

Д.А. ВОВЧУК, С.Д. ГАЛЮК, Л.Ф. ПОЛІТАНСЬКИЙ

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

П.Ф. РОБУЛЕЦЬ

ПАТ «Укртелеком», м. Чернівці

## СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛІВ, ЩО ПЕРЕДАЮТЬСЯ ЧЕРЕЗ ПРОВІДНИКОВУ МЕТАСТРУКТУРУ

У роботі вивчено можливість передавання гармонічних ЕМ сигналів через метаструктуру із паралельно розміщених провідників, що з'єднує два хвилевода, розміщених на заданій відстані один навпроти одного. Результати моделювання показали можливість передавання сигналів із однією чи декількома гармонічними складовими. Експериментальні дослідження спектральних характеристик показали здатність функціонування такої системи, що підтверджується покращенням передавання сигналів від -23,28 дБм до -4,94 дБм у закритій хвилевідній лінії та від 23,3 дБм до -16,42 дБм – у випадку розміщення хвилеводів на відстані 90 мм один від одного.

Ключові слова: середовище із паралельних провідників, передавання гармонічних сигналів, метаматеріали.

D.A. VOVCHUK, S.D. HALIUK, L.F. POLITANSKYI

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

P.F. ROBULETS

“Ukrtelecom”, Chernivtsi

### SPECTRA CHARACTERISTICS OF THE SIGNALS PROPAGATING THROUGH THE WIRE METASTRUCTURE

In the paper the possibility of harmonic signal transfer through the metastructure that consists of parallel metallic wires is studied. The investigation setup consists of two rectangular waveguides allocated one in front of another on the defined distance with air gap between them. Wire media (WM) couples the ports that is embedded into each of them with the deep equal approximately the lattice period. It allows to support the near field interaction between ports and WM as well as transfer power of wave in wide frequency range with smoothed transmission dispersion. In first simulation the sine signal with one harmonic component at 2 GHz and in second one more complex signal with five harmonic components (1.7, 1.75, 2, 2.1 and 2.3 GHz) were transferred through WM. The range of frequencies components values can be very wide but preferably there where transmission dispersion is even. The simulation results shown high effectivity of harmonic signal transfer without any distortions with little linear attenuation. Experimental setup used a signal generator to supply the input waveguide port and a spectrum analyser to depict results. The first experimental study included the investigation of harmonic signal propagation through WM when the distance between waveguide was absent (WM inside the closed waveguide transmission line) and the signal enhancement from -23,28 dBm to -4,94 dBm was reached. For the case of the air gap 90 mm between the ports apertures when EM waves are evanescent the signal enhancement from -23,3 dBm to -16,42 dBm was obtained by spectral characteristics analysis and the functionality of this model was confirmed. The presented results can be useful for transmission line development of microwaves both narrow and wide frequency ranges, advancement of wire metamaterials and their usage for different telecommunication applications.

Keywords: wire medium, harmonic signal transfer, metamaterials.

### Вступ

Метаматеріали є одним із найбільш перспективних класів матеріалів для розвитку сучасних пристроїв, таких як хвилеводи та антени, лінії передавання, поглиначі, рефлектори, сенсори, лінзи тощо [1–5]. У загальному метаматеріалами називають ефективно однорідні штучно створені матеріали із незвичайними ЕМ властивостями, що характеризується від'ємним значенням діелектричної та/або магнітної проникностей і представляють велику групу штучних ЕМ структур [6–8]. Одним із класів метаматеріалів є провідникові метаматеріали, що за фізичною структурою є оптично щільним масивом напрямлених металевих провідників, вмонтованих у діелектричну матрицю [9–11].

Структура із паралельних провідників (СПП) є одним із видів провідникових метаматеріалів, що складається із двох- або трирозмірної прямокутної решітки провідників і, для випадку дворозмірної СПП, є масивом паралельних металевих провідників довжиною  $L$ , діаметром  $2r$  та періодом їх розташування  $a$  (рис. 1) [11, 12].

СПП відома як пристрій для ефективного передавання енергії ЕМ хвиль на частотах Фабрі-Перо, довжина півхвилі якого приблизно відповідає довжині провідників структури [11–13]. Ця властивість застосовується для модифікування антен [14] та пристроїв передавання зображень у різних діапазонах частот [15–16], де можливість функціонування у широкій смузі частот була неможливою. Проте, у випадку поширення ЕМ хвиль у вузькій смузі частот джерело розміщувалось безпосередньо навпроти інтерфейсу СПП. Тому у роботах [17–19] було розглянуто можливість ширококутового передавання енергії ЕМ хвиль, ідея якої полягала у вмонтуванні джерела ЕМ хвиль безпосередньо у СПП (безконтактно по відношенню до провідників), що забезпечило подавлення резонансів Фабрі-Перо, дало змогу розширити частотну смугу завдяки сильній близько-польовій взаємодії.

Модель досліджуваної у [17, 18] установки складається з двох прямокутних металевих хвилеводів (вхідного та вихідного) розмірами 164 на 82 мм, розділених повітряним проміжком  $l = 90$  мм (рис. 2). Розглянуто два випадки, коли повітряний проміжок між апертурами хвилеводів незаповнений та заповнений СПП. Сама ж СПП складається із  $27 \times 13$  мідних провідників довжиною  $L = 100$  мм, радіусом  $r = 0,75$  мм та

періодом розташування  $a = 6$  мм. Для забезпечення режиму роботи у широкому діапазоні частот, СПП вмонтовано у кожну із апертур хвилеводів на глибину  $d = 5$  мм, що забезпечує близько-польову взаємодію СПП із джерелами ЕМ хвиль. Таким чином, можна здійснити порівняння ефективності зв'язку з та без використання СПП.

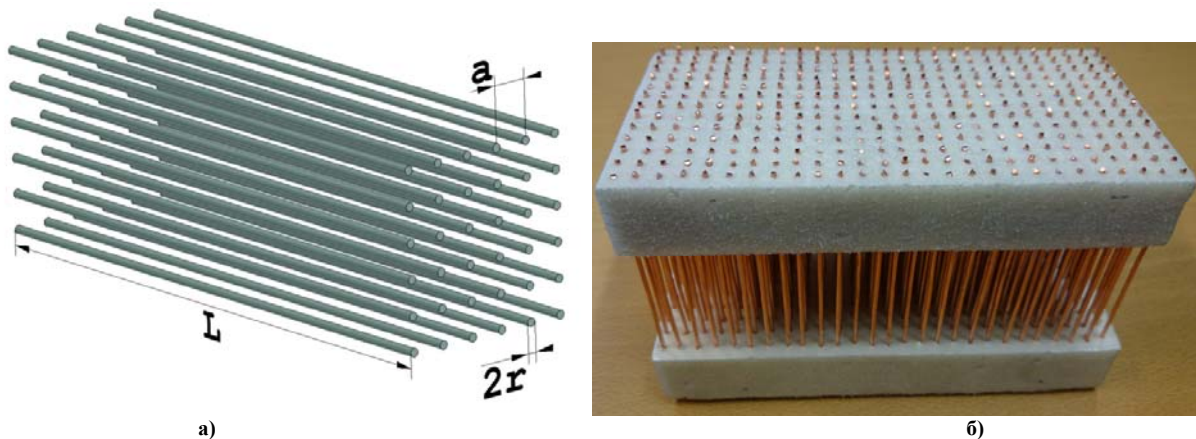
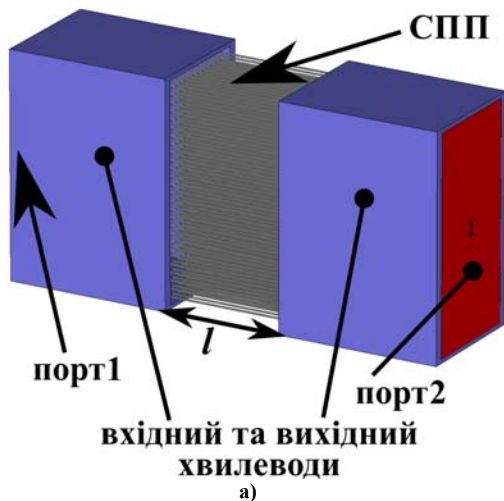


Рис. 1. Метаматеріал, що представляє собою структуру із паралельно розміщених провідників, довжиною  $L$ , діаметром  $2r$  та періодом розташування провідників  $a$ : а – комп'ютерна та б – експериментальна моделі



Ошибка! Ошибка внедренного объекта.

Рис. 2. Модель досліджуваної системи, що складається із двох хвилеводів, розділених повітряним проміжком, що заповнюється СПП: а) комп'ютерна та б) експериментальна моделі

Усереднені значення частотних дисперсій функції передавання у діапазоні частот від 1 до 2 ГГц (одномодовий режим роботи хвилеводів із домінуючою  $TE_{10}$  модою), отримані шляхом моделювання та експерименту у [17], показали покращення у 2-2,5 рази, а також приблизно у 4 рази – у діапазоні частот до 12 ГГц (багатомодовий режим роботи хвилеводів) за значеннями коефіцієнта затухання сигналу в СПП.

Таким чином, метою роботи є вивчення процесу передавання гармонічних сигналів через СПП та їх спектральний аналіз.

### Спектральний аналіз гармонічних сигналів, що передаються через СПП у широкому діапазоні частот

Із описаних вище результатів можна зробити висновок тільки про можливість передавання енергії ЕМ хвиль у заданому діапазоні частот. Проте, не можна констатувати точно про структуру і спектр ЕМ хвилі, та відгук СПП на вхідний сигнал. З цією метою проведено моделювання та експериментальні дослідження, де широкопasmові сигнали були змінені на гармонічні із заданими значеннями частоти.

#### Результати моделювання

Результати моделювання виконувались з використанням моделі наведеної на рис. 2, а. Порт 1 використано як передавач, а порт 2 – як приймач. У першому дослідженні здійснювалось передавання синусоїдального сигналу із однією гармонікою. Для дослідження у даній роботі було вибрано частоту вхідного гармонічного сигналу 2 ГГц. Як видно із рис. 3, а та б, спектральні характеристики вхідного та вихідного сигналів містять тільки одну спектральну складову. Це підтверджує те, що СПП не призводить до нелінійних спотворень сигналів.

У наступному кроці моделювання було вибрано сигнал, що містить п'ять гармонічних складових на частотах 1,7; 1,75; 2; 2,1 та 2,3 ГГц. Як і було підтверджено попередніми моделюваннями, вихідні спектральні характеристики відповідають вхідним із частковим затуханням сигналу (рис. 4, а та б).

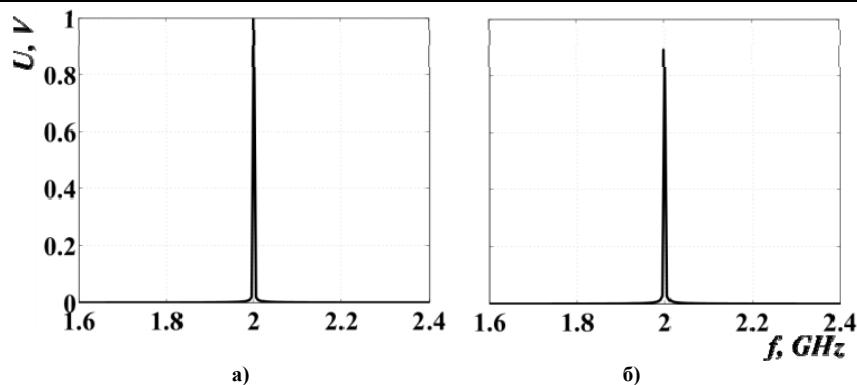


Рис. 3. Спектральні характеристики вхідного (а) та вихідного (б) гармонічних сигналів, що передаються через СПП, отримані шляхом комп'ютерного моделювання

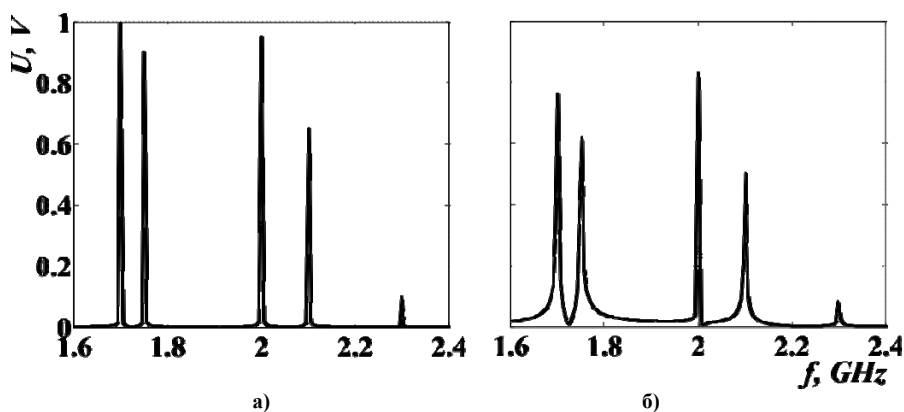


Рис. 4. Спектральні характеристики вхідного (а) та вихідного (б) сигналів із декількома гармонічними складовими, що передаються через СПП, отримані шляхом комп'ютерного моделювання

Результати експерименту. Для експериментальних досліджень використовувалась установка, наведена на рис. 2, б. На відміну від досліджень у [17, 18] замість двопортового векторного аналізатора використовувався генератор сигналів, що підключався до порту вхідного хвильоводу, та аналізатор спектру, що підключався до порту вихідного хвильоводу. Дослідження було розділено на два етапи: а) із використанням закритої хвильовідної лінії, що дозволяє оцінити процеси передавання сигналів без втрат через випромінювання у вільний простір чи паразитних відбиваннях, наприклад від країв хвильоводів; б) через повітряний проміжок між двома хвильоводами з'єднаними за допомогою СПП як показано на рис. 2, а, що дозволяє розширити трактування отриманих у [17, 18] результатів для суми гармонічних сигналів.

Не зважаючи на те, що передавання ЕМ сигналів через закрити хвильовідну лінію зв'язку здійснюється практично без втрат і спотворень, необхідно дослідити вплив СПП на поширення хвиль, шляхом заповнення порожнини хвильоводу використовуваною СПП.

Для проведення експериментальних досліджень було виготовлено СПП, розміри та конструктивні елементи якої відповідали використаним для моделювання. СПП вмонтовувалась у закрити хвильовідну лінію так як на рис. 2, б, проте при значенні  $l = 0$  мм.

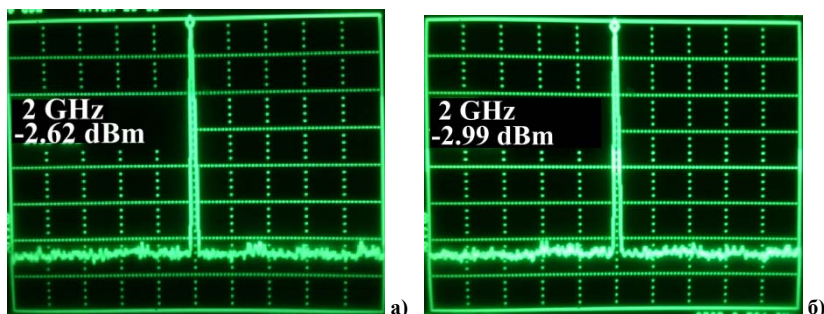


Рис. 5. Спектральні характеристики гармонічних сигналів отриманих вхідним хвильоводом у випадку закритої хвильовідної лінії при: а) пустому хвильоводі та б) із використанням СПП, отриманих експериментальним шляхом

У першому експериментальному дослідженні із генератора сигналів подавався синусоїдальний сигнал частотою 2 ГГц. Спектральна характеристика сигналу, що отримується вихідним хвильоводом без використання СПП, приведена на рис. 5, а. Видно, що потужність сигналу при проходженні через хвильовід спадає від 1 мВт (задана на генераторі потужність сигналу) до 0,55 мВт, що відповідає 0 та -2,62 дБм на

частоті 2 ГГц. У випадку використання СПП потужність прийнятого сигналу становить 0,50 мВт (-2,99 дБм), сигнал не містить ніяких додаткових спектральних складових (рис. 5, б), та майже не відрізняється від спектру на рис. 5, а. Це означає, що СПП є досить ефективною та сприятливою структурою для поширення ЕМ сигналів.

Для наступного експерименту було виготовлено металеву сітку з періодом ґратки 10 мм (рис. 6), що вмонтовувалась у вхідний хвилевід безпосередньо навпроти інтерфейсу СПП на відстані 10 мм для того, щоб перетворити ЕМ хвилю, що поширюється у вхідному хвилеводі, у еванесцентну моду. У цьому випадку, використання СПП дозволяє покращити передавання гармонічного сигналу від 0,0047 мВт (-23,28 дБм) до 0,32 мВт (-4,94 дБм), що показано на рис. 7, а та б, відповідно. Це означає, що використання СПП дозволяє покращувати передавання затухаючих ЕМ сигналів.



Рис. 6. Металічна сітка із періодом розміщення провідників 10 мм вмонтована у вхідний хвилевід, щоб забезпечити затухання ЕМ хвиль

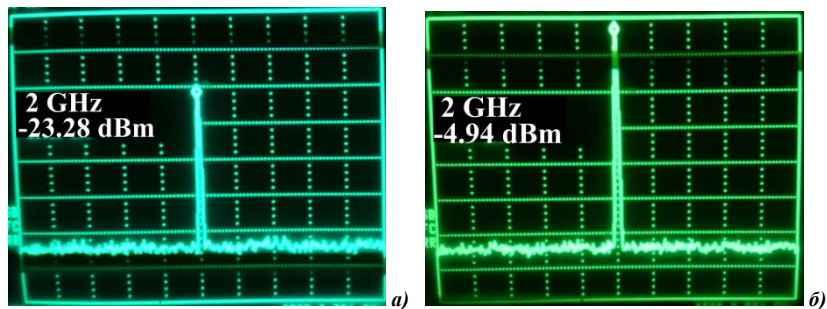


Рис. 7. Спектральні характеристики гармонічних сигналів отриманих вихідним хвилеводом у випадку закритої хвилевідної лінії та із вмонтованою металеву сіткою у вхідний хвилевід: а) без та б) із використанням СПП, отриманих експериментальним шляхом

Для дослідження процесу передавання гармонічних сигналів через повітряний проміжок, вхідний та вихідний хвилеводи розведено на відстань  $l = 90$  мм апертурами один до одного, як показано на рис. 2, б. Повітряний проміжок стає причиною розсіювання ЕМ хвиль, що відповідає низькому рівню потужності прийнятого сигналу на частоті 2 ГГц 0,0047 мВт (-23,3 дБм) та наявності додаткових спектральних складових на частотах 1,87; 1,93 та 2,12 ГГц, що зумовлено відбиванням від країв хвилеводів, а також інтерференцією хвиль (рис. 8, а).

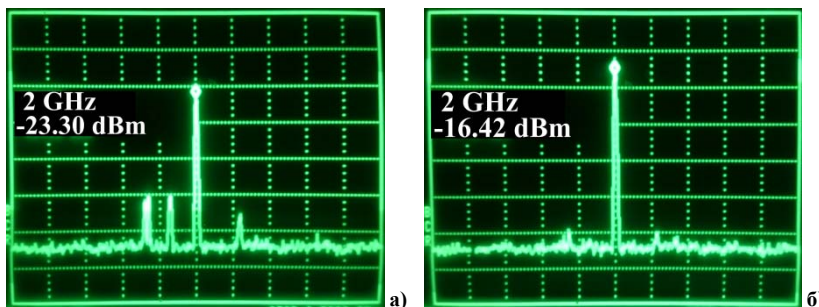


Рис. 8. Спектральні характеристики гармонічних сигналів отриманих вхідним хвилеводом у випадку розміщення хвилеводів на відстані 90 мм один навпроти одного із вмонтованою металеву сіткою у вхідний хвилевід: а) без та б) із використанням СПП, отриманих експериментальним шляхом

Використання СПП дозволяє покращити передавання гармонічного сигналу приблизно у 4,85 разів (-16,42 дБм), що відповідає отриманим у роботах [17], а також дозволяє уникнути додаткових паразитних спектральних складових через сильну близько-польову взаємодію метаструктури та хвилеводів (рис. 8, б).

#### Висновки

У роботі розглянуто СПП, що складається із паралельних металевих провідників (рис. 1), для розв'язання задачі передавання гармонічних сигналів на різних частотах. Експериментальна установка складалася із двох хвилеводів, розміщених один навпроти одного із повітряним проміжком між їх апертурами (рис. 2). Заповнюючи цей проміжок СПП, можна досягти покращення передавання ЕМ сигналів у 2-2,5 рази за значенням коефіцієнта затухання у широкому діапазоні частот [17, 18].

Для того, щоб вивчити вплив СПП на проходження ЕМ хвиль, досліджувана метаструктура була розміщена у порожнині закритої хвилевідної лінії зв'язку, що показало високу ефективність роботи структури. Дослідження використання СПП для передавання гармонічних сигналів через повітряний проміжок показало можливість її ефективного використання у випадку затухаючих та спотворених сигналів та було досягнуто покращення передавання гармонічних сигналів від -23,28 дБм до -4,94 дБм у закритій



хвилевідній лінії та від -23,3 дБм до -16,42 дБм – у випадку розміщення хвилеводів на відстані 90 мм один від одного.

Результати досліджень можуть бути корисними при розробленні ліній передавання на основі провідникових метаструктур для сигналів мікрохвильового діапазону частот як у вузькій, так і широкій смузі тощо.

### Література

1. Zheludev N.I. From metamaterials to metadevices / N.I. Zheludev, Yu.S. Kivshar // *Natural Materials*. – 2012. – № 11. – P. 917–924.
2. Simovski C.R. Wire Metamaterials: Physics and Applications / C.R. Simovski, P.A. Belov, A.V. Atrashchenko, Yu.S. Kivshar // *Advanced Materials*. – 2012. – № 24. – P. 4229–4248.
3. *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*; edited by Engheta N. and Ziolkowski R. W. – Wiley–IEEE Press, 2006. – 414 p.
4. Слюсар В. Метаматеріали в антенній техніці: основні принципи і результати / В. Слюсар // *Первая миля*. – 2010. – № 3. – С. 44–60.
5. Вовчук Д.А. Покращення характеристик антен з використанням метаматеріалів (огляд) / Д.А. Вовчук, С.Д. Галюк // *Вісник Хмельницького національного університету*. Серія: Технічні науки. – 2018. – № 5(265). – С. 116–122.
6. Sihvola A. Metamaterials in electromagnetic / A. Sihvola // *Physical Review Letters*. – 2000. – Vol. 85. – № 18. – P. 3966–3069.
7. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$  / В.Г. Веселаго // *Успехи физических наук*. – 1967. – Т. 92. – № 7. – С. 517–526.
8. Smith D.R. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity / D.R. Smith, W.J. Padill, D.C. Vier, S.C. Nemat–Nasser, S. Schultz // *Physical Review Letters*. – 2000. – № 84. – P. 4184–4187.
9. Rotman W. Plasma simulation by artificial and parallel plate media / W. Rotman // *IRE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1962. – Vol. 10. – №1. – P. 82–95.
10. Mirmoosa M.S. Wire Media for Enhancement of Radiative Heat Transfer and Spontaneous Emission / M.S. Mirmoosa // PhD Thesis at Aalto University. – 2017.
11. Nefedov I. S. Wire media: Metamaterial Handbook. Theory and Phenomena of Metamaterials / I.S. Nefedov, A. J. Viitanen // Chapter 15–1. – CRC Press. – Boca Raton. – 2009.
12. Simovski C. R. Low–frequency spatial dispersion in wire media / C. R. Simovski, P. A. Belov // *Phys. Rev. E*. – 2004. – Vol. 70. – P. 046616 (1–8).
13. Belov P. A. Canalization of subwavelength images by electromagnetic crystals / P. A. Belov, C. R. Simovski, P. Ikonen // *Phys. Rev. B*. – 2005. – Vol. 71. – P. 193105 (1–4).
14. Burghignoli P. Radiation from Elementary Sources in the Presence of Wire–Medium Slabs: Physical Mechanisms and Full-Wave Analysis / P. Burghignoli, G. Lovat, F. Capolino, D.R. Jackson, D.R. Wilton // *Proceedings of XVI Riunione Nazionale di Elettromagnetismo, Genova*. – 2006. – P. 113–116.
15. Belov P. Experimental study of the subwavelength imaging by a wire medium slab / P. Belov, Y. Zhao, S. Sudhakaran, A. Alomainy, Y. Hao // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – Vol. 89. – P. 459–462.
16. Belov P. A. Transmission of images with subwavelength resolution to distances of several wavelengths in the microwave range / P. A. Belov, Y. Zhao, S. Tse, P. Ikonen, M. G. Silveirinha, C. R. Simovski, S. A. Tretyakov, Y. Hao, C. Parini // *Phys. Rev. B*. – 2008. – Vol. 77. – P. 193108 (1–4).
17. Vovchuk D. Multi-Mode Broadband Power Transfer through a Wire Media Slab / D. Vovchuk, S. Kosulnikov, I. Nefedov, S. Tretyakov, C. Simovski // *Progress in Electromagnetics Research*. – 2015. – № 154. – P. 171–180.
18. Kosulnikov S. Broadband Power Transfer through a Metallic Wire Medium Slab / S. Kosulnikov, D. Vovchuk, I. Nefedov, S. Tretyakov, C. Simovski // *Proceedings of URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS)*. – 2016.
19. Vovchuk D. Unusual eigenmodes of wire-medium endoscopes: impact on transmission properties / D. Vovchuk, S. Kosulnikov, C. Simovski // *Optics Express*. – 2018. – Vol. 26. – № 14. – P. 17988–18005.

### References

1. Zheludev N.I. From metamaterials to metadevices / N.I. Zheludev, Yu.S. Kivshar // *Natural Materials*. – 2012. – № 11. – P. 917–924.
2. Simovski C.R. Wire Metamaterials: Physics and Applications / C.R. Simovski, P.A. Belov, A.V. Atrashchenko, Yu.S. Kivshar // *Advanced Materials*. – 2012. – № 24. – P. 4229–4248.
3. *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*; edited by Engheta N. and Ziolkowski R. W. – Wiley–IEEE Press, 2006. – 414 p.
4. Slyusar V. Metamaterialy v antennoj tehnikе: osnovnye principy i rezultaty / V. Slyusar // *Pervaya milya*. – 2010. – № 3. – С. 44–60.
5. Vovchuk D.A. Pokrashchennia kharakterystyk anten z vykorystanniam metamaterialiv (ohliad) / D.A. Vovchuk, S.D. Haliuk // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. Seria: Tekhnichni nauky. – 2018. – № 5(265). – С. 116–122.
6. Sihvola A. Metamaterials in electromagnetic / A. Sihvola // *Physical Review Letters*. – 2000. – Vol. 85. – № 18. – P. 3966–3069.
7. Veselago V.G. Elektrodinamika veshestv s odnovremenno otricatelnymi znacheniyami  $\epsilon$  i  $\mu$  / V.G. Veselago // *Uspеhi fizicheskikh nauk*. – 1967. – Т. 92. – № 7. – С. 517–526.

8. Smith D.R. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity / D.R. Smith, W.J. Padill, D.C. Vier, S.C. Nemat-Nasser, S. Schultz // *Physical Review Letters*. – 2000. – № 84. – P. 4184–4187.
9. Rotman W. Plasma simulation by artificial and parallel plate media / W. Rotman // *IRE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1962. – Vol. 10. – №1. – P. 82–95.
10. Mirmoosa M.S. Wire Media for Enhancement of Radiative Heat Transfer and Spontaneous Emission / M.S. Mirmoosa // PhD Thesis at Aalto University. – 2017.
11. Nefedov I. S. Wire media: Metamaterial Handbook. Theory and Phenomena of Metamaterials / I.S. Nefedov, A. J. Viitanen // Chapter 15–1. – CRC Press. – Boca Raton. – 2009.
12. Simovski C. R. Low-frequency spatial dispersion in wire media / C. R. Simovski, P. A. Belov // *Phys. Rev. E*. – 2004. – Vol. 70. – P. 046616 (1–8).
13. Belov P. A. Canalization of subwavelength images by electromagnetic crystals / P. A. Belov, C. R. Simovski, P. Ikonen // *Phys. Rev. B*. – 2005. – Vol. 71. – P. 193105 (1–4).
14. Burghignoli P. Radiation from Elementary Sources in the Presence of Wire-Medium Slabs: Physical Mechanisms and Full-Wave Analysis / P. Burghignoli, G. Lovat, F. Capolino, D.R. Jackson, D.R. Wilton // *Proceedings of XVI Riunione Nazionale di Elettromagnetismo*, Genova. – 2006. – P. 113–116.
15. Belov P. Experimental study of the subwavelength imaging by a wire medium slab / P. Belov, Y. Zhao, S. Sudhakaran, A. Alomainy, Y. Hao // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – Vol. 89. – P. 459–462.
16. Belov P. A. Transmission of images with subwavelength resolution to distances of several wavelengths in the microwave range / P. A. Belov, Y. Zhao, S. Tse, P. Ikonen, M. G. Silveirinha, C. R. Simovski, S. A. Tretyakov, Y. Hao, C. Parini // *Phys. Rev. B*. – 2008. – Vol. 77. – P. 193108 (1–4).
17. Vovchuk D. Multi-Mode Broadband Power Transfer through a Wire Media Slab / D. Vovchuk, S. Kosulnikov, I. Nefedov, S. Tretyakov, C. Simovski // *Progress in Electromagnetics Research*. – 2015. – № 154. – P. 171–180.
18. Kosulnikov S. Broadband Power Transfer through a Metallic Wire Medium Slab / S. Kosulnikov, D. Vovchuk, I. Nefedov, S. Tretyakov, C. Simovski // *Proceedings of URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS)*. – 2016.
19. Vovchuk D. Unusual eigenmodes of wire-medium endoscopes: impact on transmission properties / D. Vovchuk, S. Kosulnikov, C. Simovski // *Optics Express*. – 2018. – Vol. 26. – № 14. – P. 17988–18005.

Рецензія/Peer review : 8.6.2019 р. Надрукована/Printed :17.7.2019 р.  
Стаття рецензована редакційною колегією