

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-16>

УДК 637.5.02

СЕМЕНОВ Андрій

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-9580-6602>

e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

ГРОМИК Олександр

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0000-0023-0701>

e-mail: te14bhromyk@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ СПРЯМОВАНИХ І ХВИЛЬОВИХ ПАРАМЕТРІВ АНТЕНИ ПОВЕРХНЕВИХ ХВИЛЬ

Об'єктом дослідження роботи є процес випромінювання електромагнітних хвиль антеною поверхневих хвиль. Предметом дослідження є спрямовані та хвильові параметри антени поверхневих хвиль. Запропонована в роботі антена поверхневих хвиль із ребристою сповільнюючою структурою має класичну геометричну конфігурацію та працює в смузі робочих частот від 7,25 ГГц до 7,75 ГГц. Її габаритні розміри - ширина 38 мм, висота 136 мм, довжина 455 мм. Збудження антени здійснено E-секторіальною прямокутною рупорною антеною. Як сповільнююча структура була обрана плоска ребриста структура, що представляє собою періодично повторювальні канавки шириною 2 мм і глибиною 6 мм з ребрами товщиною 2 мм і періодом повторення 4 мм. Поверхневий імпеданс сповільнюючої структури носить індуктивний характер і має величину $j1,65 \text{ Ом}$, $j1,75 \text{ Ом}$ і $j1,87 \text{ Ом}$ відповідно для мінімальної, середньої та максимальної частоти робочого діапазону. У роботі отримані результати електричних розрахунків і математичного моделювання спрямованих і хвильових параметрів антени поверхневих хвиль в робочому діапазоні частот. При мінімальній довжині хвилі $\lambda = 38,7 \text{ мм}$, що відповідає частоті 7,75 ГГц ширина амплітудної діаграми спрямованості $21,9^\circ$, рівень бокових пелюсток 0,33, коефіцієнт спрямованої дії 59,94, вхідний опір 53,96 Ом, коефіцієнт відбиття 0,038 і коефіцієнт стоячої хвилі 1,07. При максимальній довжині хвилі $\lambda = 41,4 \text{ мм}$, що відповідає частоті 7,25 ГГц, ширина амплітудної діаграми спрямованості $25,8^\circ$, рівень бокових пелюсток 0,32, коефіцієнт спрямованої дії 39,93, вхідний опір 47,49 Ом, коефіцієнт відбиття -0,027 і коефіцієнт стоячої хвилі 1,05. В розробленій антені поверхневої хвилі реалізовані оптимальні значення зворотних втрат і коефіцієнта стоячої хвилі. Перевагою запропонованої антени є простота конструкції, сталість вхідного опору на рівні 50 Ом та якісне узгодження в робочому діапазоні частот.

Ключові слова: антена, поверхнева хвиля, випромінювання, хвильовий опір, діаграма спрямованості.

SEMENOV Andriy, HROMYK Oleksandr

Vinnitsia National Technical University

STUDY OF DIRECTED AND WAVE PARAMETERS OF SURFACE WAVE ANTENNAS

The research object of the work is the process of radiation of electromagnetic waves by the antenna of surface waves. The research subject is the surface wave antenna's directional and wave parameters. The proposed surface wave antenna with a ribbed retarder structure has a classic geometric configuration and operates in the operating frequency band from 7.25 GHz to 7.75 GHz. Its dimensions are a width of 38 mm, a height of 136 mm, and a length of 455 mm. The antenna is excited by an E-sectional rectangular horn antenna. As a retarding structure, a flat ribbed structure was chosen, which is a periodically repeating groove 2 mm wide and 6 mm deep with ribs 2 mm thick and a repetition period of 4 mm. The surface impedance of the retarding structure is inductive in nature and has a value of $j1.65 \text{ Ohm}$, $j1.75 \text{ Ohm}$, and $j1.87 \text{ Ohm}$, respectively, for the minimum, middle and maximum frequency of the operating range. The paper obtained the results of electrical calculations and mathematical modeling of the directional and wave parameters of the surface wave antenna in the operating frequency range. At a minimum wavelength of $\lambda = 38.7 \text{ mm}$, which corresponds to a frequency of 7.75 GHz, the width of the amplitude pattern is 21.9° , the level of the side lobes is 0.33, the coefficient of directional action is 59.94, the input resistance is 53.96 Ohm, the reflection coefficient 0.038 and standing wave coefficient 1.07. At a maximum wavelength of $\lambda = 41.4 \text{ mm}$, which corresponds to a frequency of 7.25 GHz, the width of the directional amplitude diagram is 25.8° , the level of the side lobes is 0.32, the directivity factor is 39.93, the input resistance is 47.49 Ohm, the factor reflection -0.027 and standing wave coefficient 1.05. The developed surface wave antenna realizes optimal return loss and standing wave coefficient values. The advantage of the proposed antenna is the simplicity of the design, the constancy of the input resistance at the level of 50 Ohms, and the high-quality matching in the operating frequency range.

Keywords: antenna, surface wave, radiation, wave resistance, pattern diagram.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Антени поверхневих хвиль відносяться до антен біжних хвиль [1]. Під антеною біжної хвилі розуміють такі неперервні чи дискретні системи, збудження яких виконується за законом біжної хвилі з фазовою швидкістю, яка дорівнює або менша швидкості світла [1]. Дане збудження досягається двома шляхами [2]. Перший спосіб застосовується в неперервних системах і полягає в тому, що створюється режим біжної хвилі вздовж самої випромінюючої системи (наприклад, вздовж проводів ромбічної чи

спіральної антен, вздовж стержня діелектричної антени та ін.), при цьому кожний наступний елемент системи живиться з деяким лінійним запізненням за фазою [3].

При другому способі, який застосовується в дискретних системах, потрібне фазовий розподіл забезпечується або відповідною схемою живлення, або шляхом настройки випромінювачів, чи комбінованим способом [4, 5].

В діапазоні сантиметрових хвиль одночасно з діелектричними стержньовими антенами широко застосовуються також імпедансні антени зі сповільненою фазовою швидкістю [3, 4]. Відмінною особливістю таких антен є використання у випромінюючій системі імпедансних структур, які можуть підтримувати поверхневі хвилі [3, 4].

Поверхнева хвиля, яка збуджується невеликим рупором (рис. 1), поширюється вздовж сповільнюючої структури майже без зміни амплітуди поля, оскільки відбиття хвилі від кінця сповільнюючої структури нехтувано мале. На поверхні сповільнюючої структури виникають тангенціальні компоненти електромагнітного поля H_y і E_z , яким згідно теореми еквівалентності можуть бути поставлені у відповідність еквівалентні поверхневі струми j_z^e і j_y^m на площині yz . Розподілення цих струмів вздовж осі z відповідає закону біжної хвилі зі сповільненою фазовою швидкістю, і, таким чином, сповільнюючої структура є еквівалентною лінійною випромінювальною системою біжної хвилі зі сповільненням фазової швидкості.

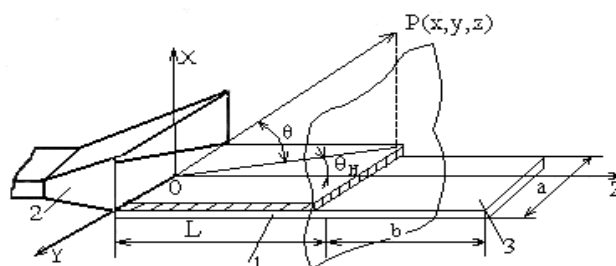


Рис. 1. Конструкція антени поверхневої хвилі:
1 – сповільнювана структура; 2 – збуджувальний пристрій; 3 – екран

Антенні поверхневих хвиль (імпедансні антени) відносяться до класу антен “осьового випромінювання” зі сповільненою фазовою швидкістю [4]. Поверхневими називають електромагнітні хвилі, які поширюються вздовж деякої поверхні і характеризуються тим, що їх амплітуда повільно затухає вздовж цієї поверхні і швидко затухає при віддаленні від поверхні по нормалі. Таким чином, основна частина енергії електромагнітної хвилі переноситься в тонкому шарі, який прилягає до спрямованої поверхні [4].

Поверхневі хвилі утворюються на межі поділу двох середовищ із різними електричними параметрами. Одним з таких середовищ звичайно є повітря, другим є середовище, в якому хвилі поширюються зі сповільненою фазовою швидкістю. Антени поверхневих хвиль є широкодіапазонними, смуга пропускання досягає декілька десятків відсотків.

Антенна поверхневої хвилі складається зі збуджувача й спрямовувача (рис. 1). Збуджувач передає енергію у спрямовувач, вздовж якого рухається поверхнева (сповільнена) хвиля. Випромінювачем є спрямовувач зі сповільнюючою структурою. Для узгодження спрямовувача з повітряним простором його товщину в кінці зменшують, завдяки цьому фазова швидкість на кінці наближується до швидкості світла і мінімізується відбита хвиля. Це дозволяє розглядати антену поверхневих хвиль як систему вісьового випромінювання. З іншої сторони її можна віднести до апертурних антен, розглядаючи в якості апертури поверхню спрямовувача. Антени поверхневих хвиль використовуються в дециметровому і сантиметровому діапазонах хвиль. Перевагою таких антен є простота конструкції та невеликі габарити по висоті в порівнянні з пірамідальними рупорними антенами.

До недоліків антен поверхневих хвиль варто віднести порівняно мале реалізоване підсилення і відносно високий рівень бічних пелюсток діаграми спрямованості. Ширина основної пелюстки діаграми на рівні $2\theta_{0,5}$ складає 15° - 20° . Існують способи, що дозволяють поліпшити спрямовані характеристики таких антен, наприклад, шляхом використання модульованих сповільнюючих структур.

Різні частини антени поверхневої хвилі служать різним цілям. Від конструкції збуджувача залежить ефективність збудження поверхневої хвилі. Сповільнююча структура спрямовує поверхневу хвилю і забезпечує основне випромінювання антени. Поле випромінювання антени поверхневої хвилі є результатом інтерференції поля випромінювання сповільнюючої структури поля, яке випромінюється збуджувачом. Останнє є шкідливим чинником, що спотворює діаграму спрямованості.

Аналіз досліджень та публікацій

В роботі [6] наведено дані про нову антену поверхневих хвиль з високим опором, яка збуджується колімованою поверхневою хвилею. Використаний двовимірний параболічний відбивач зі зміщенням, інтегрований у підкладку [6]. Функціонування прототипу запропонованої антени продемонстровано за допомогою комп'ютерного моделювання [6]. У роботі [7] представлено нову високоімпедансну поверхневу антену, що збуджується колімованою поверхневою хвилею. Пропонована антена складається з двох ідентичних збуджувачів і поверхні з високим імпедансом. Збуджувач побудований на параболічному відбивачі зі зміщеною подачею. Використовуючи техніку інтегрованого в підкладку хвилеводу, систему відбивача інтегровано в плоску підкладку. Поверхня з високим імпедансом утворена періодично розташованим прямокутним мікросмушковим масивом [7]. Роботу запропонованої антени демонстровано шляхом комп'ютерного моделювання та експериментальної перевірки. Неперервне сканування променя здійснюється від -36° до $+35,5^\circ$ в діапазоні частот 16-22 ГГц [7].

У роботі [8] розглянуто синусоїдально-модульовані імпедансні поверхні, що складаються з гексагональних елементарних комірок і використовуються для реалізації антен біжних хвиль зі скануванням частоти в діапазоні 13-18 ГГц. Смугу пропускання антени досліджували з двох точок зору: по-перше, з точки зору смуги узгодження імпедансу, а по-друге, з точки зору сканування смуги пропускання антени [8]. З метою підвищення продуктивності смуги пропускання імпедансу був використаний збуджувач із широкосмуговим переходом. Щоб покращити здатність сканування частоти, використана одновимірна ребриста структура. Збуджувач розташований в кутку, щоб зменшити шкідливу дію зворотного випромінювання [8]. Імпедансна поверхня призначена для створення нахилу променя під кутом 60° на частоті 18 ГГц. Досягнуті характеристики запропонованої антени становлять 32% пропускну здатності та кутове сканування у межах $22^\circ \dots 60^\circ$ [8].

У [9] представлено нову ультратонку поверхню з високим імпедансом, відгук якої не залежить від поляризації та кута падіння падаючої електромагнітної хвилі. Запропонована поверхня з високим імпедансом відбиває падаючу електромагнітну хвилю з одиничною величиною та нульовим зсувом фази в робочому діапазоні частот 1,7–3,0 ГГц [9]. Завдяки дуже малому розміру елементарної комірки $0,1\lambda$ поверхня не викликає розсіювання та поверхневих хвиль [9]. Розроблена поверхня з високим імпедансом застосовується до стандартної антени для покращення підсилення. Використання поверхні з високим імпедансом приводить до дуже компактної конструкції антени порівняно зі звичайним заземленням, яке має бути розташоване на відстані $\lambda/4$ для досягнення максимального підсилення [9]. Збільшення коефіцієнта підсилення, компактність розміру та запобігання поверхневим хвилям є основними перевагами, досягнутими завдяки використанню запропонованої поверхні з високим імпедансом замість звичайної заземленої площини. У роботі [10] розроблено ультратонку антену поверхневих хвиль на основі вигнутої високоімпедансної поверхні, яка має широку можливість сканування променя, якщо хвиля витоку збуджується належним вибором місця подачі. Вибір порту збудження вздовж масиву демонструє можливість сканування променя в діапазоні від -34° до $+34^\circ$. Вигнута антена на основі HIS демонструє досить широку смугу підсилення 3 дБ. Товщина становить близько соті довжини хвилі.

У [11] представлено нову багатопромінену антену поверхневих хвиль із можливістю сканування на 360° за азимутом. Запропонована антена складається з чотирьох ротаційно-симетричних мереж формування променя і мікросмушкової патч-матриці поверхню з високим імпедансом. Ланки формування променя утворені планарним зміщеним параболічним відбивачем, що живиться кількома інтегрованими хвилеводами підкладки. Оскільки поверхня з високим імпедансом спільно використовується чотирма ланками формування променя, тому розмір антени можна зменшити та досягти розширення діапазону сканування антени. У роботі [11] запропонований та експериментально досліджений прототип антени поверхневих хвиль з 28 портами живлення, по 7 у кожній ланці формування променя. Запропонована антена має недорогу, низькопрофільну та одношарову конфігурацію [11]. У [12] представлено методику отримання широкого підсилення та смуги пропускання від надтонкої високоомної антени поверхневих хвиль. Завдяки правильному вибору кількох точок живлення на лінійній антенній решітці у формі собачої кістки її пропускну здатність підсилення максимізується. Ділянки у формі собачої кістки, розподілені вздовж поверхні заземленої підкладки, здатні підтримувати поверхневу хвилю [12]. Здійснено дослідження різних місць живлення антени і забезпечена широка смуга підсилення 5,8 ГГц або 29,89% з використанням багатоточкового збудження [12].

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: розроблення антени поверхневих хвиль сантиметрового діапазону, що має спрямовувач у вигляді металевої ребристої поверхні з високим імпедансом, та дослідження її спрямованих і хвильових параметрів.

Виклад основного матеріалу

Пропонована антена поверхневих хвиль складається з таких конструктивних елементів: сповільнююча структура (рис. 2,а), збуджувального пристрою (рис. 2,б) та узгоджувального пристрою (рис. 2,в).

Сповільнюючу структуру, яка спрямовує поверхневу хвилю, прийнято характеризувати поверхневим імпедансом (поверхневим опором), який визначається відношенням складових електричного і магнітного полів на поверхні структури. Для хвилі типу Е поверхневий імпеданс записується у вигляді

$$Z = \frac{E_z}{H_y} \text{ [Ом]}, \quad (1)$$

де E_z і $\frac{E_z}{H_y}$ – компоненти поперечної площини поля випромінювання електромагнітної хвилі.

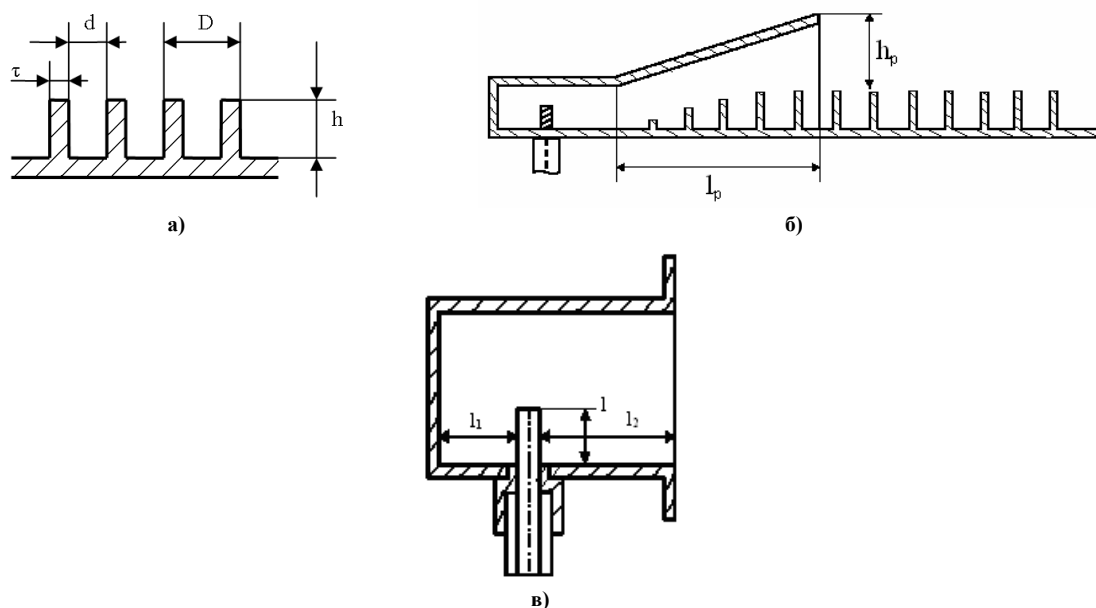


Рис. 2. Елементи антени поверхневої хвилі : а) – сповільнююча структура; б) – збуджувальний пристрій; в) – узгоджувальний пристрій

Як плоскі сповільнюючі структури використовують плоскі ребристі структури або структури у вигляді тонкого шару діелектрика на металевому екрані (підкладці). Ребриста структура (рис. 2,а) являє собою періодично повторювальні канавки шириною d і глибиною h з ребрами товщиною τ та періодом повторення ребер D . Ребриста структура еквівалентна неперервній сповільнюючій поверхні при достатньо малому періоді структури $\beta D \ll 1$ ($D \leq 0,1\lambda$; $D = d + \tau$).

Поле всередині кожної канавки ребристої структури не залежить від осі z і його розподілення відповідає розподіленню поля хвилі ТЕМ. Тому канавки ребристої структури можна розглядати як відрізки короткозамкнутої лінії, вхідний опір якої при $h < \frac{\lambda}{4}$ має індуктивний характер. При $h > \frac{\lambda}{4}$ вхідний опір короткозамкнутої лінії має ємнісний характер і ребриста структура не є сповільнюючою. Формула для розрахунку поверхневого імпедансу має вигляд [1, 4]

$$Z = j \frac{d}{d + \tau} w \cdot \operatorname{tg}(kh) \text{ [Ом]}, \quad (2)$$

де $w = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ – хвильовий опір повітряного середовища, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число, d , τ і h – геометричні розміри сповільнюючої ребристої структури на рис. 2,а.

У роботі було розроблено конструкцію антени поверхневих хвиль за таких вихідних умов: робочий

діапазон частот від 7,25 до 7,75 ГГц; коефіцієнт спрямованої дії 45; коефіцієнт стійкої хвилі у фідер не більше ніж 1,15; потужність яка підводиться до антени 10 Вт; поляризація електромагнітного поля вертикальна. Виходячи з цього були обрані такі розміри ребристої структури (рис. 2,а): глибина канавки $h = 6$ мм; ширина канавки $d = 2$ мм; товщина ребер канавки $\tau = 2$ мм; період повторення ребер $D = 4$ мм.

Розроблення та дослідження антени поверхневих хвиль було здійснено для трьох довжин хвиль 38,7 мм, 40,05 мм і 41,4 мм, що відповідають максимальній, середній та мінімальній частотам робочого діапазону.

Згідно формули (2) величина поверхневого імпедансу для мінімальної, середньої та максимальної частоти робочого діапазону відповідно становить $j1,65$ Ом, $j1,75$ Ом і $j1,87$ Ом. Тобто вхідний опір ребристої структури має індуктивний характер. Оскільки поверхневий імпеданс більше нуля на граничних та середній довжинах хвиль робочого діапазону частот, тому розміри сповільнюючої структури вибрано правильно.

Збуджуючий пристрій антени (див. рис. 2,б) призначений для трансформації енергії, яка підводиться до антени в енергію поверхневої хвилі, що випромінюється в простір сповільнюючою структурою. Конструктивно збуджуючий пристрій представляє собою розкрит Е-секторіального рупора, в який заходить сповільнююча структура (рис. 2,б).

В залежності від сповільнення поверхневої хвилі в розкриті рупора його розмір h_p повинен бути таким, щоб зменшення амплітуди поля хвилі на цій довжині було не менше 10 дБ (0,316 разів) через вплив верхньої стінки рупора. Виходячи з формули поля антени поверхневої хвилі [1, 4]

$$E_x = \frac{\beta}{\omega \varepsilon} H_0 e^{-\alpha h_p}, \quad 1 = \frac{\beta}{\omega \varepsilon} e^{0,316 h_p}, \quad \ln \frac{2\pi f \varepsilon}{\beta} = 0,316 h_p, \quad (3)$$

$$\text{де } \beta^2 = k^2 + \alpha^2, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \ln \frac{2\pi \cdot 4,25 \cdot 10^{-9}}{74,04} = 0,316 h_p, \quad \text{тоді } h_p = 64,63 \approx 65 \text{ мм.}$$

Конструкція узгоджуючого пристрою показана на рис. 2,в. В більшості випадків довжина відрізка хвилевода l_2 від збуджуючого штиря до закорочувальної стінки вибирається як $l_1 \approx \frac{\lambda_{xв}}{4}$, де $\lambda_{xв}$ - це довжина хвилі в прямокутному хвилеводі.

Довжина хвилевода l_2 від збуджуючого пристрою до горловини рупора вибирається з умови фільтрації вищих типів хвиль. Вищі типи хвиль не повинні проходити в горловину рупора і потім в його розкрит, для цього їхня амплітуда повинна зменшитися на довжині l_2 приблизно в 100 разів. Найближчою хвилею вищого типу в прямокутному хвилеводі є хвиля H_{20} , відносна зміна амплітуди якої в 100 разів буде при

$$l_2 = \frac{4,6\lambda}{2\pi \sqrt{\left(\lambda / \lambda_{крH_{20}}\right)^2 - 1}} \text{ [мм]}, \quad (4)$$

де $\lambda_{крH_{20}} = a$ - критична довжина хвилі H_{20} .

Активну складову вхідного опору можна вважати рівною опору випромінювання штиря в хвилеводі R_{Σ} . Вона повинна бути рівною хвильовому опору фідера (50 Ом). Опір випромінювання штиря в прямокутному хвилеводі в режимі біжної хвилі визначається наступним співвідношенням

$$R_{ex} = R_{\Sigma} = \frac{2\rho_{xв} h_0^2}{ab} \sin^2 \left(\frac{\pi}{a} x_1 \right) \sin^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda_{xв}} l_1 \right), \quad (5)$$

де a і b - розміри поперечного перетину хвилевода; x_1 - положення штиря на широкій стінці хвилевода, найчастіше штир розміщується всередині широкої стінки, тобто $x_1 = \frac{a}{2}$ (мм); l_1 - відстань від штиря до закорочуючої стінки хвилевода; $\lambda_{xв}$ - довжина хвилі в хвилеводі; $\rho_{xв}$ - хвильовий опір хвилевода.

Діючу висоту штиря в хвилеводі визначають з умови, що $R_{ex} = R_{\Sigma} = 50$ Ом. Тоді

$$h_o = \sqrt{\frac{R_{ex} \cdot a \cdot b}{2\rho_{x_{\text{ex}}} \sin^2\left(\frac{\pi}{a} x_1\right) \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_{x_{\text{ex}}}} l_1\right)}} \text{ [MM]}. \quad (6)$$

Геометричну висоту штиря l визначено з формули

$$h_o = \int_0^l \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} l\right) dl = \frac{\lambda}{2\pi} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} l\right)\right] \text{ [MM]}. \quad (7)$$

Креслення розробленої антени поверхневої хвилі подане на рис. 3.

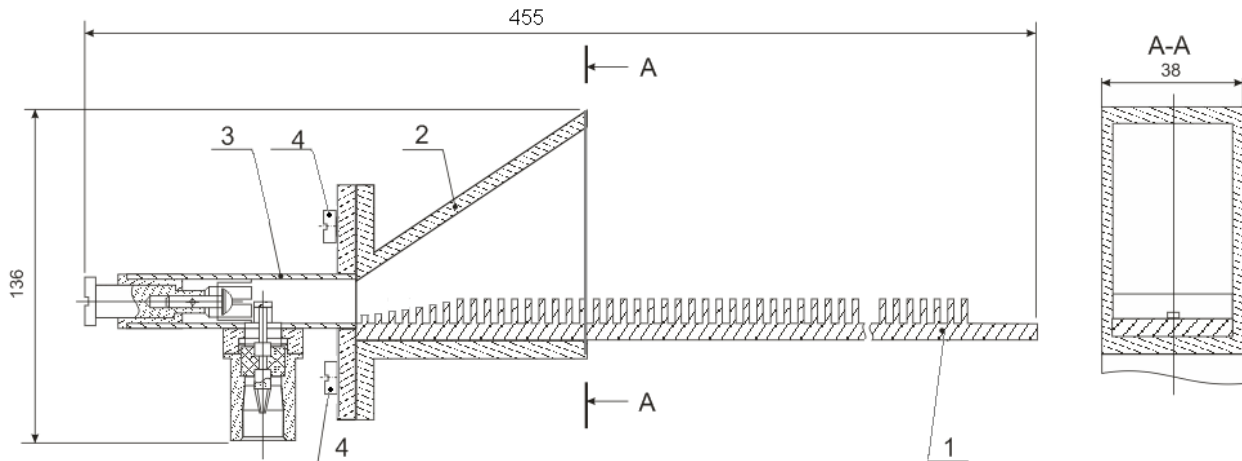


Рис. 3. Креслення розробленої антени поверхневої хвилі:

1 – сповільнювана структура; 2 – рупор; 3 – збуджувальний пристрій з коаксіально-хвилеводним переходом; 4 – болт

Розрахунок діаграми спрямованості антени поверхневої хвилі здійснено за умови формування біжної хвилі при неперервному та рівномірному розподілу струму по довжині антени [1]. Ширина діаграми спрямованості антени оцінена по формулі

$$2\theta_{0,5} = 61^\circ \sqrt{\frac{\lambda}{L}} \text{ [MM]}, \quad (8)$$

де L - довжина сповільнюючої системи (253 мм).

Характерною особливістю антени поверхневої хвилі, як і всього класу антен біжної хвилі, є відносно слабка залежність ширини амплітудної діаграми спрямованості від її електричної довжини L/λ . Згідно формули (8) ширина амплітудної діаграми спрямованості розробленої антени поверхневих хвиль на мінімальній, середній та максимальній частотах робочого діапазону складає відповідно 24,8°, 24,1°, 23,3°.

Нормована діаграма спрямованості антени поверхневих хвиль у меридіональній площині визначається

$$F(\Theta) = \frac{\sin\left[\frac{kL}{2}\left(\left(\frac{\lambda}{2L} + 1\right) - \cos(\Theta)\right)\right]}{\frac{kL}{2}\left(\left(\frac{\lambda}{2L} + 1\right) - \cos(\Theta)\right)}, \quad (9)$$

де Θ - кут у напрямку в точку спостереження.

Графік нормованої діаграма спрямованості розробленої антени поверхневих хвиль у меридіональній площині на середній частоті робочого діапазону наведений на рис. 4. Користуючись співвідношенням (9) отримані такі чисельні значення параметрів нормованої амплітудної діаграми спрямованості (АДС):

1) при мінімальній довжині хвилі $\lambda=38,7$ мм ширина АДС - 0,38рад = 21,9°, а рівень бокових пелюсток – 0,33;

2) при середній довжині хвилі $\lambda=40,05$ мм ширина АДС - $0,38\text{рад} = 21,9^\circ$, а рівень бокових пелюсток – $0,35$;

3) При максимальній довжині хвилі $\lambda=41,4$ мм ширина АДС - $0,45\text{рад} = 25,8^\circ$, а рівень бокових пелюсток – $0,32$.

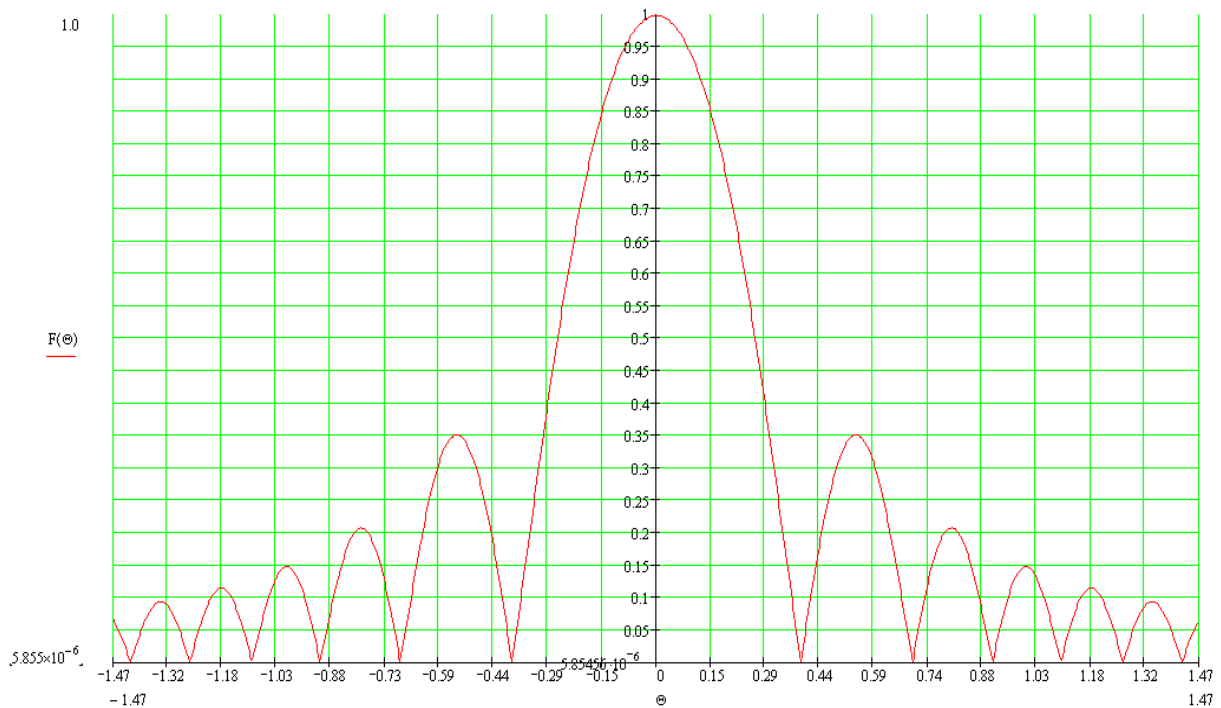


Рис. 4. Нормована діаграма спрямованості розробленої антени поверхневих хвиль у меридіональній площині на середній частоті робочого діапазону

Графік залежності теоретичної і практичної ширини головної пелюстки амплітуди діаграми спрямованості на різних довжинах хвилі в діапазоні робочих частот наведений на рис. 5. Як видно з графіка на рис. 5, теоретичні і практичні значення ширини діаграми спрямованості наближено збігаються.

По результатах математичного моделювання в роботі був розрахований коефіцієнт спрямованої дії антени поверхневих хвиль. Коефіцієнт спрямованої дії розробленої антени поверхневих хвиль становить 39,93, 51,43 і 59,94 відповідно на мінімальній, середній та максимальній частотах робочого діапазону. На рис. 6 наведений графік коефіцієнта спрямованої дії розробленої антени поверхневих хвиль у робочому діапазоні частот.

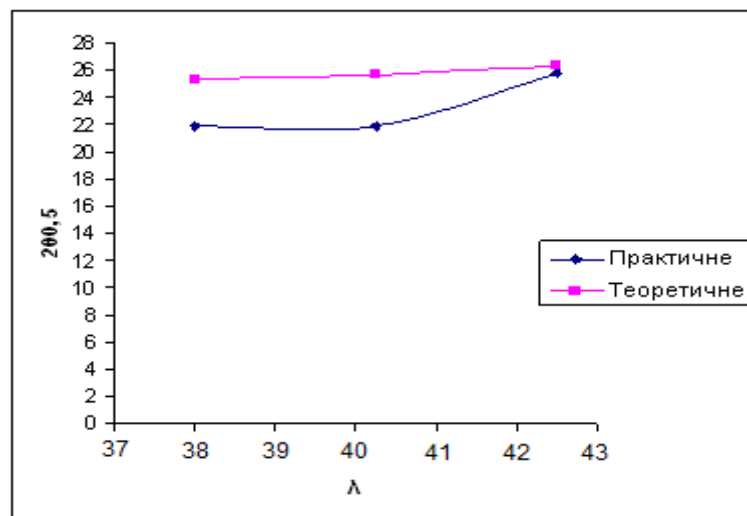


Рис. 5. Графік залежності теоретичної і практичної ширини головної пелюстки діаграми на різних довжинах хвилі в діапазоні робочих частот

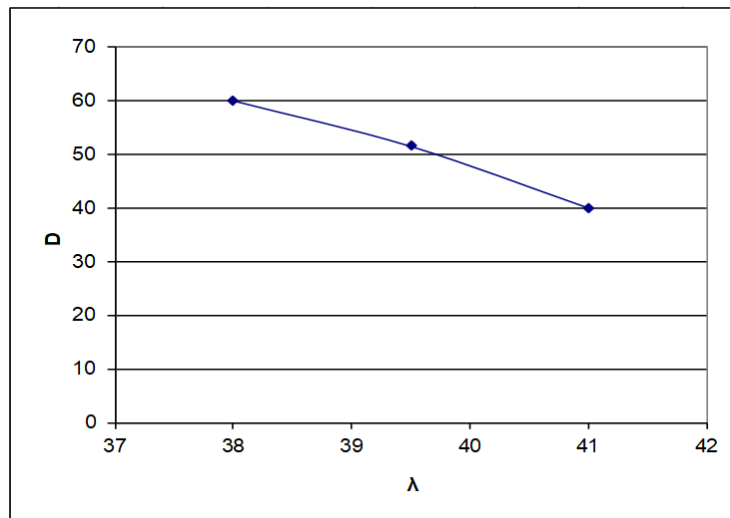


Рис. 6. Графік коефіцієнта спрямованої дії розробленої антени поверхневих хвиль в робочому діапазоні частот

Коефіцієнт стоячої хвилі розробленої антени поверхневих хвиль на граничних частотах робочого діапазону був розрахований по формулі

$$K_{ст.у} = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}, \quad (10)$$

де коефіцієнт відбиття та вхідний опір антени розраховані відповідно за співвідношеннями

$\rho = \frac{z_n - z_{ex}}{z_n + z_{ex}} = \frac{R_{ex} - 50}{R_{ex} + 50}$ і $R_{ex} = \frac{2 \cdot 120 \cdot \pi \cdot \frac{\lambda_{хв}}{\lambda} \cdot h_0^2}{a \cdot b}$. Для частоти 7,75 ГГц ($\lambda_{min} = 38,7$ мм) вхідний опір антени становить 53,96 Ом, коефіцієнт відбиття 0,038 і коефіцієнт стоячої хвилі 1,07. Для частоти 7,25 ГГц ($\lambda_{max} = 41,4$ мм) вхідний опір антени становить 47,49 Ом, коефіцієнт відбиття -0,027 і коефіцієнт стоячої хвилі 1,05.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В даній роботі було розроблено антену поверхневих хвиль із ребристою сповільнюючою структурою для діапазону частот 7,25...7,75 ГГц та виконано дослідження її спрямованих і хвильових властивостей. Її перевагою є низький коефіцієнт стоячої хвилі та забезпечення вхідного опору антени на рівні 50 Ом в робочому діапазоні частот. Дана антена має досить просту конструкцію, яка не вимагає високоточних і складних розрахунків. Ширину діаграми спрямованості $2\theta_{0,5} = 21,9^\circ$ у вузькому діапазоні частот 7,5...7,75 ГГц вдалось забезпечити постійною. Коефіцієнт спрямованої дії розробленої антени поверхневих хвиль становить 39,93, 51,43 і 59,94 відповідно на мінімальній, середній та максимальній частотах робочого діапазону.

В таких антенах можуть бути реалізовані оптимальні значення зворотних втрат і коефіцієнта стоячої хвилі. Це дозволяє забезпечити якісне узгодження антени поверхневої хвилі з передавачем у робочому діапазоні частот. Широкий діапазон частот, низький коефіцієнт стоячої хвилі і простота конструкції антен поверхневої хвилі є основними їх перевагами. У роботі встановлено, що доцільно використовувати антену поверхневої хвилі на верхніх частотах робочого діапазону.

Література

1. Constantine A. Balanis. Antenna Theory: Analysis and Design. 4th Edition. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2018. 1104 p. ISBN 978-1-11864-206-1
2. Antenna Handbook: Theory, Applications, and Design. Y. T. Lo, S. W. Lee (Eds). Springer New York, NY, 2013, 2305 p. ISBN 978-1-4615-6461-4. DOI <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6459-1>
3. S. Drabowitch, A. Papiernik, H. Griffiths, J. Encinas. Modern Antennas. Hugh Griffiths, Bradford L. Smith (Eds). Springer New York, NY, 2013, 631 p. e-ISBN 978-1-4757-2758-6. DOI <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2758-6>
4. Encyclopedia of Wireless Networks. Xuemin (Sherman) Shen, Xiaodong Lin, Kuan Zhang (Eds). Springer Nature Switzerland AG, 2020, 1515 p. ISBN 978-3-319-78261-4. DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-319-78262-1>

5. The ARRL Antenna Book: The Ultimate Reference for Amateur Radio Antennas, Transmission Lines and Propagation (ARRL Antenna Book), 21st Edition. ARRL Publishing, Newington, USA, 2007. 905 p. ISBN 978-0-87259-987-1
6. Z. L. Ma, C. H. Chan, K. B. Ng and L. J. Jiang, "A high impedance surface based leaky-wave antenna excited by collimated surface-wave," 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego, CA, USA, 2017, pp. 289-290, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072187.
7. Z. L. Ma, C. H. Chan, K. B. Ng and L. J. Jiang, "A Collimated Surface-Wave-Excited High-Impedance Surface Leaky-Wave Antenna," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 16, pp. 2082-2085, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2017.2696302.
8. H. Oraizi, A. Amini, A. Abdolali and A. M. Karimimehr, "Design of Wideband Leaky-Wave Antenna Using Sinusoidally Modulated Impedance Surface Based on the Holography Theory," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 17, no. 10, pp. 1807-1811, Oct. 2018, doi: 10.1109/LAWP.2018.2866712.
9. M. I. Khan, F. A. Tahir and M. A. Tarar, "A novel polarization independent angularly stable high impedance surface for antenna miniaturization," 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego, CA, USA, 2017, pp. 1079-1080, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072582.
10. M. M. Reazul Haque Tanmoy, S. I. Latif, A. T. Almutawa and F. Capolino, "Beamsteering Capability of a Leaky Wave-Based Curved High Impedance Surface Antenna," 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, Montreal, QC, Canada, 2020, pp. 841-842, doi: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9330454.
11. Z. L. Ma and C. H. Chan, "A Novel Surface-Wave-Based High-Impedance Surface Multibeam Antenna With Full Azimuth Coverage," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 65, no. 4, pp. 1579-1588, April 2017, doi: 10.1109/TAP.2017.2670320.
12. M. M. R. H. Tanmoy, S. I. Latif, A. T. Almutawa, F. Capolino and M. M. Hossain, "Wide Gain-Bandwidth from an Ultrathin High Impedance Surface-Based Leaky Wave Antenna using Multi-Feed Excitation," 2020 SoutheastCon, Raleigh, NC, USA, 2020, pp. 1-2, doi: 10.1109/SoutheastCon44009.2020.9249724.

References

1. Constantine A. Balanis. Antenna Theory: Analysis and Design. 4th Edition. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2018. 1104 p. ISBN 978-1-11864-206-1
2. Antenna Handbook: Theory, Applications, and Design. Y. T. Lo, S. W. Lee (Eds). Springer New York, NY, 2013, 2305 p. ISBN 978-1-4615-6461-4. DOI <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6459-1>
3. S. Drabowitch, A. Papiernik, H. Griffiths, J. Encinas. Modern Antennas. Hugh Griffiths, Bradford L. Smith (Eds). Springer New York, NY, 2013, 631 p. e-ISBN 978-1-4757-2758-6. DOI <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2758-6>
4. Encyclopedia of Wireless Networks. Xuemin (Sherman) Shen, Xiaodong Lin, Kuan Zhang (Eds). Springer Nature Switzerland AG, 2020, 1515 p. ISBN 978-3-319-78261-4. DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-319-78262-1>
5. The ARRL Antenna Book: The Ultimate Reference for Amateur Radio Antennas, Transmission Lines and Propagation (ARRL Antenna Book), 21st Edition. ARRL Publishing, Newington, USA, 2007. 905 p. ISBN 978-0-87259-987-1
6. Z. L. Ma, C. H. Chan, K. B. Ng and L. J. Jiang, "A high impedance surface based leaky-wave antenna excited by collimated surface-wave," 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego, CA, USA, 2017, pp. 289-290, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072187.
7. Z. L. Ma, C. H. Chan, K. B. Ng and L. J. Jiang, "A Collimated Surface-Wave-Excited High-Impedance Surface Leaky-Wave Antenna," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 16, pp. 2082-2085, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2017.2696302.
8. H. Oraizi, A. Amini, A. Abdolali and A. M. Karimimehr, "Design of Wideband Leaky-Wave Antenna Using Sinusoidally Modulated Impedance Surface Based on the Holography Theory," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 17, no. 10, pp. 1807-1811, Oct. 2018, doi: 10.1109/LAWP.2018.2866712.
9. M. I. Khan, F. A. Tahir and M. A. Tarar, "A novel polarization independent angularly stable high impedance surface for antenna miniaturization," 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego, CA, USA, 2017, pp. 1079-1080, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072582.
10. M. M. Reazul Haque Tanmoy, S. I. Latif, A. T. Almutawa and F. Capolino, "Beamsteering Capability of a Leaky Wave-Based Curved High Impedance Surface Antenna," 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, Montreal, QC, Canada, 2020, pp. 841-842, doi: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9330454.
11. Z. L. Ma and C. H. Chan, "A Novel Surface-Wave-Based High-Impedance Surface Multibeam Antenna With Full Azimuth Coverage," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 65, no. 4, pp. 1579-1588, April 2017, doi: 10.1109/TAP.2017.2670320.
12. M. M. R. H. Tanmoy, S. I. Latif, A. T. Almutawa, F. Capolino and M. M. Hossain, "Wide Gain-Bandwidth from an Ultrathin High Impedance Surface-Based Leaky Wave Antenna using Multi-Feed Excitation," 2020 SoutheastCon, Raleigh, NC, USA, 2020, pp. 1-2, doi: 10.1109/SoutheastCon44009.2020.9249724.