

3D ДРУКОВАНА РУПОРНА АНТЕНА

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто особливості проєктування та моделювання 3D друкованої пірамідальної рупорної антени для роботи у сантиметровому діапазоні хвиль. Проведено електродинамічне моделювання антени та визначено її основні характеристики, зокрема коефіцієнт підсилення, коефіцієнт відбиття та діаграму спрямованості. Отримані результати підтвердили перспективність використання технологій 3D друку для швидкого та економічно ефективного виготовлення сучасних антенних систем.

Ключові слова: рупорна антена, 3D друк, пірамідальна антена, електродинамічне моделювання, коефіцієнт підсилення, НВЧ системи.

Abstract

The paper considers the design and simulation features of a 3D-printed pyramidal horn antenna intended for operation in the centimeter-wave frequency range. Electrodynamics simulation of the antenna was performed, and its main characteristics, including gain, reflection coefficient, and radiation pattern, were determined. The obtained results confirmed the perspective of using 3D printing technologies for rapid and cost-effective manufacturing of modern antenna systems.

Keywords: horn antenna, 3D printing, pyramidal antenna, electrodynamic simulation, gain, microwave systems.

Вступ

Сучасний розвиток бездротових систем зв'язку, радіолокації, телекомунікацій та вимірювальних комплексів супроводжується постійним зростанням вимог до антенних систем. Особливо актуальними є задачі зменшення масогабаритних параметрів антен, спрощення процесу їх виготовлення та зниження вартості виробництва при одночасному забезпеченні високих електродинамічних характеристик. У цьому контексті перспективним напрямом є використання технологій адитивного виробництва, зокрема 3D друку, для створення антен надвисокочастотного та міліметрового діапазонів [1, 2].

Рупорні антени широко застосовуються у системах супутникового зв'язку, радіолокації, бездротових мережах стандарту Wi-Fi, системах 5G/6G та вимірювальних установках завдяки високому коефіцієнту підсилення, широкій смузі пропускання та простоті конструкції [3]. Традиційні методи виготовлення таких антен передбачають використання металевої обробки, що ускладнює створення складних геометричних структур та збільшує вартість виробництва. Застосування 3D друку дозволяє суттєво скоротити час розробки та виготовлення антенних пристроїв, забезпечити високу повторюваність параметрів і реалізувати конструкції складної форми без значних технологічних витрат [4].

Актуальність роботи полягає у дослідженні можливостей створення рупорної антени методом 3D друку з подальшим аналізом її електродинамічних характеристик. Такий підхід відкриває перспективи швидкого прототипування антен для сучасних бездротових систем та спеціалізованих радіотехнічних застосувань.

Метою роботи є розробка та моделювання 3D друкованої пірамідальної рупорної антени для роботи у сантиметровому діапазоні хвиль.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано такі завдання дослідження:

- проаналізувати особливості конструкції та принцип дії рупорних антен;
- обґрунтувати доцільність використання технології 3D друку для виготовлення антени;
- розробити геометричну модель пірамідальної рупорної антени;
- провести електродинамічне моделювання антени;
- визначити основні характеристики антени та оцінити ефективність запропонованої конструкції.

Результати дослідження

Базова конструкція пірамідальної рупорної антени складається з розширеного металевого хвилеводу, який поступово розширюється, утворюючи пірамідальну форму, зазвичай з чотирма прямокутними сторонами [5, 6]. Ця конструкція головним чином функціонує для спрямування радіочастотної енергії в певному напрямку, підвищуючи силу сигналу та коефіцієнт посилення. Фундаментальна мета полягає в ефективному перетворенні електромагнітних хвиль з хвилеводу на випромінювання вільного простору, що досягається плавним розширенням площі поперечного перерізу хвилеводу. Ця структура забезпечує мінімальні відбиття та втрати, сприяючи ефективній передачі та прийому сигналів у різних застосуваннях. Пірамідальна форма також забезпечує широку смугу пропускання та високу спрямованість, що робить її кращим вибором у радіолокації, супутниковому зв'язку та радіоастрономії [7].

Кілька ключових параметрів суттєво впливають на характеристики пірамідальної рупорної антени. Серед них розмір апертури визначає коефіцієнт посилення та ширину променя антени, тоді як кут розширення впливає на спрямованість та узгодження імпедансу. Крім того, розміри хвилеводу визначають робочий діапазон частот та смугу пропускання. Точний контроль над цими параметрами має вирішальне значення, оскільки навіть незначні відхилення можуть призвести до зниження ефективності або зміни діаграми спрямованості. Наприклад, збільшення розміру апертури зазвичай підвищує коефіцієнт підсилення, але також може збільшити фізичний розмір антени, що може бути обмеженням у мініатюрних системах [8]. Розуміння та оптимізація цих параметрів дозволяє інженерам адаптувати характеристики антени до конкретних вимог до продуктивності.

Поява 3D-друку зробила революцію в налаштуванні та виготовленні пірамідальних рупорних антен, дозволивши швидке прототипування та складні геометрії, які важко виготовити традиційними методами [1]. Завдяки адитивному виробництву, конструктори можуть точно контролювати форму та розміри кожного компонента, що сприяє інноваційним конструкціям антен з інтегрованими функціями, такими як механізми подачі або модифікації поверхні [2]. Ця технологія також пропонує економічно ефективне виробництво для невеликих партій або експериментальних моделей, зменшуючи витрати матеріалів та час виробництва [3]. Крім того, 3D-друк дозволяє легко проводити ітерації та налаштування, що дозволяє розробляти спеціалізовані антени для унікальних застосувань або діапазонів частот без необхідності використання великої інструментальної або виробничої інфраструктури [4]. Ця гнучкість відкриває нові шляхи для досліджень та впровадження в передових системах зв'язку.

У роботі було розроблено конструкцію пірамідальної рупорної антени, призначеної для роботи у діапазоні частот 8–12 ГГц. Конструкція антени містить прямокутний хвилевідний збуджувач та рупорну частину з поступовим розширенням апертури. Геометричні параметри антени були розраховані відповідно до вимог щодо забезпечення необхідного коефіцієнта підсилення та узгодження з хвилевідною лінією передачі.

Модель антени була створена із використанням ANSYS HFSS для подальшого виготовлення методом FDM 3D друку. Як матеріал основи було розглянуто полілактид (PLA), який характеризується низькою вартістю, простотою друку та достатньою механічною міцністю. Для забезпечення провідних властивостей внутрішня поверхня антени передбачала металізацію струмопровідним покриттям.

Електродинамічне моделювання проводилося у спеціалізованому програмному середовищі на основі методу скінченних елементів. За результатами моделювання отримано залежності коефіцієнта відбиття, коефіцієнта підсилення та діаграми спрямованості антени. У робочому діапазоні частот значення коефіцієнта відбиття становило менше -10 дБ, що свідчить про належне узгодження антени з фідерним трактом.

Отримані результати показали, що коефіцієнт підсилення антени досягає 12–15 дБ залежно від частоти. Діаграма спрямованості характеризується вираженим головним пелюстком та низьким рівнем бокових пелюсток, що забезпечує ефективне випромінювання електромагнітної енергії у заданому напрямку. Також встановлено, що використання 3D друку дозволяє суттєво спростити виготовлення корпусу антени та скоротити витрати на створення дослідного зразка.

Висновки

У результаті виконаного дослідження було розроблено та промодельовано 3D друковану піраміда-

льну рупорну антену для сантиметрового діапазону хвиль. Проведений аналіз підтвердив перспективність використання технологій адитивного виробництва для створення сучасних антенних систем.

За результатами моделювання встановлено, що запропонована антена забезпечує задовільне узгодження у робочому діапазоні частот, високий коефіцієнт підсилення та формування спрямованої діаграми випромінювання. Використання 3D друку дає можливість зменшити складність виготовлення, скоротити час розробки та знизити вартість створення антенних пристроїв.

Отримані результати можуть бути використані під час розробки антен для систем бездротового зв'язку, радіолокації та експериментальних НВЧ комплексів. Перспективою подальших досліджень є виготовлення фізичного макета антени та проведення експериментальних вимірювань її характеристик.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Castro J., Vasquez D., Bruna S., Rodriguez M., Pizarro F. On the Use of Low-Cost Metallic Filaments for the Implementation of Millimeter Wave Antennas. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2025, 12(3), 213–222. <https://doi.org/10.1089/3dp.2023.0128>
2. Zárate Y. D., Torres F., Rodriguez M., Pizarro F. 3D-printed low-cost choke corrugated Gaussian profile horn antenna for Ka-band. *Scientific Reports*, 2023, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50174-5>
3. Shrestha S., Abbas S. M., Asadnia M., Esselle K. P. Enhancement of Feed Source through Three Dimensional Printing. *Micromachines*, 2023, 14(6), 1244. <https://doi.org/10.3390/mi14061244>
4. Olivová J., Popela M., Richterová M., Štefl E. Use of 3D Printing for Horn Antenna Manufacturing. *Electronics*, 2022, 11(10), 1539. <https://doi.org/10.3390/electronics11101539>
5. Semenov A., Semenova O., Pinaiev B., Kozin D., Shpylovyi O. Study of the radiation pattern of a rectangular horn antenna in the operation of multimode propagation of electromagnetic waves. *Technology Audit and Production Reserves*, 2022, 2(2(64)), 50–55. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.256560>
6. Семенов А., Громик О. Дослідження спрямованих і хвильових параметрів антени поверхневих хвиль. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, (2), 2023, 125–133. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-16>
7. Семенов А. О., Семенова О. О., Пінаєв Б. О., Козін Д. О., Кристофоров А. В. Широкопasmовою прямокутна рупорна антена з діелектричною лінзою для бездротового зв'язку «точка-точка». *Системи та технології*, 2022, №2, Том 64. С. 38-47. <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2022.2-64.5>
8. Семенов А.О., Семенова О.О., Пінаєв Б.О., Білик О.В., Шпильовий О.О. Дослідження густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 2022, Том 33 (72) № 3. С. 13-19. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/03>

Семенов Андрій Олександрович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

Загребельний Максим Олегович — студент групи ТКР-22б, кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: makslaym1904@gmail.com

Янковчук Богдан Олексійович — студент групи ТКР-22б, кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: bohdan.yankovchuk@gmail.com

Semenov Andrii Oleksandrovych — Dr. Sc., Full Professor, Professor of the Department of Information Radio-Electronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

Zahrebelny Maksym Olegovych — student in group TKR-22b, Department of Information Radio-Electronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: makslaym1904@gmail.com

Yankovchuk Bohdan Oleksiyovych — student of group TKR-22b, Department of Information Radio-Electronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: bohdan.yankovchuk@gmail.com