных планарных спиралей. Предложено устройство для управления фазой волны путем изменения емкости варикапа при изменении напряжения на нем.

Разработанный метаматериал, за счет фазовых манипуляций с падающей волной, позволяет в режиме реального времени быстро изменять направление основного отраженного луча без механического перемещения метаматериала. Фазовый манипулятор за счет динамического управления варикапами создаёт возможность формирования различных диаграмм направленности в зависимости от текущих задач. Он может быть полезен для использования в таких областях техники, как радиолокация, спутниковая связь, беспроводные сети и др.

Планируется изготовление экспериментальных образцов метаматериалов, состоящих из парных планарных спиральных фазоманипулирующих элементов, для микроволнового диапазона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семченко, И.В. Электромагнитные волны в метаматериалах и спиральных структурах: монография / И.В. Семченко, С.А. Хахомов. – Минск: Беларуская навука, 2019. – 279 с.

2. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials / T.J. Cui [et al.] // Light Sci. Appl. – 2014. – Vol. 3. – P. 218.

3. Broadband diffusion of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces / L.H. Gao [et al.] // Light Sci. Appl. – 2015. – Vol. 4. – P. 324.

4. Frequency-dependent dual-functional coding metasurfaces at terahertz frequencies / S. Liu [et al.] // Adv. Opt. Mater. – 2016. – Vol. 4. – P. 1965–1973.

5. An ultra-thin broadband active frequency selective surface absorber for ultrahigh-frequency applications / W. Xu [et al.] // J. Appl. Phys. – 2015. – Vol. 118. – P. 1849031–1849038.

6. Zhu, B. Active impedance metasurface with full 360 deg reflection phase tuning / B. Zhu, J. Zhao, Y. Feng // Sci. Rep. – 2013. – Vol. 3. – P. 3059.

7. Dynamic control of electromagnetic wave propagation with the equivalent principle inspired tunable metasurface / B. Zhu [et al.] // Sci. Rep. – 2014. – Vol. 4. – P. 4971.

8. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission / A. Arbabi [et al.] // Nature Nanotechnology. – 2015. – Vol. 10. – P. 937–943.

9. A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control / Y. Huanhuan [et al.] // Scientific Reports. – 2016. – Vol. 6. – P. 35692.

10. Lee, I.G. Design of multi-functional transmitarray with active linear polarization conversion and beam steering capabilities / I.G. Lee, J.Y. Kim, I.P. Hong // Appl. Sci. – 2022. – Vol. 12. – P. 4319.

11. Li, Y. A wideband multifunctional multilayer switchable linear polarization metasurface / Y. Li, Q. Cao, Y. Wang // IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett. – 2018. – Vol. 17. – P. 1314–1318.

12. Reconfigurable metasurface for multifunctional control of electromagnetic waves / C. Huang [et al.] // Adv. Opt. Mater. – 2017. – Vol. 5. – P. 1700485.

13. Dual-band transmitarray with low scan loss for satcom applications / T.K. Pham [et al.] // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2021. – Vol. 69. – P. 1775–1780.

14. Circularly-polarized reconfigurable transmitarray in Ka-band with beam scanning and polarization switching capabilities / L. Di Palma [et al.] // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2017. – Vol. 65. – P. 529–540.

15. Using reconfigurable transmitarray to achieve beam-steering and polarization manipulation applications / C. Huang [et al.] // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2015. – Vol. 63. – P. 4801–4810.

Работа выполнена в рамках реализации проектов БРФФИ Ф22КИТГ-021 и Ф23КИ-027.

Поступила в редакцию 17.05.2024.

Информация об авторах

Самофалов Андрей Леонидович – к.ф.-м.н., доцент

Фаняев Иван Александрович – к.т.н., доцент

Сомов Павел Владиславович – ассистент

Семченко Игорь Валентинович – д.ф.-м.н., профессор, чл.-корр. НАН Беларуси

Ковалёв Андрей Александрович – старший преподаватель

Хуэй Чу – доктор инженерии, профессор