

В. В. Гоблик, В. А. Павлиш, О. М. Ліске, І. Ю. Тепляков
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронних засобів інформаційно-комп’ютерних технологій

ПОЛЕ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ РОМБІЧНИХ ВИПРОМІНЮВАЧІВ НА ОСНОВІ ЩІЛИННОЇ ЛІНІЇ ПЕРЕДАВАННЯ

© Гоблик В. В., Павлиш В. А., Ліске О. М., Тепляков І. Ю., 2017

Розглянуто планарну антену у вигляді решітки ромбічних щілинних випромінювачів, що живляться полем біжучих хвиль, створено її фізичну модель і експериментально досліджено електродинамічні характеристики. Експериментально досліджено коефіцієнт сповільнення і коефіцієнт загасання хвилі в щілинній лінії передачі. Проаналізовано результати експериментальних досліджень. Розроблено схему живлення антенної решітки, що забезпечує синфазність збудження щілинних ромбічних випромінювачів, завдяки чому отримана діаграма спрямованості має односпрямований характер.

Ключові слова: планарна антена, антенна решітка, ромбоподібна щілинна антена, щілинна лінія передачі, інтерферометр.

V. V. Hoblyk, V. A. Pavlysh, O. M. Liske, I. Yu. Teplyakov
Lviv Polytechnic National University,
Department of Electronics and Computer Technologies

ANTENNA ARRAY FIELD OF RHOMBIC RADIATORS BASED ON SLOT TRANSMISSION LINE

© Hoblyk V. V., Pavlysh V. A., Liske O. M., Teplyakov I. Yu., 2018

This paper describes the planar antenna which represents antenna array of rhombic slot radiators on the dielectric substrate, which are feed by field of traveling waves in the slot transmission line. The developed approach to determining the slowing factor allows to calculate the required length of the slot transmission line to provide common-mode excitation of the radiating elements of the antenna array. A physical model of the antenna array was created and experimentally investigated its electrodynamic characteristics – the radiation pattern and the directive gain in the frequency range. Experimentally investigated the slowing factor and the wave attenuation in the slot transmission line in the frequency range 2–4 GHz to select the optimal parameters of the slot transmission line construction. A comparative analysis of the results obtained by mathematical modeling and experimental research was done. The authors proposed the scheme of the antenna array feeding, providing the in-phase excitation of four slot rhombic radiators, so that the radiation pattern has a unidirectional character for a vertically polarized signal, there is an insignificant lateral radiation in the horizontal plane in the direction of the surface of the antenna array. Slot rhombic radiators can be used as the radiating elements of antenna arrays, which can be used as hidden antenna systems of mobile devices. The received crosspolarized radiating patterns indicate the possibility of applying such radiators as elements of interferometers.

Key words: planar antenna, antenna array, diamond-shaped slot antenna, slot line, interferometer

Вступ

Планарні антени є основою антенних систем сучасних інформаційно-комунікаційних систем. Це зумовлено простотою збудження, легкістю їх узгодження з лінією живлення, можливістю отримання необхідної діаграми спрямованості, простотою конструкції і зручністю розміщення на друкованих платах різноманітних засобів безпроводного зв'язку. Серед таких антен актуальними є антени на основі металодіелектричних структур, збуджуваних полем біжучої хвилі в щілинній лінії передачі (ЩЛП). Цей тип антен характеризується ширшим діапазоном робочих частот порівняно з мікросмужковими випромінювачами.

Антени на основі щілинних ліній, що складаються з плоских металевих екранів з прилеглим шаром діелектрика обмежених розмірів, мають широке практичне застосування. Зокрема їх застосовують для побудови інтерферометрів, у радарх, супутниковому зв'язку, біологічній телеметрії, як гнучкі аплікатори для радіочастотної фізіотерапії, мікрохвильові планарні відбивні сенсори для тестування вологості матеріалів [1, 2], в антенах з коловою поляризацією для GPS-навігаторів [3–5], мобільних засобах зв'язку [6] і т.п. Широко використовуються криволінійні випромінювачі на основі щілинних ліній передачі довільної геометричної форми [7], а також у формі симетричних геометричних фігур: кола, прямокутника, ромба [8–13]. Синфазне збудження таких випромінюючих елементів в антенних решітках здійснюється за допомогою компланарної лінії або ЩЛП [14]. З'єднання компланарної лінії дає змогу розширити смугу робочих частот, покращити можливості узгодження опорів, полегшити інтеграцію з твердотільними активними пристроями [1,15]. Еквівалентні магнітні струми в обох щілинних лініях, що становлять компланарну лінію, при поширенні хвилі квазі-ТЕМ типу випромінюють у протифазі, що призводить до зменшення до нуля кросполяризованої складової поля [2]. Застосування компланарної лінії робить можливим створення антенних решіток з декількох випромінювальних елементів складної форми [10].

Автори дослідили криволінійні щілинні випромінювачі [15–17] та розробили математичні моделі, що описують електродинамічні властивості одиночних щілинних випромінювачів замкнутої форми.

Метою роботи є експериментальне дослідження антенної решітки криволінійних щілинних випромінювачів на діелектричній підкладці в режимі короткого замикання. Розглянуто фізичну модель антенної решітки і досліджено її діаграму спрямованості і коефіцієнт підсилення в смузі частот. Результати математичного моделювання порівнюються з результатами експерименту.

Постановка задачі

Розглядається щілинний ромбічний випромінювач (ЩРВ), що складається з діелектричної підкладки з відносною діелектричною проникністю ϵ_r , на якій розташовано металевий екран з вузькою щілиною. Ширину щілини w вважають набагато меншою ніж довжина хвилі λ ($w \ll \lambda$), як це зазвичай використовується на практиці [10]. Товщина діелектричної підкладки h і ϵ_r впливає на величину електромагнітного поля, що концентрується в ній. Із зменшенням h і ϵ_r поле, що концентрується в підкладці, зменшується, і при цьому досягається максимальне випромінювання енергії щілинною лінією в зовнішній простір. Також ці параметри повинні забезпечувати умови поширення хвилі вздовж щілинної лінії, а також хвильовий опір щілинної лінії $Z_{щ}$, необхідний для узгодження її з фідером, що живить антену.

При проходженні вздовж ЩЛП фаза хвилі змінюється на 180° у місцях згинів ЩРВ. Для отримання синфазних полів випромінювання усіма сегментами ЩРВ сторони ромба бути завдовжки $l_{щ} / 2$ [15], де $l_{щ}$ – довжина хвилі в ЩЛП. Необхідно виміряти коефіцієнт сповільнення

хвилі $l_{\text{щ}} / l_0$ у ЩЛП з вибраними параметрами діелектричної підкладки ϵ_r , w і h для визначення геометричних розмірів ЩРВ для виготовлення фізичної моделі антенної решітки.

Під час проходження електромагнітної енергії вздовж ЩЛП відбувається її поступове загасання, зумовлене втратами в діелектричній підкладці, омичними втратами в провідниках і випромінюванням електромагнітної енергії. Для отримання випромінювання за нормаллю до площини антенної решітки необхідно забезпечити живлення ЩРВ однаковою кількістю електромагнітної енергії. Для вирішення цього завдання необхідно визначити коефіцієнт загасання хвилі в ЩЛП з вибраними параметрами.

Дослідження щілинної лінії передачі

Для того, щоб використовувати ЩЛП як випромінювач, потрібно використовувати діелектричні підкладки з $\epsilon_r < 10$, при цьому енергія, що концентрується в підкладці, буде мінімальною [18, 19].

Вирази в закритій формі для розрахунку $l_{\text{щ}} / l_0$ і $Z_{\text{щ}}$ (l_0 – довжина хвилі в вакуумі) поперечним резонансним методом отримав Кон [20]. Для випадку $2,22 \leq \epsilon_{\text{ef}} \leq 9,8$, $0,0015 \leq w / l_0 \leq 0,075$, $0,006 \leq h / l_0 \leq 0,06$ ці вирази забезпечують точність розрахунку $l_{\text{щ}} / l_0$ 0,37 % і 0,67 % для $Z_{\text{щ}}$.

Для визначення коефіцієнта сповільнення хвилі в ЩЛП створені макет ЩЛП, який являє собою прямолінійну щілину, прорізану в металевому екрані, розташованому на діелектричній підкладці зі склотекстоліту, з регульованою довжиною $L = 150 \dots 300$ мм. Експериментально виміряно залежності коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ) на вході ЩЛП з шириною щілини $w = 1,5$ мм за зміни її довжини L на частотах 2; 2,4; 2,8 ГГц (рис. 1, а).

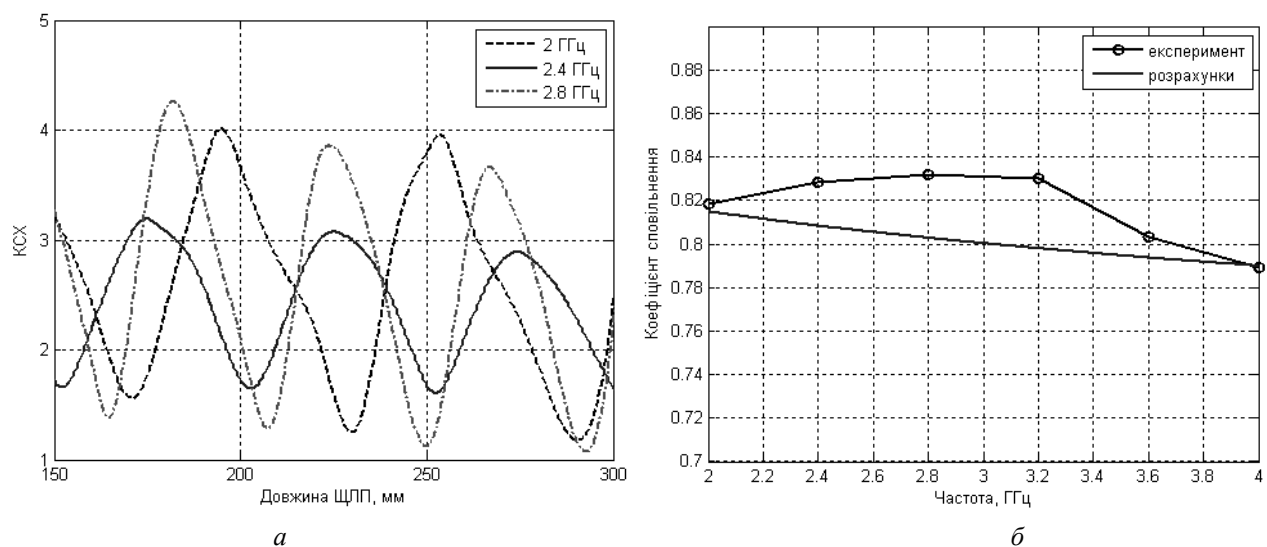


Рис. 1. Коефіцієнт стоячої хвилі на вході ЩЛП (а), коефіцієнт сповільнення хвилі в ЩЛП (б)

Значення коефіцієнта сповільнення хвилі $l_{\text{щ}} / l_0$ у ЩЛП визначено в діапазоні частот 2–4 ГГц. Для цього вимірюють довжину хвилі в ЩЛП, яка дорівнює подвоєній відстані між сусідніми мінімумами на рис. 1, а. Для порівняння з результатами, отриманими експериментально, на графіку рис. 1, б наведено криву значень коефіцієнта сповільнення хвилі в ЩЛП, отриману в результаті обчислень за формулами, які отримав Кон [20].

Величину сумарного загасання в ЩЛП α визначено за допомогою експериментально отриманої залежності КСХ на вході ЩЛП від її довжини (рис 1, а). За формулою визначення $КСХ = (1 + r) / (1 - r)$, де r – коефіцієнт відбиття від входу ЩЛП, дорівнює відношенню

падаючої і відбитої напруг на вході ЩЛП завдовжки L , $r = U_{від} / U_{над}$, знаходимо величину відбитої напруги:

$$U_{від} = U_{над} \frac{KCH - 1}{KCH + 1}. \quad (1)$$

Коефіцієнт загасання a на відрізку ΔL між ділянками, в яких спостерігаються мінімальні значення KCH , визначають за формулою:

$$2a \cdot \Delta L = 20 \log_{10} \frac{U_{від1}}{U_{від2}}, \quad (2)$$

де $\Delta L = L_1 - L_2$ – довжина ЩЛП, для якої визначають загасання; $U_{від1}$ і $U_{від2}$ – значення відбитої напруги при довжинах ЩЛП, за яких спостерігають мінімальні значення KCH .

Ліва частина формули (2) містить $2 \cdot \Delta L$, оскільки хвиля на цій ділянці проходить подвійну відстань. Підставляючи в (2) значення $U_{від1}$ і $U_{від2}$ з (1), отримуємо остаточну формулу для розрахунку a :

$$a = \frac{10}{L_1 - L_2} \log_{10} \frac{(KCH_2 + 1) \cdot (KCH_1 - 1)}{(KCH_2 - 1) \cdot (KCH_1 + 1)}. \quad (3)$$

Результати експериментальних досліджень загасання в ЩЛП при $w = 1,5$ мм у смузі частот наведено на рис. 2.

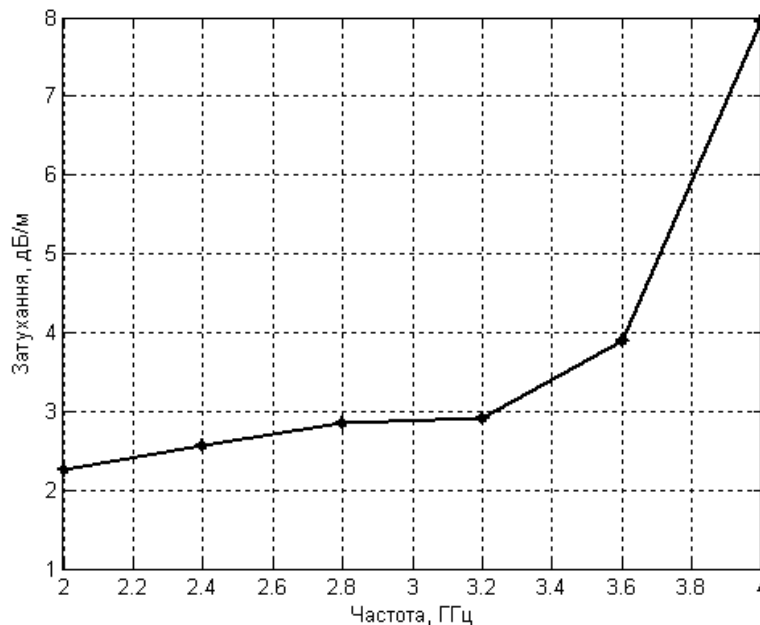


Рис. 2. Коефіцієнт загасання хвилі в ЩЛП

Результати дослідження макета ЩРВ

Макет антенної решітки з чотирьох криволінійних щілинних випромінювачів, що являють собою ромб з периметром $P = 2 \cdot l_{щ}$, виготовлено на друкованій платі з склотекстоліту завтовшки $h = 1,5$ мм. Живлення ЩРВ забезпечується коаксіально-мікросмушковим переходом, підключеним до внутрішнього і зовнішнього провідників компланарної лінії. Режим поширення хвиль у ЩЛП забезпечується підключенням опорів навантаження між краями ЩЛП у верхній частині ромбів.

На рис. 3 зображено експериментальний зразок плоскої антенної решітки, яка складається з чотирьох ЩРВ. Узгодження антенної решітки з 50-ю коаксіальною лінією здійснюється за допомогою системи компланарних ліній.

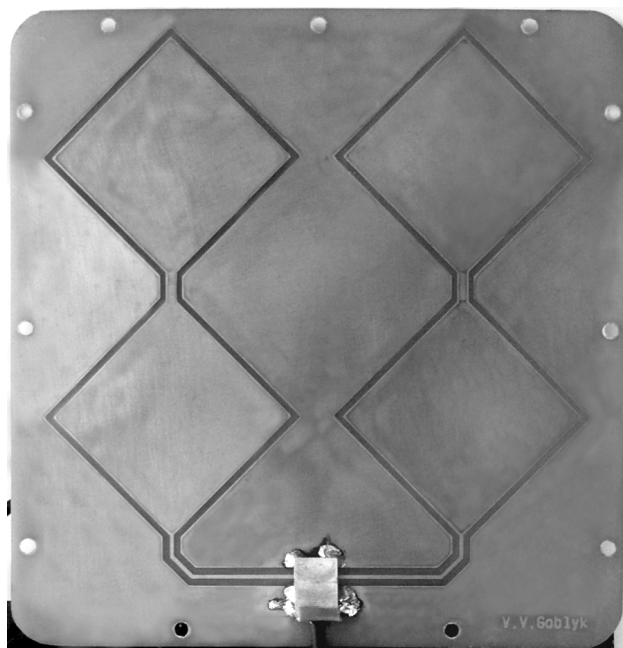


Рис. 3. Топологія друкованої плати антенної решітки ЦРВ

Досліджували експериментальний макет антенної решітки в безвідлунній камері за допомогою вимірювального комплексу, до складу якого входив генератор коливальної частоти ГКЧ-53, оснащений блоком НВЧ № 2 для роботи в діапазоні частот 2–4 ГГц.

На рис. 4 наведено результати експериментальних і теоретичних досліджень, проведених за методикою, описанною в [15], випромінюючих властивостей антенної решітки з чотирьох ЦРВ. Поляризація сигналу вертикальна.

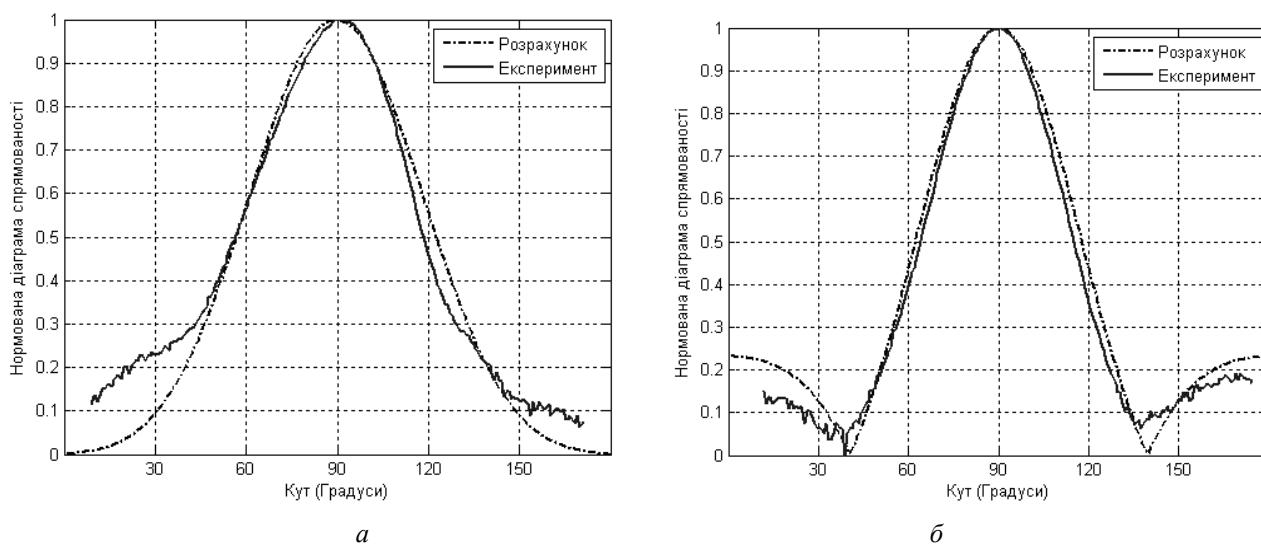


Рис.4. Нормована діаграма спрямованості плоскої антенної решітки з чотирьох ЦРВ:
а – у площині Е; б – у площині Н

Ширина діаграми спрямованості у вертикальній площині за рівнем 0.5 становить 60°, у горизонтальній площині – 50°.

На рис. 5 наведено діаграму спрямованості антенної решітки для кросполяризованого сигналу.

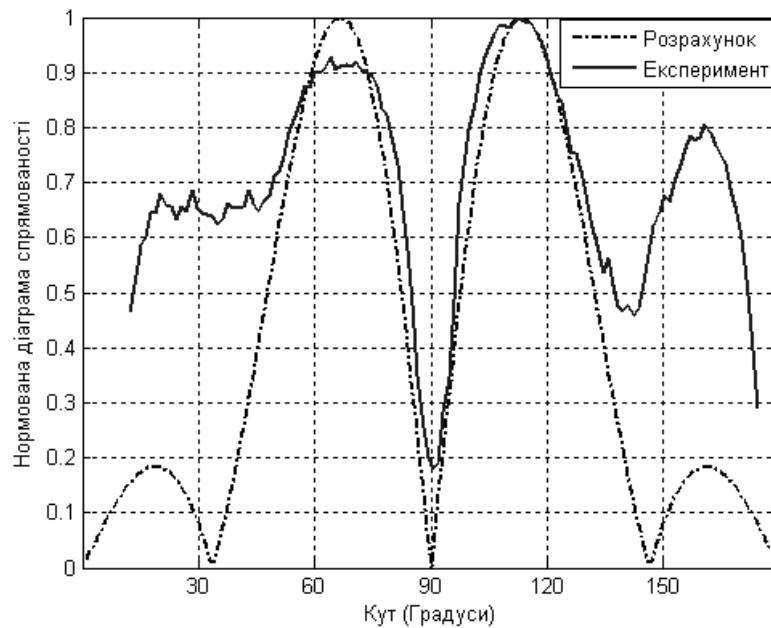


Рис. 5. Нормована діаграма спрямованості кросполяризованого сигналу плоскої антенної решітки з чотирьох ЩРВ

На рис. 5 спостерігається наявність випромінювання в напрямку нормалі на рівні 0,2 від максимуму, при цьому за розрахунками, що проведені за методикою, описаною в [15], величина кросполяризованого сигналу в цьому напрямку дорівнює нулю. Бокові пелюски, що спрямовані під кутом 22° від нормалі, спостерігаються і при числовому, і при експериментальному дослідженнях, а випромінювання під кутом 70° від нормалі, що спостерігається на експериментальному графіку, зумовлене наявністю поверхневої хвилі, що не врахована математичною моделлю.

На рис. 6 зображено результати експериментальних досліджень коефіцієнта підсилення плоскої антенної решітки з чотирьох ЩРВ з екраном у смузі частот 2–3 ГГц.

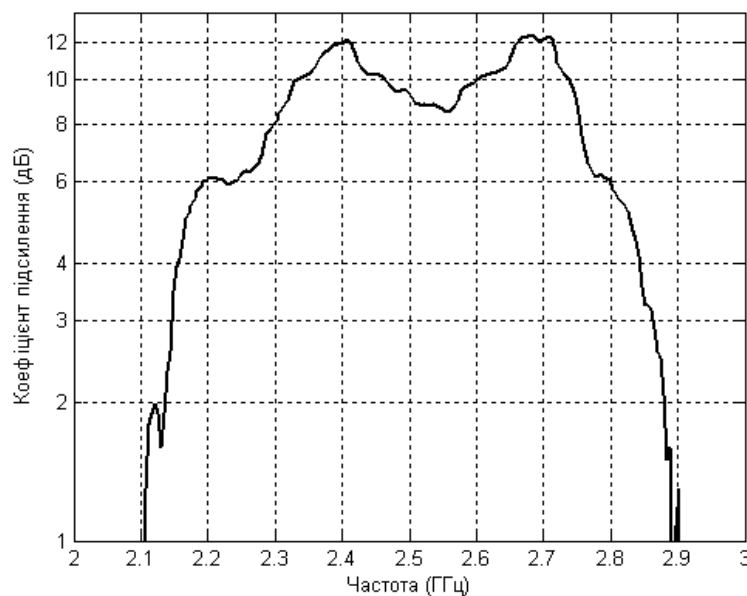


Рис. 6. Коефіцієнт підсилення плоскої антенної решітки з чотирьох ЩРВ

Підсилення одного ЩРВ у режимі короткого замикання становить 4,88 дБ на частоті 2,4 ГГц [15]. Як видно на рис. 6, підсилення чотирьохелементної антенної решітки з екраном становить

12 дБ на частоті 2,4 ГГц. Ширина робочої смуги частот становить 17 % у межах коефіцієнта підсилення 3 дБ від максимального.

Висновки

Отже, розроблено і досліджено щілинну ромбічну антену, що збуджується полем біжучих хвиль у ЩП. Розроблений підхід визначення коефіцієнта сповільнення хвилі дає змогу розрахувати параметри конструкції лінії живлення для забезпечення синфазного збудження випромінюючих елементів антенної решітки.

Запропонована схема живлення антенної решітки забезпечує збудження 4-х елементів антенної решітки, що підтверджують діаграми спрямованості, отримані експериментально. Коефіцієнт підсилення розробленого макета антенної решітки ЩРВ на частоті 2,4 ГГц у режимі короткого замикання становить 12 дБ. Смуга частот у межах коефіцієнта підсилення 3 дБ від максимального становить 2,32...2,75 ГГц, або 17 %.

Отримані просторові характеристики антенної решітки ЩРВ, зокрема, відсутність випромінювання паразитного кросполяризованого випромінювання в напрямку нормалі показують перспективність використання ЩРВ як елементів й інтерферометрів, і антенних решіток, що можуть використовуватися як невисступаючі антенні системи мобільних засобів телекомунікацій.

1. Greiser J. Coplanar stripline antenna / Greiser J. // *Microwave J.* – 1976. – Vol. 19, No. 10. – P. 47–49.
2. Liu H.-C. Radiation of printed antennas with a coplanar waveguide feed / Huan-Chang Liu, Tzyy-Sheng Horng, Nicolas G. Alexopoulos // *IEEE Trans. Antennas and Propagation.* – 1995. – Vol. 43, No. 10. – P. 1143–1148.
3. Пат. EP1170704 (A1), G 01 S 1/00. Portable access authorization device, GPS receiver and antenna / Benedikt Oswald, Urs Lott, Michael Spuehler; заявник і патентовласник Acter AG; заявл. 04.07.2000; опубл. 09.01.2002.
4. Пат. EP1434302 (A1), H 01 Q 1/12. Annular-slot antenna / Komatsu Satoru, Kuribayashi Hiroshi, Fukumaru Tomoyuki, Iijima Hiroshi, Oshima Hideaki, Matsushita Tatsuo; заявник і патентовласник Honda Motor CO LTD, Nippon Sheet Glass CO LTD; заявл. 27.12.2002; опубл. 30.06.2004.
5. Пат. WO03105278 (A1), H 01 Q 1/12. Plane antenna and its designing method / Oshima Hideaki, Matsushita Tatsuo; заявник і патентовласник Nippon Sheet Glass CO LTD; заявл. 11.06.2002; опубл. 18.12.2003.
6. Пат. US2003001790 (A1) США, H 01 Q 1/38. Compact annular-slot antenna / Louzir Ali, Le Bolzer Francoise; заявник і патентовласник Thomson Licensing S.A.; заявл. 22.06.2001; опубл. 02.01.2003.
7. Пат. EP2009742 (A1), B 60 R 11/02. Antenna assembly, monitor, and vehicle / Yoshida Takashi, Nakanishi Tomoya; заявник і патентовласник Panasonic Corp.; заявл. 17.04.2006; опубл. 31.12.2008.
8. Пат. US2005200530 (A1) США, H 01 Q 13/10. Planar antenna with slot line / Aikawa Masayoshi, Nishiyama Eisuke, Asamura Fumio, Oita Takeo; заявник і патентовласник Saga University; заявл. 28.01.2004; опубл. 15.09.2005.
9. Пат. US2003201941 (A1) США, H 01 Q 1/38. Multi-element planar array antenna / Aikawa Masayoshi, Nishiyama Eisuke, Asamura Fumio, Oita Takeo; заявник і патентовласник Nihon Dempa Kogyo CO.; заявл. 26.04.2002; опубл. 30.10.2003.
10. Garg R. Microstrip Antenna Design Handbook / R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, A. Ittipiboon. – Boston, London: Artech House, Inc., 2001. – 875 p.
11. Пат. US3086204 (A) США, H 01 Q 1/28. Island antenna for installation on aircraft / Alford Andrew; заявник і патентовласник Alford Andrew; заявл. 27.11.1959; опубл. 16.04.1963.
12. Пустолькорс А. А. Антенны / А. А. Пустолькорс. – М.: Связьиздат, 1947. – 480 с.
13. Jasik H. Antenna Engineering Handbook, 1st Edition / H. Jasik (ed.). – New York, U.S.: McGraw-Hill, 1961. – 1021 p.
14. Booker H. G. Slot Aerials and Their Relation to Complementary Wire Aerials / Booker H. G. // *J. Inst. Elect. Eng., part III A*, – 1946. – Vol. 93. – P. 620–626.
15. Hoblyk V. Radiation field modelling of slot antenna in finite size screen / V. Hoblyk, O. Liske // *Computational problems of electrical engineering.* – 2013. – Vol. 3, No. 1. – P. 29–34.
16. Гоблик В.В., Лиске О.М. Моделирование антен на базі щілинної лінії передачі // *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2004. – № 508. – С. 181–186.
17. The modeling of plane curvilinear dipole antenna arrays. V. V. Goblyk, O. M. Liske, E. I. Yakovenko. 5-th International Conference on Antenna Theory and Techniques. 24–27 May, 2005. Kyiv, Ukraine.
18. Di Paolo F.

Networks and Devices Using Planar Transmission Lines / Franco Di Paolo. – CRC Press LLC, 2000. – 680 p. 19. Полосковые платы и узлы. Проектирование и изготовление / [Е. П. Котов, В. Д. Каплун, А. А. Тер-Маркарян и др.] ; под ред. Е. П. Котова и В. Д. Каплуна. – М. : Советское радио, 1979. – 248 с. 20. Cohn S.B. Slot line field components / S. B. Cohn // *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*. – 1972. – Vol. 20. – P. 172–174.

References

1. Greiser J. (1976), "Coplanar stripline antenna", *Microwave J.*, vol. 19, no 10, pp. 47–49.
2. Liu H.-C., Horng T.-S., Alexopoulos N. G. (1995), "Radiation of printed antennas with a coplanar waveguide feed", *IEEE Trans. Antennas and Propagation* vol. 43, no 10, pp. 1143–1148.
3. Patent EP1170704 (A1), G 01 S 1/00. Portable access authorization device, GPS receiver and antenna; inventor: Benedikt Oswald, Urs Lott, Michael Spuehler; patent owner: Acter AG; declared: 04.07.2000; published: 09.01.2002.
4. Patent EP1434302 (A1), H 01 Q 1/12. Annular-slot antenna; inventor: Komatsu Satoru, Kuribayashi Hiroshi, Fukumaru Tomoyuki, Iijima Hiroshi, Oshima Hideaki, Matsushita Tatsuo; patent owner: Honda Motor CO LTD, Nippon Sheet Glass CO LTD; declared: 27.12.2002; published: 30.06.2004.
5. Patent WO03105278 (A1), H 01 Q 1/12. Plane antenna and its designing method; inventor: Oshima Hideaki, Matsushita Tatsuo; patent owner: Nippon Sheet Glass CO LTD; declared: 11.06.2002; published: 18.12.2003.
6. Patent US2003001790 (A1) USA, H 01 Q 1/38. Compact annular-slot antenna; inventor: Louzir Ali, Le Bolzer Francoise; patent owner: Thomson Licensing S. A.; declared: 22.06.2001; published: 02.01.2003.
7. Patent EP2009742 (A1), B 60 R 11/02. Antenna assembly, monitor, and vehicle; inventor: Yoshida Takashi, Nakanishi Tomoya; patent owner: Panasonic Corp.; declared: 17.04.2006; published: 31.12.2008.
8. Patent US2005200530 (A1) USA, H 01 Q 13/10. Planar antenna with slot line; inventor: Aikawa Masayoshi, Nishiyama Eisuke, Asamura Fumio, Oita Takeo; patent owner: Saga University; declared: 28.01.2004; published: 15.09.2005.
9. Patent US2003201941 (A1) USA, H 01 Q 1/38. Multi-element planar array antenna; inventor: Aikawa Masayoshi, Nishiyama Eisuke, Asamura Fumio, Oita Takeo; patent owner: Nihon Dempa Kogyo CO.; declared: 26.04.2002; published: 30.10.2003.
10. Garg R., Bhartia P., Bahl I., Ittipiboon A. (2001) *Microstrip Antenna Design Handbook*, Artech House, Inc., Boston, London.
11. Patent US3086204 (A) USA, H 01 Q 1/28. Island antenna for installation on aircraft; inventor: Alford Andrew; patent owner: Alford Andrew; declared: 27.11.1959; published: 16.04.1963.
12. Pistolkors A. A. (1947), *Antennas [Antenny]*, Svyazizdat, Moscow, USSR, 480 p.
13. Jasik H. (1961), *Antenna Engineering Handbook*, 1st Edition, McGraw-Hill, New York, USA.
14. Booker H.G. (1946), "Slot Aerials and Their Relation to Complementary Wire Aerials", *J. Inst. Elect. Eng*, part III A, vol. 93, pp. 620–626.
15. Hoblyk V. and Liske O. (2013), "Radiation field modelling of slot antenna in finite size screen", *Computational problems of electrical engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 29–34.
16. Hoblyk V. and Liske O. (2004), "Modeling of antennas based on slot transmission line" ["Modelyuvannya anten na bazi shchilynnoyi liniyi peredachi"], *Visnyk of Lviv polytechnic National university*, no. 508, pp. 181–186.
17. Goblyk V. V., Liske O. M., Yakovenko E. I. (2005), "The modeling of plane curvilinear dipole antenna arrays", 5-th International Conference on Antenna Theory and Techniques, Kyiv, Ukraine, p. 232.
18. Di Paolo F. (2000), *Networks and Devices Using Planar Transmission Lines*, CRC Press LLC, Boca Raton.
19. Kotov E. P., Kaplun V. D., Ter-Markaryan A. A. (1979), *Striplines and nodes. Design and manufacturing [Poloskovyye platy i uzly. Proektirovaniye i izgotovleniye]*, Soviet radio, Moscow, 248 p.
20. Cohn S. B. (1972), "Slot line field components" *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 20, pp. 172–174.