

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ЛІНЗИ ДЛЯ АНТЕННИХ СИСТЕМ СВЧ-ДІАПАЗОНУ

П. Ю. Лозовик¹, В. Б. Долгошей²

¹ Навчально-науковий Фізико-технічний інститут

Анотація

В даній роботі розглянуто основні принципи роботи діелектричних лінз для антенних систем СВЧ-діапазону. Пояснена основна фізика їх роботи. Розглянуті основні варіанти їх виконання та варіанти реалізації за допомогою FMD-друку. Продемонстрований змодельований прототип лінзи для частоти 4 ГГц.

Ключові слова: СВЧ-діапазон, діелектрична проникність, тангенс втрат, коефіцієнт підсилення, FMD-друк

Вступ

Діаграма спрямованості та підсилення є одними з найважливіших характеристик антен, на ряду з КСХ та опором антени. Проте не завжди можна досягнути бажаних характеристик підсилення та діаграми спрямованості лише геометрією чи типом антени. В таких випадках доцільно використовувати антенні лінзи (лінзи Люнберга). Їх можна виконувати за допомогою FMD-друку, за для зниження ваги та розмір, а також друк на принтері гарантує повторюваність даних виробів.

1. Фізичне пояснення роботи діелектричної лінзи

Основою роботи діелектричних лінз є поведінка хвилі в різних середовищах. Основна закономірність цього процесу визначається властивостями середовища, його діелектричною проникністю. Швидкість поширення хвилі в діелектрику визначається співвідношенням:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Відповідно до цього змінюється і довжина хвилі:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Хвильове число відповідає рівнянню:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_r}$$

Одним із головних аспектів роботи лінзи є фазовий зсув при проходженні хвилі крізь діелектричне середовище з товщиною d :

$$\varphi = kd = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_r} d$$

Зміна товщини шару або діелектричної сталої змінює фазовий зсув, керування фазовим зсувом лежить в

основі принципу роботи діелектричної лінзи [1]. При переході між двома середовищами виконується закон Сінеліуса, який визначає зміну напрямку хвилі, цей ефект використовують для колімації. Профіль лінзи визначається рівнянням:

$$\epsilon_r(r) = 2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2$$

2. Варіанти виконання діелектричних лінз FMD-друком

Конструкція діелектричної лінзи визначається способом формування фазового розподілу електромагнітної хвилі. Основною задачею є забезпечення однакової оптичної довжини шляху для всіх променів, що проходять через лінзу. Залежно від способу реалізації цієї умови розрізняють декілька основних типів діелектричних лінз.

2.1. Градієнтні лінзи (GRIN)

Градієнтні лінзи характеризуються неперервною зміною діелектричної проникності в просторі:

$$\epsilon_r = \epsilon_r(r)$$

У таких структурах фазова корекція здійснюється не за рахунок геометрії, а через зміну швидкості поширення хвилі:

$$v(r) = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r(r)}}$$

Класичним прикладом є лінза Люнберга:

$$\epsilon_r(r) = 2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2$$

Вона забезпечує фокусування плоскої хвилі у точку на поверхні лінзи. Градієнтні лінзи мають високу ефективність, однак їх реалізація є складною.

2.2. Гомогенні лінзи змінної геометрії

У гомогенних лінзах діелектрична проникність є сталою:

$$\varepsilon_r = \text{const}$$

Фазова компенсація досягається за рахунок зміни геометричної товщини:

$$\varphi(r) = kd(r)$$

Такі лінзи прості у виготовленні, однак мають більші фазові похибки, особливо на краях апертури.

2.3. Дискретні лінзи

Практична реалізація градієнтних лінз часто здійснюється шляхом дискретизації середовища. Лінза складається з набору концентричних шарів з різною діелектричною проникністю:

$$\varepsilon_r(r) \approx \varepsilon_i, \quad r \in [r_i, r_{i+1}]$$

Чим більша кількість шарів, тим точніше відтворюється ідеальний розподіл. Така апроксимація дозволяє реалізувати складні профілі проникності з використанням обмеженої кількості матеріалів [2]. [3].

2.4. Коміркові діелектричні структури

Один із підходів до реалізації діелектричних лінз базується на використанні штучних структур з керованими ефективними параметрами. У цьому випадку ефективна діелектрична проникність визначається як:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = f\varepsilon_{\text{material}} + (1 - f)\varepsilon_{\text{air}}$$

де f — коефіцієнт заповнення.

Зміна геометрії комірок дозволяє отримати необхідний розподіл $\varepsilon_{\text{eff}}(r)$ без зміни матеріалу. Такий підхід широко використовується в адитивних технологіях.

2.5. Лінзи на основі фазокоригуючих поверхонь

Окрему групу становлять структури, в яких фазовий зсув досягається за рахунок геометричних елементів, а не зміни матеріалу. У цьому випадку фазовий зсув можна записати як:

$$\varphi = kd_{\text{eff}}$$

де d_{eff} — ефективна довжина шляху, що залежить від геометрії елементів.

Такі структури є проміжними між класичними діелектричними лінзами та метаповерхнями [4].

3. Матеріали які підходять для реалізації

Одним із ключових етапів проектування діелектричних лінз для СВЧ-діапазону є вибір матеріалу та технології виготовлення. Основними параметрами

матеріалу, що впливають на електромагнітні характеристики лінзи, є відносна діелектрична проникність ε_r та тангенс кута діелектричних втрат $\tan \delta$.

Для виготовлення лінз із використанням технології FDM-друку зазвичай застосовуються полімерні матеріали, такі як PLA, ABS, PETG або PP. Вони характеризуються відносною діелектричною проникністю в діапазоні:

$$\varepsilon_r \approx 2 \div 3$$

та характеризуються відносно низькими втратами у СВЧ-діапазоні.

Реальні діелектрики мають комплексну проникність:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

де дійсна частина ε' визначає фазові властивості, а уявна ε'' — втрати енергії. Тангенс кута втрат визначається як:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

Збільшення $\tan \delta$ призводить до зниження ефективності лінзи.

3.1. Ефективна діелектрична проникність

Особливістю адитивних технологій є можливість формування структури з керованою ефективною діелектричною проникністю. У випадку коміркових структур вона визначається як:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = f\varepsilon_{\text{material}} + (1 - f)\varepsilon_{\text{air}}$$

де f — коефіцієнт заповнення (infill). Таким чином, змінюючи щільність структури, можна отримати необхідний розподіл $\varepsilon_r(r)$ без зміни матеріалу [3].

3.2. Вплив параметрів FMD-друку на роботу лінзи

Параметри друку безпосередньо впливають на електромагнітні властивості лінзи. До основних параметрів належать: [3]

1. Коефіцієнт заповнення (infill). Збільшення заповнення призводить до зростання ε_{eff} , що впливає на фазовий зсув:

$$\varphi = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}} d$$

2. Товщина шару. Менша товщина шару забезпечує кращу однорідність структури та зменшує розсіювання хвилі.

3. Точність геометрії Похибки друку призводять до відхилення фазового розподілу від розрахункового:

$$\Delta\varphi \propto \Delta d$$

3.3. Особливості реалізації різних типів лінз

Для лінз із комірковою структурою важливим є мінімальний розмір елементів, який визначає ефективність середовища. Розмір комірки повинен бути значно меншим за довжину хвилі:

$$a \ll \lambda$$

Це забезпечує виконання умови ефективного середовища.

Для градієнтних лінз необхідно забезпечити плавну зміну параметрів:

$$\frac{d\varepsilon_r}{dr} \neq 0$$

що досягається шляхом варіювання заповнення або використання різних матеріалів.

4. Модель діелектричної лінзи для 4ГГц

Була прорахована модель діелектричної комірчасті лінзи для діапазону 4-5 ГГц. Лінза моделювалась для FDM-друку PLA філаментом з діелектричною проникністю $\varepsilon_r = 2.7$ та тангенсом втрат $\tan \delta = 0.015$.

На частоті 4 ГГц було отримано підсилення з лінзою 15.7 dBi, без використання лінзи 12.2 dBi.

З графіка видно що діаграма спрямованості звужеться з 40 до 25 градусів.

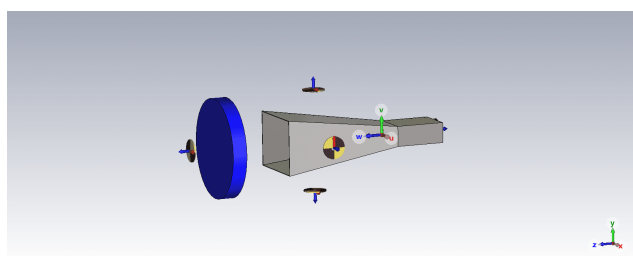


Рис. 1. Модель рупорної антени з лінзою

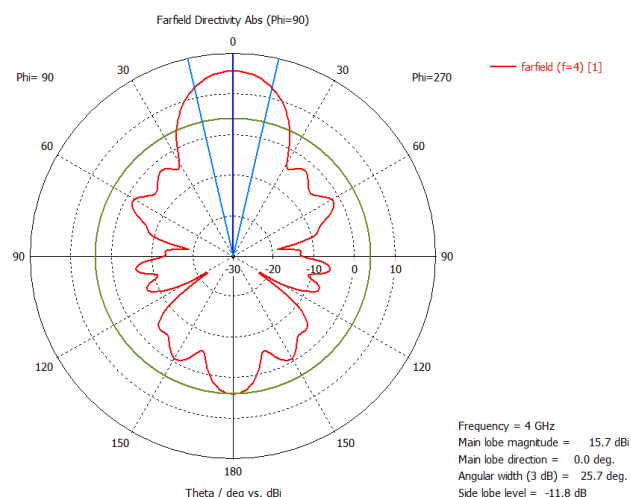
Висновки

В даній роботі було описано основний принцип роботи діелектричної лінзи для антен. Розглянуті різні варіанти їх виконання та обґрунтований вибір матеріалів для FMD-друку.

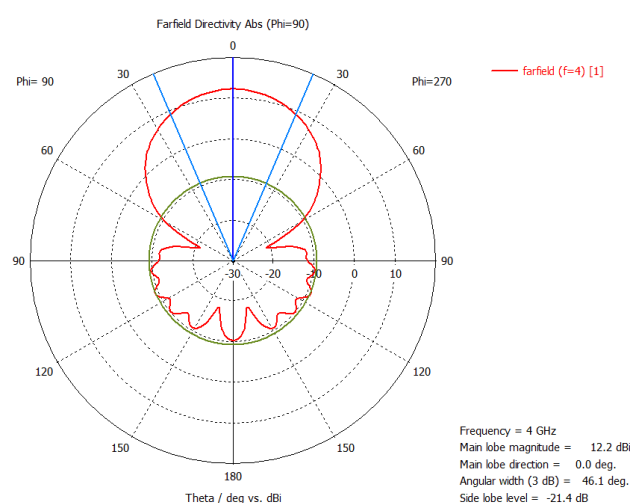
Також було продемонстровано модель комірчастої друкованої діелектричної лінзи для частоти 4 ГГц, змодельованої в середовищі CST Studio Suite. Продемонстровано її теоретичні характеристики.

Перелік використаних джерел

1. Dielectric Lens Antennas. — 2015. — URL: https://repositorio.iscte-iul.pt/bitstream/10071/11959/1/pre_print_Dielectric_Lens_Antennas_v2.pdf ; Preprint, ISCTE-IUL repository.



(a) Діаграма з лінзою



(б) Без лінзи

Рис. 2. Діаграми спрямованості

2. A Review of 3D Printed Gradient Refractive Index Lens Antennas // ResearchGate (preprint). — 2023. — URL: https://www.researchgate.net/publication/367417190_A_review_of_3D_printed_gradient_refractive_index_lens_antennas.
3. 3D-Printed Gradient Index Lens Antennas for Microwave Applications // Sensors. — 2023. — Т. 23, № 15. — С. 6961. — DOI: 10.3390/s23156961. — URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/15/6961>.
4. Creating a Luneburg Lens with a Variable Pitch 3D Printer // ResearchGate (preprint). — 2022. — URL: https://www.researchgate.net/publication/365110490_Creating_a_Luneburg_Lens_with_a_Variable_Pitch_3D_Printer.