



О. Ю. Іохов



Є. О. Каплун



О. М. Сальніков

АЛГОРИТМ ФОРМУВАННЯ ЗОНИ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО УРАЖЕННЯ РАДІОКЕРОВАНИХ БОЄПРИПАСІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ АВТОБРОНЬОВАНОЇ ТЕХНІКИ

Проведено аналіз сучасних методів та засобів знешкодження радіокерованих боєприпасів, показано перевагу у процесі використання циліндричних фазованих антенних решіток для побудови мобільних засобів знешкодження радіокерованих боєприпасів під час їх встановлення на автобронетанковій техніці. Розроблено алгоритм адаптованого формування зони функціонального ураження радіокерованих боєприпасів під час використання циліндричних фазованих антенних решіток.

Ключові слова: фазована антенна решітка, радіокеровані боєприпаси, зона функціонального ураження, алгоритм формування діаграми спрямованості фазованої антенної решітки, автобронетанкова техніка, броньовані колісні машини, бойова живучість.

Постановка проблеми. Найважливішим завданням Національної гвардії України (НГУ) є протидія збройній агресії та ліквідація збройного конфлікту шляхом ведення бойових дій під час виконання завдань територіальної оборони [1].

У сучасних умовах дедалі частіше для знешкодження автобронетехніки (броньованих колісних машин) використовуються радіокеровані боєприпаси (РКБ). Одним із шляхів захисту від РКБ є їх ураження за допомогою спеціальних радіоелектронних засобів, які порушують працездатність системи управління РКБ потужним електромагнітним випромінюванням. Для забезпечення найбільшої ефективності такі радіоелектронні засоби мають бути обладнані мобільними антенними системами. Однак аналіз тенденцій розвитку та вдосконалення РКБ виявив, що методика обґрунтування технічних характеристик таких антенних систем на базі відомого методу функціонального ураження (ФУ) РКБ, що базуються на використанні надширокосмугових (НШС) дзеркальних антенних систем, є неефективним. З метою підвищення ефективності дії таких антенних систем у попередніх працях [2, 3, 4] вирішується наукове завдання, що полягає в удосконаленні методики обґрунтування технічних характеристик мобільних антенних систем засобів знешкодження радіокерованих боєприпасів на автобронетанковій техніці

© О. Ю. Іохов, Є. О. Каплун, О. М. Сальніков, 2022

Національної гвардії України, яке здійснюється шляхом застосування фазованих антенних решіток (ФАР) [5, 6].

У межах виконання завдання удосконалення зазначеної методики виникла необхідність автоматизації процесу управління діаграмою спрямованості (ДС) ФАР для адаптації зони ФУ та пристосування її до тактичної обстановки під час руху як колони автобронетанкової техніки, так і в інших випадках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для формування НШС засобів ФУ РКБ, що випромінюються циліндричними ФАР зі спрямованими випромінювачами, необхідно отримати розрахункові співвідношення для напруженості електричного поля у зоні Фраунгофера [7–10]. Важливим параметром при просторово-фазо-частотному управлінні є закон розподілу несучих частот випромінювачів по апертурі циліндричної ФАР. На відміну від доволі добре вивчених плоских ФАР під час розгляду опуклих антенних решіток необхідно додатково враховувати кривизну їх поверхні, оскільки в утвореній площині просторово-частотний закон управління буде лінійним, а в площині напрямної – відмінним від лінійного та залежатиме від радіуса циліндричної ФАР, кроку уздовж направляючої та діапазону частот, що на сьогодні не реалізовано в

алгоритмах формування діаграми спрямованості циліндричної ФАР [11, 12].

Метою статті є розроблення алгоритму формування діаграми спрямованості циліндричної ФАР для створення зони функціонального ураження РКБ.

Виклад основного матеріалу. Як антенну систему мобільного засобу знешкодження РКБ автомобільного базування доцільно використовувати циліндричну ФАР [4]. Важливою перевагою такої ФАР порівняно з плоскими антенними системами є можливість підтримки формування одночасно кількох напрямів діаграми спрямованості, які перебувають на різних азимутах. Для управління формуванням ДС такої ФАР автори статті пропонують алгоритм (див. рис. 1). Його блоки працюють таким чином.

1. Визначення зовнішньої заданої зони ФУ за кутовими координатами зони цілевказівки (ЦВ) ($R_{цв}, \beta_{цв}, \alpha_{цв}$). Точність заданої зони ФУ повинна бути не меншою за ширину ДС засобів ФУ. Наприклад, за імпульсної потужності $P_{мп} = 200$ кВт, чутливості приймача $P_{мін} = 10-13$ Вт, ширини ДС $2\Theta = 1$ величина середньоквадратичної помилки складатиме для $\beta_{цв}, \alpha_{цв} - 1$, а за дальністю – 3 м.

2. Перетворення даних зовнішньої зони ЦВ у координати центра зони ФУ: ($R_{цв} \rightarrow R_{фy}, \beta_{цв} \rightarrow \beta_{фy}, \alpha_{цв} \rightarrow \alpha_{фy}$).

3. Перетворення кутових координат центру зони ФУ у загальну систему координат. Під загальною системою координат слід розуміти декартову систему координат, прив'язану до центра циліндричної ФАР.

$$(x_{фy}, y_{фy}, z_{фy}) : \begin{cases} z_{фy} = R_{фy} \sin \beta_{фy}, \\ x_{фy} = R_{фy} \cos \beta_{фy} \sin \alpha_{фy}, \\ y_{фy} = R_{фy} \cos \beta_{фy} \cos \alpha_{фy}. \end{cases} \quad (1)$$

4. Визначення «робочої зони» циліндричної ФАР (див. рис. 2). Під «робочою зоною» циліндричної ФАР розуміють кількість випромінювачів, які беруть участь у формуванні поля. При цьому α_{mn} визначається за такою формулою:

$$\frac{-0,7 \cdot R_u \cos^2 \alpha_{mn} + R_u \sin^2 \alpha_{mn}}{\cos \alpha_{mn}} - R_\phi (1 - 0,7 \operatorname{tg} \alpha_{mn}) = 0, \quad (2)$$

де вибір mn номерів випромінювачів знаходиться з умови $\alpha_{mn} = \pm 60$. Далі визначається кількість робочих елементів циліндричної ФАР M_x, N_z і розраховується потужність, що підводиться $P_{пдв}$.

5. Формується команда на конформне сканування, під якою розуміють вибір сектора циліндричної ФАР, що забезпечує найбільший енергетичний потенціал для ФУ. Алгоритм конформного сканування визначається системою збудження випромінювачів і може бути виконаний на лініях затримки.

6. Визначення одноступінчастого V-подібного частотного розподілу проводиться для відстаней $R_{фy} < 100$ м, що відповідає поперечному розміру сфокусованої «плями» $x\phi = 40$ м відповідно до виразів

$$f_{0mn} = \begin{cases} f_0 + |m| \Delta F_x + F_{доп}, \\ f_0 + |n| \Delta F_z, \end{cases} \quad (3)$$

де f_0 – несуча частота центрального випромінювача;
 $F_{доп} = \frac{c}{2\pi R_u} \frac{1}{[1 - \cos(m\delta\alpha)]}$ – додаткова частота, що дозволяє забезпечити синфазність плоского еквівалентного розкриття.

7. Вибір багатоступінчастого V-подібного частотного розподілу проводиться відповідно до виразів

$$f_{0mnz} = f_0 + v \left[\frac{n}{v} \right] \Delta F_z, \quad (4)$$

$$f_{0mnx} = f_0 + v \left[\frac{m}{v} \right] \Delta F_x + F_{допx}^m,$$

$$\text{де } F_{допx}^m = \frac{c}{2\pi R_u} \frac{1}{\{1 - \cos(v \left[\frac{m}{v} \right] \delta\alpha)\}}.$$

8. Фазування циліндричної ФАР здійснюється шляхом розрахунку фази для кожного робочого елемента циліндричної ФАР, що залежить від частотного розподілу:

$$\phi_{0mn} = -\frac{2\pi f_{0mn}}{c} \left[ct_\phi - y_\phi - \frac{\rho_{mn}^2}{2y_\phi} - \frac{x_\phi^2 + z_\phi^2}{2y_\phi} + \frac{x_{mn}x_\phi + z_{mn}z_\phi}{y_\phi} + Y_{mn} \right], \quad (5)$$

де x_{mn}, y_{mn}, z_{mn} – координати розташування випромінювача в загальній системі координат; x_ϕ, y_ϕ, z_ϕ – координати точки фокусування;

$$\rho_{mn}^2 = x_{mn}^2 + z_{mn}^2;$$

$$Y_{mn} = y_{mn} + \frac{\rho_{mn}^2 + x_\phi^2 + z_\phi^2}{2y_\phi^2} y_{mn} - \frac{x_{mn}x_\phi + z_{mn}z_\phi}{y_\phi^2} y_{mn}.$$

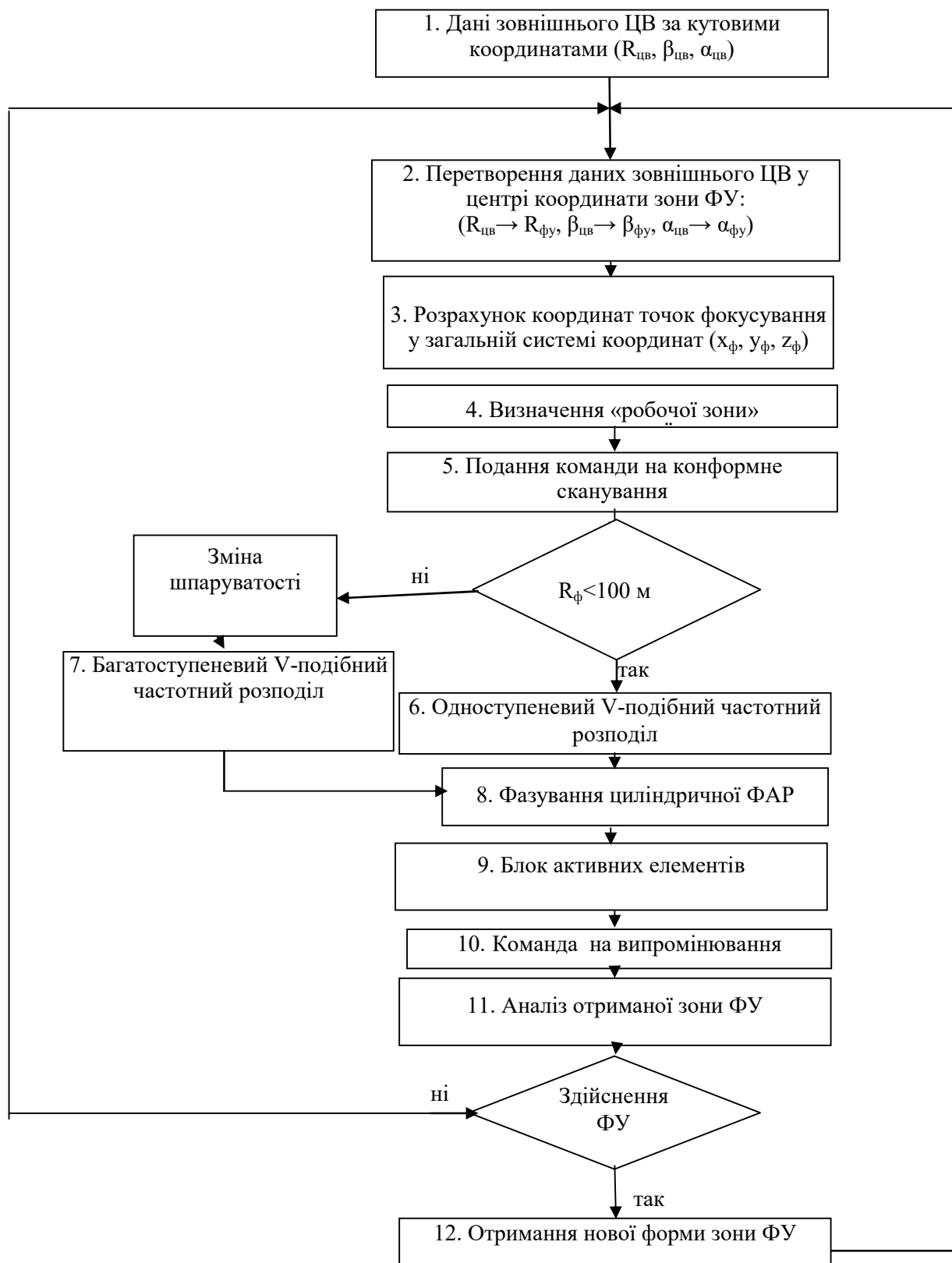


Рисунок 1 – Схема алгоритму формування зони ФУ циліндричної ФАР

Така процедура фазування забезпечує також сканування за кутом місця. Під час використання просторово-фазо-частотного управління основним елементом у цьому блоці є фазокогерентний цифровий синтезатор частот.

9. Блок активних елементів містить у собі підсилювачі потужності, які розташовані в кожному каналі випромінювача.

10. Подання команди на випромінювання. Формується пачка багаточастотних просторово-часових сигналів із заданою скважністю:

$$\mathbb{E}_{\Sigma}(P_{\phi}, t) = \sum_{i=1}^N \mathbb{E}(P_{\phi}, t - iT_{\text{пвс}}) \quad (6)$$

11. Якщо успішне ФУ РКБ не відбулося, алгоритм повторює свою роботу. У разі успішного ФУ РКБ подальша робота здійснюється за новою ЦВ.

Успішність роботи запропонованого алгоритму суттєво впливає на ефективність використання засобів ФУ РКБ на базі циліндричної ФАР, а також підвищує бойову живучість автобронетанкової техніки (броньованих колісних машин).

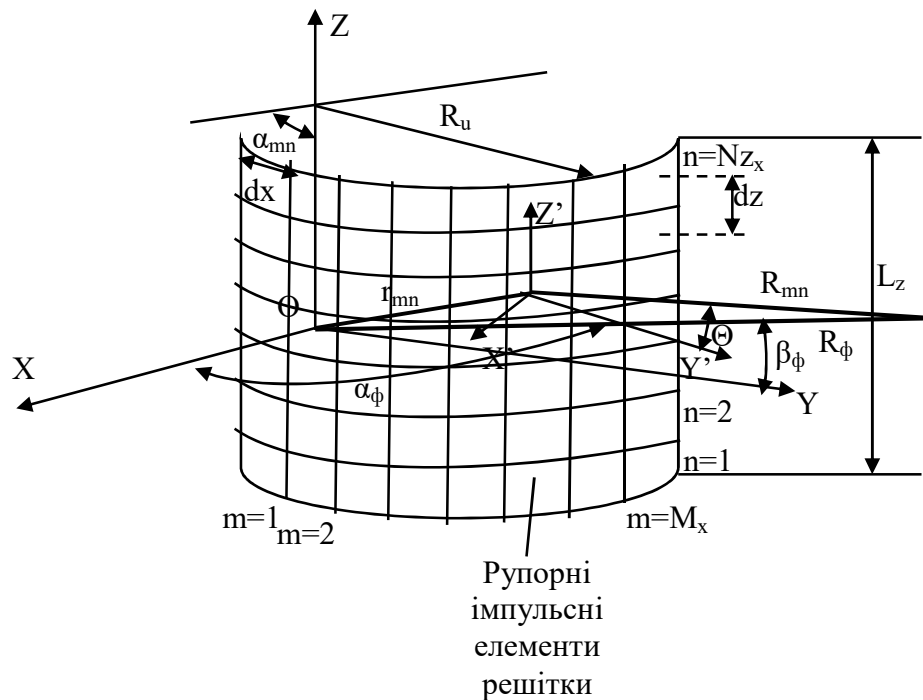


Рисунок 2 – Робоча зона ФАР у загальній системі координат $OXYZ$, випромінювач у місцевій системі координат $DX'Y'Z'$

Висновки

1. Запропоновано алгоритм формування зони функціонального ураження циліндричної ФАР, що дає змогу оперативно адаптувати зону функціонального ураження радіокерованих боєприпасів залежно від умов тактичної обстановки під час руху як колон автобронетанкової техніки (броньованих колісних машин), так і рухомих засобів знешкодження радіокерованих боєприпасів.

2. Алгоритм враховує опуклість антенних решіток, а саме: кривизну їх поверхні; в утворюючій площині застосовано лінійний просторово-частотний закон управління; площа напрямної залежить від радіуса циліндричної ФАР, кроку уздовж направляючої та діапазону частот.

3. Отримала подальший розвиток методика обґрунтування технічних характеристик мобільних антенних систем засобів знешкодження радіокерованих боєприпасів на автобронетанковій техніці, яка на відміну від відомих використовує алгоритм формування зони функціонального ураження циліндричної ФАР, що дозволяє автоматизувати процес визначення технічних характеристик та зони функціонального ураження у разі зміни умов використання автобронетанкової техніки.

Подальшого дослідження потребують спеціальні сигнальні конструкції з кращими енергетичними властивостями щодо функціонального ураження радіокерованих боєприпасів.

Перелік джерел посилання

1. Про Національну гвардію України : Закон України від 13.03.2014 р. № 876-VII.URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/876-18#Text> (дата звернення: 13.01.2022).

2. Іохов О. Ю., Малюк В. Г., Каплун Є. О. Алгоритм визначення меж зони завадостійкої роботи радіоканалу зв'язку UHF / VHF діапазону в умовах роботи системи джерел радіопридушення, розташованих на різних висотах. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. 2021. №1(37). С. 38–51.

3. Іохов О. Ю., Каплун Є. О., Сальніков О. М. Оцінка характеристик каналів радіозв'язку радіокерованих боєприпасів. *Честь і закон*. 2021 № 3(78), С. 64–70.

4. Іохов О. Ю., Малюк В. Г., Каплун Є. О. Обґрунтування основних технічних вимог до засобів знешкодження радіокерованих боєприпасів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2021. Вип. 3(65). С. 130–134.

5. Іохов О. Ю., Каплун Є. О., Головнін О. О. Методика розрахунку показників бойової ефективності засобів знешкодження радіокерованих боєприпасів. *Збірник наукових праць ЦНДІ ОБТ ЗС України*. 2021. Вип. 43(93). С. 6–15.

6. Іохов О. Ю., Каплун Є. О. Методика обґрунтування технічних характеристик мобільних антенних систем засобів знешкодження радіокерованих боєприпасів. *Збірник наукових праць НА ДПС України ім. Б. Хмельницького*. 2021. Вип. 3(75). С. 91–97.

7. Gorobets N. N., Lebedev A. S., Elizarenko A. A. Spatial distribution of the amplitude of electromagnetic waves in the near zone of linear and flat antenna arrays. *Antenna Theory and Techniques (ICATT): XI International Conference*. 2017. P. 180–182.

8. Gorobets N. N., Ovsyannikova Y. Y. Wave processes in the near-field zone of large aperture antenna. *Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW): 9th International Kharkiv Symposium*. 2016. P. 1–3.

9. Boutayeb P. Watson. Broadband collocated antennas with three orthogonal polarizations. *Antennas and Propagation (EUCAP): 11th European Conference*. 2017. P. 2228–2232.

10. Compact antenna for digital beamforming with software defined radios / A. Narbudowicz et al. *Antennas and Propagation (ISAP): International Symposium*. 2017. P. 1–2.

11. Narbudowicz A., Ammann M. Low-Cost Multimode Patch Antenna for Dual MIMO and Enhanced Localization Use. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2018. Vol. 66. № 1. P. 405–408.

12. Аникин А. С., Крутиков М. В. Эффективность фокусировки плоских активных фазированных антенных решеток вдоль оптической оси в ближней зоне. *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2015. № 4 (38). С. 67–75.

Стаття надійшла до редакції 09.02.2022 р.

UDC 623.624.9

О. Іохов, Ye. Kaplun, O. Salnikov

ALGORITHM FOR THE FORMATION OF A ZONE OF FUNCTIONAL INJURY OF RADIO CONTROLLED AMMUNITION FOR THE PROTECTION OF ARMORED VEHICLES

The analysis of modern methods and means of neutralization of radio-controlled ammunition is carried out, the advantage of using cylindrical phased array antennas for construction of mobile means of neutralization of radio-controlled munitions at their installation on motor transport is shown, the algorithm of adapted formation of the zone of functional damage of radio-controlled ammunition using cylindrical phased array antennas. The algorithm of formation of the zone of functional damage of cylindrical headlights is offered, which allows to quickly adapt the zone of functional damage of radio-controlled ammunition depending on the conditions of the tactical situation when moving both columns of armored vehicles and mobile means of disposal of radio-controlled ammunition. The aim of the article is to develop an algorithm for forming a pattern of cylindrical phased array antenna to create a zone of functional damage to radio-controlled ammunition. An important advantage of such a phased array antenna compared to flat antenna systems is the ability to support the simultaneous formation of several directions of the pattern, which are at different azimuths. The proposed algorithm takes into account the convexity of the antenna arrays, namely: takes into account the curvature of their surface; the linear space-frequency control law is applied in the forming plane; in the plane of the guide depends on the radius of the cylindrical headlights, the step along the guide and the frequency range. The method of substantiation of technical characteristics of mobile antenna systems of means of neutralization of radio-controlled ammunition on armored vehicles has been further developed. armored vehicles.

Keywords: *phased antenna array, radio-controlled munitions, functional damage zone, phased array beamforming algorithm, armored vehicles, armored wheeled vehicles, combat survivability.*

Іохов Олександр Юрійович – доктор технічних наук, доцент, начальник кафедри військового зв'язку та інформатизації Національної академії Національної гвардії України
<https://orcid.org/0000-0002-1718-0138>

Каплун Євген Олександрович – ад'юнкт Національної академії Національної гвардії України
<https://orcid.org/0000-0002-1085-446x>

Сальніков Олександр Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри військового зв'язку та інформатизації Національної академії Національної гвардії України
<https://orcid.org/0000-0003-4973-9634>