

Активная 5×5-элементная метаповерхность с функцией управления фазой для приложений в Ka-диапазоне частот

И. А. Фаняев¹, А. А. Тимошенко¹, А. Л. Самофалов¹,
С. А. Хахомов¹, И. В. Семченко²

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, г. Гомель, Республика Беларусь,

²Государственное научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», г. Минск, Республика Беларусь,

samofalov@gsu.by, semchenko@oelt.basnet.by

Аннотация. Проведено численное моделирование метаповерхности с функцией управления фазой прошедших электромагнитных волн в Ka-диапазоне. Исследование включало анализ метаповерхности на основе варикапов с размерностью 5×5 элементов. Полученные результаты подтверждают перспективность интегрирования представленной метаповерхности в антенны В5G/6G для динамического управления диаграммой направленности, однако требуют дополнительной оптимизации для практического применения.

I. Введение

В условиях стремительного развития беспроводных технологий нового поколения, таких как В5G и 6G [1], возрастают требования к антенным системам по параметрам направленности [2], эффективности использования спектра, миниатюризации и гибкости управления характеристиками излучения [3]. Одним из перспективных решений, отвечающих этим требованиям, является интеграция в антенны метаповерхностей – искусственно структурированных материалов, способных управлять электромагнитными волнами с высокой точностью. Особенно важную роль в этом контексте играют метаповерхности [4], обладающие функциями управления фазой [5], амплитудой [6] и поляризацией излучения [7], что позволяет реализовать динамическую адаптацию диаграммы направленности и эффективное формирование луча без механических перемещений.

Данная работа направлена на разработку и численное исследование метаповерхности с функцией управления фазой прошедшей электромагнитной волны в Ka-диапазоне. Подобная метаповерхность предназначена для динамической манипуляции диаграммой направленности (ДН) за счет использования в каждом излучающем элементе активного компонента, такого как варикап, с последующим включением её в состав антенной системы перспективных стандартов связи В5G.

II. Численное исследование метаповерхности

Перестраиваемая метаповерхность основана на использовании активных микрорезонаторов [3] для фазового управления прошедшей волны с размерностью 5×5 элементов. На рис. 1 приведена конструкция микрорезонатора и метаповерхности с линейными размерами $dx=50$ мм, периодом $p=7,2$ мм. Предлагаемая конструкция активного микрорезонатора состоит из проводящей площадки и замкнутого прямоугольного контура, в зазоре между которыми подключен варикап (рис. 1, а). Также в конструкции имеется сосредоточенная индуктивность (1 нГн), которая подключена к внешнему контуру и небольшой контактной площадке. Возбуждение колебаний в таком элементе осуществляется за счет энергии электромагнитной волны при её нормальном падении. Предлагаемая структура вследствие использования варикапа позволяет путём изменения напряжения на нем менять электрическую емкость, и как следствие – реактивное сопротивление. Сосредоточенная индуктивность позволяет увеличить общую индуктивность структуры ввиду ее малых линейных размеров. Это дает возможность изменять фазу прошедшей электромагнитной волны в некоторых пределах. Численные значения геометрических параметров микрорезонатора: $L=5$ мм, $w=1,2$ мм, $g=0,8$ мм, $s=0,5$ мм. Толщина медного слоя $t=17$ мкм, диэлектрическая подложка Rogers 5880 толщиной $h=0,254$ мм с диэлектрической проницаемостью 2,2 и тангенсом угла потерь 0,0009.

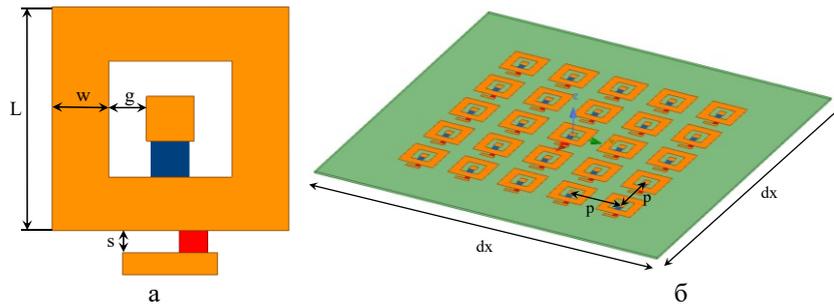


Рис. 1. Конструкция (а) микрорезонатора и (б) метаповерхности с варикапами размерностью 5x5 элементов

Проведено численное моделирование метаповерхности и построены нормированные диаграммы направленности при различных значениях электрической емкости варикапа на каждом микрорезонаторе (рис. 2 и 3).

На рис. 2а представлены нормированные диаграммы направленности в двух главных плоскостях, сформированные метаповерхностью от линейно поляризованной вдоль оси X падающей волны при одинаковой емкости всех варикапов (0,5 пФ). Исследования проводились на центральной частоте 26 ГГц.

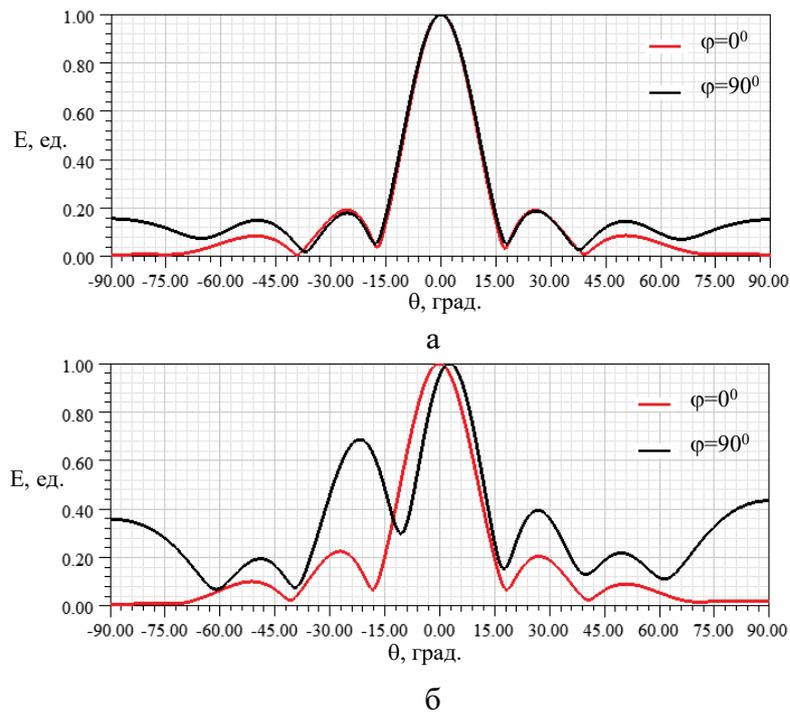


Рис. 2. Нормированные диаграммы направленности при различных значениях электроемкости варикапов

На рис. 2б показаны ДН в главных плоскостях, которые сформированы за счет задания разных значений электроемкости варикапов (от 0,15 до 0,5 пФ) в каждом ряду для формирования фазового фронта с отклонением от нормали. Как видно из рис. 2а, сформированный метаповерхностью луч достаточно широкий – порядка 18 градусов. Благодаря изменению электроемкости варикапов удастся сформировать фазовый фронт, который отклоняет луч на 4 градуса (рис. 2б).

На рис. 3 приведены ненормированные ДН в сферической системе координат при разных значениях емкости варикапов.

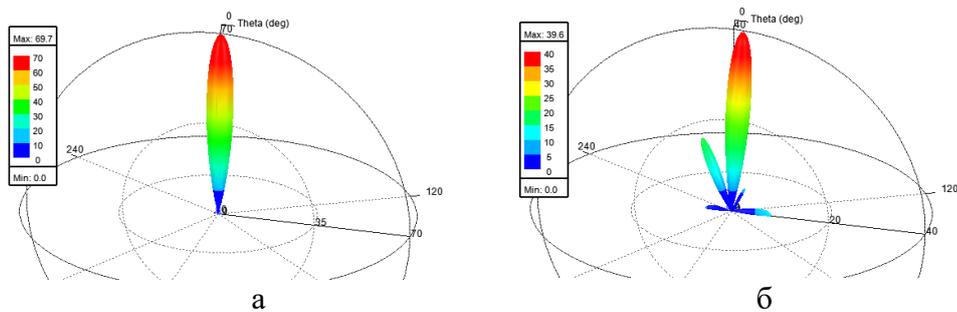


Рис. 3. Ненормированные диаграммы направленности в сферической системе координат (а) без и (б) с наклоном фазового фронта

Анализируя полученные ДН, можно увидеть, что при сформированном активными микрорезонаторами наклоне фазового фронта появляются боковые лепестки и значительно снижается коэффициент направленности.

III. Заключение

В ходе проведённой работы было выполнено численное моделирование конструкции метаповерхности, предназначенной для управления фазой прошедших электромагнитных волн в Ка диапазоне частот. Исследование проводилось для метаповерхности размерностью 5×5 элементов на основе варикапов и сосредоточенных индуктивностей. Установлено, что за счёт изменения емкости варикапов возможно отклонение ДН шириной 18° на угол до 4° , однако такая конфигурация сопровождается выраженными боковыми лепестками, что снижает направленность и эффективность излучения.

В целом, полученные результаты подтверждают высокую перспективность использования активных метаповерхностей для динамического управления фазовым фронтом в антеннах нового поколения. Однако для практической реализации требуется дальнейшая оптимизация конструкции и схемы управления.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта БРФФИ №Ф24КИТГ-005.

Литература

- [1] M. Selvaraj, V. Ramya, A. Rajesh "Reflective metasurface for 5G & beyond Wireless communications." *Scientific Reports*, V.15(1), 2025, pp. 126.
- [2] A.H. Naqvi, et al. "1-bit transmission-type digital programmable coding metasurface with multi-functional beam-shaping capability for ka-band applications." *Micromachines*, V.14(6), 2023, pp. 1250.
- [3] A.H. Naqvi Naqvi, L. Sungjoon "Low-profile electronic beam-scanning metasurface antenna for Ka-band applications." *Waves in Random and Complex Media*, 2023, pp. 1-16.
- [4] Y. Song, et al. "The Design of Chiral Metamaterials and Metasurfaces." Elsevier, 2025. – 268 p.
- [5] S. Verho, C. Jae-Young "Design of a compact and minimalistic intermediate phase shifting feed network for Ka-band electrical beam steering." *Sensors*, V.24(4), 2024, pp. 1235.
- [6] M.K. Emara, et al. "Dynamic metasurface reflectors based on coupled resonators for simultaneous magnitude and phase control." *IEEE Access*, V.11, 2023, pp. 129552-129565.
- [7] Y. Ge, L. Chengxiu, L. Yujie "Broadband folded transmitarray antenna based on an ultrathin transmission polarizer." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, V.66(11), 2018, pp. 5974-5981.