

УДК. 621.391

канд. техн. наук, професор Радзівілов Г. Д. ORCID: 0000-0002-6047-1897 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
канд. техн. наук Ільїнов М. Д. ORCID: 0009-0008-6945-3354 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Хоменко П. В. ORCID: 0000-0002-8543-1971 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ДІАГРАМИ НАПРАВЛЕНОСТІ КІЛЬЦЕВИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК, ЯКІ ВИКОНАНІ НА ПІВХВИЛЬОВИХ СИМЕТРИЧНИХ ВІБРАТОРАХ, РОЗМІЩЕНИХ НАД ЦИЛІНДРИЧНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

Застосування антенно-фідерних пристроїв, особливо встановлених на рухомих об'єктах, вказує на необхідність модернізації та розробки антенних пристроїв нового типу для підвищення ефективності функціонування системи радіозв'язку в умовах активного радіоелектронного подавлення. Одним із варіантів забезпечення завадозахисту в каналах зв'язку з рухомими об'єктами є застосування вузьконаправлених Smart антен із керованою діаграмою направленості. Smart антени, які ще мають назву інтелектуальні антени, це один з різновидів фазованих антенних решіток. Smart антени використовують набір випромінюючих елементів, побудованих у формі решіток. Найбільше поширення отримали кільцеві антенні решітки, які відрізняються компактністю та великими функціональними можливостями.

Актуальність завдання по компонованню Smart антен полягає у зменшенні загальної кількості випромінювачів без погіршення параметрів антени. Це завдання особливо важливе для антен з круговими діаграмами випромінювання в системах зв'язку з рухомими об'єктами.

Щоб зменшити кількість вібраторів у таких антенах, зазвичай знаходять максимально велику відстань між вібраторами, при якій рівномірність β діаграми направленості не знижується нижче заданого рівня. Щоб знайти допустиму відстань, можна розрахувати залежність β від радіуса решітки безпосередньо при розрахунку азимутальної діаграми направленості антени. Для вирішення цього завдання було розглянуто зовнішні характеристики кільцевих антенних решіток, які виконані на півхвильових симетричних вібраторах в ідеальних умовах та вібраторах, розміщених над циліндричною поверхнею. Отримані результати наглядно показують можливості компоновання кільцевих антенних решіток залежно від радіуса антенної решітки та радіуса циліндричної опори, та при яких умовах геометричні розміри кільцевих антенних решіток будуть зберігати коефіцієнт рівномірності діаграми направленості.

Ключові слова: діаграма направленості, Smart антена, фазована антенна решітка, кільцева антенна решітка, коефіцієнт нерівномірності діаграми направленості.

H. Radzivilov, M. Ilyinov, P. Khomenko Features computation diagram of annular direction antenna arrays what made on half-wave vibrators located above cylindrical surface.

The use of antenna-feeder devices, especially installed on moving objects, indicates the need to modernize and develop new type antenna devices to increase the efficiency of the radio communication system in conditions of active radio electronic suppression. One of the options for providing interference protection in communication channels with moving objects is the use of narrowly directed Smart antennas with a controlled directional pattern. Smart antennas, which are also called intelligent antennas, are one of the varieties of phased antenna arrays. Smart antennas use a set of radiating elements built in the form of grids. The most widespread are the ring antenna arrays, which are characterized by their compactness and great functionality.

The relevance of the task of designing Smart antennas is to reduce the total number of emitters without degrading the antenna parameters. This task is particularly important for antennas with circular radiation patterns in communication systems with moving objects.

The obtained results clearly show the possibilities of ring antenna arrays layout, depending on the radius of the antenna array and the radius of the cylindrical support, and under which conditions the geometric dimensions of the ring antenna arrays will preserve the coefficient of uniformity of the directional pattern. In order to reduce the number of vibrators in such antennas, the maximum distance between the vibrators is usually found, at which the uniformity of β directional diagrams does not decrease below a given level. To find the permissible distance, you can calculate the dependence of β on the radius of the grating directly when calculating the azimuthal directional diagrams of the antenna. To solve this problem, the external characteristics of the ring antenna arrays performed on half-wave symmetric vibrators in ideal conditions and vibrators placed over a cylindrical surface were considered.

Keywords: directional pattern, Smart antenna, phased antenna array, annular antenna array, coefficient of unevenness of the directional diagram.

Постановка завдання.

Аналіз досвіду застосування антенно-фідерних пристроїв, особливо встановлених на рухомих об'єктах, вказує на необхідність модернізації та розробки антенних пристроїв нового типу для підвищення ефективності функціонування системи радіозв'язку в умовах активного радіоелектронного подавлення. Одним з варіантів забезпечення завадозахисту в каналах зв'язку з рухомими об'єктами є застосування вузьконаправлених Smart антен з керованою діаграмою направленості (ДН). Smart антени, які ще мають назву інтелектуальні антени, це один з різновидів фазованих антенних решіток (ФАР) [1].

Smart антени – це найбільш перспективніша технологія, що покращує якість прийнятого сигналу завдяки збільшенню ємності системи, зменшує багатопроменевість та інтерференцію між сусідніми каналами. Найчастіше на базі інтелектуальних антен використовують формування вузької діаграми направленості. Вузька діаграма направленості дозволяє сфокусувати енергію сигналу у визначеному напрямку (зазвичай назустріч приймальному пристрою), що збільшує відношення сигнал/шум, або, навпаки, сформуєвати провал у діаграмі направленості в напрямку завади, що особливо критично для придушення радіоелектронних джерел противника. При вузькому антенному промені зменшуються також вплив завад, збільшується відношення сигнал/шум, і таким чином підвищується ефективність використання спектра частот [2]. Smart антени використовують набір випромінюючих елементів, побудованих у формі решіток [3]. Слід зазначити, що найбільше поширення отримали кільцеві антенні решітки (КАР), які відрізняються компактністю та великими функціональними можливостями.

З метою можливого застосування КАР, виникає завдання в проведенні аналізу електричних характеристик антени залежно від їхніх геометричних розмірів.

Аналіз публікацій за темою дослідження.

У роботі [4] проведено аналіз завдань, які виникають при впровадженні технології адаптивного діаграмоутворення в мобільних радіомережах в умовах активної радіоелектронної протидії, основними з яких є наступні: визначення просторових координат власної станції, кореспондентів мережі та постановника навмисних завад; розрахунок оптимального кута орієнтації основного пелюстка діаграми направленості антени при прийомі сигналу від сусідніх кореспондентів з урахуванням взаємного розташування радіостанцій та постановника завад. Але приклади діаграм направленості кільцевої антенної решітки представлено в ідеальних умовах, без врахування реальної побудови КАР, яке суттєво буде впливати на масо-габаритні та електричні характеристики антени в цілому.

У роботі [5] розкрито особливості розрахунку зовнішніх характеристик кільцевих антенних решіток на основі низькопрофільних випромінювачів над циліндричною поверхнею. Розглянуто вирішення задачі про розрахунок характеристики направленості в азимутальній площині. Але наглядно представлено тільки приклади розрахунку двох- та трьохелементної антенної решітки, що не дає повної оцінки ефективності компонування кільцевих антенних решіток.

У статті [6] представлено удосконалений метод адаптивного прийому сигналів від рухомих джерел, який дозволяє знизити обсяг обчислень порівняно з існуючим, коли ваговий вектор з адаптивними антенними решітками є оптимальним і вибирається як власний вектор сигнальної кореляційної матриці, що визначає його новизну, при цьому можливо забезпечити досить високу ефективність прийому сигналів, однак автори не зосереджують увагу на форми ДН та їхню залежність від компонування антени.

У науковій праці [7] представлено методіку адаптивного управління параметрами багатоантенних систем військового радіозв'язку з активними фазованими антенними решітками, проте в роботі не розкрито залежність процесу діаграмоутворення від зміни параметрів управління антени.

У роботі [8] результат наукового дослідження показав, що одним із найбільш перспективних підходів вирішення задачі, що підкреслює актуальність, є підвищення ефективності прийому сигналу при використанні адаптивних антенних решіток і відповідних методів просторової обробки сигналів, проте конфігурація адаптивних антенних решіток передбачається довільною.

Тому, метою статті є дослідження можливих варіантів конфігурації Smart антен на рухомих об'єктах з мінімальними масо-габаритними показниками.

Виклад основного матеріалу.

Актуальність завдання по компонуванню Smart антен полягає у зменшенні загальної кількості випромінювачів без погіршення параметрів антени. Це завдання особливо важливе для антен з круговими діаграмами випромінювання в системах зв'язку з рухомими об'єктами. Часто такі антени виконані у вигляді кругових рівновіддалених вертикальних вібраторів, розташованих навколо висотних опор (місце кріплення антени). Великі відносно робочої довжини хвилі поперечні розміри опор потребують використання великої кількості вібраторів для отримання в горизонтальній площині близької до кругової ДН антени. Щоб зменшити кількість вібраторів у таких антенах, зазвичай знаходять максимально велику відстань між вібраторами, при якій рівномірність β ДН не знижується нижче заданого рівня. Щоб знайти допустиму відстань, можна розрахувати залежність β від радіуса решітки безпосередньо при розрахунку азимутальної ДН антени за формулою $\beta(kr) = |F_{\max}(kr)| / |F_{\min}(kr)|$. При цьому важливо мінімізувати масо-габаритні показники та зберегти жорсткість конструкції.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити ряд часткових задач, а саме:

- розрахувати геометричні розміри кільцевої антенної решітки, виконаної на півхвильових симетричних вібраторах (рис. 1), та кільцевої антенної решітки, виконаної на півхвильових симетричних вібраторах, розміщеної над циліндричною поверхнею (рис. 3);
- за допомогою середовища математичного моделювання MathCad 15 визначити характеристики антен (ДН та коефіцієнт нерівномірності ДН).

Розрахунок кільцевої антенної решітки, виконаної на півхвильових симетричних вібраторах

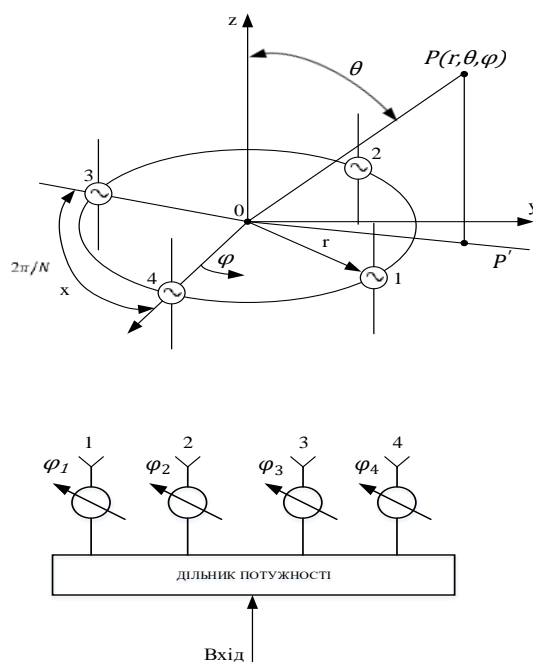


Рис. 1. Кільцева антенна решітка, виконана на півхвильових симетричних вібраторах

Геометрична симетрія в КАР забезпечить рівномірне розміщення елементів антенної решітки по кільцю, з радіусом r , з координатами $\varphi_n = (n - 1) \frac{360}{N}$, де N – кількість випромінюючих елементів. Електрична симетрія буде реалізована внаслідок збудження випромінюючих елементів, амплітудно-фазовий розподіл яких ідентичний в секторах, співпадаючий з кутовими відстанями між суміжними випромінювачами $I_{im} = \frac{1}{\sqrt{N}} l^{jm(i-1)} \frac{360}{N}$ де, $m = 0; \pm 1$, $N/2$ – номер моди (типу) розподілу струму, наприклад, $m = 0$ – синфазне збудження елементів решітки, $m = 1$ – квадратурне ($N = 4$).

Просторова напруженість електричного поля для КАР з рівномірним розташуванням N елементів по колу з радіусом r [9], визначимо за виразом (1):

$$f_{\text{вв}}(\varphi) := \left| \sum_{i=1}^N \left(e^{i \cdot \psi(i)} \cdot F_0(\varphi - \phi(i)) \cdot e^{i \cdot kR \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\varphi - \phi(i))} \right) \right|. \quad (1)$$

Коефіцієнт направленої дії (КНД) КАР кількісно визначимо через просторовий розподіл напруженості електричного поля [10] за виразом (2):

$$D := \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F(\varphi)^2 \cdot \sin(\theta) \, d\theta \, d\varphi}. \quad (2)$$

Проведемо аналіз зовнішніх характеристик КАР з урахуванням $R = 0,29\lambda$ (радіус решітки); $l = 0,25\lambda$ (довжина половини вібратора). Формування поля випромінювання в азимутальній площині визначається не тільки амплітудно-фазовим розподілом струмів у випромінюючих елементах КАР ($m = 0, m = 1$), а й її геометричними розмірами, що наочно показано на рисунку 2.

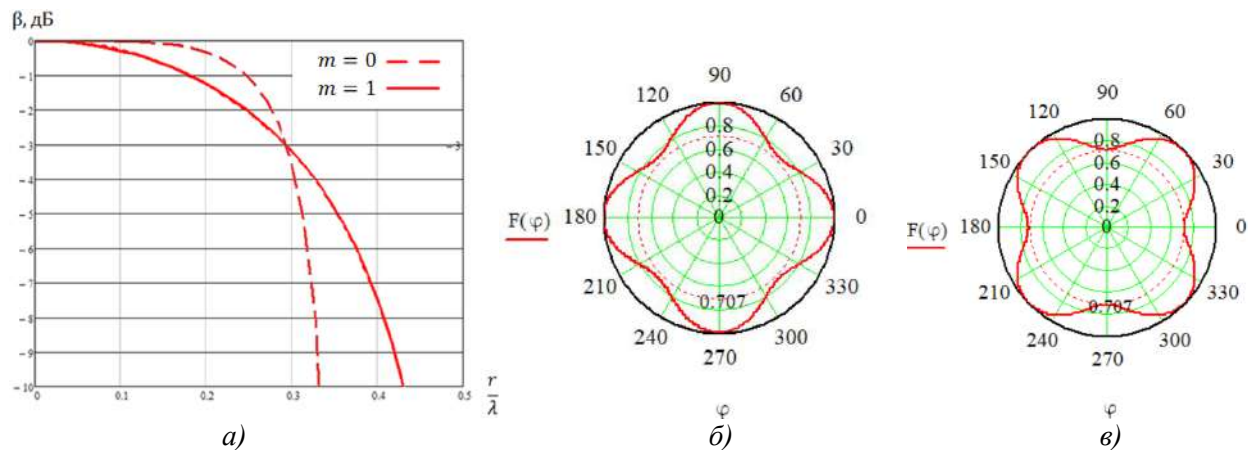


Рис. 2. ДН при радіусі КАР $R = 0,29$:

a – коефіцієнт нерівномірності діаграми направленості; b – синфазне збудження випромінюючих елементів мода ($m = 0$); c – квадратурне збудження випромінюючих елементів мода ($m = 1$)

Отримані теоретичні результати досліджень зовнішніх характеристик КАР, виконаних на вертикальних симетричних вібраторах, дозволяє зробити наступні висновки:

- незалежно від моди збудження випромінюючих елементів КАР максимальний радіус її побудови дорівнює $0,29 \lambda$;
- при компонованні КАР, для яких масо-габаритні показники мають важливе значення, необхідно застосовувати синфазне збудження випромінюючих елементів ($m = 0$);

– коефіцієнт нерівномірності ДН в азимутальній площині для моди ($m = 0$) дорівнює 0 дБ практично до значення радіуса КАР $0,2 \lambda$.

Розрахунок кільцевої антенної решітки, виконаної на півхвильових симетричних вібраторах, розміщених над циліндричною поверхнею

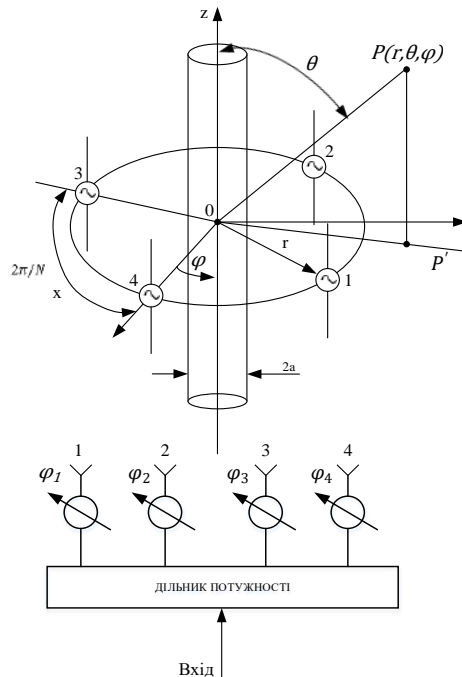


Рис. 3. Кільцева антенна решітка, виконана на півхвильових симетричних вібраторах, розміщених над циліндричною поверхнею

Розглянемо інший варіант побудови КАР у вигляді вертикальних симетричних вібраторів, розташованих біля відбиваючої поверхні.

Така будова КАР дозволить зменшити вплив між випромінюючими елементами, а також розширити функціональні можливості антенної решітки по формуванню поля випромінювання в азимутальній площині завдяки зміні розмірів радіуса відбиваючої поверхні. Характеристики кільцевої антенної решітки з урахуванням дифракції поля випромінюючих елементів, розташованих над циліндричною поверхнею (рис. 3), можна визначити за наступним виразом [11]:

$$(\varphi, \theta) := \left| \frac{\cos(ki \cdot \cos(\theta)) - \cos(kl)}{\sin(\theta)} \sum_{i=1}^N \sum_{n=0}^{10} \left[\varepsilon(n) i^n e^{i \cdot \psi(i)} \left(J_n(n, kr \cdot \sin(\theta)) - \frac{J_n(n, ka \cdot \sin(\theta))}{H_2(n, ka \cdot \sin(\theta))} H_2(n, kr \cdot \sin(\theta)) \right) \cos \left[n \left[\varphi - \frac{2\pi}{N} (i - 1) \right] \right] \right] \right|, \quad (3)$$

де J_n , H_n^2 – функція Бесселя і Ганкеля n -го порядку відповідно;

N – кількість випромінюючих елементів в КАР;

n – кількість елементів в рядку;

φ, θ – кут розташування n -го вібратора.

Проведемо аналіз зовнішніх характеристик КАР з урахуванням впливу циліндричної поверхні на характеристики випромінювання в азимутальній площині, для різних значень радіуса циліндричної поверхні ($a = 0,01\lambda$, рис. 4; $a = 0,02\lambda$, рис. 5; $a = 0,05\lambda$, рис. 6; $a = 0,1\lambda$, рис. 7; $R = 0,29\lambda$ (радіус решітки); $l = 0,25\lambda$ (довжина половини вібратора).

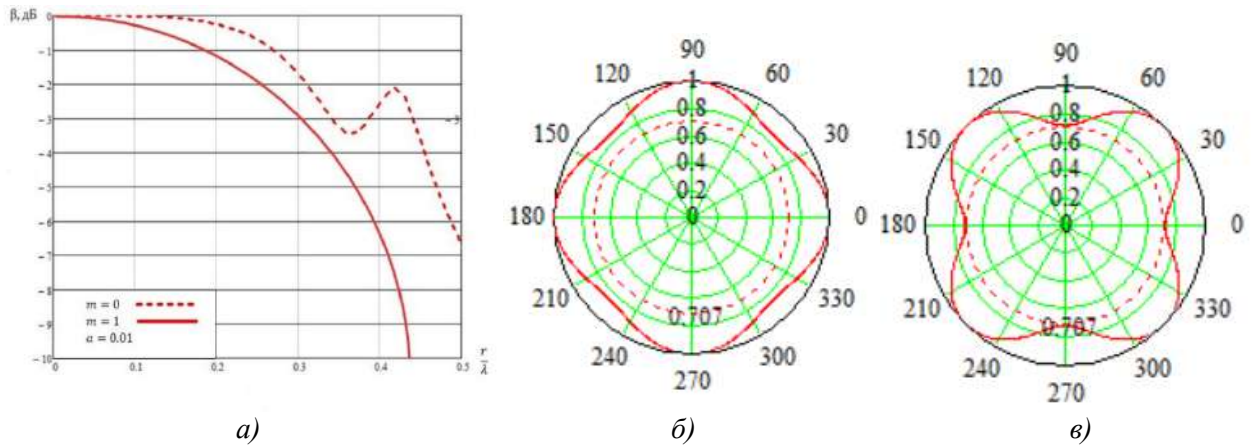


Рис. 4. ДН при радіусі КАР $R = 0,29$, радіус циліндричної поверхні $a = 0,01\lambda$:
 a – коефіцієнт нерівномірності діаграми направленості; б – синфазне збудження випромінюючих елементів мода ($m = 0$); в – квадратурне збудження випромінюючих елементів мода ($m = 1$)

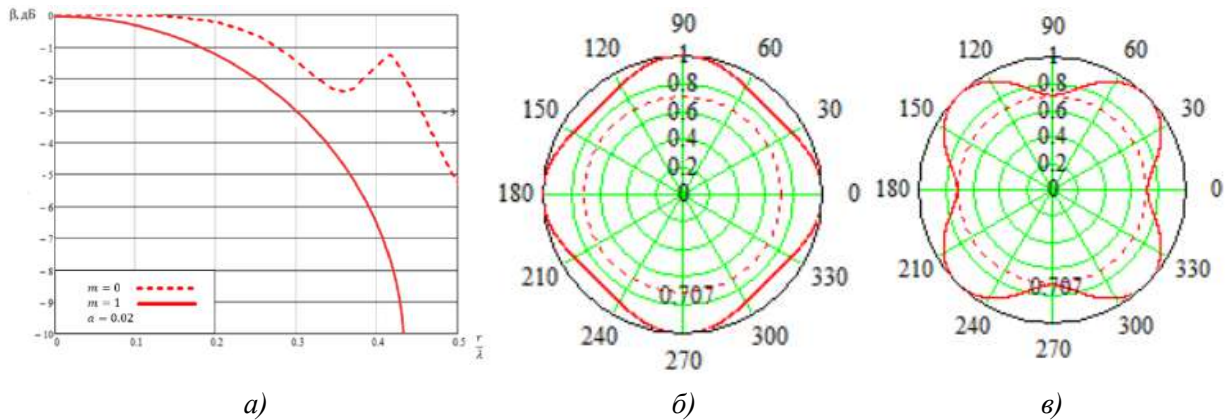


Рис. 5. ДН при радіусі КАР $R = 0,29$, радіус циліндричної поверхні $a = 0,02\lambda$:
 a – коефіцієнт нерівномірності діаграми направленості; б – синфазне збудження випромінюючих елементів мода ($m = 0$); в – квадратурне збудження випромінюючих елементів мода ($m = 1$)

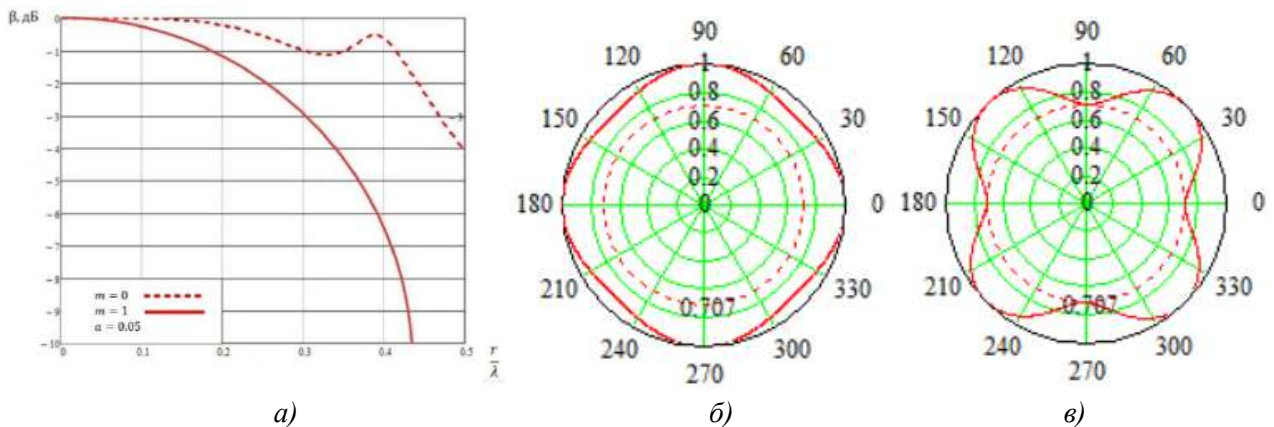


Рис. 6. ДН при радіусі КАР $R = 0,29$, радіус циліндричної поверхні $a = 0,05\lambda$:
 a – коефіцієнт нерівномірності діаграми направленості; б – синфазне збудження випромінюючих елементів мода ($m = 0$); в – квадратурне збудження випромінюючих елементів мода ($m = 1$)

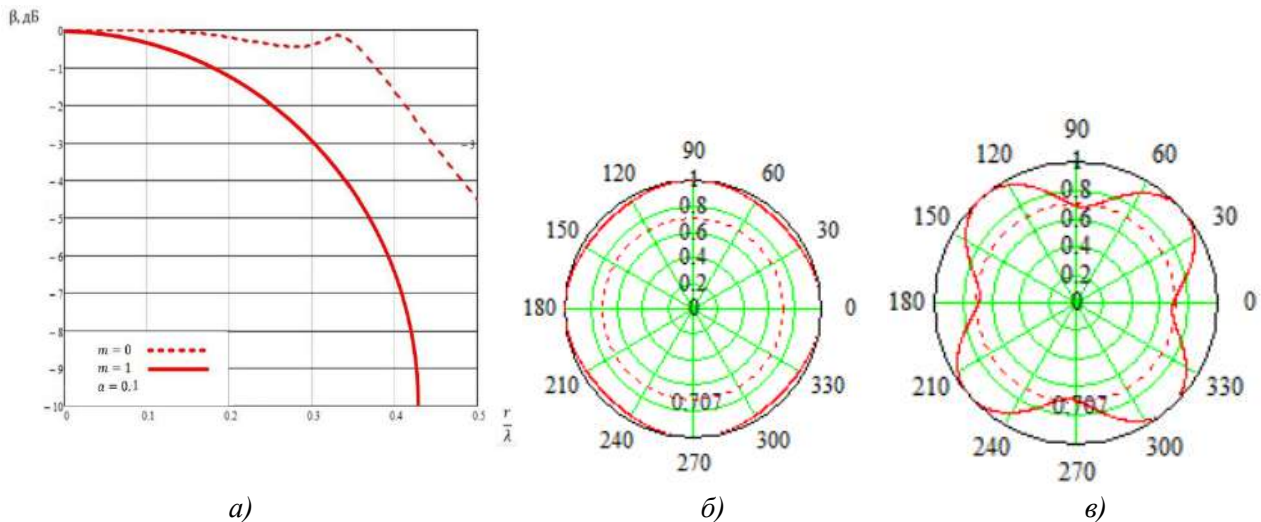


Рис. 7. ДН при радіусі КАР $R = 0,29$, радіус циліндричної поверхні $a = 0,1\lambda$:
 a – коефіцієнт нерівномірності діаграми направленості; b – синфазне збудження випромінюючих елементів мода ($m = 0$); c – квадратурне збудження випромінюючих елементів мода ($m = 1$)

Результати проведеного аналізу зовнішніх характеристик КАР з урахуванням впливу на характеристики випромінювання в азимутальній площині дозволяє зробити наступні висновки:

коефіцієнт нерівномірності ДН в азимутальній площині при квадратурному збудженні випромінюючих елементів (мода, $m = 1$) зі збільшенням радіуса циліндричної поверхні не змінюється. Максимальний радіус КАР по коефіцієнту нерівномірності більше -3 дБ дорівнює $0,3\lambda$ при всіх значеннях радіуса циліндричної відбиваючої поверхні;

при синфазному збудженні випромінюючих елементів КАР (мода, $m = 0$) коефіцієнт нерівномірності ДН в азимутальній площині змінюється залежно від радіуса циліндричної поверхні. Так, при радіусі циліндричної поверхні $a = 0,01\lambda$ максимальний радіус КАР складає $r = 0,34\lambda$, а при $a = 0,05\lambda$, $r = 0,47\lambda$.

Отримані результати наглядно показують можливості компоновання КАР з ненаправленим випромінюванням в азимутальній площині. Так, при застосуванні таких антенних пристроїв на рухомих об'єктах необхідно врахувати місце кріплення антени, яке буде впливати та формування поля випромінювання азимутальній площині та на геометричні розміри антени.

Висновок. Одним з варіантів забезпечення завадозахисту в каналах зв'язку з рухомими об'єктами є застосування вузьконаправлених Smart антен з керованою діаграмою направленості (ДН).

Вузька діаграма направленості дозволяє сфокусувати енергію сигналу у визначеному напрямку, що збільшує відношення сигнал/шум, або, навпаки, сформувані провал в діаграмі направленості в напрямку завади, що особливо критично для придушення радіоелектронних джерел противника. Smart антени використовують набір випромінюючих елементів, побудованих у формі решіток. Найбільше поширення отримали кільцеві антенні решітки, які відрізняються компактністю та великими функціональними можливостями.

У статті за допомогою середовища математичного моделювання MathCad 15 проведено розрахунки коефіцієнта нерівномірності діаграми направленості 4-елементної кільцевої антенної решітки, виконаної на півхвильових симетричних вібраторах в ідеальних умовах та за умови кріплення антени на опорах з різними радіусами.

Отримані результати наглядно показують можливості компоновання КАР з ненаправленим випромінюванням в азимутальній площині залежно від радіуса антенної решітки та радіуса циліндричної опори, та при яких умовах геометричні розміри кільцевих антенних решіток будуть зберігати коефіцієнт рівномірності діаграми направленості.

На основі проведених розрахунків, **напрямки подальших досліджень** будуть направлені на аналіз та вдосконалення системи автоматичного управління діаграмою направленості Smart антен, які встановлені на рухомих об'єктах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Development of a method of increasing the interference immunity of frequency-hopping spread spectrum radio communication devices / O. Kuvshynov et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, no. 9 (98). P. 74–84. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160328>.
2. Масесов М. О., Субач І. Ю., Руденко Д. М., Станович О. В. Перспективи застосування цифрового діаграмоутворення у станціях тропосферного зв'язку спеціального призначення. *Збірник наукових праць ВІТІ ДУТ*. 2014. Вип. 1. С. 43–48.
3. Булашенко А. В. Принципи формування променя інтелектуальних антен. *Вісник СумДУ. Серія технічні науки*. 2010. № 1. С. 14–19.
4. Increasing the anti-jammingness of mobile radio networks with adaptive beamforming / S. Boholii et al. *Communication, informatization and cybersecurity systems and technologies*. 2022. Vol. 2, no. 2. URL: <https://doi.org/10.58254/viti.2.2022.01.5>.
5. Ilinov M., Nesterenko I., Iankovskii O. The way of construction compensator interference based on usage multi-input antenna systems. *Communication, informatization and cybersecurity systems and technologies*. 2023. Vol. 3, no. 3. URL: <https://doi.org/10.58254/viti.3.2023.02.14>.
6. The method of adaptive signal reception with adaptive antenna arrays from moving sources / H. Radzivilov et al. *Communication, informatization and cybersecurity systems and technologies*. 2022. Vol. 1, no. 1. URL: <https://doi.org/10.58254/viti.1.2022.09.75>.
7. Шишацький А. В., Жук О. Г., Беляков Р. О. Методика адаптивного управління параметрами МІМО-АФАР. *Системи озброєння і військова техніка*. 2016. № 4. С. 77–82.
8. Частотно неселективний просторовий канал з використанням адаптивних антенних решіток / О. Г. Цатурян та ін. *Вісник ВІТІ. Комунікаційні та інформаційні системи*. 2021. № 1. С. 113–119.
9. Підвищення ефективності функціонування систем радіозв'язку за рахунок використання адаптивних антенних решіток / І. В. Борисов та ін. *Збірник наукових праць ВІТІ*. 2015. С. 16–24.
10. Гриценко К. М., Гурський Т. Г. Методика формування діаграми спрямованості кільцевої антенної решітки радіостанції мобільної радіомережі в умовах навмисних завад. *Збірник наукових праць ВІТІ*. 2018. С. 6–16.
11. Радзівілов Г. Д., Ільїнов М. Д., Хоменко П. В. Фазована кругова антенна решітка на півхвильових симетричних вібраторах. *III Міжнародна науково-технічна конференція ВІТІ імені Героїв Крут: Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки: акт. питання і тенденції розвитку*, м. Київ, 19 груд. 2023 р. С. 263–264.