УДК 621.396

А. О. Семенов[1]
Д. А. Данчевський[1]
Д. С. Кужільний[1]

ПРЯМОКУТНА РУПОРНА АНТЕНА З ДІЕЛЕКТРИЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

[1] Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі досліджено прямокутну рупорну антену з діелектричним навантаженням та проаналізовано вплив параметрів діелектричної вставки на характеристики випромінювання. Встановлено, що використання діелектричного навантаження дозволяє підвищити коефіцієнт підсилення, знизити рівень бокових пелюсток і покращити спрямовані властивості антени. Отримані результати підтверджують перспективність застосування таких конструкцій у сучасних телекомунікаційних і радіолокаційних системах.

Ключові слова: упорна антена, діелектричне навантаження, діаграма спрямованості, коефіцієнт підсилення, електромагнітне поле, телекомунікаційні системи.

Abstract

The paper investigates a rectangular horn antenna with dielectric loading and analyzes the influence of dielectric insert parameters on radiation characteristics. It has been established that the use of dielectric loading increases antenna gain, reduces side lobe levels, and improves directional properties. The obtained results confirm the prospects of applying such antenna structures in modern telecommunication and radar systems.

Keywords: horn antenna, dielectric loading, radiation pattern, antenna gain, electromagnetic field, telecommunication systems.

Вступ

Сучасний розвиток телекомунікаційних систем, радіолокації, супутникового зв’язку та бездротових мереж високих частот зумовлює потребу у створенні антен із підвищеними показниками спрямованості, широкосмуговості та енергетичної ефективності [1,2]. Одним із перспективних типів випромінювачів для сантиметрового та міліметрового діапазонів є прямокутні рупорні антени, які характеризуються простотою конструкції, високим коефіцієнтом підсилення та низьким рівнем втрат [3,4]. Проте традиційні рупорні антени мають відносно великі габарити та нерівномірний розподіл електромагнітного поля в апертурі, що обмежує їх ефективність у компактних радіотехнічних системах [5,6].

Одним зі способів удосконалення характеристик рупорних антен є використання діелектричного навантаження, яке дозволяє змінювати фазовий розподіл поля в апертурі, зменшувати бокові пелюстки діаграми спрямованості та підвищувати коефіцієнт концентрації електромагнітної енергії [7,8]. Застосування діелектричних вставок також сприяє зменшенню довжини рупора при збереженні необхідних електродинамічних характеристик, що є особливо важливим для сучасних мобільних і бортових систем зв’язку.

Метою роботи є розроблення нової конструкції та дослідження електродинамічних характеристик прямокутної рупорної антени з діелектричним навантаженням, а також оцінка впливу параметрів діелектрика на характеристики випромінювання антени.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– проаналізувати особливості поширення електромагнітної хвилі в рупорній антені з діелектричним навантаженням;

– дослідити вплив діелектричної проникності матеріалу на форму діаграми спрямованості;

– визначити зміни коефіцієнта підсилення та рівня бічних пелюсток;

– оцінити можливість зменшення габаритів антени за рахунок використання діелектричних елементів.

Результати дослідження

У роботі розглянуто прямокутну рупорну антену, в апертурі якої розміщено діелектричне навантаження у вигляді вставки з матеріалу з відносною діелектричною проникністю $\varepsilon_r = 2{,}2$ (рис. 1). Аналіз електромагнітного поля виконувався на основі хвильового підходу з урахуванням модифікації фазового фронту хвилі при проходженні через діелектричне середовище.

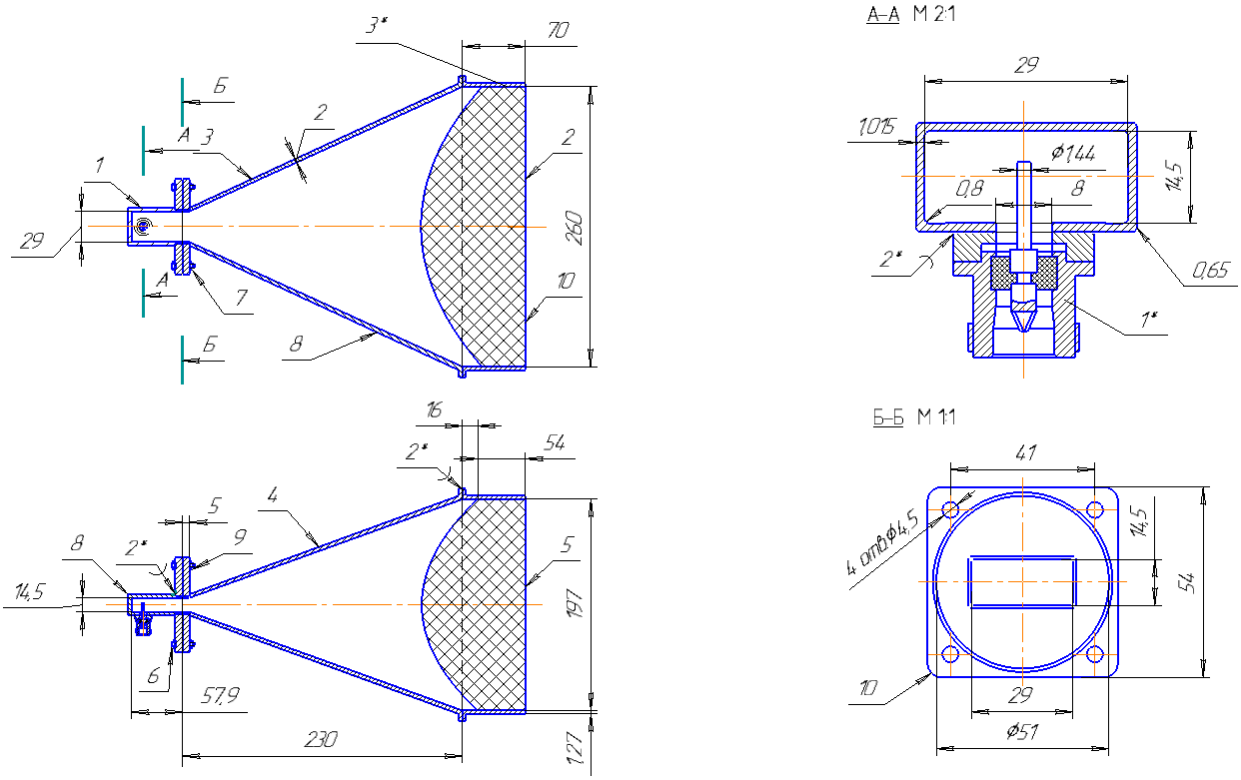


Рис. 1. Креслення прямокутної рупорної антени з діелектричним навантаженням

Дослідження показали, що введення діелектричного навантаження сприяє більш рівномірному розподілу фаз у площині апертури. Це забезпечує покращення спрямованих властивостей антени та підвищення коефіцієнта підсилення в середньому на 1,5–2 дБ порівняно з аналогічною конструкцією без діелектричного елемента. При цьому спостерігається зменшення ширини головної пелюстки діаграми спрямованості, що свідчить про зростання концентрації випромінюваної енергії в основному напрямку.

Встановлено, що найбільш ефективний режим роботи антени досягається при використанні діелектрика з помірним значенням діелектричної проникності. За надмірного збільшення εr виникає додаткове відбиття хвиль на межі поділу середовищ, що призводить до погіршення узгодження та збільшення коефіцієнта стоячої хвилі. Оптимізація геометричних параметрів вставки дозволяє мінімізувати ці негативні ефекти.

Окрему увагу приділено аналізу бокових пелюсток діаграми спрямованості. Встановлено, що діелектричне навантаження дозволяє знизити рівень бокових пелюсток на 3–5 дБ, що є важливим для радіолокаційних та телекомунікаційних систем, де необхідно зменшити вплив паразитних напрямків випромінювання.

Також проведено оцінювання можливості зменшення геометричних розмірів рупорної антени. Результати моделювання свідчать, що застосування діелектричного навантаження дає змогу скоротити довжину рупора до 20% без суттєвого погіршення характеристик спрямованості. Це забезпечує перспективність використання таких антен у компактних системах зв’язку та переносних радіотехнічних пристроях.

Отримані результати підтверджують доцільність використання діелектричних елементів для підвищення ефективності прямокутних рупорних антен у високочастотних системах передачі інформації.

Висновки

У результаті проведених досліджень встановлено, що використання діелектричного навантаження у прямокутній рупорній антені забезпечує покращення її електродинамічних характеристик. Введення діелектричної вставки сприяє вирівнюванню фазового розподілу електромагнітного поля в апертурі, що приводить до підвищення коефіцієнта підсилення та звуження головної пелюстки діаграми спрямованості. Показано, що оптимальний вибір діелектричної проникності та геометричних параметрів навантаження дозволяє знизити рівень бокових пелюсток і покращити узгодження антени з фідерним трактом. Крім того, застосування діелектричних елементів дає можливість зменшити габарити рупорної антени без істотної втрати ефективності випромінювання. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні антенних систем сантиметрового та міліметрового діапазонів для сучасних телекомунікаційних, радіолокаційних і супутникових систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhang S., Cadman D., Vardaxoglou J. Y. C. Additively Manufactured Profiled Conical Horn Antenna With Dielectric Loading. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(11), 2128–2132. https://doi.org/10.1109/lawp.2018.2871029
2. Huang S., Chan K. Y., Fu Y., Ramer R. Dielectric-loaded substrate integrated waveguide H-plane horn antenna with embedded air cavity. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2021, 15(2), 154–162. https://doi.org/10.1049/mia2.12036
3. Liu S., Li M., Li H., Yang L., Shi X. Cavity-backed bow-tie antenna with dielectric loading for ground-penetrating radar application. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2019, 14(2), 153–157. https://doi.org/10.1049/iet-map.2019.0309
4. Zhang B., Du W., Liu N., Fu G. Dielectric-Loaded Horn Antenna Design and Simulation Using the Metamaterial Method. *Electronics*, 2024, 13(6), 1089. https://doi.org/10.3390/electronics13061089
5. Semenov A., Havrilov D., Volovyk A., Stalchenko O., Kulias R., Ilchuk D. Single-Mode and Multimode Operation of the Rectangular Waveguide with a Spherical Ferrite Probe. In *2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, 26-28 August 2021, Lviv, Ukraine, pp. 100–104. https://doi.org/10.1109/ukrcon53503.2021.9575750
6. 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
7. 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
8. Семенов А. О., Семенова О. О., Пінаєв Б. О., Козін Д. О., Кристофоров А. В. Широкосмугова 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

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

Данчевський Дмитро Анатолійович — студент групи ТКР-22б, кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: dmitrodanchevskiy@gmail.com

Кужільний Дмитро Сергійович — студент групи ТКР-22б, кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: kuzhilniydmytro@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

Danchevsky Dmytro Anatoliyovych — student in group TKR-22b, Department of Information Radio-Electronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: dmitrodanchevskiy@gmail.com

Kuzhilny Dmytro Serhiyovych — student of group TKR-22b, Department of Information Radio-Electronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kuzhilniydmytro@gmail.com