

# АНТЕНИ ТА ПРИСТРОЇ НВЧ

УДК 621.372.852.1

Віктор Гоблик, Олексій Ліске

Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій

## МОДЕЛЮВАННЯ АНТЕН НА БАЗІ ЩІЛИННОЇ ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ

© Гоблик Віктор, Ліске Олексій, 2004

**Подано результати аналізу мікросмужкової антени на базі щілинної лінії передачі за допомогою методу наведених ЕРС. Отримані результати підтвержені експериментально.**

**Results of the analysis of the microstrip antenna based on a slot line with the help of a method of moments are submitted. The obtained results were confirmed experimentally.**

### Вступ

Використання смужкових ліній передачі зумовило створення спеціальних смужкових антен, які виготовляються друкованим методом [1]. Мікросмужкові антени широко застосовуються в аерокосмічних комплексах та в переносних системах безпроводного зв'язку [2].

Існує велика кількість різновидів мікросмужкових антен. Найбільше застосування знайшли друковані випромінювачі резонаторного та нерезонаторного типів різної геометричної форми. Найпоширенішими є мікросмужкові антени прямокутної, круглої або трикутної форми [3]. Проводяться дослідження мікросмужкових антен, в яких використовується щілина як випромінюючий елемент. В [4] наведено результати досліджень прямокутної мікросмужкової антени з U-подібною щілиною. Аналіз петлевої щілинної антени з компланарним живленням [5, 6] показав переваги таких антен порівняно з іншими друкованими випромінюючими елементами: ширша смуга робочих частот, кращі можливості узгодження вхідного опору.

Існує клас антен, які називають „ антени на базі щілинної лінії передачі ”. Перевагами цих антен є простота конструкції, високоефективні техніко-економічні показники, великі потенційні можливості для застосування в сучасних інформаційних технологіях. Відсутність суворої теорії обумовлює потребу у вивченні таких структур.

У цій роботі наведено результати аналізу антени, яка являє собою щілину, прорізану в провідному екрані, розташованому на діелектричній підкладці. Для дослідження випромінюючих властивостей антени застосовано метод наведених ЕРС.

### Формулювання задачі

Антенна на базі щілинної лінії передачі (рис. 1, а) складається з таких елементів: щілинної лінії (1), прорізаної в металевому екрані (2), з прилеглим шаром діелектрика (3) завтовшки  $h$  і відносною діелектричною проникністю  $\epsilon$ .

Живлення підводиться в точку А за допомогою коаксіального кабеля.

Суворий підхід до розрахунку мікросмужкової антени полягає в тому, що складається інтегральне рівняння відносно струмів, які протікають по поверхні антени.

Умовно розіб'ємо площу мікросмужкової антени вздовж осі Y на тонкі смужки (рис. 1, б). У цьому разі мікросмужкову антену можна розглядати як плоску антенну решітку з лінійних вертикальних вібраторів з послідовною схемою живлення. Щілинна лінія відіграє роль фідера, який послідовно живить вібратори від точки А до точки В. Поле антени в точці, яка знаходиться в дальній зоні, є результатом інтерференції полів, що випромінюються лінійними вібраторами.

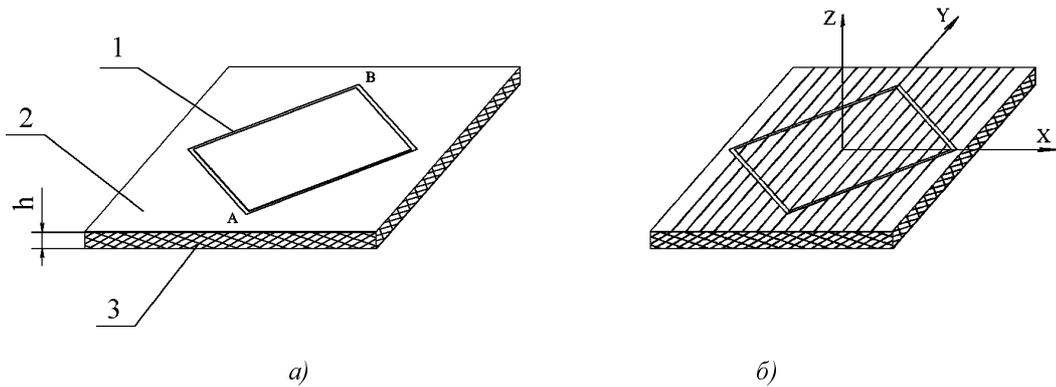


Рис. 1. Антена на базі циліндричної лінії передачі

Враховуючи це, мікросмужкову антену можна подати у вигляді антенної решітки, зображеної на рис. 2. Антенна решітка складається з двох антен біжучої хвилі I і II, увімкнених в точці A паралельно до лінії живлення з хвилевим опором  $Z_{x\beta}$ . В точці B вони навантажені на опір  $Z_T$ .

В точці A підведена до антени потужність ділиться наполовину, одна половина поступає в плече I, а інша, відповідно, в плече II. Щільні лінії I та II можуть мати довільну геометричну форму. Обидві лінії сходяться в точці B. Залежно від виду навантаження в точці B можливі декілька режимів роботи антени: 1) режим біжучої хвилі, – якщо в точці B лінії навантажені узгодженим навантаженням; 2) режим стоячої хвилі – в точці B лінії навантажені на короткозамкнуте навантаження; 3) режим змішаної хвилі, коли в точці B відсутнє навантаження, при цьому електромагнітна хвиля з плеча I поступає в плече II, і навпаки.

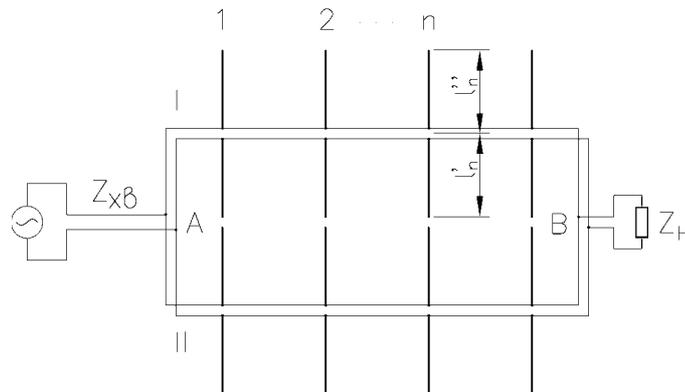


Рис. 2. Еквівалент мікросмужкової антени у вигляді антени біжучої хвилі

Антенні решітки I, II складаються з лінійних вібраторів, які в загальному можуть мати плечі  $l_n'$  і  $l_n''$  однакової або різної довжини. Лінійні вібратори збуджуються за допомогою електромагнітної хвилі, що поширюється вздовж ліній живлення з певною фазовою швидкістю.

Для числового розрахунку, виготовлення та вимірювання була вибрана антена, зображена на рис. 3, а. Поверхню антени подамо лінійними симетричними вібраторами (рис. 3, б), точки живлення яких розташовані вздовж сторін фігури AC'BC''. На ділянках AD', AD'', E'B, E''B вібратори мають однакову довжину, а на ділянках D'C', D''C'', C'E', C''E'' довжина вібраторів є лінійно змінною вздовж лінії живлення. Кількість вібраторів на ділянці AC' дорівнює N, загальна кількість вібраторів в решітці дорівнює 4N. Якщо  $N \rightarrow \infty$ , то антенна решітка перетворюється в неперервну систему випромінювачів, тобто мікросмужкову антену, що зображена на рис. 3, а.

Між випромінювачами антенної решітки існує взаємодія. Кожний елемент решітки не тільки випромінює електромагнітну хвилю у вільний простір, але також збуджує сусідні елементи, і

навпаки, збуджується ними. Поля, що наводяться в кожному елементі антенної решітки, змінюють їх напрямленість і вхідний опір. Для дослідження характеристик випромінювання антенної решітки використаємо метод наведених ЕРС.

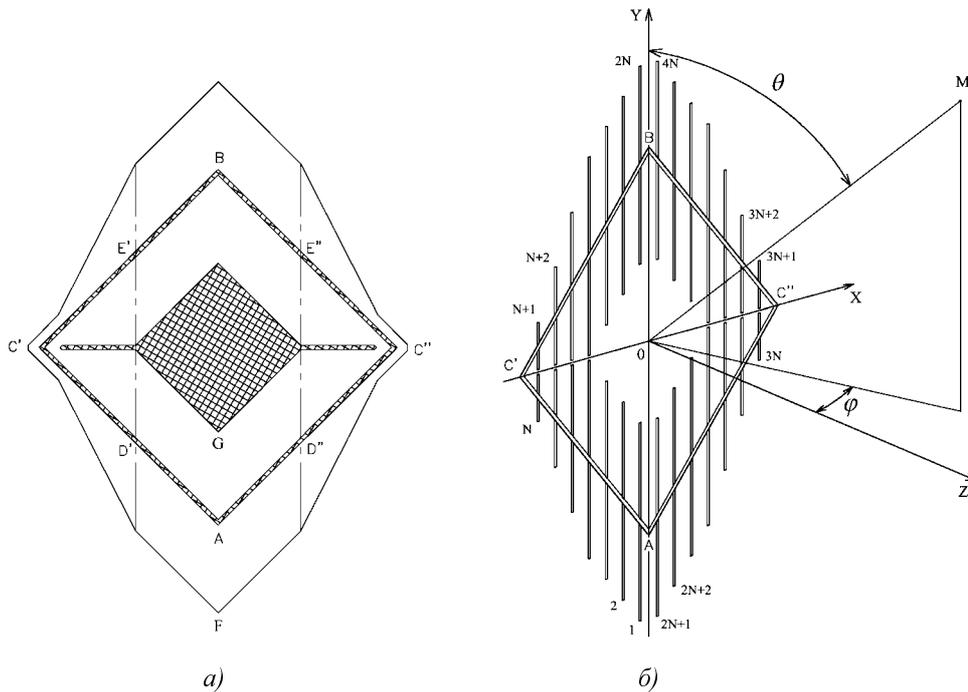


Рис. 3. Антена на базі щільної лінії передачі: а – зображення мікросмушкової антени; б – антенна решітка з лінійних симетричних вібраторів

Розглянемо два лінійні симетричні вібратори  $i, j$  довільної довжини, які паралельно розташовані в одній площині в будь-яких точках геометричної фігури  $AC'BC''$  (рис. 4). Координати точки живлення  $n$ -го вібратора описуються рівняннями  $y_n = f_y(n)$ ,  $x_n = f_x(n)$ . Взаємний опір між цими вібраторами залежить від їх взаємного розташування та довжини плеча кожного з вібраторів  $l_i, l_j$ . Зміщення між вібраторами  $i$  та  $j$  по осях  $X, Y$  відповідно дорівнює:  $x_{i,j} = |x_i - x_j|$ ,  $y_{i,j} = |y_i - y_j|$ .

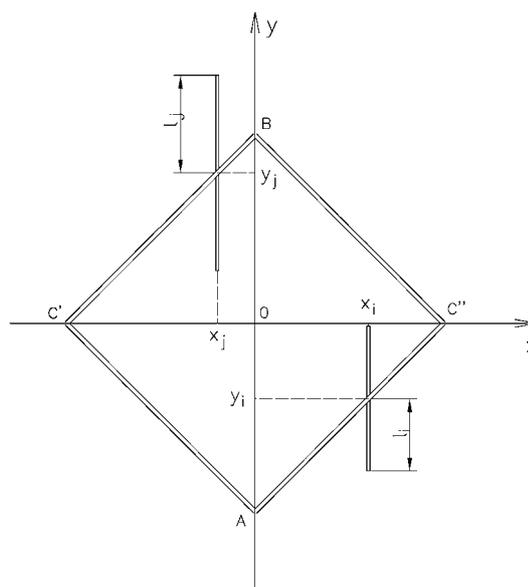


Рис. 4. Два симетричні вібратори довільної довжини, розташовані в площині  $XOY$

Взаємний опір між двома лінійними симетричними вібраторами, розташованими у вільному просторі паралельно до однієї площини з врахуванням зсуву по вертикалі, можна вивести з формули, наведеної в [7], і записати як

$$z_{i,j} = i \cdot \frac{30}{\sin(kl_i)\sin(kl_j)} \int_{-l_i}^{l_i} \sin(k(l_i - |x|)) \left[ \frac{e^{-ik\sqrt{x_{i,j}^2 + (l_j - y_{i,j} - x)^2}}}{\sqrt{d_{i,j}^2 + (l_j - h_{i,j} - x)^2}} + \dots \right. \\ \left. + \frac{e^{-ik\sqrt{x_{i,j}^2 + (l_j + y_{i,j} + x)^2}}}{\sqrt{x_{i,j}^2 + (l_j + y_{i,j} + x)^2}} + \frac{e^{-ik\sqrt{x_{i,j}^2 + (y_{i,j} + x)^2}}}{\sqrt{x_{i,j}^2 + (y_{i,j} + x)^2}} 2 \cos(kl_j) \right] dx. \quad (1)$$

Розподіл струму по довжині  $i$ -го симетричного вібратора задається співвідношенням

$$I(z) = \frac{I_0}{\sin kl_i} \sin k(l_i - |x|), \quad (2)$$

де  $I_0$  – струм живлення електричного вібратора в точці прикладення напруги  $U$ .

Для системи з  $4N$  вібраторів можна записати:

$$\begin{bmatrix} Z_{11}, Z_{12}, \dots, Z_{1-4N} \\ Z_{21}, Z_{22}, \dots, Z_{2-4N} \\ \vdots \\ Z_{4N-1}, \dots, Z_{4N-4N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{4N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_{4N} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

звідки можна знайти невідомий вектор-стовпець струмів.

Напруга вздовж лінії має рівномірний розподіл і описується коефіцієнтом послаблення лінії. Елементи вектора  $|U|$  задаються в такий спосіб:

$$U_n = U_m e^{-\gamma L_n}, \quad n = 1, 2, \dots, 4N, \quad (5)$$

де  $L_n$  – довжина лінії живлення до  $n$ -го вібратора;  $U_m$  – амплітуда напруги живлення антенної решітки в точці  $A$ ;  $\gamma$  – стала поширення щілинної лінії передачі.

Коефіцієнт  $\gamma$  дорівнює

$$\gamma = \alpha + i \frac{2\pi}{\lambda_n}, \quad (6)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт затухання;  $\lambda_n = \xi \cdot c / f$  – довжина хвилі в щілинній лінії.

Коефіцієнт сповільнення  $\xi$  залежить від параметрів щілинної лінії передачі,  $\xi = 1 / \sqrt{\epsilon_{ef}}$ .

Діаграма напрямленості антенної решітки в площині  $E$ , яка збігається з площиною  $YOZ$ , описується таким співвідношенням [8]:

$$f(\theta) = \sum_{n=1}^{4N} f_n(\theta) I_n e^{iky_n \sin \theta}, \quad (7)$$

де  $\theta$  – кут, який відраховується в площині  $E$  від осі  $OZ$  і змінюється від  $-\pi$  до  $\pi$ ;  $y_n$  – вертикальне зміщення  $n$ -го вібратора від осі  $OX$ ;  $f_n(\theta)$  – діаграма напрямленості  $n$ -го випромінювача в площині  $E$ .

Діаграму напрямленості в площині  $H$ , яка збігається з площиною  $XOZ$ , знаходимо за формулою [8]

$$f(\psi) = \sum_{n=1}^{4N} I_n e^{ikx_n \sin \psi}, \quad (8)$$

де  $\psi$  – кут, який відраховується в площині  $H$  від осі  $OZ$  і змінюється від  $-\pi$  до  $\pi$ ;  $x_n$  – горизонтальне зміщення  $n$ -го вібратора від осі  $OY$ .

В площині Н діаграма напрямленості симетричного лінійного вібратора є ненапрявленою, тому в формулі (8) відсутній множник напрямленості одиничного вібратора.

### Числові результати

Розрахунки проводились при загальній кількості елементів антенної решітки (рис. 3,б.) 36 і 252. Коефіцієнт сповільнення щілинної лінії  $\xi = 0.63$ . Затуханням в щілинній лінії можна знехтувати, прийнявши  $\alpha = 0$ .

Для оцінки адекватності математичної моделі фізичній ситуації була виготовлена мікросмужкова антена, зображена на рис. 3, а, з такими параметрами: товщина діелектрика  $h=1.5$  мм, відносна діелектрична проникність  $\epsilon = 5.5$ , фігура АС'BC'' являє собою квадрат, сторона якого  $AC' = 0.23 \lambda$ , відрізок  $AD' = 0.09 \lambda$ , довжина відрізка FG (відповідно і довжина симетричних вібраторів антенної решітки (рис. 2, б, на ділянці AD')) дорівнює  $0.19 \lambda$ . Довжина хвилі у вільному просторі  $\lambda = 28$  см. Ширина щілини вибрана згідно з [9] так, щоб хвильовий опір щілинної лінії дорівнював  $z_{xв} = 100$  Ом. Живлення антени здійснюється за допомогою коаксіального кабеля з хвильовим опором 50 Ом. Оплетіння під'єднане до зовнішньої провідної поверхні щілинної лінії, а центральна жила – до внутрішньої. В точці В щілинні лінії I і II навантажені резистором, опір якого дорівнює  $z_{II} = z_{xв} / 2 = 50$  Ом.

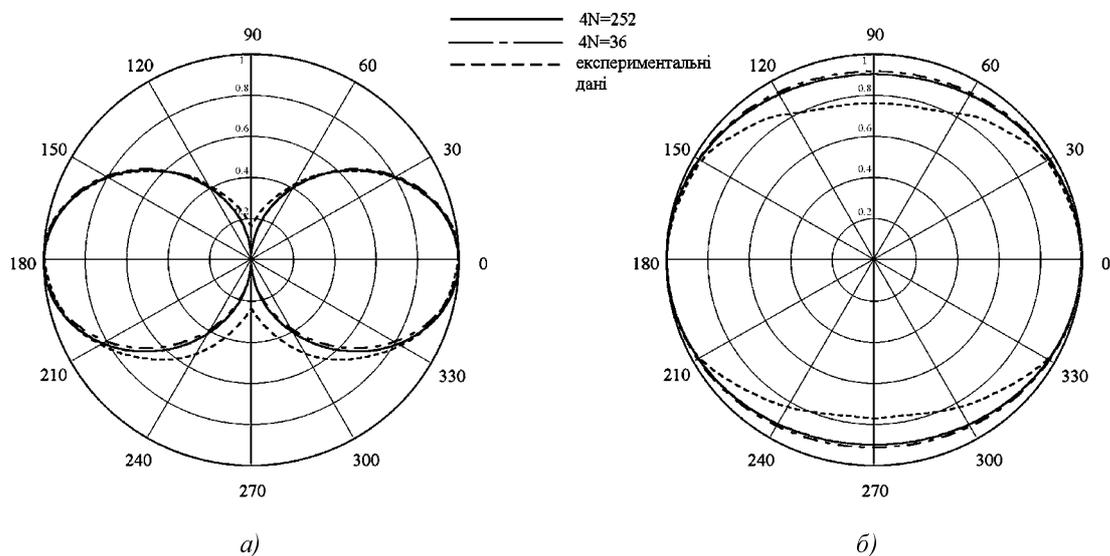


Рис. 5. Діаграма напрямленості мікросмужкової антени: а – в Е-площині; б – в Н-площині

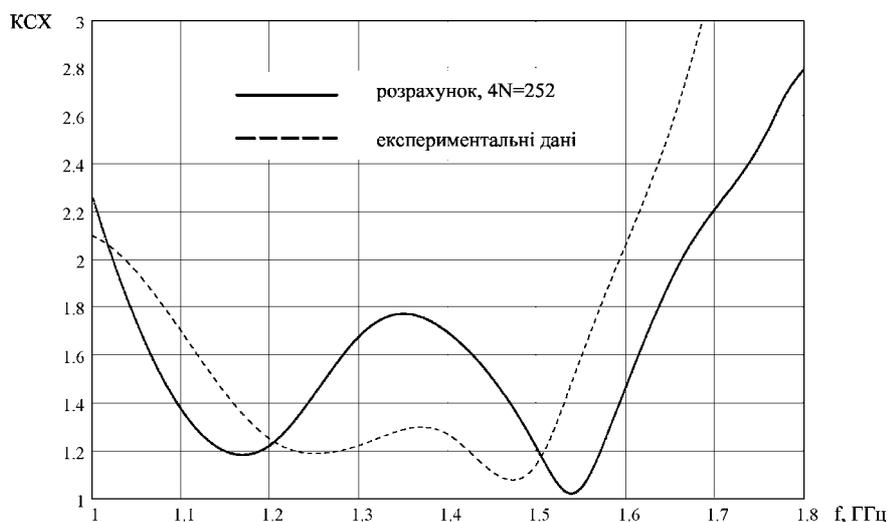


Рис. 6. КСХ в смузі частот

Порівняння результатів розрахунків та експериментальних результатів подано на рис. 5. та 6.

З рис. 5 видно, що розраховані діаграми напрямленості відрізняються від експериментальних в області кутів  $\pm 90^\circ$ , що пояснюється поширенням у діелектрику поверхневих хвиль.

Експериментально встановлено, що смуга робочих частот за КСХ < 2 мікросмушкової антени в режимі біжучої хвилі становить 42 % (рис. 6), при розрахунку КСХ антенної решітки, описаної вище, з загальною кількістю лінійних вібраторів 252, ширина смуги частот за КСХ < 2 дорівнює 47 %.

### Висновки

Випромінюючі властивості антени на базі щілинної лінії передачі проаналізовано з використанням методу наведених ЕРС. Показано діаграми напрямленості в Е- та Н-площині. Подібність теоретичних і експериментальних результатів підтверджує можливість використання методу наведених ЕРС для розрахунку антен такого класу. Направлені властивості антени можна регулювати, змінюючи форму щілин, параметри діелектричної підкладки, а також режим роботи антени за допомогою опору навантаження. Антена на базі щілинної лінії передачі може використовуватись як елемент антенної решітки.

1. Кочержевский Г.Н. и др. *Антенно-фидерные устройства*. – М., 1989. 2. J. R. James, P.S. Hall, Eds., *Handbook of Microstrip Antennas*. London, U.K.: Peter Peregrinus, 1989. 3. R. Garg, V.S. Reddy, "Edge Feeding of Microstrip Ring Antennas", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.51, pp. 1941–1945, Aug. 2003. 4. K.-F. Tong, K.-M. Luk, K.-F. Lee, R.Q. Lee, "A Broad-band U-slot Rectangular Patch Antenna on a Microwave Substrate", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.48, pp. 954–960, Jun. 2000. 5. H.-C. Liu, T.-S. Horng, N.G. Alexopoulos, "Radiation of Printed Antennas with a Coplanar Waveguide Feed", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.43, pp. 1143–1148, Oct. 1995. 6. J. Litva, C. Wu, Z. Bi, K. Wu, "Some Considerations for Microstrip Coplanar-waveguide Antennas", 1992 *IEEE AP-S Symp. Dig.*, pp. 491-494. 7. Хмель В.Ф., Чаплин А.Ф., Шумлянский И.И. *Антенны и устройства СВЧ: Сборник задач*. – К., 1990. 8. Чаплин А.Ф. *Анализ и синтез антенных решёток*. – Львов, 1987. 9. Бахарев С.И., Вольман В.И., Либ Ю.Н. и др. *Справочник по расчёту и конструированию СВЧ плосковых устройств*. – М., 1982.

УДК 621.396.67

Володимир Должиков, Анна Сербін

Харківський національний університет радіоелектроніки,  
кафедра ОРТ

## РАДІАЛЬНИЙ РОЗПОДІЛ СЕРЕДНЬОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ ПОЛЯ В ЗОНІ ФРЕНЕЛЯ КРУГЛОЇ СФОКУСОВАНОЇ АПЕРТУРИ

© Должиков Володимир, Сербін Анна, 2004

**Наведено результати аналітичного і комп'ютерного досліджень впливу фазових флуктуацій поля збудження круглої сфокусованої апертури на характер радіального розподілу середньої інтенсивності поля в її зоні Френеля.**

**In this paper analytical and computer researches results of the excitation field phase fluctuations influence of the circular focused aperture for the radial distribution character of the average field intensity in its Fresnel zone are given.**

### Вступ

Дослідження структури поля випромінюючих систем, сфокусованих у зону Френеля, має важливе значення для вирішення таких проблем радіоелектроніки, як електромагнітна сумісність