

## АПРОКСИМАЦІЯ ДІАГРАМИ СПРЯМОВАНОСТІ АНТЕНИ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ

**Кравчук С.О., Рисцова К.І.**

*Інститут телекомунікаційних систем КПІ ім. І. Сікорського, Україна  
E-mail: sakravchuk@ukr.net*

### Base station antenna pattern approximation

In this paper, a new approximation of the BS directional pattern in the horizontal and vertical planes is developed, the axes of which are interconnected by the geometry of the ellipse. Moreover, the plane of such an ellipse corresponds to the cross-sectional plane of the BS directional pattern with the position of the drone, which forms a radio channel with the BS and the user terminal.

На даний час мають місце багато різних моделей апроксимації секторних антен базових станцій (БС) систем мобільного зв'язку [1-3]. Однак кожна із відомих апроксимацій розроблена для певного сценарію з певними спрощеннями, які не можуть бути прийнятними для всіх можливих сценаріїв розгортання системи. Тому в даній роботі розроблено нову апроксимацію діаграми спрямованості БС в горизонтальній і вертикальній площинах, вісі яких пов'язані між собою геометрією еліпса. Причому площина такого еліпса відповідає площині перетину діаграми спрямованості БС з положенням дрону, який формує радіоканал із БС і користувацьким терміналом.

Потрібно провести оцінку положення дрона і користувацького терміналу UE по відношенню до обсягу діаграми спрямованості антени БС. Це важливо, тому що реалізація нашого сценарію можлива тільки в разі потрапляння дрона в опромінення антеною системи БС. Область діаграми спрямованості представимо у вигляді прямого конуса з вершиною в точці антеною системи БС, кутом розкриття  $2\theta_{bs}$ , який дорівнює ширині її головного променя на рівні 0,5 від її максимального значення за потужністю, і лінією висоти конуса, що збігається з головною віссю симетрії діаграми спрямованості антени БС. Площа трикутника (BS,  $O_2$ ,  $O_3$ ), обертанням якого навколо головної осі діаграми спрямованості формується конус випромінювання БС, є площиною аналізу положення дрона в промені випромінювання антени БС. Визначимо ординати точки  $O_1$  як точки найменшої відстані від дрона до головної осі симетрії антени БС. Виходячи з того, що точкою джерела випромінювання служить антена БС, то відстані до UAV і  $O_1$  приймаємо рівними (однаковий радіус фронту хвилі від БС), тобто  $\rho = |BS, UAV| = |BS, O_1| = d_{bs-dr}$ . Тоді координати точки  $O_1 (x_{o1}, y_{o1}, z_{o1})$  можна визначити як  $y_{o1} = \rho_x \sin \psi_{xy}$ ,  $x_{o1} = \rho_x \cos \psi_{xy}$ ,  $z_{o1} = z_{bs} - \rho \sin \psi_z$ , де  $\rho_x = \rho \cos \psi_z$  - проекція вектора  $\rho$  на площину  $(x, y)$ .

Відстань між UAV і  $O_1$  буде  $d_{dr-o1} = [(x_{o1} - x_{dr})^2 + (y_{o1} - y_{dr})^2 + (z_{o1} - z_{dr})^2]^{1/2} = [(x_{o1} - l_{dr} \cos \varphi_{xy})^2 + (y_{o1} - l_{dr} \sin \varphi_{xy})^2 + (z_{o1} - h_{dr})^2]^{1/2}$ .

Діаграма спрямованості антенної системи БС є секторною з різними розподілами електромагнітного поля у вертикальній і горизонтальній площині. Звідси в горизонтальній площині розкрив основного променя діаграми

спрямованості, головним чином, має  $60^\circ$ , а у вертикальній - до  $10^\circ$ . Для простоти аналізу сценарію, який розглядається, скористаємося існуючими апроксимаціями діаграм спрямованості антен. Так у вертикальній площині скористаємося апроксимацією для вузько направленої діаграми згідно [4, 5]:

$$G_v(\varphi) = G_{\max} \sin^2(\pi n \varphi) / (n \sin^2(\pi \varphi)),$$

де  $n$  - ціле число, яке визначає крутизну спаду спрямованості головного пелюстка антени;  $\varphi$  - кут відхилення від електричної осі (головного пелюстка) антени;  $G_{\max}$  - максимальне значення коефіцієнта підсилення головного пелюстка антени. Для апроксимації горизонтальної спрямованості характеристики головного пелюстка антени скористаємося виразом з [6]:  $G_v(\varphi) = G_{\max} (\cos \varphi)^n$ .

Оскільки даний вираз не відтворює структуру бічних пелюсток, можна використовувати для моделювання плоске уявлення бічної пелюстки (воно зазвичай вказується виробником антен) наступним чином:

$$G_h(\varphi) = \max[G_{\max} (\cos \varphi)^n, G_0],$$

де  $G_0$  – рівень перших бічних пелюсток діаграми спрямованості.

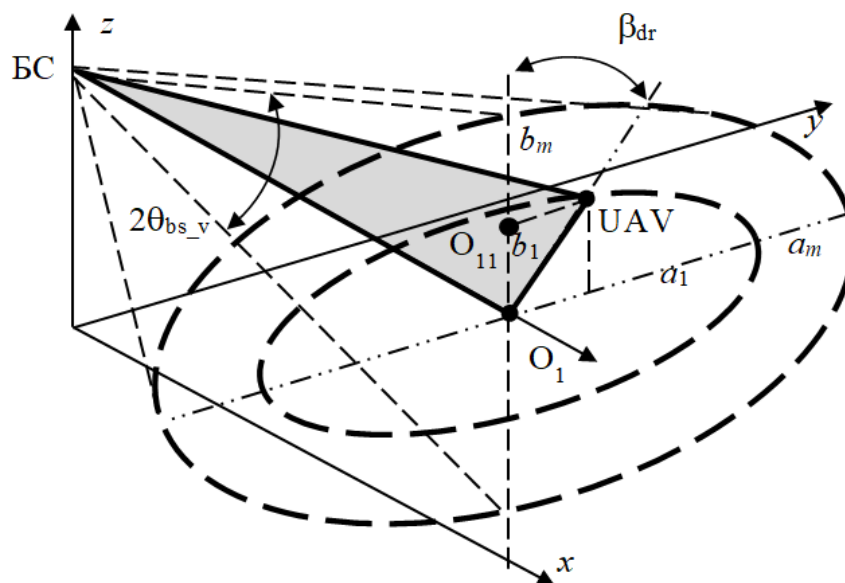


Рис. 1. Сценарій перетину діаграми спрямованості антени БС з еліптичною площиною, де розташований дрон (UAV – точка зависання дрону).

Перед нами стоїть завдання визначення положення дрона по відношенню до площини перетину діаграми спрямованості з метою визначення коефіцієнта підсилення в даній точці зависання дрона. Беручи еліптичний перетин діаграми спрямованості, отримуємо, що велику і малу осі еліпса перетину визначають кутові величини  $2\theta_{bs\_v}$  і  $2\theta_{bs\_h}$ , відповідно. Тоді можна визначити положення антени дрона як точку на дузі еліпса перетину. Для цього знаходимо кут  $\beta_{dr}$

відхилення положення антени дрона щодо вертикальної площини діаграми спрямованості в розглянутому еліптичному перетині. Визначаємо координати точки

$O_{11}$  ( $x_{o1}$ , 0,  $z_{dr}$ ) як проекції точки UAV на перпендикуляр до площини ( $x$ ,  $y$ ), який проходить через точку  $O_1$ , і відстань між UAV і  $O_{11}$ :

$$\begin{aligned} d_{dr-o11} &= [(x_{o11} - x_{dr})^2 + (y_{o11} - y_{dr})^2 + (z_{o11} - z_{dr})^2]^{1/2} = \\ &= [(x_{o11} - x_{dr})^2 + (y_{dr})^2]^{1/2}, \end{aligned}$$

а відстань між точками  $O_1$  і  $O_{11}$  буде

$$d_{o1-o11} = [(x_{o11} - x_{o1})^2 + (y_{o11} - y_{o1})^2 + (z_{o11} - z_{o1})^2]^{1/2} = |z_{o11} - z_{o1}|.$$

Тоді кут відхилення можна визначити із  $\beta_{dr} = \arcsin(d_{dr-o11} / d_{dr-o1})$ .

Геометрію еліпса визначаємо: велика напіввісь  $a$ , лінія якої паралельна вісі ( $0$ ,  $y$ ), і мала напіввісь  $b$ , лінія якої співпадає з перпендикуляром до площини ( $x$ ,  $y$ ) і проходить через точку  $O_1$ . Для еліптичного перерізу діаграми спрямованості антени БС на відстані  $d_{bs-o1} = [(x_{o1})^2 + (y_{o1})^2 + (z_{o1} - z_{bs})^2]^{1/2}$  і при кутах розкриття  $2\theta_{bs\_v}$  і  $2\theta_{bs\_h}$  маємо розмір великої і малої напіввісей  $2a_m = d_{bs-o1} / (2 \cos(4 \theta_{bs\_h}))$  і  $2b_m = d_{bs-o1} / (2 \cos(4 \theta_{bs\_v}))$ , відповідно. Звідси можна визначити співвідношення між півосями як

$$k_m = a_m / b_m = d_{bs-o1} / (2 \cos(4 \theta_{bs\_h})) / d_{bs-o1} / (2 \cos(4 \theta_{bs\_v})) = \cos(4 \theta_{bs\_v}) / \cos(4 \theta_{bs\_h}).$$

Для всіх еліпсів, які можуть бути сформовані з центром в точці  $O_1$  і всередині площі еліпса з  $a_m$  і  $b_m$ , матимуть  $k_m = \text{const}$ . Це дозволяє визначити еліпс перетину діаграми спрямованості (з півосями  $a_1$  і  $b_1$ ), на якому розташовується точка антени дрона UAV. Приведемо тривимірні координати UAV до двовимірних ( $x_{dre}$ ,  $y_{dre}$ ) на площині, яка утворюється еліпсами з початком координат в точці  $O_1$ . Тут  $x_{dre} = d_{dr-o11}$ ,  $y_{dre} = d_{o1-o11}$ . Тоді піввісь периметра еліпса, де розташований UAV, можна знайти як  $a_1 = (y_{dre}^2 k_m^2 + x_{dre}^2)^{1/2}$ ,  $b_1 = a_1 / k_m$ . Тепер можна визначити кути розкриття діаграми для еліптичного перетину з півосями  $a_1$  і  $b_1$  при допомозі співвідношень для рівнобедреного трикутника

$$2\theta_{1bs\_v} = \arccos(d_v / (4 b_1)) \text{ і } 2\theta_{1bs\_h} = \arccos(d_h / (4 a_1)),$$

де

$$d_v^2 = (d_{bs-o1})^2 - 4 b_1^2; d_h^2 = (d_{bs-o1})^2 - 4 a_1^2; d_{bs-o1} = [(x_{o1} - x_{bs})^2 + (y_{o1} - y_{bs})^2 + (z_{o1} - z_{bs})^2]^{1/2}.$$

Визначивши необхідні робочі кути розкриття діаграми спрямованості антени БС, можна визначити значення коефіцієнта посилення в точках, які лежать на кінцях півосей еліпса, що проходить через антену дрона:  $G_h(\theta_{1bs\_h})$  і  $G_v(\theta_{1bs\_v})$ .

Тобто  $G_{vy} = G_v y_1 / b_1$ ;  $G_{hx} = G_x x_1 / a_1$ ;  $x_1 = d_{dr-o1} \sin(\beta_{dr})$ ;  $y_1 = d_{dr-o1} \cos(\beta_{dr})$ ;  
 $G_{dr} = (G_{vy} G_{hx})^{1/2}$ .

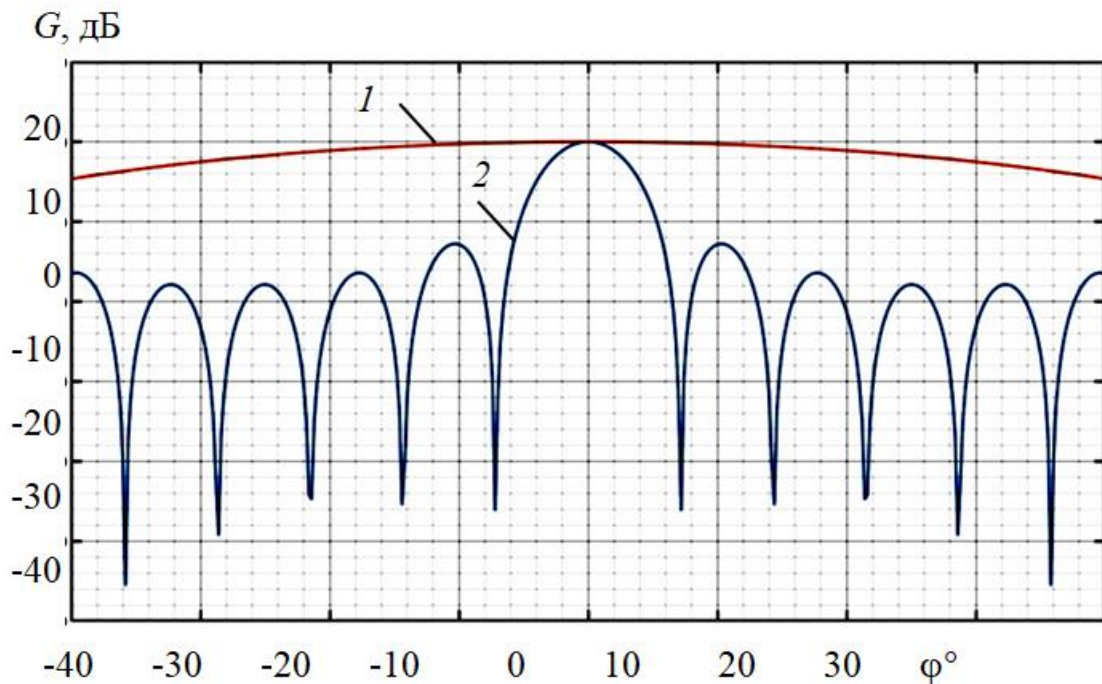


Рис. 2. Апроксимація діаграми спрямованості антени БС в площинах ( $G_{max} = 20$  dB):  
 1 - горизонтальній  $2\theta_{bs_h} = 60^\circ$  ( $n = 4$ ); 2 - вертикальній  $2\theta_{bs_v} = 6,4^\circ$  ( $n = 8$ )

Результати моделювання на базі запропонованої моделі апроксимації діаграми спрямованості в пакеті Матлаб представлені на рис. 2.

## Література

1. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи. – К.: Наукова думка, 2017.
2. Advanced in the telecommunications 2019: monograph / by edited M.Y. Ilchenko, S.O. Kravchuk, Kyiv, 2019, 336 p. (ISBN 978-617-7734-12-2).
3. Kaidenko M., Kravchuk S. Autonomous Unmanned Aerial Vehicles Communications on the Base of Software-Defined Radio. In: Ilchenko M., Uryvsky L., Globa L. (eds) Advances in Information and Communication Technology and Systems. MCT 2019. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 152. Springer, Cham. pp. 289-302 (2019) [https://doi.org/10.1007/978-3-030-58359-0\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58359-0_16).
4. N. Deng, M. Haenggi, “A Novel Approximate Antenna Pattern for Directional Antenna Arrays”, IEEE Wireless Communications Letters, Vol. 7, Issue 5, pp. 832 – 835 (2018) (DOI: 10.1109/LWC.2018.2829741).
5. X. Yu, J. Zhang, M. Haenggi, and K. B. Letaief, “Coverage analysis for millimeter wave networks: The impact of directional antenna arrays,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 7, pp. 1498–1512, Jul. 2017 (DOI: 10.1109/JSAC.2017.2699098).
6. Balanis C.A. Antenna theory: Analysis and design. — N.Y.: John Wily & Sons, 1996. — 960 p.