

УДК 621.396.67

DOI <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2025-01-09-05>

ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ПАРАМЕТРИ 16-ЕЛЕМЕНТНОЇ ТА 64-ЕЛЕМЕНТНОЇ ФАР ДЛЯ РАДІОСИСТЕМ НВЧ ДІАПАЗОНУ

Почерняєв В. М., д.т.н., проф., Національна академія Служби безпеки України, Київ, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-7130-8668>, vpochernyaev@gmail.com

Сивкова Н. М., доктор філософії, Національна академія Служби безпеки України, Київ, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-4934-4109>, natsivonat@gmail.com

Магомедова М. С., доктор філософії, Київський фаховий коледж зв'язку, Київ, Україна. <https://orcid.org/0000-0003-1936-5555>, kkz.praktika@ukr.net

Гонтар С. В., Київський фаховий коледж зв'язку, Київ, Україна. <https://orcid.org/0009-0006-6862-3548>, serg.hontar@gmail.com

Анотація. У статті рекомендується використання фазованих антенних решіток у мобільних цифрових комбінованих тропосферних системах військового та спеціального призначення. Відмічено, що для організації управління в військових конфліктах, при виникненні надзвичайних і позаштатних ситуацій у мирний час радіозв'язок НВЧ діапазону є основним типом зв'язку. Одним із важливих параметрів енергетичного потенціалу є коефіцієнт підсилення передавальної та приймальної антен. Використання висконаправлених фазованих антенних решіток у діапазоні НВЧ дає змогу суттєво підвищити надійність і стійкість зв'язку на тропосферних лініях зв'язку. Перспективним є створення мобільного комплексу цифрового тропосферного зв'язку, у складі якого є мобільна вузлова цифрова тропосферна станція й цифрові тропосферні станції різних модифікацій: типу Р-412 МУ, малогабаритні на автомобілях типу «жеер», переносні (портативні). При цьому мобільна вузлова цифрова тропосферна станція є станцією, яка працює за схемою «точка-багатоточка». Виділено напрями розвитку радіотехнологій НВЧ діапазону в системі військового та спеціального зв'язку. Відмічено, що основними поляризаційними параметрами фазованих антенних решіток є коефіцієнт поляризації та кут орієнтації еліпса поляризації. Подано поляризаційні параметри фазованих антенних решіток і їх характеристики, розрахунки кутів сканування для ФАР-16 і ФАР-64. Приведено графічні залежності коефіцієнта поляризації та кута орієнтації еліпса поляризації від кутів сканування й геометричних параметрів ФАР-16 і ФАР-64. Отримано чисельні результати, що дають змогу розраховувати поляризаційні параметри фазованих антенних решіток, а також простежити динаміку зміни поляризаційних параметрів при різних кутах сканування. Показано, що амплітудний розподіл впливає на поляризаційні параметри залежно від кількості елементів фазованої антенної решітки практично однаково: чим більша відмінність в амплітудному розподілі правополяризаційних і лівополяризаційних елементів, тим більше коефіцієнт поляризації прямує до кругової поляризації того знака, амплітудний розподіл якого ближче до рівномірного.

Ключові слова: фазована антенна решітка; коефіцієнт поляризації; кут орієнтації еліпса поляризації; кут сканування; мобільні цифрові комбіновані тропосферні станції.

POLARIZATION PARAMETERS OF 16-ELEMENTS AND 64-ELEMENTS PHASED ANTENNA ARRAYS FOR MICROWAVE RADIOSYSTEMS

Vitaly Pochernyaev, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Academy of Security Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0001-7130-8668>, vpochernyaev@gmail.com

Nataliia Syvkova, Doctor of Philosophy, National Academy of Security Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0002-4934-4109>, natsivonat@gmail.com

Mariia Mahomedova, Doctor of Philosophy, Kyiv Professional College of Communications, Kyiv, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0003-1936-5555>, kkz.praktika@ukr.net

Serhii Hontar, Kyiv Professional College of Communications, Kyiv, Ukraine. <https://orcid.org/0009-0006-6862-3548>, serg.hontar@gmail.com

Abstract. The article recommends the use of phased antenna arrays in mobile digital troposcatter combined systems for military and special purposes. It is noted that for organizing control in military conflicts, in the event of emergency and abnormal situations in peacetime microwave radio communication is the main type of communication. One of the important parameters of the energy potential is the gain of the

transmitting and receiving antennas. The use of highly directional phased antenna arrays in the microwave range allows for a significant increase in the reliability and stability of communications on tropospheric communication lines. A promising option is the creation of a mobile digital tropospheric communication complex, which includes a mobile nodal digital tropospheric station and digital tropospheric stations of various modifications: type R-412 MU, small-sized on vehicles such as "jeep" and portable. In this case, the mobile nodal digital tropospheric station is a station operating on the "point-to-multipoint" scheme. In the article highlights the development directions of microwave radio technologies in the military and special communications system. In the article notes that the main polarization parameters of phased antenna arrays are the polarization coefficient and the orientation angle of the polarization ellipse. The article presents the polarization parameters of phased antenna arrays and their characteristics, the calculation of scanning angles for PAA-16 and PAA-64. Graphic dependences of the polarization coefficient and the angle of orientation of the ellipse polarization on the scanning angles and geometric parameters of the FAR-16 and FAR-64 are given. Numerical results are obtained that allow calculating the polarization parameters of phased antenna arrays, as well as tracking the dynamics of changes in polarization parameters, both at different scans of the diagram DS and at different parameters of the amplitude distribution. It is shown that the amplitude distribution affects the polarization parameters depending on the number of elements of the phased antenna arrays in almost the same way: the greater the difference in the amplitude distribution of right-hand and left-hand polarization elements, the more the polarization coefficient is directed toward the circular polarization of the sign whose amplitude distribution is closer.

Key words: phased antenna array; polarization coefficient; polarization ellipse orientation angle; scanning angle; mobile digital combined tropospheric stations.

Вступ

Для організації управління у військових конфліктах, при виникненні надзвичайних і позаштатних ситуацій у мирний час радіозв'язок НВЧ діапазону є основним типом зв'язку. Питання підвищення надійності, стійкості та якості радіозв'язку (достовірності передачі інформації) пов'язані з енергетичним потенціалом радіолінії. Одним із важливих параметрів енергетичного потенціалу є коефіцієнт підсилення передавальної та приймальної антен. Широке впровадження фазованих антенних решіток (далі – ФАР) у радіолокації дало змогу рекомендувати використання ФАР у цифрових комбінованих тропосферних системах військового й спеціального призначення. Наприклад, корпорація Raytheon використовує діапазон 14 ГГц та кругову поляризацію для комбінованих тропосферно-космічних станцій військового призначення [1].

Використання високонаправлених ФАР у діапазоні НВЧ дає змогу суттєво підвищити надійність і стійкість зв'язку на тропосферних лініях зв'язку. Перспективним є створення мобільного комплексу цифрового тропосферного зв'язку, у складі якого є мобільна вузлова цифрова тропосферна станція (далі – МВЦТРС) і цифрові тропосферні станції (далі – ЦТРС) різних модифікацій: типу Р-412 МУ, малогабаритні на автомобілях типу «жеер», переносні (портативні). При цьому МВЦТРС є станцією, яка працює за схемою «точка-багатоточка». Схема організація зв'язку такого комплексу представлена на рис. 1.

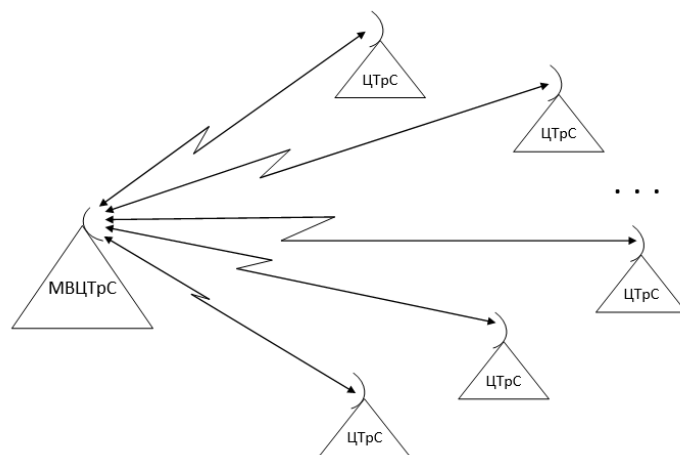


Рис. 1. Схема організації зв'язку «точка-багатоточка» на цифрових тропосферних станціях
Джерело: використано авторами за [1].

Відмітимо, що для телекомунікаційних НВЧ систем економічним є впровадження різних модифікацій ФАР та ефективність від такого впровадження буде вищою, ніж при використанні параболічних антен на штатних засобах зв'язку НВЧ діапазону в системах військового й спеціального зв'язку. Так,

пропонується використання 16-елементної ФАР (ФАР-16) і 64-елементної ФАР (ФАР-64) для мобільної комбінованої цифрової тропосферно-космічної станції [2] та мобільної вузлової цифрової тропосферної станції [3]. Тому комплекс цифрових тропосферних станцій включає таке: мобільну вузлову цифрову тропосферну станцію з ФАР-64 та кінцеві цифрові тропосферні станції у вигляді мобільних комбінованих цифрових тропосферно-космічних станцій з ФАР-16 і мобільних високошвидкісних цифрових тропосферних станцій з ФАР-16 [4].

Напрями розвитку радіотехнологій НВЧ діапазону в системі військового та спеціального зв'язку охоплюють таке:

1) передачу мультимедійної та графічної інформації в завадозахищеному режимі з високою пропускною здатністю;

2) реалізацію завадозахищених каналів цифрового радіозв'язку за рахунок розробки нових сигнально-кодових конструкцій і схем модуляції з розширенням бази сигналів і мінімізації ширини смуги;

3) передачу інформації по каналах терагерцового діапазону частот і близького до нього ділянки спектру піагерцового діапазону частот;

4) використання технологій ФАР різних модифікацій з вузьконаправленими діаграмами спрямованості;

5) введення адаптивних систем контролю якості каналів радіозв'язку.

Аналіз літератури показує, що сучасні радіотехнічні системи НВЧ потребують великого різноманіття ФАР. Тому різноманітним питанням створення ФАР присвячено багато публікацій:

– широкосмуговим і ширококутовим скануючим ФАР – [5; 8; 11; 16; 17; 19; 21; 28; 31; 33];

– створенню ФАР із високим коефіцієнтом підсилення – [6; 10];

– дослідженню та створенню ФАР у високих діапазонах частот – [7; 15; 20; 29];

– використанню нових матеріалів при конструюванні ФАР – [9; 32];

– методиці випробувань ФАР – [12; 13];

– питанням синтезу ФАР – [14; 34];

– створенню активних ФАР [18; 22; 23; 24; 30];

– створенню моноімпульсної ФАР – [25];

– використанню фотонної технології при проєктуванні – [26].

Аналіз дає змогу зробити висновок, що одним із трендів розвитку цифрових радіосистем систем НВЧ діапазону є впровадження ФАР у різних діапазонах частот і для різних призначень [35].

Метою роботи є дослідження поляризаційних параметрів ФАР-64 та ФАР-16 для комплексу цифрових тропосферних станцій

Виконання досліджень

Основними поляризаційними параметрами ФАР є коефіцієнт поляризації P та кут орієнтації еліпса поляризації $\varphi_{ел}$.

Уважаємо, що ФАР складається з N^+ елементів кругової поляризації правого обертання (лінійної горизонтальної поляризації) та з N^- елементів кругової поляризації лівого обертання (лінійної вертикальної поляризації). У напрямку головного максимуму діаграми спрямованості (далі – ДС) ФАР її поляризаційні параметри запишуться в такому вигляді:

коефіцієнт поляризації:

$$P_{\pm} = \frac{|E_{\pm}^+ - E_{\pm}^-|}{|E_{\Sigma}^+ + E_{\Sigma}^-|},$$

кут орієнтації еліпса поляризації:

$$\varphi_{ел} = \frac{\Phi_{\Sigma}^+ - \Phi_{\Sigma}^-}{2},$$

$$\text{де } E_{\pm}^{\pm} = \left| \sum_{i=-(N^- - 1/2)}^{+(N^+ - 1/2)} A_i^{\pm} e^{j\Phi_i^{\pm}} \right|,$$

$$\Phi_{\pm}^{\pm} = \arctg \frac{I_m \left\{ E_{\Sigma}^{\pm} \right\}}{R_e \left\{ E_{\Sigma}^{\pm} \right\}},$$

де $A_i^{\pm}$ – амплітудний розподіл правополяризованих (лінійно-горизонтально поляризованих) і лівополяризованих (лінійно-вертикально поляризованих) елементів, $\Phi_i^{\pm}$ – фазовий розподіл правополяризованих (лінійно-горизонтально поляризованих) і лівополяризованих (лінійно-вертикально поляризованих) елементів.

Запишемо поляризаційні параметри в напрямку максимуму ДС ФАР:

– коефіцієнт поляризації – P ;

– кут орієнтації еліпса поляризації $\varphi_{ел}$;

- амплітудне розподілення на ФАР в i -елементі:

$$A_i^{\pm} = \delta^{\pm} \left[\cos \left(\frac{\pi}{2} \frac{i}{N^2} \right) \right];$$

- фазовий розподіл на ФАР в i -елементі:

$$\psi_i^{\pm} = 2\pi \frac{d}{\lambda} (\sin \varphi - \sin \varphi_{\text{ск}}).$$

У ФАР будуть такі характеристики:

$$P = \left[\sum A^+ e^{j\psi^+} - \sum A^- e^{j\psi^-} \right] / \left[\sum A^+ e^{j\psi^+} + \sum A^- e^{j\psi^-} \right],$$

$$\varphi_{\text{ел}} = \frac{\sum \psi_i^+ - \sum \psi_i^-}{2}.$$

Розрахунки кутів сканування для ФАР-16 для величини $0^\circ \leq \varphi_{\text{ск}} \leq 45^\circ$ та $d/\lambda = 0,6; 0,8$ показані на рис. 2а, б, с, d.

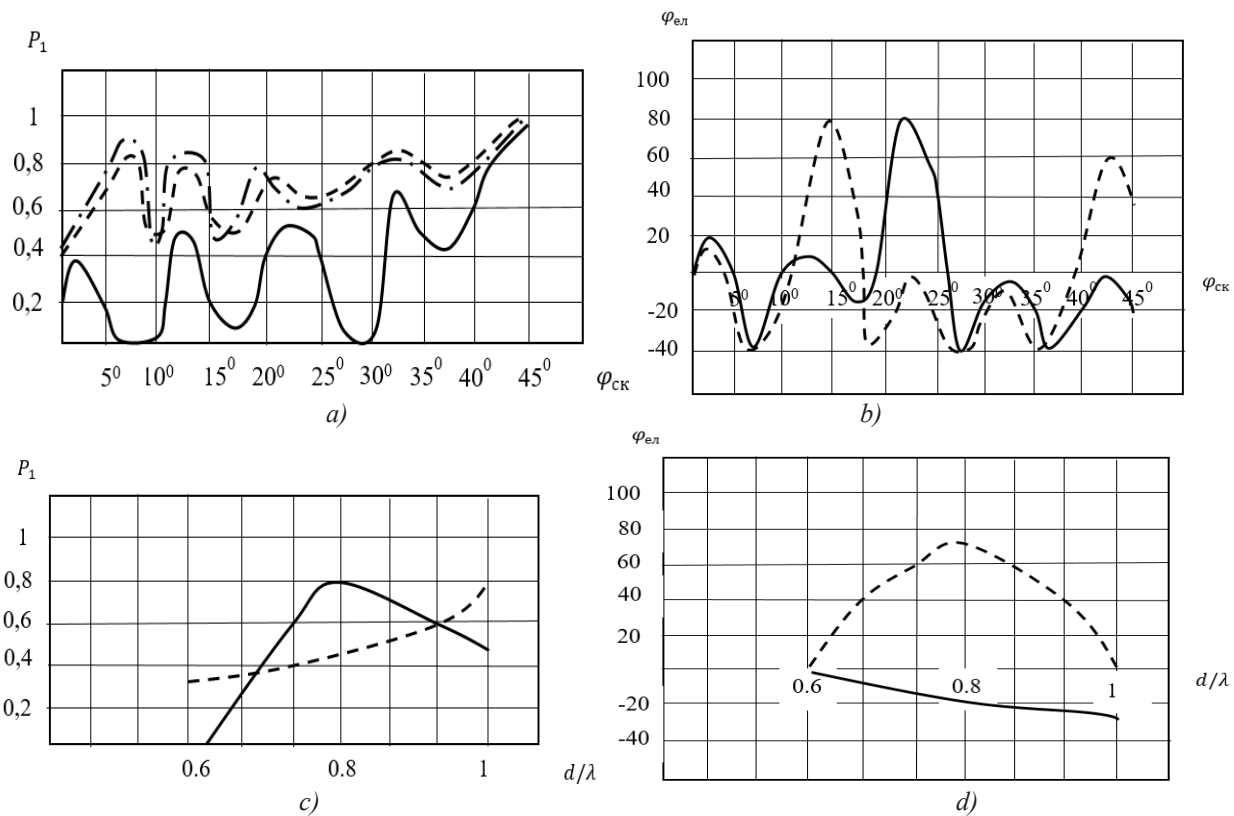


Рис. 2. Залежність коефіцієнта поляризації та кута орієнтації еліпса поляризації від кутів сканування й геометричних параметрів ФАР-16

Розглянемо залежність поляризаційних параметрів від кутів сканування, параметрів амплітудного розподілу й геометричних параметрів для ФАР-16.

При малих кутах сканування ($0^\circ \leq \varphi_{\text{ск}} \leq 15^\circ$) і при $d/\lambda = 0,6$ функція $P = f(\varphi_{\text{ск}})$ змінюється в межах $0 \dots 0,5$, при середніх кутах сканування ($15^\circ \leq \varphi_{\text{ск}} \leq 30^\circ$) – у межах $0,7 \dots 0$, при великих кутах сканування ($30^\circ \leq \varphi_{\text{ск}} \leq 45^\circ$) – у межах $0 \dots 0,95$.

Залежність кута нахилу великої осі еліпса поляризації від кута сканування також має осцилюючий характер. Для тих самих геометричних параметрів $d/\lambda = 0,6$ кут $\varphi_{\text{ел}}$ змінюється в межах $-60^\circ \dots +90^\circ$.

З графіків на рис. 2а, б, с, д видно, що при малих кутах сканування ($\varphi_{ск} \leq 5^\circ$) коефіцієнт поляризації P суттєво залежить від відстані між елементами випромінювання. При середніх і великих кутах сканування ($\varphi_{ск} > 5^\circ$) коефіцієнт поляризації P майже залежить від відстані d між випромінюючими елементами.

Зазначимо, що при куті сканування $\varphi_{ск} = 0$ коефіцієнт поляризації $P=0,3$.

Розрахунки кутів сканування для ФАР-64 для величини $0^\circ \leq \varphi_{ск} \leq 45^\circ$ та $d/\lambda = 0,6; 0,8$ показані на рис. 3а, б, с, д.

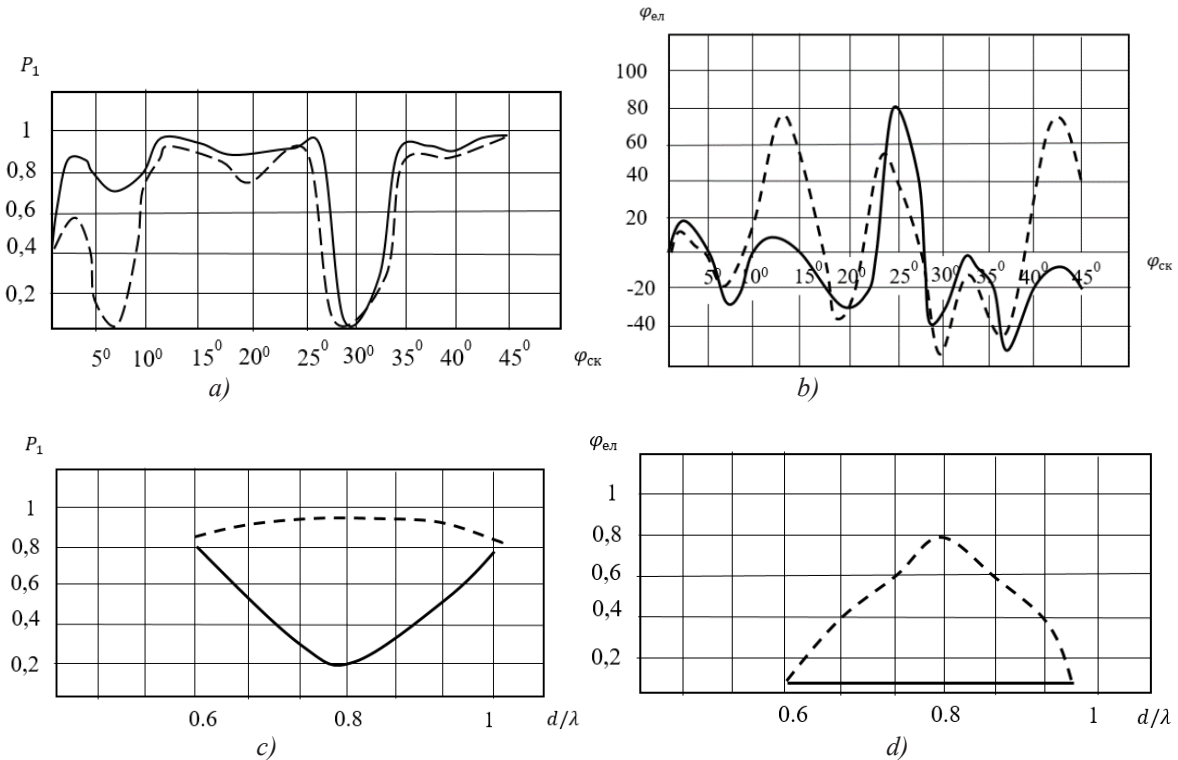


Рис. 3. Залежність коефіцієнта поляризації та кута орієнтації еліпса поляризації від кутів сканування й геометричних параметрів ФАР-64

Розглянемо залежність поляризаційних параметрів від кутів сканування, параметрів амплітудного розподілу й геометричних параметрів для ФАР-64.

При малих кутах сканування ($0^\circ \leq \varphi_{ск} \leq 15^\circ$) і при $d/\lambda = 0,6$ функція $P = f(\varphi_{ск})$ змінюється в межах 0,25 ... 0,95, при середніх кутах сканування ($15^\circ \leq \varphi_{ск} \leq 30^\circ$) – у межах 0,95 ... 0, при великих кутах сканування ($30^\circ \leq \varphi_{ск} \leq 45^\circ$) – у межах 0 ... 0,95.

При середніх і великих кутах сканування ($15^\circ \leq \varphi_{ск} \leq 30^\circ$) коефіцієнт поляризації P майже не залежить від відстані d між випромінюючими елементами.

Залежність кута нахилу великої осі еліпса поляризації від кута сканування також має осцилюючий характер. Для тих самих геометричних параметрів $d/\lambda = 0,6$ кут $\varphi_{ел}$ змінюється в межах $-50^\circ \dots +80^\circ$.

При малих кутах сканування коефіцієнт поляризації P суттєво залежить від величини d/λ . При великих кутах сканування ($30^\circ \leq \varphi_{ск} \leq 45^\circ$) коефіцієнт поляризації P майже не залежить від відстані d між випромінюючими елементами.

Висновок

Отримані чисельні результати, що дають змогу розрахувати поляризаційні параметри ФАР, а також простежити динаміку зміни поляризаційних параметрів як при різних скануванні ДС, так і при різних параметрах амплітудного розподілу.

Показано, що амплітудний розподіл впливає на поляризаційні параметри залежно від кількості елементів ФАР практично однаково: чим більша відмінність в амплітудному розподілі правополяризаційних і лівополяризаційних елементів, тим більше коефіцієнт поляризації прямує до кругової поляризації того знака, амплітудний розподіл якого ближче до рівномірного.

Коефіцієнт поляризації P практично незалежно від кількості випромінюючих елементів при малих кутах сканування ($0^\circ \leq \varphi_{ск} \leq 15^\circ$) має залежність від відстані d між випромінюючими елементами, а при середніх ($15^\circ \leq \varphi_{ск} \leq 30^\circ$) і великих ($30^\circ \leq \varphi_{ск} \leq 45^\circ$) кутах сканування – практично не залежить.

Залежність кута нахилу головної вісі еліпса поляризації від кута сканування – осцилююча, глибина осциляції залежить від виду амплітудного розподілу, кількості елементів ФАР і відстані між елементами. Характер залежності кута нахилу великої вісі еліпса поляризації від відстані між елементами при $N=16$ та $N=64$ однаковий. При малих кутах сканування ($\varphi_{\text{ск}} \leq 5^\circ$) кут орієнтації еліпсу майже не залежить від відстані між елементами, тоді як при середніх і великих кутах сканування ($\varphi_{\text{ск}} \leq 10^\circ$) значно змінюється.

Перспективним є ФАР у мобільних комбінованих цифрових тропосферно-радіорелейних станціях [36; 37], мобільних комбінованих цифрових тропосферно-іоносферних станціях [38] і мобільних вузлових цифрових тропосферних станціях [39].

Література

1. DART-T. Dual-Mode All-Band Relocatable-Communications Transport Terminal. HC-BLOS Family of Products. URL: <https://vovklicl.nl/intercom/2010/4/47.pdf>.
2. Патент України на винахід № 126206 Україна: С2. заявл. 10.03.2020; опубл. 31.08.2022. Бюл. № 35. Мобільна вузлова цифрова тропосферна станція.
3. Патент України на винахід № 126203 Україна: С2. заявл. 17.01.2020; опубл. 31.08.2022. Бюл. № 35. Мобільна цифрова тропосферно-космічна станція.
4. Патент України на винахід № 122168 Україна: С2. заявл. 01.08.2018; опубл. 25.09.2020. Бюл. № 18. Мобільна високошвидкісна цифрова тропосферна станція.
5. Bakan T., Yilmaz B. A., Cetintepe Ç., Alatan L. A Dual-Polarized Low-Profile Wideband Antenna Array with Wide-Scan Ability. 2022 IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology (PAST), Waltham, MA, USA, 2022. P.1-4. DOI: 10.1109/PAST49659.2022.9975098.
6. Su Y., Soares I. V., Balon S., Cao J., Nikolayev D., Skrivervik A. K. Compact Irregular Conformal Phased Array: High-Gain Wide-Scan Onboard System for Enhancing UAV Communication. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2024. Vol. 73. № 12. P. 18005–18016. DOI: 10.1109/TVT.2024.3445456.
7. Aljuhani A. H., Kanar T., Zahir S., Rebeiz G. M. A 256-Element Ku-Band Polarization Agile SATCOM Receive Phased Array With Wide-Angle Scanning and High Polarization Purity. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2021. Vol. 69, № 5. P. 2609–2628. DOI: 10.1109/TMTT.2021.3056439.
8. Bu D., Qu S.-W. Millimeter-Wave Endfire Circularly Polarized Phased Array With Wideband Wide-Angle Scanning. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024. Vol.72, No.10, P.7644–7650. DOI: 10.1109/TAP.2024.3451158.
9. Fang S.-G., Qu S.-W., Yang S., Li X.-Q., Sun H.-B., Zhou Z.-P. Low Scattering Patch Array Antenna Based on Grooved Ground. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2021. Vol. 20, № 3. P. 308–312. DOI: 10.1109/LAWP.2020.3048779.
10. Omam Z. R., Abdel-Wahab W. M., Gigoyan S., Safavi-Naeini S. High Gain 4x4 SIW Passive Phased Array Antenna. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, Montreal, QC, Canada, 2020. P. 45–46. DOI: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9329752.
11. Li A., Qu S.-W., Yang S. Conformal Array Antenna for Applications in Wide-Scanning Phased Array Antenna Systems. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2022. Vol. 21, № 9. P. 1762–1766. DOI: 10.1109/LAWP.2022.3179404.
12. Ghaffarian N. et al. Characterization and Calibration Challenges of an K-Band Large-Scale Active Phased-Array Antenna with a Modular Architecture. 50th European Microwave Conference (EuMC), Utrecht, Netherlands, 2021, P. 1039–1042. DOI: 10.23919/EuMC48046.2021.9338111.
13. Ciociola A., Infante L., Ricciardella N., Solimene R., Felaco M., Pellegrini G. Digitally Synthesized Antenna Test Bench for Next Generation Phased Array Systems. IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology (PAST), Waltham, MA, USA, 2022, P. 1–6. DOI: 10.1109/PAST49659.2022.9975028.
14. Cash I., Tong K.-F., Al-Armaghany A. Passive Phase Multiplication as a Means Towards Low-Cost, High-Performance Phased Array Antennas. IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (ARRAY), Boston, MA, USA, 2024. P. 1–6. DOI: 10.1109/ARRAY58370.2024.10880421.
15. Sano M., Higaki M., Wada K., Hashimoto K. A Patch Antenna Array With a Rotatable Polarization Plane for Ku-Band Phased Arrays. International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Osaka, Japan, 2021. P. 7–8. DOI: 10.23919/ISAP47053.2021.9391459.
16. Kim J.-W., Chae S.-C., Jo H.-W., Yeo T.-D., Yu J.-W. Wideband Circularly Polarized Phased Array Antenna System for Wide Axial Ratio Scanning. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2022. Vol. 70, № 2. P. 1523–1528. DOI: 10.1109/TAP.2021.3078509.
17. Chikkodi R., Vangol P. A. M., Kedar A. Wide-Scan and Wideband Antenna Array Design for Phased Array applications in X-band. IEEE Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon), Hassan, India, 2021. P. 197–201. DOI: 10.1109/MysuruCon52639.2021.9641092.
18. Xue X., Shi H., Jiang T., Han Y., Zhi G. Design of a Low-Profile Polarization Tracking Active Phased Array Antenna for Satcom On the Move. IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), Chongqing, China, 2022. P. 1765–1769. DOI: 10.1109/ITOEC53115.2022.9734657.
19. Peng J.-J., Qu S.-W., Xia M., Yang S. Wide-Scanning Conformal Phased Array Antenna for UAV Radar Based on Polyimide Film. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2020. Vol. 19, № 9. P. 1581–1585. DOI: 10.1109/LAWP.2020.3011412.
20. Omam Z. R., Abdel-Wahab W. M., Ghafarian N., Gigoyan S., Safavi-Naeini S. Two-way Passive Phased Array Antenna for Simultaneous Transmit and Receive Signals. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI), Singapore, Singapore, 2021. P. 1401–1402. DOI: 10.1109/APS/URSI47566.2021.9704568.
21. Wang D., Zhang X., Xia X., Feng C. An Ultra Wideband Wide-Angle Scanning Phased Array Antenna. IEEE 12th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Nanjing, China, 2024. P. 1–2. DOI: 10.1109/APCAP62011.2024.10881986.
22. Kedar A. Indigenous State-of-the-Art Development of Wide Band and Wide Scan Active Phased Array Antennas. IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON), Bangalore, India, 2022. P. 1572–1577. DOI: 10.1109/MAPCON56011.2022.10046969.
23. Gupta N., Jha B. M. Wideband Phased Array Radar Antenna Using Low Profile Cavity-Backed Slots. IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON), Ahmedabad, India, 2023. P. 1–4. DOI: 10.1109/MAPCON58678.2023.10464007.
24. Abdel-Wahab W. M., Palizban A., Ehsandar A., Safavi-Naeini S. SIW-Feed for 20 GHz Active Phased Array (1024-Element) Antenna with Modular Architecture. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, Montreal, QC, Canada, 2020. P. 629–630. DOI: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9329789.

25. Waters J., Pour M. Dual-Mode Antenna Element with Application in a Linear Monopulse Phased Array. IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (ARRAY), Boston, MA, USA, 2024. P. 1-3. DOI: 10.1109/ARRAY58370.2024.10880334.
26. Kataria C. Y., Cantley L. E., Fenn A. J., Terranova D. F., Yegnanarayanan S. S., Zhang B. Design of a Flexible Thermally-Drawn Photonics Receive Linear Dipole Phased Array Antenna at UHF. IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology (PAST), Waltham, MA, USA, 2022. P. 1–8. DOI: 10.1109/PAST49659.2022.9974961.
27. Zhu Y., Y Hao., Deng C. Single-Layer Dual-Polarized End-Fire Phased Array Antenna for Low-Cost Millimeter-Wave Mobile Terminal Applications. IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA), Guangzhou, China, 2022. P. 1–3. DOI: 10.1109/CAMA56352.2022.10002551.
28. Liu M., Li W. An X-band Dual-polarized Microstrip Phased Array Antenna with Wide-angle Scanning. 13th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE), Zhuhai, China, 2021. P. 1–3. DOI: 10.1109/ISAPE54070.2021.9753153.
29. Jihao L. Antenna on board package for 5G millimeter wave phased array antenna. 21st International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), Guangzhou, China, 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICEPT50128.2020.9202652.
30. Deng Y., Li B., Zhang J., Sun L., Zhou Z. A Compact W-band Tapered Slot Antenna on Silicon Substrate for Active Phased Array Antenna. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Shanghai, China, 2020. P. 1–3. DOI: 10.1109/ICMMT49418.2020.9386634.
31. Tadayon H., Ardakani M. D., Karimian R., Ahmadi S., M Zaghoul. A Wideband Non-Reciprocal Phased Array Antenna with Side Lobe Level Suppression. IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology (PAST), Waltham, MA, USA, 2022. P. 1–4. DOI: 10.1109/PAST49659.2022.9974969.
32. Banerjee R., Sharma S. K., Nguyen P., Chieh J.-C. S., Olsen R. Investigations of All Metal Heat Sink Dual Linear Polarized Phased Array Antenna for Ku-Band Applications. International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES), Monterey, CA, USA, 2020. P. 1–2. DOI: 10.23919/ACES49320.2020.9196052.
33. Yang G., Zhang Y., Zhang S. Wide-Band and Wide-Angle Scanning Phased Array Antenna for Mobile Communication System. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*. 2021. Vol. 2. P. 203–212. DOI: 10.1109/OJAP.2021.3057062.
34. Schwartzman D., Palmer R. D., Yu T.-Y., Nai F. Phase-Only Antenna Pattern Synthesis for Polarimetric Phased Array Radar. IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (ARRAY), Boston, MA, USA, 2024. P. 1–6. DOI: 10.1109/ARRAY58370.2024.10880311.
35. Почерняев В. М., Магомедова М. С., Сивкова Н. М. Плоска фазована антенна решітка для мобільних цифрових станцій зв'язку «точка-багатоточка» НВЧ діапазону. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2024. Т. 2. № 76. С. 187–190. DOI: 10.26906/SUNZ.2024.2.187.
36. Патент України на винахід № 112217 Україна: С2. заявл. 12.09.2014; опубл. 10.08.2016. Бюл. №15 Мобільна цифрова тропосферно-радіорелейна станція.
37. Патент України на винахід № 120288 Україна: С2. заявл. 29.08.2017; опубл. 11.11.2019. Бюл. № 21. Мобільна цифрова тропосферно-радіорелейна станція.
38. Патент України на винахід № 127524 Україна: С2. публ. 20.09.2023. Бюл № 38. Мобільна цифрова тропосферно-іоносферна станція.
39. Почерняев В. М., Сивкова Н. М., Магомедова М. С. Мобільна вузлова цифрова тропосферна станція. *Системи озброєння і військова техніка*. 2024. № 4(76). С. 6–15. <https://journal-hnups.com.ua/index.php/soivt/article/view/1542/1408>.

References

1. DART-T. Dual-Mode All-Band Relocatable-Communications Transport Terminal. HC-BLOS Family of Products. URL: <https://vovklicl.nl/intercom/2010/4/47.pdf>.
2. Патент України на винахід № 126206 Україна: С2. заявл. 10.03.2020; опубл. 31.08.2022, Биул. № 35. Мобільна вузлова цифрова тропосферна станція.
3. Патент України на винахід № 126203 Україна: С2. заявл. 17.01.2020; опубл. 31.08.2022, Биул. № 35. Мобільна цифрова тропосферно-космічна станція.
4. Патент України на винахід № 122168 Україна: С2. заявл. 01.08.2018; опубл. 25.09.2020, Биул. № 18. Мобільна високоскоростна цифрова тропосферна станція.
5. Bakan T., Yilmaz B. A., Çetintepe Ç., Alatan L. A Dual-Polarized Low-Profile Wideband Antenna Array with Wide-Scan Ability. 2022 IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology (PAST), Waltham, MA, USA, 2022. P. 1–4. DOI: 10.1109/PAST49659.2022.9975098.
6. Su Y., Soares I. V., Balon S., Cao J., Nikolayev D., Skrivervik A. K. Compact Irregular Conformal Phased Array: High-Gain Wide-Scan Onboard System for Enhancing UAV Communication. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024. Vol. 73, № 12, P. 18005–18016. DOI: 10.1109/TVT.2024.3445456.
7. Aljuhani A. H., Kanar T., Zahir S., Rebeiz G. M. A 256-Element Ku-Band Polarization Agile SATCOM Receive Phased Array With Wide-Angle Scanning and High Polarization Purity. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021. Vol. 69, № 5, P. 2609–2628. DOI: 10.1109/TMTT.2021.3056439.
8. Bu D., Qu S.-W. Millimeter-Wave Endfire Circularly Polarized Phased Array With Wideband Wide-Angle Scanning. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024. Vol. 72, № 10, P. 7644–7650. DOI: 10.1109/TAP.2024.3451158.
9. Fang S.-G., Qu S.-W., Yang S., Li X.-Q., Sun H.-B., Zhou Z.-P. Low Scattering Patch Array Antenna Based on Grooved Ground. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021. Vol. 20, № 3, P. 308–312. DOI: 10.1109/LAWP.2020.3048779.
10. Omam Z. R., Abdel-Wahab W. M., Gigoyan S., Safavi-Naeini S. High Gain 4×4 SIW Passive Phased Array Antenna. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting*, Montreal, QC, Canada, 2020, P. 45–46. DOI: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9329752.
11. Li A., Qu S.-W., Yang S. Conformal Array Antenna for Applications in Wide-Scanning Phased Array Antenna Systems. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2022. Vol. 21, № 9, P. 1762–1766. DOI: 10.1109/LAWP.2022.3179404.
12. Ghaffarian N. et al. Characterization and Calibration Challenges of an K-Band Large-Scale Active Phased-Array Antenna with a Modular Architecture. 50th European Microwave Conference (EuMC), Utrecht, Netherlands, 2021, P. 1039–1042. DOI: 10.23919/EuMC48046.2021.9338111.
13. Ciociola A., Infante L., Ricciardella N., Solimene R., Pellegrini G. Digitally Synthesized Antenna Test Bench for Next Generation Phased Array Systems. *IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology (PAST)*, Waltham, MA, USA, 2022, P. 1–6. DOI: 10.1109/PAST49659.2022.9975028.

14. Cash I., Tong K.-F., Al-Armaghany A. Passive Phase Multiplication as a Means Towards Low-Cost, High-Performance Phased Array Antennas. IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (ARRAY), Boston, MA, USA, 2024, P. 1–6. DOI: 10.1109/ARRAY58370.2024.10880421.
15. Sano M., Higaki M., Wada K., Hashimoto K. A Patch Antenna Array With a Rotatable Polarization Plane for Ku-Band Phased Arrays. International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Osaka, Japan, 2021, P. 7–8. DOI: 10.23919/ISAP47053.2021.9391459.
16. Kim J.-W., Chae S.-C., Jo H.-W., Yeo T.-D., Yu J.-W. Wideband Circularly Polarized Phased Array Antenna System for Wide Axial Ratio Scanning. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022. Vol. 70, № 2, P. 1523–1528. DOI: 10.1109/TAP.2021.3078509.
17. Chikkodi R., Vangol P., A. M., Kedar A. Wide-Scan and Wideband Antenna Array Design for Phased Array applications in X-band. IEEE Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon), Hassan, India, 2021. P. 197–201. DOI: 10.1109/MysuruCon52639.2021.9641092.
18. Xue X., Shi H., Jiang T., Han Y., Zhi G. Design of a Low-Profile Polarization Tracking Active Phased Array Antenna for Satcom On the Move. IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), Chongqing, China, 2022. P. 1765–1769. DOI: 10.1109/ITOEC53115.2022.9734657.
19. Peng J.-J., Qu S.-W., Xia M., Yang S. Wide-Scanning Conformal Phased Array Antenna for UAV Radar Based on Polyimide Film. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020. Vol. 19, № 9, P. 1581–1585. DOI: 10.1109/LAWP.2020.3011412.
20. Omam Z. R., Abdel-Wahab W. M., Ghafarian N., Gigoyan S., Safavi-Naeini S. Two-way Passive Phased Array Antenna for Simultaneous Transmit and Receive Signals. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI), Singapore, 2021. P. 1401–1402. DOI: 10.1109/APS/URSI47566.2021.9704568.
21. Wang D., Zhang X., Xia X., Feng C. An Ultra Wideband Wide-Angle Scanning Phased Array Antenna. IEEE 12th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Nanjing, China, 2024. P. 1–2. DOI: 10.1109/APCAP62011.2024.10881986.
22. Kedar A. Indigenous State-of-the-Art Development of Wide Band and Wide Scan Active Phased Array Antennas. IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON), Bangalore, India, 2022. P. 1572–1577. DOI: 10.1109/MAPCON56011.2022.10046969.
23. Gupta N., Jha B. M. Wideband Phased Array Radar Antenna Using Low Profile Cavity-Backed Slots. IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON), Ahmedabad, India, 2023. P. 1–4. DOI: 10.1109/MAPCON58678.2023.10464007.
24. Abdel-Wahab W. M., Palizban A., Ehsandar A., Safavi-Naeini S. SIW-Feed for 20 GHz Active Phased Array (1024-Element) Antenna with Modular Architecture. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, Montreal, QC, Canada, 2020. P. 629–630. DOI: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9329789.
25. Waters J., Pour M. Dual-Mode Antenna Element with Application in a Linear Monopulse Phased Array. IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (ARRAY), Boston, MA, USA, 2024. P. 1-3. DOI: 10.1109/ARRAY58370.2024.10880334.
26. Kataria C. Y., Cantley L. E., Fenn A. J., Terranova D. F., Yegnanarayanan S. S., Zhang B. Design of a Flexible Thermally-Drawn Photonics Receive Linear Dipole Phased Array Antenna at UHF. IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology (PAST), Waltham, MA, USA, 2022. P. 1–8. DOI: 10.1109/PAST49659.2022.9974961.
27. Zhu Y., Y. Hao., Deng C. Single-Layer Dual-Polarized End-Fire Phased Array Antenna for Low-Cost Millimeter-Wave Mobile Terminal Applications. IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA), Guangzhou, China, 2022. P. 1–3. DOI: 10.1109/CAMA56352.2022.10002551.
28. Liu M., Li W. An X-band Dual-polarized Microstrip Phased Array Antenna with Wide-angle Scanning. 13th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE), Zhuhai, China, 2021. P. 1–3. DOI: 10.1109/ISAPE54070.2021.9753153.
29. Jihao L. Antenna on board package for 5G millimeter wave phased array antenna. 21st International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), Guangzhou, China, 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICEPT50128.2020.9202652.
30. Deng Y., Li B., Zhang J., Sun L., Zhou Z. A Compact W-band Tapered Slot Antenna on Silicon Substrate for Active Phased Array Antenna. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Shanghai, China, 2020. P. 1–3. DOI: 10.1109/ICMMT49418.2020.9386634.
31. Tadayon H., Ardakani M.D., Karimian R., Ahmadi S., M Zaghloul. A Wideband Non-Reciprocal Phased Array Antenna with Side Lobe Level Suppression. IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology (PAST), Waltham, MA, USA, 2022. P. 1–4. DOI: 10.1109/PAST49659.2022.9974969.
32. Banerjee R., Sharma S. K., Nguyen P., Chieh J.-C. S., Olsen R. Investigations of All Metal Heat Sink Dual Linear Polarized Phased Array Antenna for Ku-Band Applications. International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES), Monterey, CA, USA, 2020. P. 1–2. DOI: 10.23919/ACES49320.2020.9196052.
33. Yang G., Zhang Y., Zhang S. Wide-Band and Wide-Angle Scanning Phased Array Antenna for Mobile Communication System. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2021. Vol. 2, P. 203–212. DOI: 10.1109/OJAP.2021.3057062.
34. Schwartzman D., Palmer R. D., Yu T.-Y., Nai F. Phase-Only Antenna Pattern Synthesis for Polarimetric Phased Array Radar. IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (ARRAY), Boston, MA, USA, 2024. P. 1–6. DOI: 10.1109/ARRAY58370.2024.10880311.
35. Pocherniaiev V. M., Mahomedova M. S., Syvkova N. M. Ploska fazovana antenna reshodka dla mobilnykh tsyfrovykh stantsii zviyazku «tochka-bahatotochka» NVCh diapazonu. Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviyazku, 2024. T. 2, № 76, S. 187–190. DOI: 10.26906/SUNZ.2024.2.187.
36. Patent Ukrainy na vynakhid № 112217 Ukraina: C2. zaiavl. 12.09.2014; opubl. 10.08.2016, Biul. № 15. Mobilna tsyfrova troposferno-radioreleina stantsiia.
37. Patent Ukrainy na vynakhid № 120288 Ukraina: C2. zaiavl. 29.08.2017; opubl. 11.11.2019, Biul. № 21. Mobilna tsyfrova troposferno-radioreleina stantsiia.
38. Patent Ukrainy na vynakhid № 127524 Ukraina: S2. publ. 20.09.2023 Biul № 38. Mobilna tsyfrova troposferno-ionosferna stantsiia.
39. Pocherniaiev V. M., Syvkova N. M., Mahomedova M. S. Mobilna vuzlova tsyfrova troposferna stantsiia. Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. 2024, № 4(76). C. 6–15. <https://journal-hnups.com.ua/index.php/soivt/article/view/1542/1408>.

Дата першого надходження рукопису до видання: 10.05.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.06.2025

Дата публікації: 25.07.2025