

УДК 621.396.67

ПАРАМЕТРИ ПОЛЯ У ФОКАЛЬНІЙ ОБЛАСТІ КРУГЛОЇ АПЕРТУРИ, ЩО СФОКУСОВАНА У ЗОНУ ФРЕНЕЛЯ

Горелов О.Ю.

e-mail: oleksandr.horelov@nure.ua

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф.КРіСТЗІ
м. Харків, Україна

In this paper, analytical expressions are obtained for calculating the main parameters characterizing the longitudinal distribution of the circular focused aperture field intensity with a relatively large diameter ($2R/\lambda \geq 10$): the displacement of the intensity maximum relative to the focal point, focusing gain and depth of focus. Cases of uniform and decreasing amplitude distributions of the excitation field are considered. The found approximate relations make it possible to determine the values of the above parameters for any values of the longitudinal coordinate of the focal point, lying both in the Fresnel zone and in the far zone. Comparison with numerical calculations showed that the error in the obtained parameter values does not exceed 5%.

Однією з характерних особливостей сучасної теорії антен є стрімке зростання інтересу до дослідження структури поля випромінювання антен у їх зоні Френеля, оскільки її протяжність збільшується через інтенсивне освоєння дедалі коротших довжин хвиль, що призводить до віддалення межі дальньої зони. Це зумовлено широким впровадженням у практику систем, основою яких є взаємодія поля випромінювання антени з об'єктом, що знаходиться в зоні Френеля антени. До таких відносяться системи ближнього радіозв'язку та радіолокації; бездротової передачі енергії; антени із синтезованою апертурою; системи медичної діагностики та гіпертермії, що використовують сфокусовані антени для отримання високої просторової роздільної здатності; системи бездротової зарядки мобільних пристроїв; системи RFID; бездротовий персональний зв'язок, передавання даних і живлення для імплантів у біологічному середовищі тощо. Підвищення інтересу до зони Френеля зумовлено також загостренням проблеми ЕМС через швидке збільшення кількості радіоелектронних засобів (РЕЗ), зростання потужності випромінювання та чутливості їх приймальних пристроїв, а також суттєве підвищення вимог до забезпечення нормального функціонування РЕЗ, які розташовані поблизу один від одного, що є характерним, наприклад, для сучасних морських суден та літальних апаратів. Суміжною до проблеми ЕМС є важлива задача захисту біологічних об'єктів від опромінення електромагнітним полем, актуальність якої також значно зросла у зв'язку зі збільшенням кількості РЕЗ та потужності їх випромінювання.

У літературі вже опубліковано чимало робіт, що присвячені дослідженню особливостей поля антен у зоні Френеля [1-3]. Однак, в більшості з них наведено результати чисельних розрахунків, що не повною мірою

задовольняє потреби практики.

У цій роботі отримано аналітичні вирази для основних параметрів, що характеризують поздовжній розподіл поля антени у вигляді круглої апертури з рівномірним і спадним амплітудними розподілами, що сфокусована як у зону Френеля, так і в дальню зону.

Розглядається пласка синфазна кругла апертура з радіусом R та початком координат у центрі апертури (рис.1).

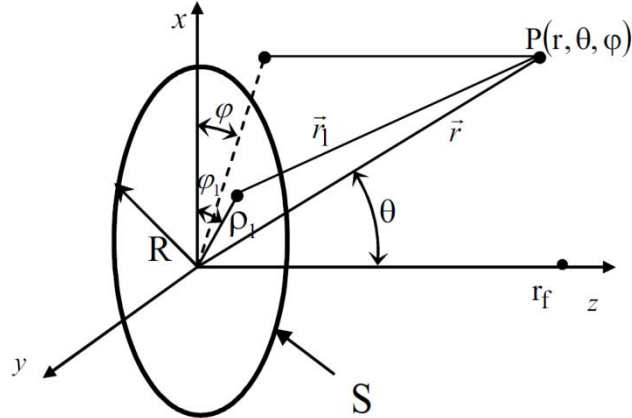


Рисунок 1 – Геометрія антени

Передбачається, що електричне поле в апертурі лінійно поляризоване в заданому напрямку. Тоді x -а компонента напруженості електричного поля в точці $P(r, \theta, \varphi)$ зони Френеля для великих апертур ($2R/\lambda \gg 1$) визначається за формулою Френеля-Кірхгофа [4]:

$$E(\zeta, \psi, \varphi) = iE_0 e^{-ikr} \frac{1}{8\chi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} A(u, \varphi_1) e^{i2\zeta u^2} e^{iu\psi \cos(\varphi - \varphi_1)} u du d\varphi_1, \quad (1)$$

де E_0 – амплітуда електричного поля на апертурі; $A(u, \varphi)$ – функція, що описує амплітудний розподіл збуджувального поля; $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число; $\psi = kR \sin \theta$ – узагальнений кут; $u = \rho_1 / R$ – безрозмірна радіальна координата на апертурі; $\chi = r / r_{дз}$ – нормована радіальна координата точки спостереження; $\zeta = (\pi/16\chi_0)(1 - \chi_0/\chi)$ – узагальнена радіальна координата; χ_0 – нормована радіальна координата точки фокусування.

Інтенсивність поля на фокальній вісі з точністю до множника $(iE_0 \pi e^{-ikr} / 8)^2$ у припущенні, що амплітудне розподілення типу $A(u) = 1 - (1 - \Delta)u^2$, де Δ – висота п'єдесталу, після інтегрування в (1), має вигляд:

$$P(\zeta) = \frac{1}{\chi_0^2} \left(1 - \frac{16\chi_0}{\pi} \zeta \right)^2 \frac{\sin^2 \zeta}{\zeta^2} \left\{ \Delta + \frac{(1-\Delta)^2}{4} \left[1 + \left(\frac{1}{\zeta} - \frac{\cos \zeta}{\sin \zeta} \right)^2 \right] \right\} \quad (2)$$

Співвідношення (2) описує поздовжний розподіл інтенсивності (ПРІ) поля уздовж вісі круглої апертури, що сфокусована у фіксовану точку $\chi_0 = \text{const}$. Якщо ж положення точки спостереження є фіксованим, то (2) визначає залежність інтенсивності у точці спостереження від відстані фокусування.

Для характеристики властивостей ПРІ у зоні Френеля найчастіше використовують наступні параметри: 1) зсув максимуму інтенсивності поля (МПП) уздовж фокальної вісі відносно точки фокусування $\Delta\chi_{\text{max}}$ (Focal Shift – FS), 2) глибина фокусування D_f (ширина головної пелюстки поздовжного розподілу інтенсивності на рівні – 3 дБ (Depth of Focus – DoF), 3) підсилення фокусування G_f (Focusing Gain – FG), тобто відношення максимальної інтенсивності до інтенсивності на межі дальньої зони синфазної рівномірно збудженої апертури.

Було отримано аналітичні вирази для перелічених параметрів на різних відстанях фокусування – як у зоні Френеля, так і у дальній зоні. Наведено графічні залежності параметрів від відстані фокусування та висоти п'єдесталу, побудовані за отриманими наближеними формулами та за результатами чисельних розрахунків. Порівняння з результатами чисельних розрахунків показало, що отримані наближені співвідношення дають змогу визначати значення зазначених параметрів для будь-яких відстаней фокусування, які лежать як у зоні Френеля, так і в дальній зоні, з похибкою, що в найгіршому випадку не перевищує 5%. Результати роботи будуть корисними при розрахунку поля апертурних антен у вигляді круглої сфокусованої апертури, а також сфокусованих антенних решіток, що працюють у зоні Френеля.

Список використаних джерел

1. R. C. Hansen, *Microwave Scanning Antennas, Volume 1: Apertures*, New York, Academic Press, 1964.
2. R. C. Hansen, *Focal Region Characteristics of Focused Array Antennas*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-33,12, December 1985, pp1328-1337.
3. W. Wang, H. Gao, Y. Wu, Y. Liu. "Impact on Focal Parameters for Near-field-focused Aperture Antennas", Int J Numer Model. 2018; e2510, P 1-13. <https://doi.org/10.1002/jnm.2510>.
4. Silver S. *Microwave Antenna Theory and Design*. McGraw-Yill, New York, 1949, 312 p.