

Ю. Г. Гічко¹, С. Ю. Мазор¹, Т. В. Храновська¹, Г. Я. Криховецький²

¹ Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського, Київ, Україна

² Науково-дослідний інститут воєнної розвідки, Київ, Україна

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИМІРЮВАННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ АНТЕН НАДВИСОКОЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ

Анотація. Актуальність. У статті розглянуто методику експериментального вимірювання основних параметрів антен надвисокочастотного (НВЧ) діапазону, зокрема діаграми спрямованості та коефіцієнта підсилення. **Об'єкт дослідження:** рупорні спіральні та вібраторні антени, які широко використовуються в НВЧ системах зв'язку, радіолокації та телеметрії. **Предмет дослідження.** Методика вимірювання основних параметрів антен НВЧ діапазону. **Мета дослідження:** розроблення, обґрунтування та експериментальна реалізація методики вимірювання основних параметрів антен НВЧ діапазону, зокрема діаграми спрямованості та коефіцієнта підсилення, з використанням лабораторної установки, оптимізованої для умов навчального і прикладного технічного середовища. **Завдання дослідження.** Розробити та експериментально реалізувати методику вимірювання діаграми спрямованості й коефіцієнта підсилення антен НВЧ-діапазону. **Методи дослідження:** експериментальні дослідження, методи вимірювання параметрів антен НВЧ-діапазону, порівняльний аналіз та математична обробка результатів вимірювань. **Результати дослідження.** У статті проведено аналіз лабораторної установки, яка дозволяє здійснювати вимірювання в діапазоні до 10 ГГц з використанням генератора НВЧ Keysight N5173B EXG X-Series Microwave Signal Generator, аналізатора спектра Keysight N9010A EXA, передавальної пірамідальної рупорної антени, приймальної антени та детекторної секції здійснюється зняття діаграм спрямованості, а також вимірювання коефіцієнта підсилення методом еталонної антени. Як еталон застосовано відкритий кінець хвильоводу, що дозволяє теоретично або експериментально визначати базові параметри випромінювання. **Висновки.** Наукова новизна роботи полягає в практичному поєднанні класичної методики вимірювань з сучасними підходами до аналізу антенних характеристик, що може бути використано як у навчальному процесі, так і при розробці ефективних антенних систем для систем зв'язку. Порівняно з аналогічними роботами, у статті детально описано процедуру визначення коефіцієнта спрямованої дії з використанням графічних залежностей, що спрощує процес оцінки антен для реальних технічних застосувань.

Ключові слова: рупорна антена; надвисокі частоти; діаграма спрямованості; коефіцієнт підсилення; еталонна антена; вимірювання параметрів антен; НВЧ випромінювання; спрямована дія; експериментальна методика.

1. Вступ

1.1 Актуальність тематики

У сучасних телекомунікаційних і радіотехнічних системах, особливо тих, що функціонують у надвисокочастотному (НВЧ) діапазоні, надзвичайно важливим є знання основних параметрів антен, зокрема діаграми спрямованості та коефіцієнта підсилення. Ці характеристики безпосередньо впливають на ефективність передачі та прийому сигналів, визначають енергетичний баланс радіоліній і якість покриття [1, 2]. Особливого значення набуває забезпечення високої точності вимірювань антенних параметрів для систем мобільного зв'язку, радіолокації, систем зв'язку з рухомими об'єктами, супутникових каналів та інших критичних сфер, де втрати сигналу можуть призвести до суттєвих функціональних обмежень або зниження надійності системи [3, 4].

Незважаючи на значну кількість відомих теоретичних моделей і числових методів аналізу антен [5, 6], саме експериментальне підтвердження характеристик випромінювання залишається незамінним етапом у процесі проектування, налаштування й експлуатації антенних пристроїв. У той же час, багато класичних лабораторних методик, особливо ті, що застосовуються в навчальному

процесі, потребують актуалізації або адаптації до сучасних вимог – зокрема щодо точності та швидкості вимірювань та простоти реалізації [7, 8].

Тому постає важливе наукове і практичне завдання: удосконалення або уточнення експериментальної методики вимірювання просторових характеристик антен НВЧ-діапазону з урахуванням вимог до точності повторюваності результатів і простоти реалізації в навчальних та прикладних технічних умовах.

1.2 Аналіз літературних джерел і визначення проблеми

Сучасні дослідження в галузі визначення параметрів антен НВЧ охоплюють розробку ширококутових конструкцій та методики вимірювань. У роботах [3, 5] описано конструкції ширококутових рупорних антен для імпульсних та сенсорних застосувань, які відзначаються високою точністю та стійкістю при калібруванні. Особливу увагу приділено оптимізації конструкцій антен для міліметрового діапазону [1]. Крім того, методи вимірювання, використані у [2] та [9], демонструють можливість оцінки коефіцієнта підсилення в цьому діапазоні навіть за умов обмеженого лабораторного оснащення. Не менш важливо: дослідження [7, 8] детально аналізують багаторежимні хвильоводи з

рупорними антенами, що підтверджує актуальність і перспективність обраної тематики в локальному академічному середовищі. Разом ці роботи демонструють високий рівень технічної розробки, але найчастіше такі методики складні або потребують дорогого обладнання, що обмежує їх використання в навчальних лабораторіях.

1.3 Мета і завдання дослідження

Метою роботи є розроблення, обґрунтування та експериментальна реалізація методики вимірювання основних параметрів антен НВЧ діапазону, зокрема діаграми спрямованості (ДС) та коефіцієнта підсилення, з використанням лабораторної установки, оптимізованої для умов навчального і прикладного технічного середовища. Завдання полягає у розробці та експериментальній реалізації методики вимірювання діаграми спрямованості й коефіцієнта підсилення антен НВЧ-діапазону та оцінити її ефективність.

2. Матеріали і методи дослідження

Антен НВЧ діапазону відіграють ключову роль у побудові сучасних систем бездротового зв'язку, радіолокації, телеметрії та сенсорних технологій. Зокрема, рупорні антени вирізняються простотою конструкції, надійністю та високою ефективністю в заданому напрямку, що робить їх широко використовуваними в НВЧ-техніці [1, 5, 6]. В останні роки посилено досліджуються широкосмугові та міліметровохвильові рупорні антени, які застосовуються для точних вимірювань імпульсних сигналів, у тому числі в умовах 5G-середовища та індустріального сенсорного зв'язку [3, 4].

Особливого значення набуває задача точного визначення параметрів випромінювання антен – таких як діаграма спрямованості та коефіцієнт підсилення. Ці характеристики є критичними при проектуванні радіоліній та оцінці якості роботи антенно-фідерних трактів [10]. У багатьох дослідженнях реалізовано складні вимірювальні схеми в безлунних камерах і систем з числовим

керуванням, які дають високу точність [2, 9]. Водночас, такі системи не завжди придатні до використання в умовах базових навчальних лабораторій або малопотужних мобільних пристроїв.

У вітчизняній практиці, зокрема в роботах [7, 8], продемонстровано приклади досліджень характеристик рупорних антен за умов багатомодової роботи хвильоводів, що підтверджує практичну цінність та складність аналізу таких структур. Це зумовлює потребу в розробці методики, яка б поєднувала доступність реалізації з достатньою точністю для проведення технічно коректних вимірювань параметрів рупорних антен у НВЧ-діапазоні.

3. Результати дослідження методики вимірювання основних параметрів антен надвисоких частот

3.1 Вимірювання діаграми спрямованості антен

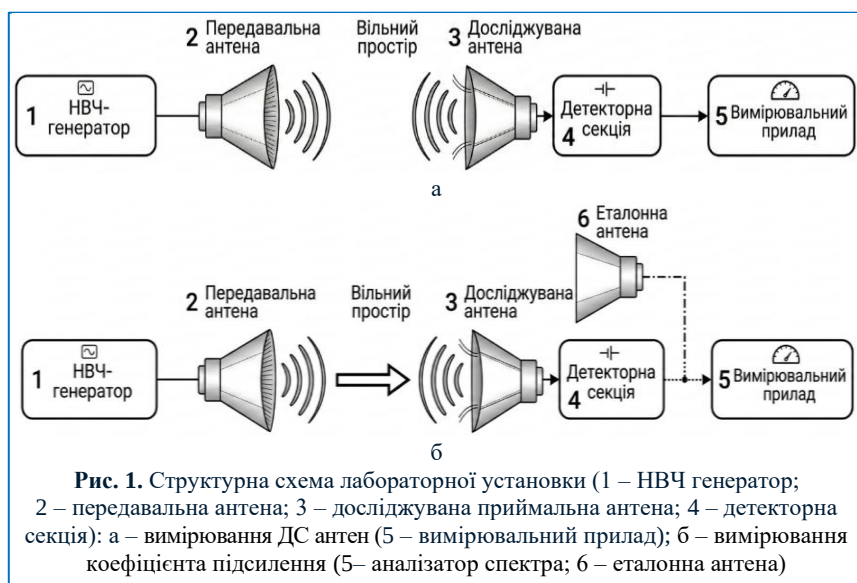
Установка для вимірювання ДС антен (рис. 1, а) складається з генератора НВЧ з передавальною антеною типу «пірамідальний рупор»; приймальних (досліджуваних) антен, в якості яких використовуються відкритий кінець хвильоводу, E та H секторіальні та пірамідальний рупори; детекторної секції; вимірювального приладу та поворотного пристрою; еталонні антени з відомим коефіцієнтом підсилення.

Лабораторна установка працює в діапазоні хвиль до 10 ГГц. НВЧ енергія генератора випромінюється передавальною рупорною антеною у вільний простір і надходить на приймальну (досліджувану) антену. Після детектування в детекторній секції сигнал надходить на вимірювальний прилад, який визначає його величину. Поворотний пристрій дозволяє змінювати орієнтацію досліджуваної антени в горизонтальній площині, чим забезпечується можливість зняття ДС у цій площині. Величина сигналу, що приймається на вимірювальному приладі, прямо пропорційна амплітуді ДС і залежить від орієнтації приймальної антени відносно передавальної.

Знята залежність відповідає ДС по потужності, оскільки вольт-амперна характеристика детектора при малих рівнях сигналу квадратична, а рівень випромінюваного сигналу генератора лабораторної установки досить малий.

3.2 Вимірювання коефіцієнта підсилення антени

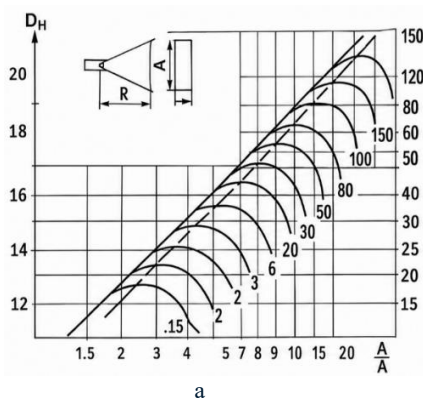
Установка для вимірювання коефіцієнта підсилення (рис. 1, б) складається з генератора НВЧ з передавальною антеною типу «пірамідальний рупор»; еталонної приймальної антени; приймальних (досліджуваних) антен; детекторної секції та вимірювального приладу.



Лабораторна установка працює в діапазоні хвиль до 10 ГГц. НВЧ енергія генератора за допомогою передавальної антени випромінюється в простір і надходить на приймальну антену. Після детектування сигнал надходить на вимірювальний прилад. Величина сигналу, що приймається, прямо пропорційна величині коефіцієнта підсилення досліджуваної антени.

Вимірювання коефіцієнта підсилення антен проводиться методом порівняння (методом еталонної антени). Цей метод є найпростішим і досить точним. В якості еталона використовується антена, коефіцієнт підсилення якої відомий або може бути визначений теоретично або експериментально. Порівняння досліджуваної антени та еталонної проводиться в режимі прийому або випромінювання. З визначення коефіцієнта підсилення випливає, що потужності випромінювання досліджуваної та еталонної антен пропорційні їх коефіцієнтам підсилення:

$$\frac{P_{IC}}{P_{ET}} = \frac{G_{IC}}{G_{ET}}, \quad G_{IC} = G_{ET} \frac{P_{IC}}{P_{ET}}. \quad (1)$$



Як видно із співвідношення (1), для визначення коефіцієнта підсилення досліджуваної антени достатньо знати коефіцієнт підсилення еталона та відношення їх потужностей випромінювання. Через те, що у виразі (1) використовується відношення потужностей, визначення абсолютних значень цих величин вимірювати не потрібно.

У даній роботі в якості еталонної антени використовується відкритий кінець хвильоводу, коефіцієнт підсилення якого є таким:

$$G_{ET} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot 0,81ab\eta_a, \quad (2)$$

a і b відповідно розміри широкої та вузької стінок хвильоводу.

При розрахунку коефіцієнта підсилення рупорних антен з достатньою для практики точністю можна знехтувати втратами та скористатися графіком залежності коефіцієнта спрямованої дії (КСД) від електричних розмірів рупора (рис. 2), вважаючи, що

$$G = D\eta_a, \quad \eta_a = 1. \quad (3)$$

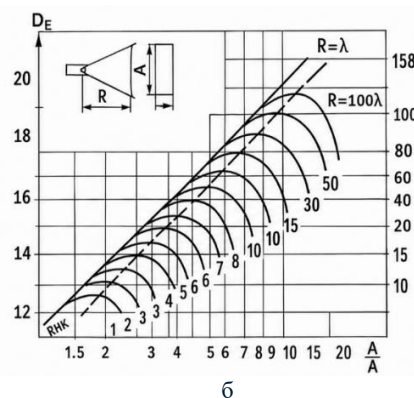


Рис. 2. Залежність КСД від розмірів розкриття рупора: а – H – секторного; б – E – секторного

Для визначення КСД необхідно заміряти висоту рупора R і з урахуванням відомої довжини хвилі вибрати відповідну криву на графіку. Потім, вимірявши величину розкриття рупора, визначити відношення величини розкриття до довжини хвилі, після чого за вертикальною шкалою знайти відповідне для даного рупора значення коефіцієнта підсилення. Коефіцієнт підсилення пірамідального рупора розраховують за формулою

$$G = 0,1 \left(\frac{\lambda}{A} D_E \right) \left(\frac{\lambda}{B} D_H \right).$$

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі

фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Zhang, Z.-Y., Lu, K., and Leung, K. W. (2023), "Gain Enhancement of Horn Antenna Using a Metal Lens", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 2, pp. 1337–1348, doi: <https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3228631>
- Zheng, J., Ala-Laurinaho, J., and Räsänen, A. (2019), "On the One-Antenna Gain Measurement Method in Probe Station Environment at mm-Wave Frequencies", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, no. 11, pp. 4510–4517, doi: <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2890454>
- Ma, B., Li, J., Chen, Y., Si, Y., Gao, H., Wu, Q., and Li, M. (2024), "A 60 GHz Slotted Array Horn Antenna for Radar Sensing Applications in Future Global Industrial Scenarios", *Micromachines*, vol. 15, no. 6, doi: <https://doi.org/10.3390/mi15060728>

4. Hong, J., Zheng, S., Liu, R., and Zhao, W. (2021), "Design of mmWave Directional Antenna for Enhanced 5G Broadcasting Coverage", *Sensors*, vol. 21, no. 3, Art. 746, doi: <https://doi.org/10.3390/s21030746>
5. Zhang, T., Wei, Y., Wang, Y., Duan, C., Wang, L., Li, Z., Li, X., Li, X., & Cao, B. (2025), "Design of Segmented Ultra-Wideband TEM Horn Antenna for Calibration of Wideband Electromagnetic Pulse Sensors", *Sensors*, vol. 25, no. 12, doi: <https://doi.org/10.3390/s25123599>
6. Singh, G. I., Singh, R. K., and Lal, R. (2020), "Design and Development of 2.1 GHz Horn Antenna", *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 587, Springer, Singapore, pp. 251–259, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-32-9775-3_25
7. Семенов, А., Гаврилюк, П., Кириченко, С., Пархоменко, О. & Литвиненко, А. (2022), "Дослідження діаграми спрямованості прямокутного рупора за умови багаторежимного поширення електромагнітних хвиль", *Технологічний аудит та резерви виробництва*, т. 64, № 2, С. 50–55, doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.256560>
8. Семенов, А., Гаврилюк, П., Кириченко, С. & Литвиненко, А. (2021), "Одномодовий і багатомодовий режими роботи прямокутного хвилеводу з сферичним феритовим зондом", *Матеріали 2021 IEEE 3-ї Української конференції з електротехніки та обчислювальної техніки (UKRCON)*, Львів, Україна, 26–28 серпня 2021 р., С. 100–104, doi: <https://doi.org/10.1109/UKRCON53503.2021.9575750>
9. Wang, J.-Y., Ng Mou Keh, M., and Rajo-Iglesias, E. (2020), "Design of a planar array of low profile horns at 28 GHz", *Sensors*, vol. 20, Art. 6989, doi: <https://doi.org/10.3390/s20236989>
10. Denghua, L., Fangfang, J., Cui, H., and Wenbai, C. (2018), "Study on Design and Simulation of Pyramidal Horn Antenna", *Journal of System Simulation*, vol. 30, no. 10, pp. 3933–3938, doi: <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.201810040>

Received (Надійшла) 29.06.2026

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.08.2026

Publication date (Дата публікації) 25.09.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Гічко Юрій Геннадійович – аспірант, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;

Hichko Yurii – postgraduate student, Institute of special communication and information security of National technical university of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute», Kyiv, Ukraine;
e-mail: gichko@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0004-3147-6092>.

Мазор Сергій Юрійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;

Mazor Serhii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Special Communications and Information Protection of the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine;
e-mail: mazorsk@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0003-2103-4883>.

Храновська Тетяна Василівна – молодший науковий співробітник, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «КПІ імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна;

Khranovska Tetyana – Junior Researcher, Institute of Special Communications and Information Protection of the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine;
e-mail: tanyakhranovskaya@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0007-7873-4919>.

Криховецький Георгій Яремович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідний інститут воєнної розвідки, м. Київ, Україна;

Heorhii Krykhovetskyi – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Defence Intelligence Research Institute, Kyiv, Ukraine;
e-mail: kgeorg@ukr.net; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0001-2981-7810>;
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58697828100>.

Methods of Experimental Measurement of the Main Parameters of Antennas of the Ultra-High Frequency Range

Yurii Gichko, Serhii Mazor, Tetyana Khranovska, Heorhii Krykhovetskyi

Abstract. Relevance. The article considers the method of experimental measurement of the main parameters of antennas of the ultra-high-frequency (microwave) range, in particular the radiation pattern and gain. **Object of research:** horn spiral and vibrator antennas, which are widely used in microwave communication, radar and telemetry systems. **Subject of research.** Methods for measuring the main parameters of microwave antennas. **The purpose of the study:** development, substantiation and experimental implementation of a method for measuring the main parameters of microwave antennas, in particular the radiation pattern and gain, using a laboratory installation optimized for the conditions of the educational and applied technical environment. **Research objectives.** To develop and experimentally implement a method for measuring the radiation pattern and gain of microwave antennas. **Research methods:** experimental studies, methods for measuring the parameters of microwave antennas, comparative analysis and mathematical processing of measurement results. **Research results.** The article analyzes a laboratory setup that allows measurements in the range up to 10 GHz using the Keysight N5173B EXG X-Series Microwave Signal Generator, Keysight N9010A EXA spectrum analyzer, transmitting pyramidal horn antenna, receiving antenna and detector section. The open end is used as a standard waveguide, which allows theoretically or experimentally to determine the basic parameters of radiation. **Conclusions.** The scientific novelty of the work lies in the practical combination of the classical measurement technique with modern approaches to the analysis of antenna characteristics, which can be used both in the educational process and in the development of effective antenna systems for communication systems. Compared to similar works, the article describes in detail the procedure for determining the directional action coefficient using graphical dependencies, which simplifies the process of evaluating antennas for real technical applications.

Keywords: horn antenna; microwave frequencies; radiation pattern; antenna gain; reference antenna; antenna parameter measurement; microwave radiation, directivity; experimental methodology.