

УДК 621.396.67

DOI <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2025-02-10-02>

КОРЕКТОР ПОЛЯРИЗАЦІЇ АНТЕННО-ФІДЕРНОГО ТРАКТУ МОБІЛЬНОЇ ЦИФРОВОЇ ТРОПОСФЕРНОЇ СТАНЦІЇ

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

Анотація. Перспективні мобільні цифрові тропосферні станції мають антенно-фідерні тракту, побудовані на частково заповнених діелектриком хвиеводах. В склад антенно-фідерного тракту входять поляризаційні селектори, призначені для забезпечення роботи мобільних цифрових тропосферних станцій в режимах двох лінійних поляризацій – горизонтальної та вертикальної, що потребує забезпечення відповідної кросполяризаційної розв'язки. Коректор поляризації призначений для корекції паразитного поляризаційного зсуву, що вноситься деполаризаторами. Наведена конструкція поляризаційного селектора на частково заповненому діелектриком квадратному хвиеводі. В даній роботі пропонується пристрій, а саме коректор поляризації на частково заповнених діелектриком квадратному хвиеводі, який забезпечує більш високу кросполяризаційну розв'язку для лінійно-поляризованих хвиль. Цей пристрій коректує положення лінійно-поляризованої хвилі в горизонтальній та вертикальній площинах. Проведено аналіз тематичної літератури. Коректор поляризації представляє собою металізований плоско-поперечний стик з двома ортогональними щілинами з увімкненими в них відкритими нелінійними структурами. В роботі досліджено коректор поляризації у вигляді металізованого плоско-поперечного стику з двома ортогональними щілинами з увімкненими в них відкритими нелінійними структурами. В кожному з ортогональних щілин увімкнено відкриту нелінійну структуру у вигляді наноплівки. Наявність тонких ВНС в щілинах у вигляді наноплівок відповідає рівню нанотехнологій. Регулювання вольтамперних параметрів через відкриті нелінійні структури забезпечує необхідну реактивну провідність стику та модуля коефіцієнта трансформації, а ті в свою чергу необхідну кросполяризаційну розв'язку для лінійно-поляризованих хвиль. Записано коефіцієнт кросполяризаційної розв'язки в термінах S-матриці. Приведені власні векторні функції частково заповненого діелектриком квадратного хвиеводу, які виражені через функції Мат'є. Для розрахунків функції Мат'є представлені у вигляді тригонометричних рядів та рядів по функціям Бесселя першого роду. Отримані чисельні результати для коефіцієнта кросполяризаційної розв'язки в залежності від модуля коефіцієнта відображення при різних утриманнях членів рядів функції Мат'є.

Ключові слова: кросполяризаційна розв'язка, лінійно-поляризовані хвилі, відкрита нелінійна структура, наноплівка, частково заповнений діелектриком квадратний хвиевод, модуль коефіцієнта відображення, власні векторні функції, функції Мат'є.

POLARIZATION CORRECTOR OF THE ANTENNA-FEEDER PATH OF A MOBILE DIGITAL TROPOSCATTER STATION

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

Abstract. Promising mobile digital troposcatter stations have antenna-feeder paths built on waveguides partially filled by dielectric. The antenna-feeder path includes polarization selectors designed to ensure the operation of mobile digital troposcatter stations in two linear polarization modes – horizontal and vertical, which ensures the appropriate cross-polarization isolation. A polarization corrector is designed to correct the parasitic polarization shift introduced by depolarizers. The design of a polarization selector based on a square waveguide partially filled by dielectric is presented. In this article proposes a device – a polarization corrector based on a square waveguide partially filled by dielectric that provides higher cross-polarization isolation for linearly polarized waves. The device corrects the position of a linearly polarized wave in the horizontal and vertical planes. A literature review was conducted. The polarization corrector is a metallized flat transverse junction with two orthogonal slits containing open nonlinear structures. The article presents a polarization corrector in the form of a metallized plane-transverse junction with two orthogonal slits containing open nonlinear structures. Each orthogonal

slit contains an open nonlinear structure in the form of a nanofilm. The presence of thin open nonlinear structures in the gaps in the form of nanofilms corresponds to the level of nanotechnology. Adjusting the current-voltage parameters through open nonlinear structures ensures the required junction conductance and transformation ratio modulus, which in turn provides the necessary cross-polarization isolation for linearly polarized waves. The cross-polarization isolation coefficient is written in terms of the S-matrix. The eigenvector functions of a square waveguide partially filled by dielectric are presented, expressed in terms of Mathieu functions. For calculations, the Mathieu functions are presented as trigonometric series and series in terms of Bessel functions of the first kind. Numerical results are obtained for the cross-polarization decoupling coefficient depending on the modulus of the mapping coefficient for different retentions of the terms of the Mathieu function series.

Key words: cross-polarization decoupling, linearly polarized waves, open nonlinear structure, nanofilm, square waveguide partially filled by dielectric, modulus of the mapping coefficient, eigenvector functions, Mathieu functions.

Вступ

Перспективні мобільні цифрові тропосферні станції (МЦТрС) мають антенно-фідерні тракти, побудовані на частково заповнених діелектриком хвильоводах (ЧЗДХ). В склад антенно-фідерного тракту входять поляризаційні селектори, призначені для забезпечення роботи МЦТрС в режимах двох лінійних поляризацій – горизонтальної та вертикальної, що потребує забезпечення відповідної кросполяризаційної розв'язки. Коректор поляризації призначений для корекції паразитного поляризаційного зсуву, що вноситься деполяризаторами. Під деполяризаторами будемо розуміти елементи антенно-фідерного тракту або впливи на трасі розповсюдження сигналу, які призводять до нестійкості площин поляризації.

Запропонований спосіб покращення кросполяризаційної розв'язки для трактів, реалізованих на ЧЗДХ полягає у введенні в тракт після поляризаційного селектора [1] коректора поляризації. Мобільні комбіновані цифрові тропосферно-радіорелейні, тропосферно-космічні, тропосферно-іоносферні станції і мобільна вузлова цифрова тропосферна станція мають антенно-фідерні тракти, що реалізовані на ЧЗДХ [2; 3]. Деякі пристрої та елементи антенно-фідерних трактів МЦТрС та комбінованих цифрових станцій описані в роботах [4–15].

В роботі [1] досліджена конструкція поляризаційного селектора на ЧЗДХ (рис. 1). В даній роботі досліджується пристрій, а саме коректор поляризації на частково заповненому діелектриком квадратному хвильоводі (ЧЗДКХ), який забезпечує більш високу кросполяризаційну розв'язку для лінійно-поляризованих хвиль. Цей пристрій коректує положення лінійно-поляризованої хвилі в горизонтальній та вертикальній площинах.

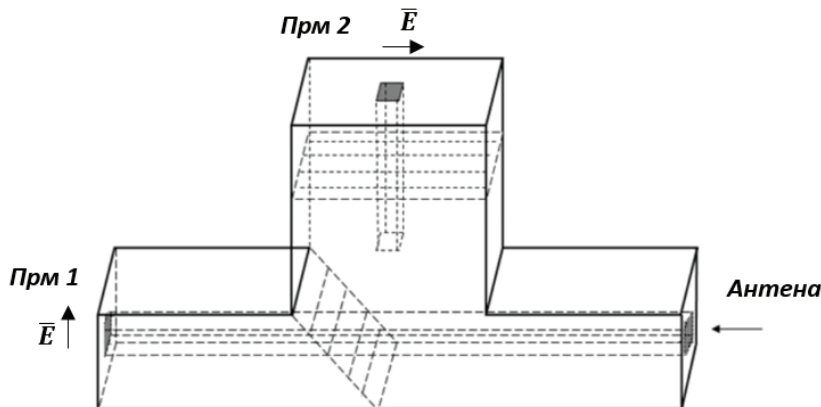


Рис.1. Конструкція поляризаційного селектора на ЧЗДКХ

Аналіз літератури

Аналіз літератури показує, що основні хвильоводні конструкції коректорів поляризації складаються з основного осьового круглого або квадратного хвильоводів та одномодового прямокутного хвильоводу, розташованого під кутом $\pi/2$ до основного осьового хвильоводу. В основному осьовому хвильоводі круглого поперечного перерізу встановлена поздовжня провідна пластина. Ця пластина дозволяє пропускати хвилю однієї лінійної поляризації і відбиває хвилю з іншою лінійною поляризацією в бічний прямокутний хвильовод. Конструкції поляризаційних селекторів, що мають найбільше застосування, показано у довіднику [16]. Також модифікації цих конструкцій досліджено в [17–19; 28; 32], а поляризаційна фільтрація в антенах різних типів і різних діапазонів проаналізовано в [20–27; 29–31; 33–35].

Метою роботи є розробка та дослідження коректора поляризації на ЧЗДКХ.

Основний зміст

Коректор поляризації представляє собою металізований плоско-поперечний стик з двома ортогональними щілинами з увімкненими в них відкритими нелінійними структурами (ВНС). На рис.2 наведено коректор поляризації у вигляді металізованого плоско-поперечного стика з двома ортогональними щілинами з увімкненими в них ВНС. В кожному з ортогональних щілин увімкнені ВНС у вигляді наноплівки. Регулювання вольтаперних параметрів через ВНС забезпечує необхідну jb та $|S_{11}|$, а ті в свою чергу необхідну кросполяризаційну розв'язку для лінійно-поляризованих хвиль.

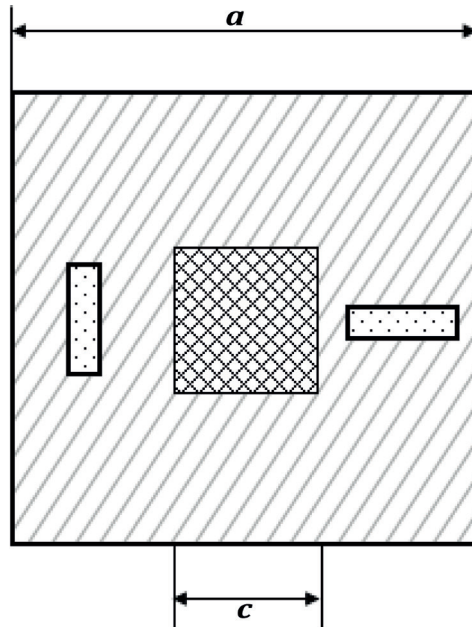


Рис. 2. Коректор поляризації у вигляді металізованого плоско-поперечного стика з двома ортогональними щілинами з увімкненими в них ВНС у вигляді наноплівки

На рис. 3 наведено фрагмент ЧЗДКХ з (увімкненим в нього) коректором поляризації.

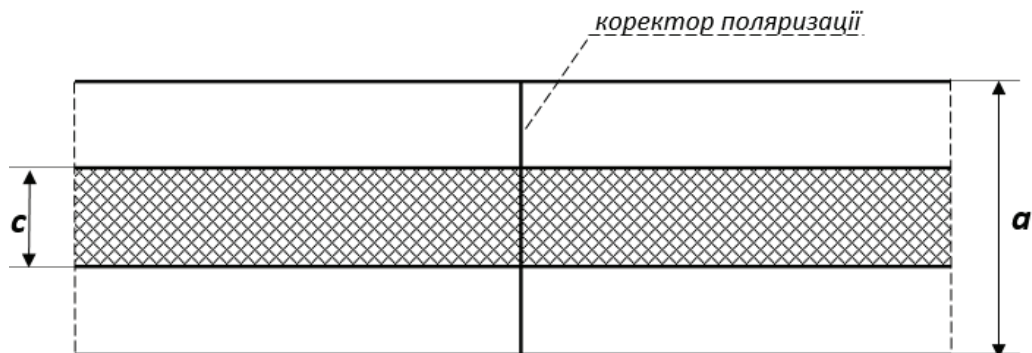


Рис. 3. Фрагмент ЧЗДКХ з (увімкненим в нього) коректором поляризації

Коефіцієнт кросполяризаційної розв'язки в термінах S-матриці визначається наступним чином:

$$X = 20 \lg \frac{|S_{11}| / \sqrt{1 - |S_{11}|^2}}{\sqrt{1 - \frac{|S_{11}|^2}{1 - |S_{11}|^2}}} = 20 \lg \frac{|S_{11}|}{\sqrt{1 - 2|S_{11}|^2}},$$

де $|S_{11}|$ – модуль коефіцієнта відображення від плоско-поперечного стика взаємно перпендикулярних отворів з ВНС.

Конструкція коректора поляризації з ортогональними щілинами еквівалентна ЕН-зчленуванням. Тому:

$$S_{11} = S_{11}^E + S_{11}^H, S_{11}^E = \frac{m_1^2}{2Q_1}, S_{11}^H = -\frac{m_2^2}{2Q_2},$$

$$Q_1 = n^2 + \frac{1}{2}m_1^2 + jb, Q_2 = n^2 + \frac{1}{2}m_2^2 + jb.$$

Такі ЕН-зчленування еквівалентні Е-зчленуванню та Н-зчленуванню подвійного хвильового трийника.

Для Е-зчленування, яке не володіє напрямленими властивостями, в якості функції, апроксимуючої розподіл дотичного електричного поля на отворі, візьмемо власну функцію отвору виду:

$$\bar{\Xi}_1 = \sqrt{\frac{128}{tl}} Ce_1(x, q) \bar{z}^0, \quad (1)$$

де t, l – ширина та довжина прямокутного отвору.

Вираз для коефіцієнту трансформації m_1 [7]:

$$m_1 = \int_S [\bar{n} \bar{\Xi}_1] \bar{\mathbf{S}}_{\perp} \cos \beta_{10} z dS,$$

$$\text{де } \bar{\mathbf{S}}_{\perp} = \sqrt{128 / dl (64 + q^2 + p^2 + q^2 p^2)} * [Ce_1(x, q) Ce_0(y, p) \bar{x}^0 + Ce_1(x, q) Ce_0(y, p) \bar{y}^0]$$

з врахуванням (1) та $\bar{n} = \bar{y}^0$ набуде вигляд:

$$m_1 = N_1 \int_S Ce_0(y, p) Ce_1(x, q) Se_1(x, q) \cos \beta_{10} z dS, \quad (2)$$

де $N_1 = 128 / dl \sqrt{(64 + q^2 + p^2 + q^2 p^2)(64 + q^2)}$, $Ce_0(y, p), Ce_1(x, q)$ – парні функції Мат'є; $Ce_0(y, p), Ce_1(x, q)$ – похідні парні функцій Мат'є; $Se_1(x, q)$ – непарна функція Мат'є; β_{10} – фазова постійна основної хвилі квазі- H_{10} ; q, p – параметри функцій Мат'є [7]; S – площа отвору.

Коефіцієнт трансформації m_1 знайдемо двома способами, в основу яких покладена різниця представлення функцій Мат'є та кількість врахованих членів ряду. Перший спосіб полягає в розкладанні функцій Мат'є в ряд за тригонометричними функціями, другий – в ряд по функціям Бесселя. Збіжність таких рядів досліджена в [36].

При розкладанні функцій Мат'є в ряд по тригонометричним функціям обмежимося членами другого порядку малості. Для цього достатньо враховувати члени ряду з коефіцієнтами q^k, p^k , де $k \leq 2$. Тоді

$$Ce_0(y, p) = 1 - \frac{p}{2} \cos \frac{2\pi}{d} y,$$

$$Ce_1(x, q) = \cos \frac{\pi}{l} x - \frac{q}{8} \cos \frac{3\pi}{l} x + \frac{q^2}{64} \left(\frac{1}{3} \cos \frac{5\pi}{l} x - \cos \frac{3\pi}{l} x \right),$$

$$Se_1(x, q) = \sin \frac{\pi}{l} x - \frac{q}{8} \sin \frac{3\pi}{l} x + \frac{q^2}{64} \left(\sin \frac{3\pi}{l} x + \frac{1}{3} \sin \frac{5\pi}{l} x \right). \quad (3)$$

Після підставлення (3) в (2) інтеграл зводиться до табличного [37].

Функції Мат'є, представлені рядами по функціям Бесселя, мають вигляд:

$$Ce_0(y, p) = A_0 \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k A_{2k} J_{2k} (4\sqrt{2p} \cos y),$$

$$Ce_1(x, q) = (A_1 / 2\sqrt{2q}) \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k A_{2k+1} J_{2k+1} (4\sqrt{2q} \cos x), \quad (4)$$

$$Se_1(x, q) = (B_1 / 2\sqrt{2q}) \operatorname{tg} x \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k (2k+1) B_{2k+1} J_{2k+1} (4\sqrt{2q} \cos x),$$

де A, B – коефіцієнти ряду [36]; J – функції Бесселя першого роду.

Ряди в виразах (4) мають рівномірний збіг [36], тому при розрахунку інтегралу (2) скористаємося результатами роботи [7]. Коефіцієнт трансформації m_1 в цьому випадку виражається через гіпергеометричну функцію Гауса.

Для H -зчленування, який так само не володіє напрямленими властивостями, апроксимуюча функція на отворі:

$$\bar{\Xi}_2 = \sqrt{\frac{128}{dl(64 + p^2)}} Ce_1(y, p) \bar{z}^0, \quad (5)$$

Вираз для коефіцієнту трансформації [7]:

$$m_2 = \left(\frac{k_{10}}{\beta_{10}} \right) \int_S [\bar{n} \bar{\Xi}_2] \bar{S}_z \cos \beta_{10} z dS,$$

$$\text{де } \bar{S}_z = \sqrt{128 / dl(64 + q^2 + p^2 + q^2 p^2)} Ce_1(y, p) Ce_0(x, q) \bar{z}^0,$$

З врахуванням (5) та $\bar{n} = \bar{x}^0$ набуде вигляд:

$$m_2 = N_2 \left(\frac{k_{10}}{\beta_{10}} \right) \int_S Ce_1(y, p) Ce_0(x, q) Se_1(y, p) \cos \beta_{10} z dS, \quad (6)$$

$$\text{де } N_2 = 128 / dl \sqrt{(64 + q^2 + p^2 + q^2 p^2)(64 + p^2)}.$$

На рис.4 показані залежності кросполяризаційної розв'язки від модуля коефіцієнта відображення. Ці залежності побудовані при величинах $c/a = 0,3$; $m_1 = 0,45$; $m_2 = 0,35$. Крива 1 побудована з використанням формули (3), крива 2 – з використанням формули (4) з утриманням двох членів ряду. Хрестиками біля кривої 1 показаний результат, що до використання формули (4) з утриманням трьох членів ряду. З графіків рис.4 можна зробити висновок, що при $|S_{11}| \rightarrow 0,1$ величина $X \approx 10$ дБ, а при $|S_{11}| \rightarrow 0,01$ величина X вже досягає ≈ 30 дБ. На сучасних лініях радіозв'язку величина $X \geq 30$ дБ враховується достатньою для мобільних радіосистем.

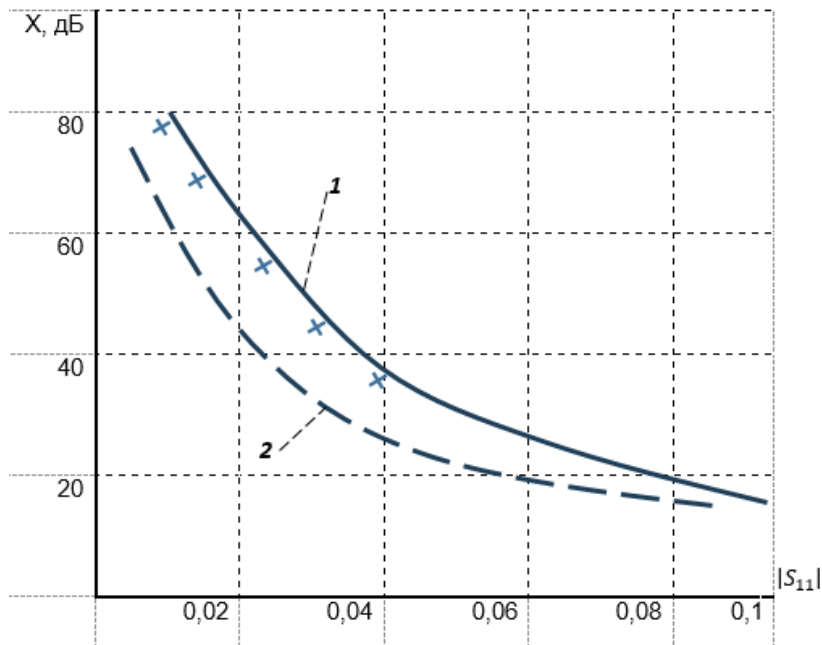


Рис. 4. Коефіцієнт кросполяризаційної розв'язки

Висновок

Новизна конструкції полягає в тому, що коректор поляризації на основі порожнистого круглого хвильоводу замінений на ЧЗДКХ як більш складну конструкцію, але яка дає можливість варіації більшої кількості параметрів. Така заміна основного осьового хвильоводу, яким раніше слугував порожнистий

круглий хвилевід на ЧЗДХ, шляхом підбору геометричних розмірів діелектричної пластини, її відносної діелектричної проникності та вольтамперних характеристик ВНС у вигляді наноплівок дозволяє корегувати поляризаційні характеристики в широкій смузі частот будь-якої радіосистеми НВЧ. При відсутності коректора поляризації потрапляємо в область значень $|S_{11}|$, при якій значення кросполяризаційної розв'язки становить ≈ 20 дБ.

Таким чином, наявність в щілинах ВНС у вигляді наноплівок відповідає рівню нанотехнологій і дозволяє отримувати високі поляризаційні характеристики.

Література

1. Почерняев В. М., Сивкова Н. М., Магомедова М. С. Поляризаційний селектор на частково заповнених діелектриком хвелеводах. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2024. Т.14. № 4. С. 28–31.
2. 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.
3. Почерняев В. Н. Повхлеб В. С. Состояние и направления развития мобильных цифровых тропосферных систем связи. *Системи озброєння і військова техніка*. 2018. № 2. С. 51–60.
4. Почерняев В., Магомедова М. Вібаторна антенна решітка для мобільної цифрової іоносферної станції. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*. 2022. № 2 (04). С. 50–58. DOI: <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2022-02-04-05>.
5. Pochernyaev V., Syvkova N. Broadband switch on partially filled by dielectric rectangular waveguide. *The scientific heritage*. 2021. № 60 (60). VOL 1. С. 49–52. ISSN 9215-0365.
6. Pochernyaev V., Syvkova N., Mahomedova M. Switch-filter on a rectangular waveguide partially filled by dielectric. *Informatyka, Automatyka, Pomiar W Gospodarce I Ochronie Środowiska*. 2022. № 12 (3). P. 8–11.
7. Почерняев В. Н. Устройства на частично заполненных диэлектриком волноводах. Киев : УКНИПСК, 2000. 223 с.
8. Почерняев В. М., Сивкова Н. М., Магомедова М. С. Обмежувач потужності НВЧ на частково заповнених діелектриком прямокутних хвелеводах. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*. 2022. № 1 (03). С. 90–101.
9. Почерняев В. М., Сивкова Н. М., Магомедова М. С. Пристрій регулювання потужністю НВЧ на частково заповнених діелектриком прямокутних хвелеводах. *Інфокомунікаційні та інформаційні технології*. 2021. № 2 (02). С. 161–171.
10. Почерняев В. М., Сивкова Н. М. Пристрій управління потужністю НВЧ на частково заповненому діелектриком прямокутному хвелеводі. *Інфокомунікаційні та інформаційні технології*. 2021. № 1 (01). С. 81–89.
11. Pochernyaev V., Mahomedova M., Syvkova N. Комутаційний фазообертач на частково заповненому діелектриком прямокутному хвелеводі. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2023. Т. 1 (71). С. 171–176.
12. Почерняев В. М., Магомедова М. С., Сивкова Н. М. Фазо-частотний пристрій на частково заповненому діелектриком прямокутному хвелеводі. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2022. № 4 (70). С. 158–161.
13. Почерняев В. М., Сивкова Н. М. Перемикач на хвелеводному тринику, частково заповнений діелектриком. *The scientific heritage*. 2022. VOL 1. № 84 (84). С. 53–57. ISSN 9215-0365.
14. Почерняев В. М., Сивкова Н. М. Фільтр на хвелеводних триниках, що частково заповнені діелектриком. *The scientific heritage*. 2021. № 75 (75). VOL 1. С. 42–47. ISSN 9215-0365.
15. Pochernyaev V., Syvkova N., Mahomedova M. Microwave mixer on rectangular waveguides partially filled by dielectric. *Informatyka, Automatyka, Pomiar W Gospodarce I Ochronie Środowiska*. 2023. 13 (4). 126–131.
16. Справочник по цифровым радиорелейным системам. Женева : MCE, 1996.
17. Matthias Nickel et al. A liquid crystal based tunable polarization selector in a microwave imaging radiometer. 11th German Microwave Conference – GeMiC. 2018. DOI: <http://doi.org/10.23919/GEMIC.2018.8335036>.
18. Qingsong Jia et al. A Multifunctional Broadband Linear-Circular Polarization Conversion Transmission Metasurface. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology – ICMMT. 2023. DOI: <http://doi.org/10.1109/ICMMT58241.2023.10277184>.
19. Sergey V. Skovorodnikov et al. Application of Higher-order Wave Modes Filter for Measurement of Phased Antenna Array Elements. Antennas Design and Measurement International Conference – ADMInC. 2021. DOI: <http://doi.org/10.1109/ADMInC54110.2021.9671007>.
20. Sheng Jie Yang et al. Millimeter-Wave Dual-Polarized Filtering Antenna Design for 5G AiP Application. IEEE MTT-S International Microwave Filter Workshop – IMFW. 2021. DOI: <http://doi.org/10.1109/IMFW49589.2021.9642335>.
21. Wenwei Wang et al. Circularly Polarized Patch Antenna With Filtering Performance Using Polarization Isolation and Dispersive Delay Line. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2020. 19 (8). Pp. 1457–1461 DOI: <http://doi.org/10.1109/LAWP.2020.3005709>.
22. Tao Xu et al. A Wideband Circularly Polarized Filtering Patch Antenna With Strip Network. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2023. 22 (12). Pp. 2826–2830. DOI: <http://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3300168>.
23. Jixing Wang et al. A Wideband Circularly Polarized Filtering Antenna Based on Slot-Patch Structure. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2023. 22 (8). Pp. 1858–1862. DOI: <http://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3267053>.
24. Kai Huang et al. Dual-Polarized Filtering Antenna Based on a Second-Order SIR Filter. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2024. 23 (1). Pp. 154–158. DOI: <http://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3320655>.
25. Pan-Pan Zhang et al. Design of Single-Layer Circularly Polarized Filtering Reflectarray Antenna. IEEE MTT-S International Wireless Symposium – IWS. 2023. DOI: <http://doi.org/10.1109/IWS58240.2023.10222869>.
26. Guangshang Cheng et al. A Stacked Circularly Polarized Filtering Antenna With Crossed Slot. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2023. 22 (12). Pp. 2935–2939. DOI: <http://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3305600>.
27. Xinyu Song et al. Planar circularly polarization filter antenna design for the 2.4 GHz Bluetooth band. International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium – ACES-China. 2022. DOI: <http://doi.org/10.1109/ACES-China56081.2022.10064915>.
28. Xiuxiang Zhong et al. Circularly Polarized Filtering Antenna Based on Integrated Substrate Gap Waveguide. IEEE MTT-S International Wireless Symposium – IWS. 2021 DOI: <http://doi.org/10.1109/IWS52775.2021.9499709>.

29. Zheng Y. Y. et al. A Compact Full-metal Circularly Polarized Filtering Antenna with an Embedded Metasurface. IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications – IMWS-AMP. 2022. DOI: <http://doi.org/10.1109/IMWS-AMP54652.2022.10106855>.
30. Zhou Jian et al. A Wideband Circularly Polarized Filtering Antenna Based on Stacked Patch Structure. IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications – IMWS-AMP. 2023. DOI: <http://doi.org/10.1109/IMWS-AMP57814.2023.10381421>.
31. Li Hui-Min et al. Compact Broadband Filtering Differential Dielectric Resonator Antenna for Dual-Polarized Applications. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2024. 23 (1). DOI: <http://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3325411>.
32. He Yejun et al. Dual-Polarized Filtering Antenna Array for 5G Base Station Applications. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology – ICMMT. 2022. DOI: <http://doi.org/10.1109/ICMMT55580.2022.10022492>.
33. Zhao Weitao et al. A Millimeter-Wave Dual-Polarized Filtering Patch Antenna Array Supported by High-Order SIW Cavity. IEEE 5th International Conference on Electronic Information and Communication Technology – ICEICT. 2022. DOI: <http://doi.org/10.1109/ICEICT55736.2022.9909079>.
34. Yuan Hang et al. A Wideband and High Gain Dual-Polarized Filtering Antenna Based on Multiple Patches. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2022. 70 (10). Pp. 9843–9848. DOI: <http://doi.org/10.1109/TAP.2022.3177494>.
35. Zhai Jian Hong et al. Millimeter-Wave Wideband Circularly Polarized Filtering Antenna for Satellite Communication. 16th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies – UCMMT. 2023. DOI: <http://doi.org/10.1109/UCMMT58116.2023.10310621>.
36. McLachlan N. Theory and Application of Mathieu Functions. Oxford, 1947. 402 p.
37. Gradshteyn I. S., Ryzhik I. M. Table of Integrals, Series, and Products. Academic Press, 2007. 1121 p.

References

1. Pocherniaiev V. M., Syvkova N. M., Mahomedova M. S. Poliaryzatsiyni selektor na chastkovo zapovnenykh dielektrykom khvylevodakh. *Informatyka, Avtomatyka, Pomiry w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 2024. № 4. T. 14. S. 28–31.
2. 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.
3. Pocherniaiev V. N. Povkhele V. S. Sostoianye y napravleniya rozvytyia mobyl'nykh tsyfrovyykh troposfernykh system svyazy. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*. 2018. № 2. S. 51–60.
4. Pocherniaiev V., Mahomedova M. Vibratorna antenna reshitka dla mobilnoi tsyfrovoy ionosfernoi stantsii. Infokomunikatsiini ta kompiuterni tekhnologii. 2023. № 2 (04). 50–58. DOI: <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2022-02-04-05>.
5. Pochernyaev V., Syvkova N. Broadband switch on partially filled by dielectric rectangular waveguide. *The scientific heritage*. 2021. № 60 (60). VOL 1. P. 49–52. ISSN 9215-0365.
6. Pochernyaev V., Syvkova N., Mahomedova M. Switch-filter on a rectangular waveguide partially filled by dielectric. *Informatyka, Avtomatyka, Pomiry W Gospodarce I Ochronie Środowiska*. 2022. № 12. P. 8–11.
7. Pocherniaiev V. N. Ustroistva na chastychno zapolnennykh dyelektrykom volnovodakh. Kyev : UKNYPSPK, 2000. 223s.
8. Pocherniaiev V. M., Syvkova N. M., Mahomedova M. S. Obmezhuvach potuzhnosti NVCh na chastkovo zapovnenykh dielektrykom priamokutnykh khvylevodakh. *Infokomunikatsiini ta kompiuterni tekhnologii*. 2022. № 1 (03). S. 90–101.
9. Pocherniaiev V. M., Syvkova N. M., Mahomedova M. S. Prystirii rehuliuвання potuzhnosti NVCh na chastkovo zapovnenykh dielektrykom priamokutnykh khvylevodakh. *Infokomunikatsiini ta informatsiini tekhnologii*. 2021. № 2 (02). S. 161–171.
10. Pocherniaiev V. M., Syvkova N. M. Prystirii upravlinnia potuzhnosti NVCh na chastkovo zapovnenomu dielektrykom priamokutnomu khvylevodi. *Infokomunikatsiini ta informatsiini tekhnologii*. 2021. № 1 (01). S. 81–89.
11. Pochernyaev V., Mahomedova M., Syvkova N. Komutatsiyni fazoobertach na chastkovo zapovnenomu dielektrykom priamokutnomu khvylevodi. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*. 2023. T. 1 (71). S. 171–176.
12. Pocherniaiev V. M., Mahomedova M. S., Syvkova N. M. Fazo-chastotnyi prystirii na chastkovo zapovnenomu dielektrykom priamokutnomu khvylevodi. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*. 2022. № 4 (70). S. 158–161.
13. Pocherniaiev V. M., Syvkova N. M. Peremykach na khvylevodnomu triinyku, chastkovo zapovnenyi dielektrykom. *The scientific heritage*. 2022. № 84 (84). VOL 1. S. 53–57. ISSN 9215-0365.
14. Pocherniaiev V. M., Syvkova N. M. Filtr na khvylevodnykh triinykakh, shcho chastkovo zapovneni dielektrykom. *The scientific heritage*. 2021. VOL 1. № 75 (75). S. 42–47. ISSN 9215-0365.
15. Pochernyaev V., Syvkova N., Mahomedova M. Microwave mixer on rectangular waveguides partially filled by dielectric. *Informatyka, Avtomatyka, Pomiry W Gospodarce I Ochronie Środowiska*. 2023. 13 (4). 126–131.
16. Spravochnik po tsyfrovym radyoreleinyim systemam. Zheneva : MSE, 1996.
17. Matthias Nickel et al. A liquid crystal based tunable polarization selector in a microwave imaging radiometer. 11th German Microwave Conference – GeMiC. 2018. DOI: <http://doi.org/10.23919/GEMIC.2018.8335036>.
18. Qingsong Jia et al. A Multifunctional Broadband Linear-Circular Polarization Conversion Transmission Metasurface. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology – ICMMT. 2023. DOI: <http://doi.org/10.1109/ICMMT58241.2023.10277184>.
19. Sergey V. Skovorodnikov et al. Application of Higher-order Wave Modes Filter for Measurement of Phased Antenna Array Elements. Antennas Design and Measurement International Conference – ADMInC. 2021. DOI: <http://doi.org/10.1109/ADMInC54110.2021.9671007>.
20. Sheng Jie Yang et al. Millimeter-Wave Dual-Polarized Filtering Antenna Design for 5G AiP Application. IEEE MTT-S International Microwave Filter Workshop – IMFW. 2021 DOI: <http://doi.org/10.1109/IMFW49589.2021.9642335>.
21. Wenwei Wang et al. Circularly Polarized Patch Antenna With Filtering Performance Using Polarization Isolation and Dispersive Delay Line. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2020. 19 (8). Pp. 1457–1461. DOI: <http://doi.org/10.1109/LAWP.2020.3005709>.
22. Tao Xu et al. A Wideband Circularly Polarized Filtering Patch Antenna With Strip Network. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2023. 22 (12). Pp. 2826–2830. DOI: <http://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3300168>.

23. Jixing Wang et al. A Wideband Circularly Polarized Filtering Antenna Based on Slot-Patch Structure. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2023. 22 (8). Pp. 1858–1862. DOI: <http://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3267053>.
24. Kai Huang et al. Dual-Polarized Filtering Antenna Based on a Second-Order SIR Filter. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2024. 23 (1). Pp. 154–158. DOI: <http://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3320655>.
25. Pan-Pan Zhang et al. Design of Single-Layer Circularly Polarized Filtering Reflectarray Antenna. *IEEE MTT-S International Wireless Symposium – IWS*. 2023. DOI: <http://doi.org/10.1109/IWS58240.2023.10222869>.
26. Guangshang Cheng et al. A Stacked Circularly Polarized Filtering Antenna With Crossed Slot. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2023. 22 (12). Pp. 2935–2939. DOI: <http://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3305600>.
27. Xinyu Song et al. Planar circularly polarization filter antenna design for the 2.4 GHz Bluetooth band. *International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium – ACES-China*. 2022. DOI: <http://doi.org/10.1109/ACES-China56081.2022.10064915>.
28. Xiuxiang Zhong et al. Circularly Polarized Filtering Antenna Based on Integrated Substrate Gap Waveguide. *IEEE MTT-S International Wireless Symposium – IWS*. 2021. DOI: <http://doi.org/10.1109/IWS52775.2021.9499709>.
29. Zheng Y. Y. et al. A Compact Full-metal Circularly Polarized Filtering Antenna with an Embedded Metasurface. *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications – IMWS-AMP*. 2022. DOI: <http://doi.org/10.1109/IMWS-AMP54652.2022.10106855>.
30. Zhou Jian et al. A Wideband Circularly Polarized Filtering Antenna Based on Stacked Patch Structure. *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications – IMWS-AMP*. 2023. DOI: <http://doi.org/10.1109/IMWS-AMP57814.2023.10381421>.
31. Li Hui-Min et al. Compact Broadband Filtering Differential Dielectric Resonator Antenna for Dual-Polarized Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2024. 23 (1). DOI: <http://doi.org/10.1109/LAWP.2023.3325411>.
32. He Yejun et al. Dual-Polarized Filtering Antenna Array for 5G Base Station Applications. *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology – ICMWT*. 2022. DOI: <http://doi.org/10.1109/ICMWT55580.2022.10022492>.
33. Zhao Weitao et al. A Millimeter-Wave Dual-Polarized Filtering Patch Antenna Array Supported by High-Order SIW Cavity. *IEEE 5th International Conference on Electronic Information and Communication Technology – ICEICT*. 2022. DOI: <http://doi.org/10.1109/ICEICT55736.2022.9909079>.
34. Yuan Hang et al. A Wideband and High Gain Dual-Polarized Filtering Antenna Based on Multiple Patches. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2022. 70 (10). Pp. 9843–9848. DOI: <http://doi.org/10.1109/TAP.2022.3177494>.
35. Zhai Jian Hong et al. Millimeter-Wave Wideband Circularly Polarized Filtering Antenna for Satellite Communication. *16th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies – UCMWT*. 2023. DOI: <http://doi.org/10.1109/UCMWT58116.2023.10310621>.
36. McLachlan N. *Theory and Application of Mathieu Functions*. Oxford, 1947. 402 p.
37. Gradshteyn I. S., Ryzhik I. M. *Table of Integrals, Series, and Products*. Academic Press, 2007. 1121 p.

Дата першого надходження статті до видання: 24.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.11.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.12.2025