

УДК 621.371; 537.8

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2022.2-64.5>

**Семенов А. О.**, доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри інформаційних радіоелектронних  
технологій і систем  
Вінницького національного технічного університету  
ORCID: 0000-0001-9580-6602

**Семенова О. О.**, кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій  
Вінницького національного технічного університету  
ORCID: 0000-0001-5312-9148

**Пінаєв Б. О.**, аспірант кафедри інформаційних  
радіоелектронних технологій і систем  
Вінницького національного технічного університету  
ORCID: 0000-0001-9592-0640

**Козін Д. О.**, аспірант кафедри інформаційних  
радіоелектронних технологій і систем  
Вінницького національного технічного університету  
ORCID: 0000-0003-2987-1726

**Кристофоров А. В.**, студент кафедри інформаційних  
радіоелектронних технологій і систем  
Вінницького національного технічного університету  
ORCID: 0000-0003-0616-667X

## ШИРОКОСМУГОВА ПРЯМОКУТНА РУПОРНА АНТЕНА З ДІЕЛЕКТРИЧНОЮ ЛІНЗОЮ ДЛЯ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ «ТОЧКА-ТОЧКА»

Сучасні інформаційні технології стрімко розвиваються. Застосування Інтернету речей та сенсорних мереж потребує освоєння нових діапазонів частот. При цьому спостерігається тенденція стрімкого переходу від дециметрового діапазону до сантиметрового діапазону довжин хвиль. На сьогоднішній день виникла актуальна науково-практична задача створення нових антенних пристроїв для застосування в бездротових інфокомунікаційних і сенсорних мережах, що мають бездротовий зв'язок типу «точка-точка». Антени є надзвичайно важливим компонентом пристроїв бездротових інфокомунікаційних і сенсорних мереж. Для забезпечення якісного бездротового зв'язку важливу роль відіграє форма амплітудної діаграми спрямованості, що визначає спрямовані властивості антени. Від якості узгодження параметрів антени в робочому діапазоні частот залежить рівень інформаційних сигналів і можливість здійснення просторового розділення каналів. Також від величини спрямованих властивостей антени суттєво залежить енергоефективність інфокомунікаційних пристроїв. Об'єктом дослідження у роботі є процес випромінювання електромагнітних хвиль і спрямовані властивості прямокутної рупорної антени з діелектричною лінзою в одномодовому режимі роботи. Запропонована в роботі широкосмугова прямокутна рупорна антена з діелектричною лінзою має класичну геометричну конфігурацію та працює у смузі частот 4285,7 МГц – 8571,4 МГц. Її габаритні розміри – ширина 318 мм, висота 240 мм, довжина 320 мм. Збудження антени здійснено зондовим збуджувачем у вигляді несиметричного штиря. Живлення антени здійснено коаксіальним кабелем з хвильовим опором 75 Ом. Поблизу штиря крім хвилі основного типу  $H_{10}$  збуджується багато вищих типів електромагнітних хвиль. Усі збуджені вищі типи хвиль перебувають у закритичному режимі роботи прямокутного хвильоводу і по мірі поширення до рупора затухають по експоненціальному закону. Їх амплітуда зменшується понад ніж у 100 разів. А тому вищі типи хвиль не проходять в горловину рупора та не надходять до розкриття рупора, в якому розташована діелектрична лінза. В результаті досліджень встановлено, що у робочому діапазоні частот 6,5 ГГц ... 7,6 ГГц ширина діаграми спрямованості антени змінюється в таких межах  $2\theta_{0,5}^E = 8,14^\circ \dots 9,75^\circ$ ;  $2\theta_{0,5}^H = 6,2^\circ \dots 7,2^\circ$ . Коефіцієнт спрямованої дії антени у робочому діапазоні частот знаходиться в межах 490-370 разів, а її коефіцієнт підсилення по потужності змінюється у межах 26,55-26,0 дБ.

Ключові слова: рупорна антена, діелектрична лінза, частота, амплітуда, діаграма спрямованості, електромагнітна хвиля, випромінювання.

© А. О. Семенов, О. О. Семенова, Б. О. Пінаєв, Д. О. Козін, А. В. Кристофоров, 2022

---

**Semenov A. O., Semenova O. O., Pinaiev B. O., Kulias R. O., Krystoforov A. V. Broadband rectangular horn antenna with dielectric lens for point-to-point wireless communication**

Modern information technologies are developing rapidly. The application of the Internet of Things and sensor networks requires the development of new frequency ranges. At the same time, there is a tendency for rapid transition from the decimeter range to the centimeter range of wavelengths. Today, there is an urgent scientific and practical task of creating new antenna devices for use in wireless information communication and sensor networks with point-to-point wireless communication. Antennas are an extremely important component of wireless information communication and sensor network devices. To ensure high-quality wireless communication, an important role is played by the shape of the amplitude pattern, which determines the directional properties of the antenna. The level of information signals and the possibility of spatial separation of channels depends on the quality of the antenna parameters agreement in the operating frequency range. Also, the energy efficiency of information communication devices significantly depends on the magnitude of the directional properties of the antenna. The object of research in the paper is the process of electromagnetic wave radiation and directional properties of a rectangular horn antenna with a dielectric lens in single-mode operation. The proposed broadband rectangular horn antenna with a dielectric lens has a classic geometric configuration and operates in the frequency band 4285.7 MHz – 8571.4 MHz. Its dimensions are width 318 mm, height 240 mm, length 320 mm. The antenna is excited by a probe exciter in the form of an asymmetric pin. The antenna is powered by a coaxial cable with a wave resistance of 75 Ohms. In addition to the basic  $H_{10}$ -type wave, many higher types of electromagnetic waves are excited near the pin. All excited higher types of waves are in the closed mode of operation of the rectangular waveguide and decay exponentially as they propagate to the horn. Their amplitude decreases more than 100 times. Therefore, higher types of waves do not pass through the throat of the horn and do not reach the opening of the horn in which the dielectric lens is located. As a result of research, it was established that in the operating frequency range of 6.5 GHz ... 7.6 GHz, the width of the antenna's directional pattern varies within the following limits:  $2\theta_{0.5}^E = 8.14^\circ \dots 9.75^\circ$ ;  $2\theta_{0.5}^H = 6.2^\circ \dots 7.2^\circ$ . The coefficient of directional action of the antenna in the working frequency range is within 490-370 times, and its power gain varies within 26.55-26.0 dB.

Key words: horn antenna, dielectric lens, frequency, amplitude, directional pattern, electromagnetic wave, radiation.

**Постановка проблеми.** Хвилеводні випромінювачі та рупорні антени є поширеним типом антен мікрохвильового діапазону [1]. Вони використовуються як окремі антени, а також як випромінювальні елементи інших антен (дзеркальних, лінзових) [2]. Ці антени широко використовують у діапазонах сантиметрових і міліметрових довжин електромагнітних хвиль [3].

Рупорні антени дозволяють формувати діаграми спрямованості шириною від  $100^\circ \dots 140^\circ$  (при розкритті спеціальної геометричної форми) до  $8^\circ \dots 16^\circ$  у пірамідальних рупорах. Можливість подальшого звуження діаграми спрямованості рупора обмежується необхідністю різкого збільшення його геометричних розмірів [4].

Основними перевагами рупорних антен є [5, 6]:

1) Широка смуга робочих частот. Рупорні антени мають приблизно полуторне перекриття по діапазону. Можливість зміни робочої частоти у ще більших межах обмежується складністю збудження і поширення вищих типів електромагнітних хвиль у фідерах, що їх живлять.

2) Високий коефіцієнт корисної дії (на практиці 93...97%).

3) Велика гранична потужність НВЧ сигналу.

4) Рупорні антени досить прості у виготовленні.

Основними недоліками рупорних антен є [7, 8]:

1) Громіздкість конструкції.

2) Складність формування вузьких діаграм спрямованості.

3) Труднощі регулювання амплітудно-фазового розподілу поля в розкритті. Це обмежує можливість зменшення рівня бокових пелюсток і створення діаграм спрямованості спеціальної форми.

Тому розроблення та дослідження нових методів і засобів для керування формою та параметрами діаграми спрямованості рупорних антен є актуальним науково-технічним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогоднішній день є низка провідних світових компаній-виробників, що серійно виготовляють рупорні антени. Найбільш відомими з них є Rohde & Schwarz (<https://www.rohde-schwarz.com/>), Schwarzbeck (<https://www.schwarzbeck.com/>), Aaronia (<https://aaronia.com/>), TS-Lindgren (<https://www.ets-lindgren.com/>), АМТЕК-СТС (<https://www.ametek-cts.com/>).

На рисунку 1 показана світлина ширококугової рупорної антени ТЕМН 6000 виробництва компанії Schwarzbeck, збудження якої здійснюється електромагнітними хвилями ТЕМ типу [9]. Це лінійно поляризована ширококугова рупорна антена ТЕМ, що виготовлена з алюмінію. Вона призначена для прийому та передачі радіохвиль, особливо для генерації випромінюваних полів під час випробувань на стійкість до зовнішнього середовища та надширококугових вимірювань [9]. Використовуваний діапазон частот 300 МГц – 8 ГГц. Робочий діапазон частот 380 МГц – 6 ГГц. Хвильовий опір 50 Ом, максимальна потужність 300 Вт. Максимальний коефіцієнт підсилення у смузі робочих частот 9,41 dBi. Розміри площини випромінювання рупора: ширина – 260 мм, висота – 210 мм. Вага 1,4 кг. Типовим застосуванням цієї антени є стандарт IEC 61000-4-39 [9].



Рис. 1. Широкопasmова рупорна антена TEMH 6000 виробництва компанії Schwarzbeck [9]

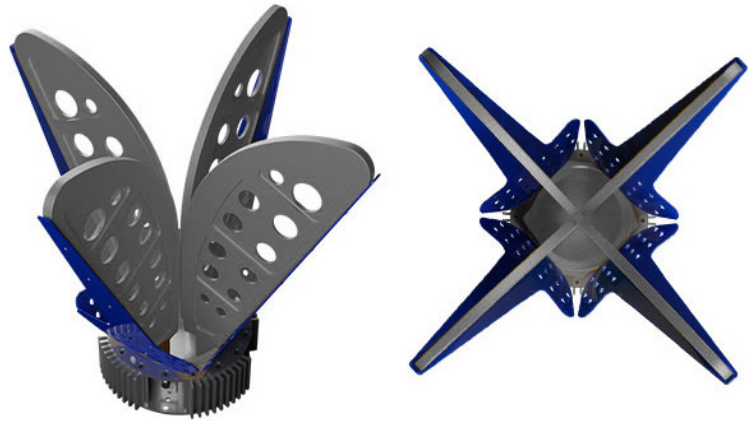


Рис. 2. Рупорна антени серії PowerLOG® PRO виробництва компанії Aaronia AG: вигляд збоку (ліворуч), вигляд згори (праворуч) [10]

Перевагою широкопasmової рупорної антени TEMH 6000 виробництва компанії Schwarzbeck є малі геометричні розміри та вага. Недоліком цієї антени є малий коефіцієнт підсилення.

На рисунку 2 наведена світлина рупорної антени серії PowerLOG® PRO виробництва компанії Aaronia AG [10]. Така антена характеризується великою шириною смуги частот і досить високою входною потужністю. Коефіцієнт підсилення збільшується зі збільшенням частоти максимум до 14 дБі [10]. Це збільшення підсилення компенсує зростаючі втрати кабелю на високих частотах. Рупорні антени серії PowerLOG® PRO придатні як для випромінювання, так і для приймання радіохвиль [10]. Завдяки високій потужності передачі до 500 Вт серія PowerLOG® PRO особливо підходить для вимірювань електромагнітної сумісності та випромінювання перешкод [10]. Основні параметри антени: діапазон частот 300 МГц – 8 ГГц; максимальна потужність 500 Вт; хвильовий опір 50 Ом; максимальне значення коефіцієнта стоячої хвилі по напрузі у фідері в робочому діапазоні частот не більше 2,5. Геометричні розміри рупора: довжина 510 мм, ширина 507, висота 507 мм. Вага 8,8 кг.

Конструкція відкритої рупорної антени з чотирма ребрами на рис. 2 подібна на дві хвилевідні антени з двома ребрами, що розташовані ортогонально одна одній. За такою конструкцією побудовані та серійно виготовляються фірмою ETS-Lindgren рупорні антени моделі Quad-Ridged Horn 3164-06 для діапазону частот від 300 МГц до 6 ГГц [11] та моделі Quad-Ridged Horn 3164-08 для діапазону частот від 700 МГц до 8 ГГц [12]. Тако фірма Aaronia виготовляє подібні рупорні антени моделі 30600 PowerLOG PRO Series для діапазону частот від 300 МГц до 8 ГГц [13]. Основними недоліком рупорних антен зазначених серій є їхні великі геометричні розміри, велика вага та надмірно велика вартість – від 2999 € до 6998 € і більше.

При створенні рупорних антен основною технічною задачею є зменшення геометричних розмірів рупору, зокрема довжини. Існують два шляхи вирішення задачі зменшення довжини рупора. Перший шлях полягає у застосуванні багаторупорної антени. Великий розмір розкриву антени розбивається на  $n$  частин. Тоді довжина кожного рупора може бути зменшена в  $n^2$  разів в порівнянні з довжиною однорупорної антени. Рупори розташовуються вздовж прямої в одній площині і з'єднуються так, щоб довжина шляху хвилі від загального хвилевода до кожного з рупорів була однаковою. Цим досягається синфазність збудження рупорів [14].

В основі другого шляху зменшення довжини рупора покладено застосування спеціальних пристроїв, які корегують фазові спотворення в розкритті рупора. Вони штучно вирівнюють довжину шляху, який проходить електромагнітна хвиля від горловини рупора до всіх точок розкриття. Або в розкритті рупора розташовують різноманітні типи лінз. Ці лінзи вирівнюють фазовий фронт хвилі. Або використовують метаматеріали всередині рупора [15].

У роботі [16] здійснено покращення підсилення рупорної антени за допомогою металевої лінзи. Запропонована в [16] антена складається з просторового подільника потужності та Н-площинної лінзи. Подільник потужності і лінза металеві та виготовлені за допомогою технології 3-D-друку. Запропонована у [16] металева лінза має зморшкуваті підканали різної довжини для перетворення вихідного квазіциліндричного хвильового фронту в майже плоский хвильовий фронт у широкому діапазоні частот. Це уможливило створити широкопasmову антену з високим коефіцієнтом підсилення. У роботі [16] запропоновано дві конструкції рупорної антени з металевою лінзою. Коефіцієнт підсилення першої конструкції антени становить 18,1 дБі при нормованому рівні бічних пелюсток -9,4 дБ. Коефіцієнт підсилення другої конструкції антени рівний 19,6 дБі при нормованому рівні бічних пелюсток -15,0 дБ. Встановлено, що розміри (осьові довжини) запропонованих конструкцій антени на 60% менші ніж у оптимальних рупорних антен [16].

Основну увагу при дослідженні спрямованих властивостей рупорних антен приділено для рупорів різної геометричної форми [17]. Дослідженню параметрів і характеристик рупорних антен з використанням діелектричних лінз менше було приділено уваги. Об'єктом дослідження у роботі є процес випромінювання електромагнітних хвиль і спрямовані властивості прямокутної рупорної антени з діелектричною лінзою в одномодовому режимі роботи.

**Мета статті:** дослідження спрямованих властивостей прямокутної рупорної антени з діелектричною лінзою в режимі одномодового поширення електромагнітних хвиль. Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання: 1) здійснити чисельний розрахунок діаграми спрямованості прямокутної рупорної антени в горизонтальній площині і вертикальній площині; 2) виконати математичне моделювання діаграми спрямованості прямокутної рупорної антени з діелектричною лінзою в робочому діапазоні частот; 3) отримати результати дослідження спрямованих властивостей та частотних характеристик прямокутної рупорної антени з діелектричною лінзою.

**Вклад основного матеріалу.** Для отримання гострішої діаграми спрямованості переріз стандартного хвилеводу можна плавно збільшувати, перетворюючи хвилевід на рупор (рис. 3) [18]. В цьому випадку структура поля в хвилеводі в основному збережеться [18]. У горлі рупора, тобто в місці його з'єднання з хвилеводом, все ж таки виникають вищі типи хвиль. Проте якщо кут розкриття рупора не дуже великий, то хвилі всіх типів, окрім основного, швидко затухнуть в районі горловини рупора, а по рупору розповсюджуватиметься тільки коливання основного типу [18].

Плавне збільшення перерізу хвилеводу також покращує узгодження його з вільним простором [19]. Модуль коефіцієнта відбиття від кінця прямокутного хвилеводу (рупора) з хвилею типу  $H_{10}$  може бути виражений такою формулою

$$|\rho| = (1 - \lambda / \lambda_x) / (1 + \lambda / \lambda_x), \quad (1)$$

де  $\lambda$  – довжини хвилі у вільному просторі,  $\lambda_x$  – довжина хвилі в рупорі. Збільшення розкриття рупора в площині вектору  $H$  приводить до наближення довжини хвилі в рупорі  $\lambda_x$  до довжини хвилі у вільному просторі  $\lambda$ . При цьому модуль коефіцієнта відбиття  $|\rho|$  наближається до нуля [19].

Діаграма спрямованості (ДС) антени це залежність інтенсивності електромагнітного поля, що випромінює антена в дальній зоні від кутів  $\theta$  і  $\varphi$  при одній і тій самій відстані від точки спостереження до початку координат. Комплексна діаграма спрямованості антени має три складові – амплітудна, фазову та поляризаційну діаграми спрямованості. Фізичний зміст амплітудної діаграми спрямованості антени – це здатність антени концентрувати електромагнітну енергію в завчасно вибраному секторі простору [20]. Розраховувати ДС будемо на трьох частотах робочого діапазону – нижній, середній та верхній. Це здійснено для з'ясування діапазонних властивостей антени [20].

Діаграма спрямованості (ДС) антени це залежність інтенсивності електромагнітного поля, що випромінює антена в дальній зоні від кутів  $\theta$  і  $\varphi$  при одній і тій самій відстані від точки спостереження до початку координат. Комплексна діаграма спрямованості антени має три складові – амплітудна, фазову та поляризаційну діаграми спрямованості. Фізичний зміст амплітудної діаграми спрямованості антени – це здатність антени концентрувати електромагнітну енергію в завчасно вибраному секторі простору [20]. Розраховувати ДС будемо на трьох частотах робочого діапазону – нижній, середній та верхній. Це здійснено для з'ясування діапазонних властивостей антени [20].

На рис. 4 показано профіль діелектричної лінзи,  $\Theta^E$  – кут між віссю антени і напрямком в точку спостереження.

Моделювання амплітудної діаграми проведено за допомогою програми Mathcad 14 за такими співвідношеннями:

– в площині  $H$

$$F(\theta^H) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot a_p \cdot \sin \theta^H\right) \theta}{\frac{\pi}{\lambda} \cdot a_p \cdot \sin \theta^H} \cdot \frac{1 + \cos \theta^H}{2}, \quad (2)$$

– в площині  $E$

$$F(\theta^E) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} \cdot b_p \cdot \sin \theta^E\right) \theta}{\frac{\pi}{\lambda} \cdot b_p \cdot \sin \theta^E} \cdot \frac{1 + \cos \theta^E}{2}. \quad (3)$$

На рис. 5 і рис. 6 наведені графіки діаграм спрямованості в площині  $H$  та  $E$  відповідно.

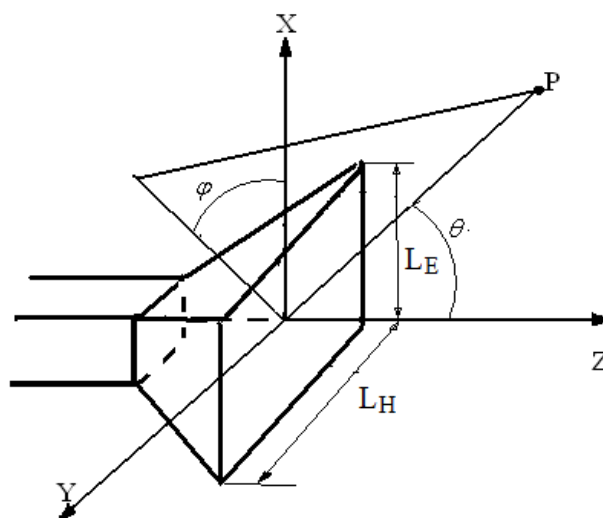


Рис. 3. Будова рупорної антени та система координат [18]

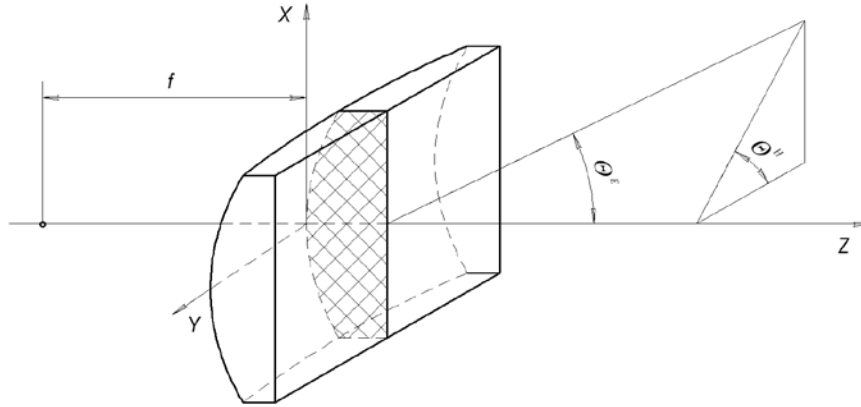


Рис. 4. Профіль діелектричної лінзи

Параметри амплітудної ДС антени занесені до табл. 1.

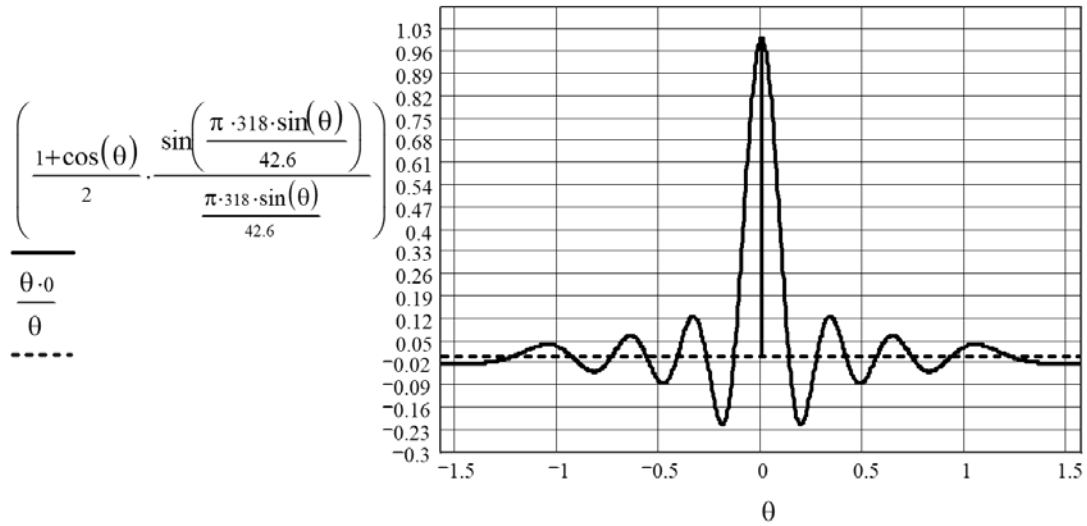


Рис. 5. Діаграма спрямованості в площині Н в декартовій системі координат на середній довжині хвилі  $\lambda = 42,6$  мм робочого діапазону

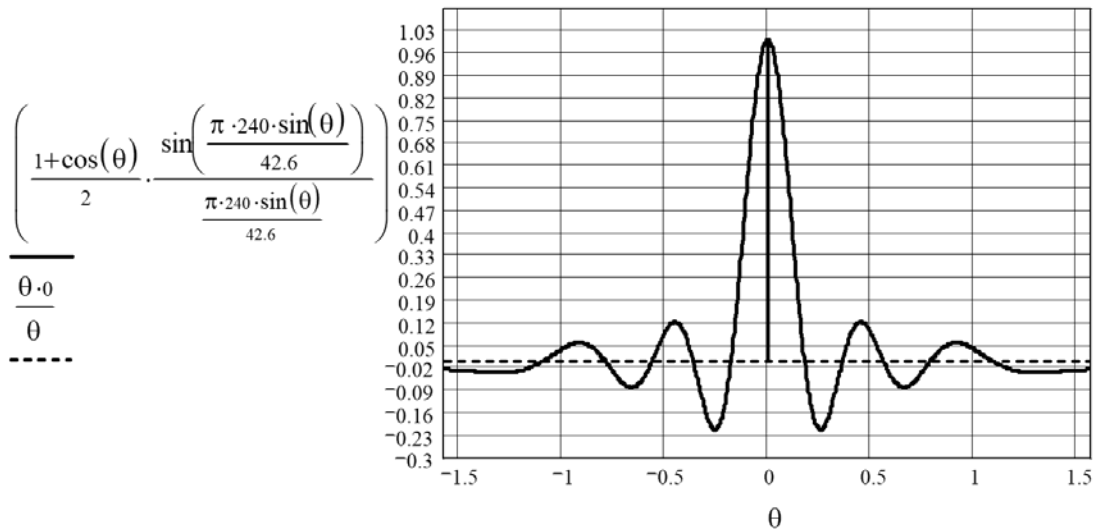


Рис. 6. Діаграма спрямованості в площині Е в декартовій системі координат на середній довжині хвилі  $\lambda = 42,6$  мм робочого діапазону

Результати математичного моделювання амплітудної ДС антени

	Н			Е		
	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\text{ср}}$	$\lambda_{\max}$	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\text{ср}}$	$\lambda_{\max}$
$\theta$	6,2°	6,7°	7,2°	8,14°	9,06°	9,75°
РБП	0,218	0,212	0,207	0,222	0,212	0,202

Коефіцієнт спрямованої дії антени (КСД) – це відношення квадрата напруженості електричного поля, створюваного антеною в заданому напрямку, до середнього значення квадрата напруженості електричного поля в усіх напрямках. Для діелектричної лінзової антени КСД визначено за формулою

$$D = 0,81 \cdot \frac{4 \cdot \pi}{\lambda^2} \cdot L_E \cdot L_H, \quad (4)$$

де  $L_H = 318$  мм – довжина широкої (горизонтальної) сторони розкриву рупора,

$L_E = 240$  мм – довжина вузької (вертикальної) сторони розкриву рупора.

Графік залежності коефіцієнта спрямованої дії антени від довжини хвилі поданий на рис. 7.

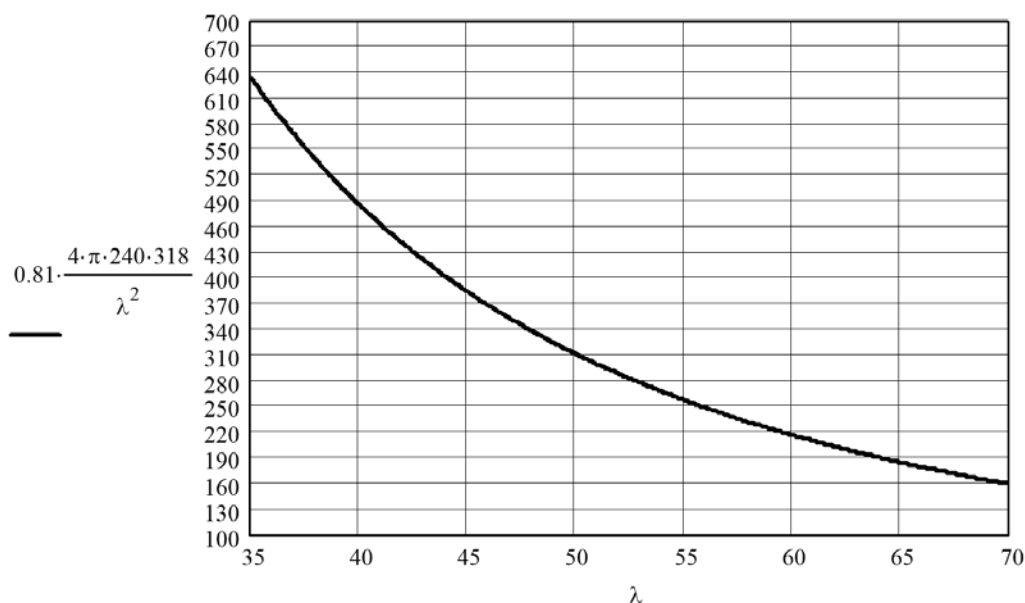


Рис. 7. Залежність коефіцієнта спрямованої дії антени від довжини хвилі (в діапазоні довжин хвиль 35-70 мм)

Коефіцієнт підсилення антени – це відношення потужності на вході еталонної антени до потужності, яка підводиться до входу досліджуваної антени, за умови, що обидві антени створюють у даному напрямку на однаковій відстані рівні значення напруженості поля або такої ж щільності потоку потужності.

Коефіцієнт підсилення антени діелектричної лінзової антени визначається за формулою

$$G = \eta \cdot D, \quad (5)$$

де  $\eta = 93\%$  – коефіцієнт корисної дії рупорної антени з діелектричною лінзою.

Графік залежності коефіцієнта підсилення антени від довжини хвилі поданий на рис. 8.

Залежність ширини променя від довжини хвилі визначено за формулами:

– в площині Н

$$L_H = \frac{67^\circ \cdot \lambda}{20_{0,5}^E}, \quad (6)$$

– в площині Е

$$L_E = \frac{51^\circ \cdot \lambda}{20_{0,5}^E}. \quad (7)$$

Графік залежності ширини пелюстки амплітудної ДС у напрямку основного випромінювання від довжини хвилі в площині Н і в площині Е подані на рис. 9 – рис. 10 відповідно.

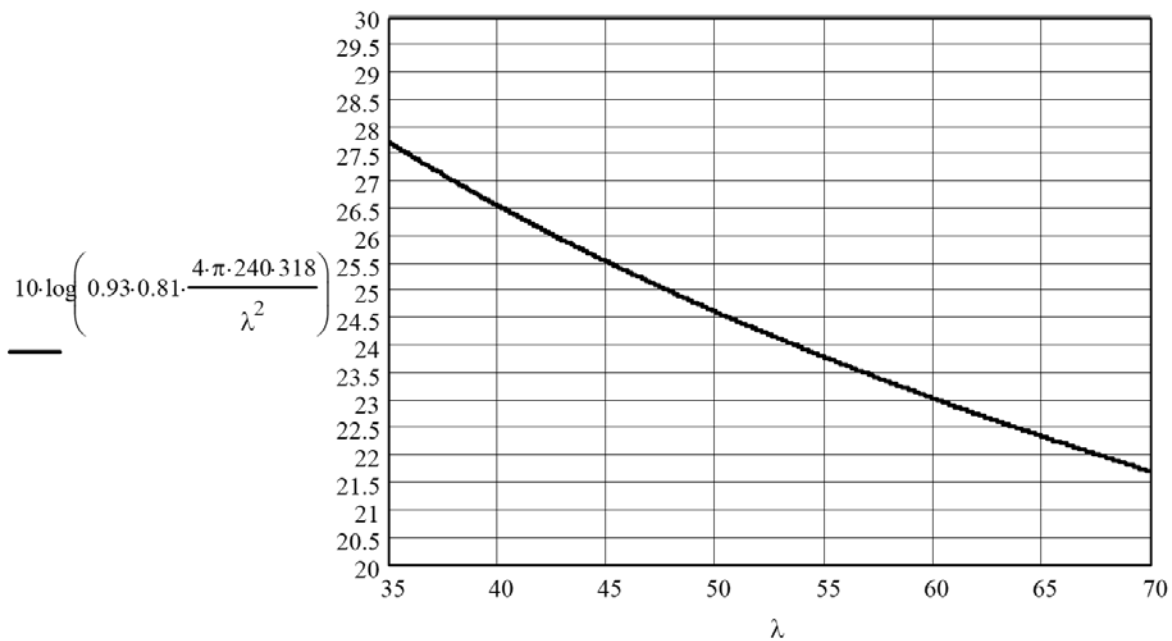


Рис. 8. Графік залежності коефіцієнта підсилення антени від довжини хвилі (в діапазоні довжин хвиль 35-70 мм)

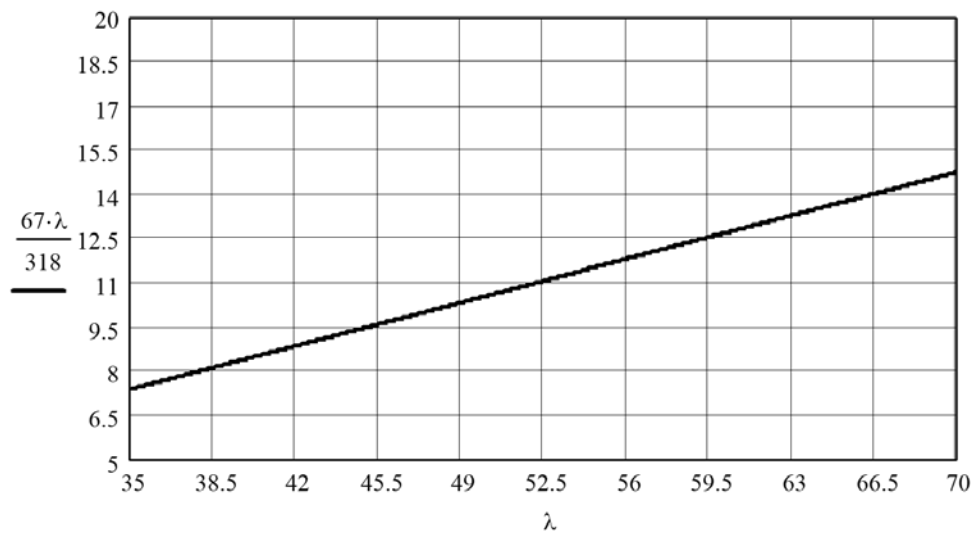


Рис. 9. Графік залежності ширини пелюстки амплітудної ДС у напрямку основного випромінювання від довжини хвилі в площині Н

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі.** У роботі було запропоновано варіант діелектричної лінзової антени для діапазону частот 4285,7 МГц – 8571,4 МГц (довжини хвиль 35 мм – 70 мм). Її перевагою є те, що вона має досить високий коефіцієнт спрямованої дії, високий коефіцієнт корисної дії та високий коефіцієнт підсилення. Дана антена має досить просту конструкцію, яка не потребує дуже точних розмірів. Робочий діапазон частот у якому забезпечено хвильовий опір антени 75 Ом становить 6,5–7,6 ГГц. У робочому діапазоні частот ширина діаграми спрямованості змінюється в таких межах  $2\theta_{0,5}^E = 8,14^\circ \dots 9,75^\circ$ ;  $2\theta_{0,5}^H = 6,2^\circ \dots 7,2^\circ$ . В таких антенах можуть бути реалізовані оптимальні ДС, так як розподіл поля в розкритті може вибиратися в широких межах за рахунок зміни зв'язку випромінювачів з хвилеводом. В антені використаний найпоширеніший збуджувальний пристрій зондового

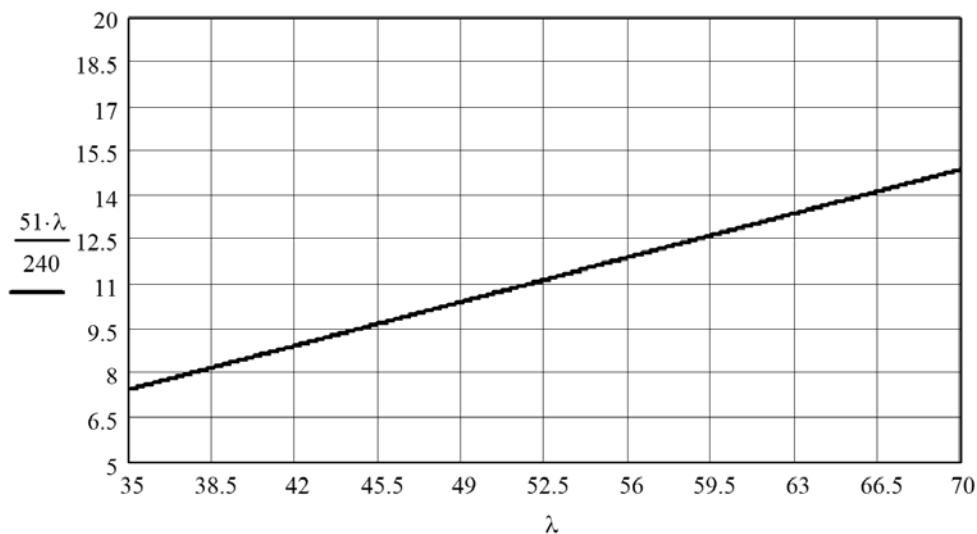


Рис. 10. Графік залежності ширини пелюстки амплітудної ДС у напрямку основного випромінювання від довжини хвилі в площині Е

типу, який виконаний у вигляді несиметричного штиря, що розташований паралельно силовим лініям електричного поля. Коефіцієнт спрямованої дії антени у робочому діапазоні частот знаходиться в межах 490-370 разів, а її коефіцієнт підсилення по потужності змінюється у межах 26,55-26,0 дБ. З отриманих результатів досліджень слідує, що параметри антени у робочому діапазоні частот 6,5–7,6 ГГц змінюються в невеликих межах. Подальший розвиток досліджень у даному напрямку полягає у застосуванні нейронної мережі для керування параметрами сигналу (амплітуди та фази) збудження електромагнітних коливань у рупорній з метою досягнення максимально можливих її спрямованих властивостей. Це уможливить значно збільшити відстань бездротового зв'язку типу «точка-точка» при незмінній потужності радіопередавача.

#### Список використаних джерел:

1. Lee J. N., Cho Y. K., Jung J. H., Hyun S. B. High-gain sub-terahertz lens horn antenna with a metal guide. *Electronics Letters*. 2020. Vol. 56, Issue 14, pp. 689–691. DOI: 10.1049/el.2020.0860
2. Wang J., Lin H., Yang F., Xu G., Ge J. Design of 94GHz Dual-Polarization Antenna Fed by Diagonal Horn for Cloud Radars. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10, pp. 22480–22486. DOI: 10.1109/access.2022.3154483
3. He Y., Zhao X., Zhao L., Fan Z., Wang J.-K., Zhang L., Ni C., Wu W.-J. Design of Broadband Double-Ridge Horn Antenna for Millimeter-Wave Applications. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9, pp. 118919–118926. DOI: 10.1109/access.2021.3107914
4. Huang S., Chan K. Y., Wang Y., Ramer R. High Gain SIW H-Plane Horn Antenna with 3D Printed Parasitic E-Plane Horn. *Electronics*. 2021. Vol. 10, Issue 19, p. 2391. DOI: 10.3390/electronics10192391
5. Wang P., Wu Q., He R.-B., Luo W. Gain and Radiation Pattern Enhancement of the H-Plane Horn Antenna Using a Tapered Dielectric Lens. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7, pp. 69101–69107. DOI: 10.1109/access.2019.2915934
6. Chang C., Zhu X., Liu G., Fang J., Xiao R., Chen C., Shao H., Li J., Huang H., Zhang Q., Zhang Z.-Q. Design and Experiments of the GW High-Power Microwave Feed Horn. *Progress In Electromagnetics Research*. 2010. Vol. 101, pp. 157–171. DOI: 10.2528/pier10010202
7. Jacobs B., Odendaal J. W., Joubert J. An Improved Design for a 1–18 GHz Double-Ridged Guide Horn Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2012. Vol. 60, Issue 9, pp. 4110–4118. DOI: 10.1109/tap.2012.2207043
8. Wang J., Yao Y., Yu J., Chen X. Broadband compact smooth horn with flat-top radiation pattern. *Electronics Letters*. 2019. Vol. 55, Issue 3, pp. 119–120. DOI: 10.1049/el.2018.7541
9. Broadband TEM Horn Antenna TEMH 6000. URL: [http://schwarzbeck.de/Datenblatt/m\\_temh6000.pdf](http://schwarzbeck.de/Datenblatt/m_temh6000.pdf)
10. High-power horn antennas PowerLOG® PRO series. URL: [https://downloads.aaronia.com/datasheets/antennas/PowerLOG/PowerLOG\\_PRO\\_Horn\\_Antennas\\_Quad\\_only.pdf](https://downloads.aaronia.com/datasheets/antennas/PowerLOG/PowerLOG_PRO_Horn_Antennas_Quad_only.pdf)
11. 3164-06 Open Boundary Quad-Ridged Horn. URL: <https://www.ets-https://www.ets-lindgren.com/datasheet/antennas/open-boundary-quad-ridged-horn/4003/400303>
12. 3164-08 Open Boundary Quad-Ridged Horn. URL: <https://www.ets-lindgren.com/datasheet/antennas/open-boundary-quad-ridged-horn/4003/400304>
13. The horn antennas of the PowerLOG® PRO series. URL: <https://aaronia.com/antennas/powerlog-pro-series-horn/>



14. Teber A. Beamforming Radiation Properties of Absorbing/Transparent Zones-Added Horn Antenna. *Gazi University Journal of Science*. 2020. (Vol. 33, Issue 2, pp. 355–363). DOI: 10.35378/gujs.602204
15. Tomaz A., Barroso J. J., Hasar U. C. Side Lobe Reduction in an X-Band Horn Antenna Loaded by a Wire Medium. *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2015. Vol. 7, Issue 3, pp. 307–313. DOI: 10.5028/jatm.v7i3.468
16. Zhang Z.-Y., Lu K., Leung K. W. Gain Enhancement of Horn Antenna Using a Metal Lens. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2022. pp. 1–1. DOI: 10.1109/tap.2022.3228631
17. Patel A., Vala A., Mahant K., Bhatt P., Chaudhari J., Mewada H. Performance Analysis of Corrugated Horn Antenna for Liquid Level Measurement Application. In: Dhavse, R., Kumar, V., Monteleone, S. (eds) *Emerging Technology Trends in Electronics, Communication and Networking. Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2023, vol. 952. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-19-6737-5\_6
18. Andriy Semenov, Olena Semenova, Bogdan Pinaiev, Dmytro Kozin, Oleksandr Shpylovyi. 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), pp. 50–55. DOI: 10.15587/2706-5448.2022.256560
19. Semenov A., Havrilov D., Volovyk A., Stalchenko O., Kulas R., Ilchuk D. Single-Mode and Multimode Operation of the Rectangular Waveguide with a Spherical Ferrite Probe. *2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 26–28 Aug. 2021, pp. 100–104. DOI: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575750.
20. Semenov A., Semenova O., Pinaiev B., Kulas R., Shpylovyi O. Development of a flexible antenna-wristband for wearable wrist-worn infocommunication devices of the LTE standard. *Technology Audit and Production Reserves*. 2022. Vol. 3, Issue 1(65), pp. 20–26. DOI 10.15587/2706-5448.2022.261718

#### References:

1. Lee, J. N., Cho, Y. K., Jung, J. H., & Hyun, S. B. (2020). High-gain sub-terahertz lens horn antenna with a metal guide. In *Electronics Letters* (Vol. 56, Issue 14, pp. 689–691). Institution of Engineering and Technology (IET). <https://doi.org/10.1049/el.2020.0860>
2. Wang, J., Lin, H., Yang, F., Xu, G., & Ge, J. (2022). Design of 94GHz Dual-Polarization Antenna Fed by Diagonal Horn for Cloud Radars. In *IEEE Access* (Vol. 10, pp. 22480–22486). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/access.2022.3154483>
3. He, Y., Zhao, X., Zhao, L., Fan, Z., Wang, J.-K., Zhang, L., Ni, C., & Wu, W.-J. (2021). Design of Broadband Double-Ridge Horn Antenna for Millimeter-Wave Applications. In *IEEE Access* (Vol. 9, pp. 118919–118926). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/access.2021.3107914>
4. Huang, S., Chan, K. Y., Wang, Y., & Ramer, R. (2021). High Gain SIW H-Plane Horn Antenna with 3D Printed Parasitic E-Plane Horn. In *Electronics* (Vol. 10, Issue 19, p. 2391). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/electronics10192391>
5. Wang, P., Wu, Q., He, R.-B., & Luo, W. (2019). Gain and Radiation Pattern Enhancement of the H-Plane Horn Antenna Using a Tapered Dielectric Lens. In *IEEE Access* (Vol. 7, pp. 69101–69107). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/access.2019.2915934>
6. Chang, C., Zhu, X., Liu, G., Fang, J., Xiao, R., Chen, C., Shao, H., Li, J., Huang, H., Zhang, Q., & Zhang, Z.-Q. (2010). DESIGN AND EXPERIMENTS OF THE GW HIGH-POWER MICROWAVE FEED HORN. In *Progress In Electromagnetics Research* (Vol. 101, pp. 157–171). The Electromagnetics Academy. <https://doi.org/10.2528/pier10010202>
7. Jacobs, B., Odendaal, J. W., & Joubert, J. (2012). An Improved Design for a 1–18 GHz Double-Ridged Guide Horn Antenna. In *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (Vol. 60, Issue 9, pp. 4110–4118). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/tap.2012.2207043>
8. Wang, J., Yao, Y., Yu, J., & Chen, X. (2019). Broadband compact smooth horn with flat-top radiation pattern. In *Electronics Letters* (Vol. 55, Issue 3, pp. 119–120). Institution of Engineering and Technology (IET). <https://doi.org/10.1049/el.2018.7541>
9. Broadband TEM Horn Antenna TEMH 6000. Retrieved from [http://schwarzbeck.de/Datenblatt/m\\_temh6000.pdf](http://schwarzbeck.de/Datenblatt/m_temh6000.pdf)
10. High-power horn antennas PowerLOG® PRO series. Retrieved from [https://downloads.aaronia.com/datasheets/antennas/PowerLOG/PowerLOG\\_PRO\\_Horn\\_Antennas\\_Quad\\_only.pdf](https://downloads.aaronia.com/datasheets/antennas/PowerLOG/PowerLOG_PRO_Horn_Antennas_Quad_only.pdf)
11. 3164-06 Open Boundary Quad-Ridged Horn. Retrieved from <https://www.ets-lindgren.com/datasheet/antennas/open-boundary-quad-ridged-horn/4003/400303>
12. 3164-08 Open Boundary Quad-Ridged Horn. Retrieved from <https://www.ets-lindgren.com/datasheet/antennas/open-boundary-quad-ridged-horn/4003/400304>
13. The horn antennas of the PowerLOG® PRO series. Retrieved from <https://aaronia.com/antennas/powerlog-pro-series-horn/>
14. TEBER, A. (2020). Beamforming Radiation Properties of Absorbing/Transparent Zones-Added Horn Antenna. In *GAZI UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE* (Vol. 33, Issue 2, pp. 355–363). Gazi University Journal of Science. <https://doi.org/10.35378/gujs.602204>

- 
15. Tomaz, A., Barroso, J. J., & Hasar, U. C. (2015). Side Lobe Reduction in an X-Band Horn Antenna Loaded by a Wire Medium. In *Journal of Aerospace Technology and Management* (Vol. 7, Issue 3, pp. 307–313). FapUNIFESP (SciELO). <https://doi.org/10.5028/jatm.v7i3.468>
  16. Zhang, Z.-Y., Lu, K., & Leung, K. W. (2022). Gain Enhancement of Horn Antenna Using a Metal Lens. In *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (pp. 1–1). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/tap.2022.3228631>
  17. Patel, A., Vala, A., Mahant, K., Bhatt, P., Chaudhari, J., & Mewada, H. (2022). Performance Analysis of Corrugated Horn Antenna for Liquid Level Measurement Application. In *Lecture Notes in Electrical Engineering* (pp. 65–71). Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-6737-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-19-6737-5_6)
  18. Semenov, A., Semenova, O., Pinaiev, B., Kozin, D., & Shpylovyi, O. (2022). Study of the radiation pattern of a rectangular horn antenna in the operation of multimode propagation of electromagnetic waves. In *Technology audit and production reserves* (Vol. 2, Issue 2(64), pp. 50–55). Private Company Technology Center. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.256560>
  19. Semenov, A., Havrilov, D., Volovyk, A., Stalchenko, O., Kulias, R., & Ilchuk, D. (2021). 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). 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ukrcon53503.2021.9575750>
  20. Semenov, A., Semenova, O., Pinaiev, B., Kulias, R., & Shpylovyi, O. (2022). Development of a flexible antenna-wristband for wearable wrist-worn infocommunication devices of the LTE standard. In *Technology audit and production reserves* (Vol. 3, Issue 1(65), pp. 20–26). Private Company Technology Center. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.261718>