

НВЧ-діагностика

Воропаев П.В., Митрофанов А.Б., Биденко В.А., Зоренко А.В. **Методы СВЧ-диагностики плазмы.** Произведен обзор основных методов СВЧ-диагностики плазмы, а именно: интерферометрии, поляриметрии и циклотронной СВЧ-диагностики плазмы

**Ключевые слова:** плазма, ТОКАМАК, интерферометрия, поляриметрия, циклотронная СВЧ-диагностика

Voropaiev P.V., Mytrofanov A.B., Bidenko V.A., Zorenko A.V. **Methods of plasma UHF-diagnostics.** Reviewed the basic methods of plasma UHF-diagnostics. There are: interferometry, polarimetry and plasma cyclotron diagnostics.

**Keywords:** plasma, ТОКАМАК, interferometry, polarimetry, cyclotron UHF-diagnostics.

УДК 621.396.674.3

## БАГАТОПРОМЕНЕВІ АНТЕНІ РЕШІТКИ НА ОСНОВІ ЛІНЗ РОТМАНА (ОГЛЯД)

*Булашенко А.В.*

Багатопроренева антенна решітка (БАР) – це антенний пристрій, здатний формувати у просторі декілька діаграм спрямованості (ДС), кожній з яких відповідає визначений вхід променя. Такі антени використовуються як самостійні пристрої або як елементи складних систем. БАР забезпечує можливість паралельного огляду простору в широкому секторі кутів з високою роздільною здатністю, одночасного сканування декількох незалежними променями, управління формою ДС та інше.

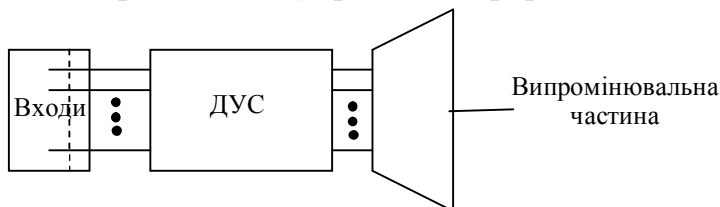


Рис. 1. Структурна схема БАР

Структурна схема БАР (рис. 1) включає випромінювальну частину, яка може бути виконана у вигляді решітки випромінювачів або розкриву апертурної антени,

діаграмоутворюючу схему (ДУС) та входи антени у вигляді поперечних перетинів ліній передачі з одним типом хвилі. ДУС – це основний елемент структурної схеми БАР, призначений для створення потрібних амплітудно-фазових розподілів поля у випромінюючій частині.

За способом реалізації випромінюючої частини можна виділити апертурні та решітчасті БАР [1]. Апертурні БАР зазвичай реалізують на основі лінзових чи дзеркальних антен. ДУС таких БАР – це сукупність опромінювачів з рефлектором або лінзою. Їх перевага у простоті конструкції та можливості формування ДС з малими бічними пелюстками. До недоліків належать: низький рівень перетину сусідніх пелюстків, громіздкість констру-

кції та велика маса. До складу решітчастих БАР входить ДУС у вигляді схем матричного типу. Найбільш відомі схеми живлення багатопромених антенних решіток – схеми Батлера та Бласа [1] – є складними в реалізації. Схема Бласа реалізується на основі взаємно перетинаючих фідерних ліній, що зв'язані у місцях перетину за допомогою спрямованих відгалужувачів. Фазові зсуви між сусідніми випромінювачами забезпечуються нахилом фідерів відносно один одного. Оскільки така лінія навантажена на узгоджене навантаження, і спрямовані відгалужувачі вносять додаткові втрати, то ККД такої схеми зменшений. Схема Батлера – це паралельна схема живлення, що містить направлені відгалужувачі та фіксовані фазообертачі. До недоліків такої схеми відносять: складність реалізації амплітудних розподілів спеціальної форми для зменшення бічних пелюсток, частотно-залежне положення променів у просторі. Тому останнім часом все більше для живлення багатопромених антенних решіток використовують ДУС у вигляді лінз Ротмана [2].

Лінза Ротмана у своєму найпростішому виконанні (рис. 2) складається з області між паралельними пластинами, що живляться коаксіальними зондами з двох протилежних сторін. Зонди з правої сторони називаються входами випромінюючих елементів. Вони з'єднані відрізками високочастотних кабелів визначеної довжини з окремими випромінюючими елементами антенної решітки на розкритті лінзи. Зонди, що розташовані з лівої сторони лінзи, називають входами променів. Вони розподілені вздовж фокальної дуги таким чином, що кожен з них відповідає визначеному напрямку променя у просторі.

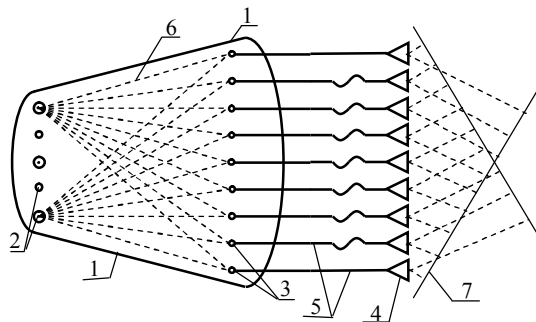


Рис. 2.

Схематичне зображення лінзи Ротмана:  
1 – лінза, 2 – входи променів, 3 – входи випромінюючих елементів, 4 – випромінюючі елементи, 5 – кабелі, що з'єднують випромінюючі елементи з їх входами, 6 – траєкторії променів, 7 – фронт хвилі на вході лінзи

Геометрія лінзи Ротмана та довжини кабелів вибрані таким чином, що електрична довжина від кожної фокальної точки входу кожного променя до відповідного хвильового фронту кожного променя є однаковою.

Решітки на основі лінз Ротмана можуть бути прямолінійними та криволінійними. Останні можна використовувати як невисступаючі антени для літальних апаратів. Прямолінійні решітки дають більш вузький промінь, ніж криволінійні при тих же розмірах розкриття. Криволінійні мають ту перевагу, що мають більш широкий сектор сканування (чи сектор перекриття багатопроменевою діаграмою), їх максимальна ефективна радіолокаційна площа розсіювання менша, ніж у прямолінійної решітки, в них не спосте-

рігається «осліплення» решітки, оскільки кривизна решітки руйнує періодичність розташування елементів.

Головна перевага лінзи Ротмана в її широкосмуговості, оскільки вона має незалежне від частоти регулювання променя. Смуга частот обмежується лише смугою пропускання її елементів та неузгодженням імпедансу між випромінювачами та з'єднувальними лініями передачі. Друга перевага полягає в тому, що можна одночасно використовувати багато променів при формуванні головного променя. Третя перевага полягає в тому, що можлива зміна фази незалежно від частоти, що дозволяє не використовувати дорогі фазозсувачі. Крім того, лінзи Ротмана через їх просту модель та компактні розміри є привабливими для використання при електронному скануванні. Джерела, що встановлені на центральній дузі лінзи забезпечують зручний шлях для будь-якого формування багатьох променів.

До недоліків лінз Ротмана слід віднести наявність відбиття від бічних стін, взаємний вплив сусідніх входів один на одного, що послаблює вихідний промінь та спотворює діаграму спрямованості, а також досить високі рівні бічних пелюсток.

Для усунення першого недоліку бічні стінки проектують таким чином, щоб мінімізувати випромінювання від них. Для цього вводять набір входів, що мають узгоджене навантаження.

У роботі [3] розглянутий прототип лінзи Ротмана на частоті 37 ГГц, що складався з 34 входів решітки та 19 променів. Відстань між елементами складала 0.478 см, максимальний кут сканування  $22.2^\circ$ , фокусна довжина 17.34 см. Головна задача полягала у тому, щоб досягти низького рівня бічних пелюсток (менше -30 дБ). На рис. 3 показано залежності амплітуди променів (у дБ) від кута сканування на частотах 37 ГГц та 36.8 ГГц відповідно.

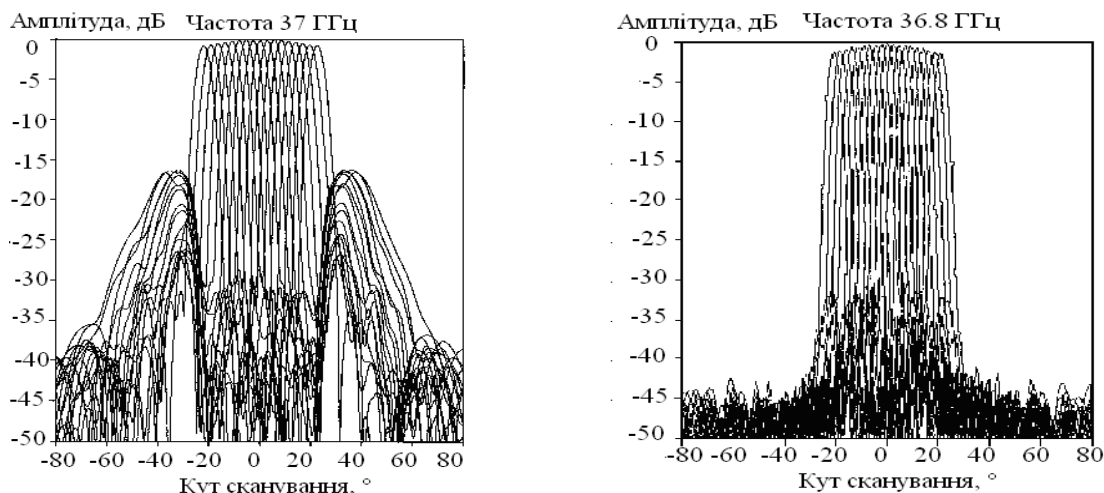


Рис. 3. Залежність амплітуди променів від кута сканування

Робота [4] присвячена розгляду математичних співвідношень при побудові БАР на основі лінз Ротмана.

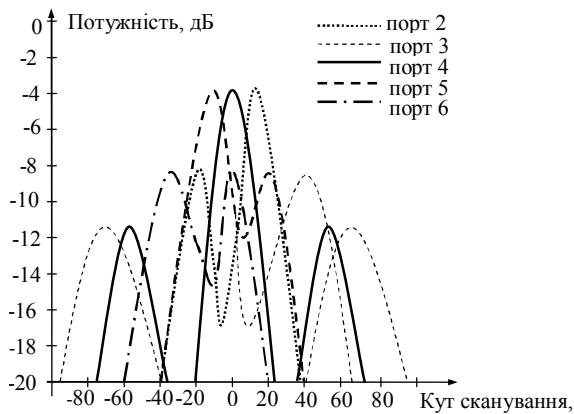


Рис. 4. Залежність потужності від кута

на частоті 20.5 ГГц.

До теперішнього часу було створено багато різних лінз Ротмана, але ми зупинимося лише на мікросмужкових. У 1992 Пітерсон запропонував смужкову лінію для реалізації лінзи Ротмана [3]. Такі реалізації базуються на поперечні хвилі TEM та демонструють відносно широкі робочі смуги частот (3:1 та більше). У Ka-діапазоні та в ще вищих діапазонах частот втрати та малі фізичні розміри ускладнюють виконання TEM-лінзи. У таких випадках використовують TEM-модель з паралельною пластиною, що обмежує смугу пропускання. Такі лінзи були розроблені недавно [3, 7].

У роботі [8] розглянутий дослідний зразок лінзи Ротмана, яка мала 41 порт решітки та 46 портів променя. Така решітка була досліджена на частотах від 18 до 22 ГГц. На рис. 5 представлений графік фазових похибок такої решітки, а на рис. 6 показана амплітуда для центрального порту променя.

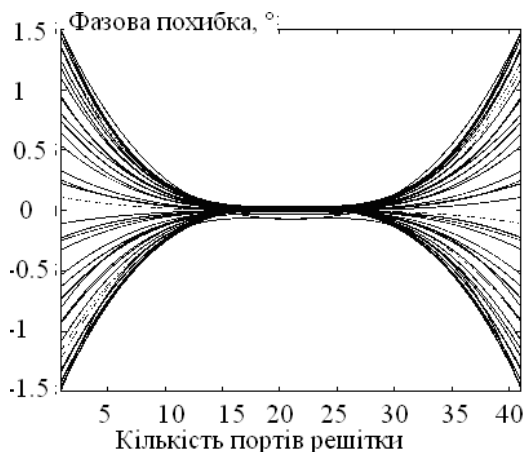


Рис. 5. Графік фазової похибки

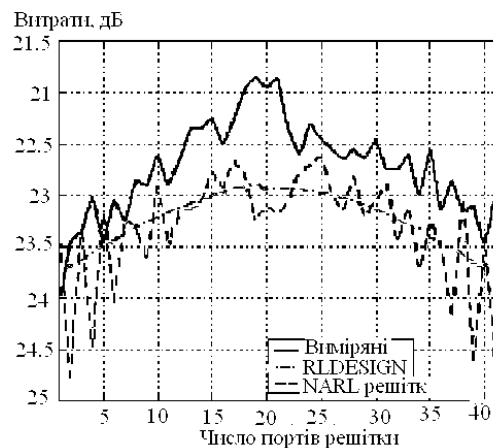


Рис. 6. Розподіл амплітуди центрального порту променя

Автори роботи [9] розглядають модель лінзи Ротмана для міліметрових хвиль, а у роботі [10] розглянуті особливості застосування широко кутової мікрохвильової лінзи Ротмана. У роботі [11] розглянуті лінзи Ротмана однакової висоти решітки та контурів живлення.

Нещодавно, були введені деякі види синтезованих хвилеводів на діелектричній підкладинці (рис. 7), такі як підкладинка інтегрованого хвилеводу (SIW) [6], [13] - [16], штир у стінці хвилеводів [16], чи шаруваті хвилеводи [18], [19]. Характеристики SIW були майже ідентичними до заповненого діелектриком звичайного хвилеводу з тією ж самою висотою та еквівалентною шириною та мали перспективу для використання на НВЧ чи міліметрових хвилях з перевагами: низькі втрати, масове виробництво та легка інтеграція з іншими плоскими схемами. У роботі [21] запропоновано новий тип лінзи Ротмана на SIW для живлення щільової антенної решітки на SIW для формування променів на частоті 28.5 ГГц. Оскільки режим TEM не міг існувати в SIW, був обраний режим  $TE_{10}$ , щоб збуджувати лінзу та на її основі розподілення поля на основі можливої структури живлення. Охоплення простору БАР 4x5 поданий на рис. 8.

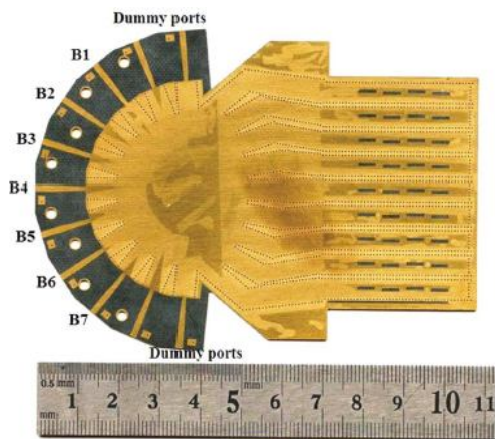


Рис. 7. Фотографія багатопроменевої антени на SIW

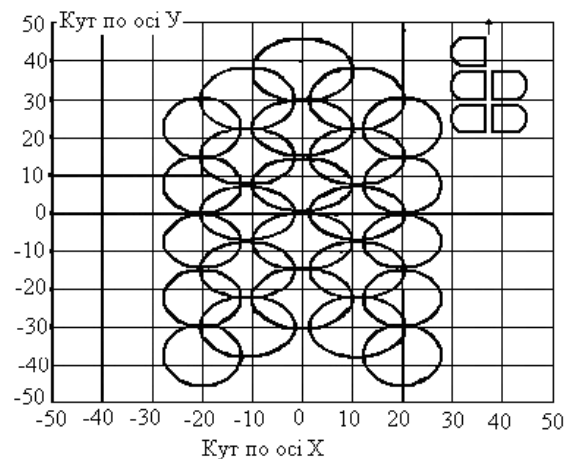


Рис. 8. Променевий охоп 4 x 5 у двовірній площині з шириною смуги у 5 дБ

Лінзи Ротмана на SIW з 7 вхідними портами променя каскадно ввімкнені з дев'ятьма щільними антенними решітками на SIW були розроблені та виготовлені. На відміну від традиційних багатопроменевих антен, була запропонована плоска конфігурація, що працює на міліметрових хвилях, і забезпечує при цьому високий коефіцієнт підсилення та низькі втрати. Експериментально перевірені та розвинені два різні шляхи, щоб забезпечити двовимірний сектор охопту променями. Виміряні результати демонструють, що цей тип багатопроменевої антени на SIW можна використовувати для розширеного Ка-діапазону та комунікаційних систем міліметрового діапазону.

Зразки променя були виміряні в безлунній мікрохвильовій камері (див. рис. 9). Також існує явище погіршення форми випромінюючого про-

меня через вплив інших антен та пластини, що підтримує. Це погіршує роботу цілої системи. Модель двовимірного охопту цієї багатопроменевої антени зображена на рис. 8. Вона може створювати 5 x 5 променів, щоб перекрити сектор приблизно  $(-25^\circ, 25^\circ) \times (-35^\circ, 35^\circ)$  з шириною променя на рівні -5 дБ.

Для забезпечення сумісності з шириною смуги частот багатопроменевих лінз, елементи решітки повинні працювати у смузі частот 4:1 чи більше, бажані кутові сектори повинні бути до  $120^\circ$  [2]. Для застосувань у радіоподавленні та радіопротидії бажана колова поляризація, щоб бути чутливою до різних видів поляризації. Для усунення формування бічних пелюстків решітки, коли решітка сканує у широкому куті, інтервал між елементами не повинен перевищувати величину приблизно  $0.5\lambda_{\min}$ , де  $\lambda_{\min}$  - довжина хвилі на найвищій робочій частоті.

Найбільш популярним методом отримання колової поляризації в широкосмуговій решітці є використання лінійно поляризованих випромінюючих елементів, розміщених перед апертурою. Були розроблені багатошарові поляризатори з перекриттям смуги частот 4:1.

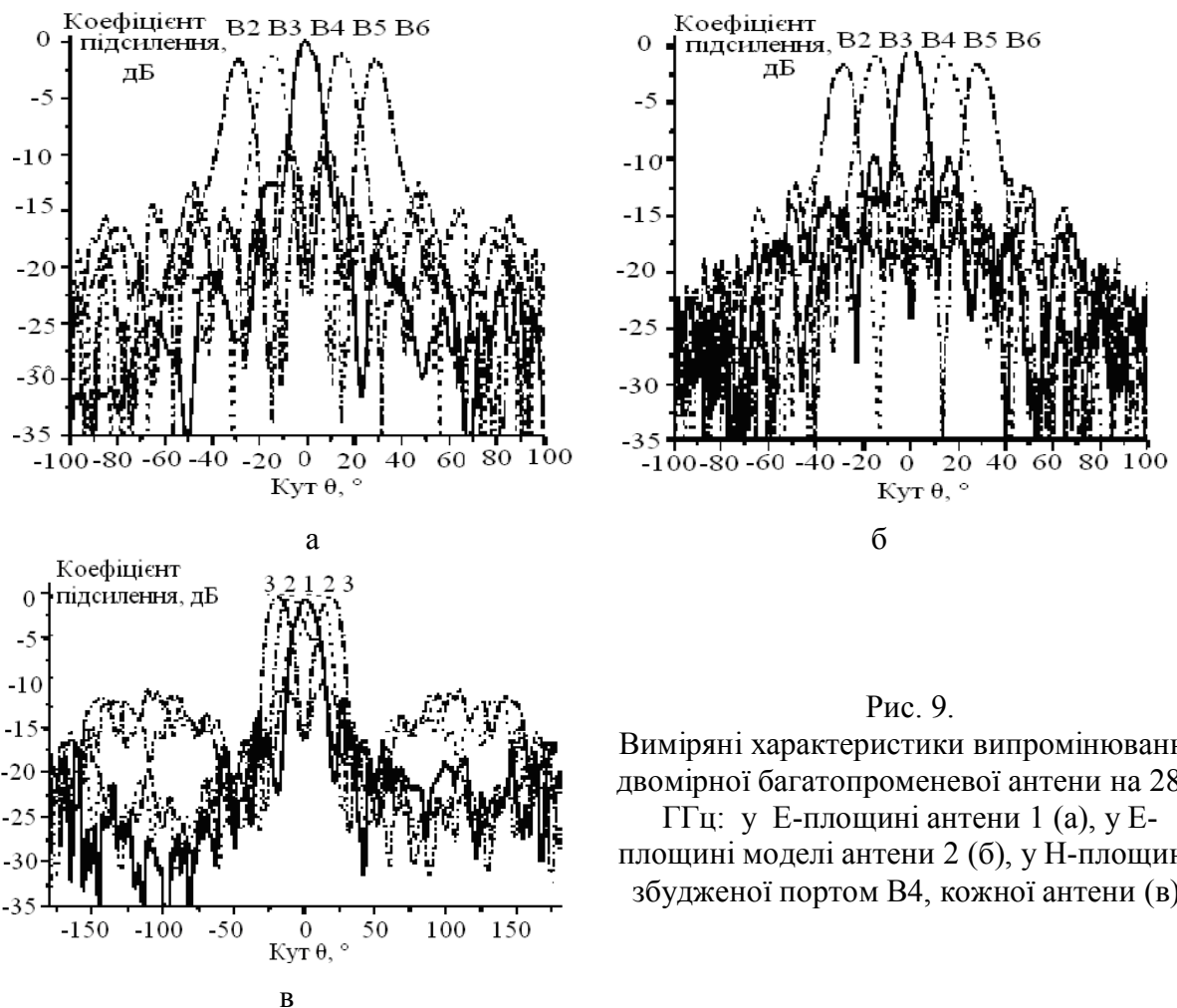


Рис. 9. Виміряні характеристики випромінювання двовимірної багатопроменевої антени на 28.5 ГГц: у Е-площині антени 1 (а), у Е-площині моделі антени 2 (б), у Н-площині, збудженої портом В4, кожної антени (в).

У роботі [24] розглянута лінійна решітка у Н-площині із семи вертикально поляризованих двохгребінчатих елементів. Вона забезпечує сектор  $60^\circ$  по куту місця та  $120^\circ$  – по азимуту. Робоча смуга частот решітки перевищує 4:1.

У роботі [25] розглянута друкована решітка з восьми друкованих рупорних елементів у Н-площині. Вона живиться через смужкову лінію подільника потужності, що має вісім виходів, витравлених на внутрішній поверхні друкованої плати. Після схеми подільника потужності є мікросмужковий перехід, який плавно звужується, щоб сформувати рупор. Випромінення здійснюється безпосередньо від мікросмужки. Коли решітка збуджується лінзами Ротмана, одержуємо приблизно  $120^\circ$  по азимуту та  $120^\circ$  – по куту місця.

Розглядаючи фактори втрат, складності, та обмеження структури можна стверджувати, що багатопроменева антенна на SIW, побудована на лінзах Ротмана, може підтримувати тільки п'ять - десять променів вздовж однієї площини. Таким чином, при необхідності покрити широкий сектор з десятками або сотнями променів, треба одночасно використовувати групу багатопроменевих антен на SIW.

### Висновки

На сьогоднішній день лінзи Ротмана є найкращими схемами живлення для побудови ширококутових та надширококутових (з перекриттям по частоті 2:1 та більше) багатопроменевих антенних решіток. Розроблено багато лінз Ротмана в різних діапазонах частот (до 37 ГГц). Максимальна кількість входів у існуючих зразках 41, максимальне число променів 46, мінімальний рівень бічних пелюстків менше -30дБ, максимальний сектор по куту місця  $120^\circ$ , а максимальний сектор по азимуту  $120^\circ$ .

### Література

1. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: Уч. пособие для вузов /Под ред. Д.И. Воскресенского. М.: Радиотехника, 2003. – 632с.
2. Rotman W., Turner R. Wide-angle microwave lens for line source applications // IEEE Transactions Antennas Propagation, Vol. 11, No. 6, November, 1963, pp. 623 – 632.
3. Peterson A. F. Scattering matrix integral equation analysis for the design of a waveguide Rotman lens // IEEE Transactions on antennas and propagation, Vol. 47, No. 5, May 1999. – pp. 870 – 878.
4. Hansen R. C. Design trades for Rotman lenses // IEEE Transactions on antennas and propagation, Vol. 39, No. 4, April 1991., pp. 464 – 472.
5. Park C. S., Kim J., Min S. TM<sub>0</sub> mode surface wave excited dielectric slab Rotman lens // IEEE Antennas and wireless propagation letters, Vol. 6, 2007. – pp. 584 – 587.
6. Kim S., Zepeda P., Chang K. Piezoelectric transducer controlled multiple beam phased array using microstrip Rotman lens // IEEE Microwave and wireless components letters, Vol. 15, No. 4, April 2005. – pp. 247 – 249.
7. Kim J., Cho C. S., Barnes F. S. Dielectric slab Rotman lens // IEEE Microwave and wireless components letters, Vol. 15, No. 5, May 2005. – pp. 348 – 350.
8. Simon P. S. Analysis and synthesis of Rotman lenses // 22<sup>nd</sup> AIAA International Communications Satellite systems conference and exhibit 2004, 9-12 May, Monterey, Cali-

fornia, USA.

9. Hall L., Hansen H., Abbott D. Rotman lens for mm-wavelengths // Proceedings of SPIE. Vol. 4935, 2002. – pp. 215 – 221.

10. Rotman R., Green Y., Israel Y., Lee J. F., Lin T. Y., Lee S. C. Design and analysis of microstrip line Rotman lenses // Electro Science laboratory.

11. Singhal P. K., Sharma P. C., Gupta R. D. Rotman lens with equal height of array and feed contours // IEEE Transactions on antennas and propagation, Vol. 51, No. 8, August 2003, pp. 2048 – 2056.

12. The handbook of antenna design. Volume 1 ed. By A. W. Rudge. – London, UK: Peter Peregrinus Ltd., 1982. – 336 p.

13. Josef G. Worms, Peter Knott and Dirk Nuessler. The experimental system PALES: signal separation with a multibeam-system based on a Rotman lens // IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 49, No. 3, June 2007. – pp. 95 – 107.

14. Takashi Katagi, Seiji Mano, Shin-ichi Sato. An improved design method of Rotman lens antennas // IEEE Transactions on antennas and propagation, Vol. AP-32, No. 5, May 1984. – pp. 524 – 527.

15. Tao Y. M., Delisle G. Y. Lens-fed multiple beam array for millimeter wave Indoor Communications // IEEE Trans. On Antennas and propagation, Vol. AP-32, No. 5, May 1997, pp. 2206 – 2209.

16. David R. Gagnon. Procedure for correct refocusing of the Rotman lens according to Shell's law // IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 37, No. 3, March 1989. – pp. 390 – 392.

17. Jacob Remez, Avigdor segal and Refael Shansi. Dual-polarized wideband widescan multibeam antenna system from tapered slotline elements array // IEEE Antennas and wireless propagation letters, Vol. 4, 2005. – pp. 293 – 296.

18. Lora Schulwitz, Amir Mortazawi. A new low loss Rotman lens design using a graded dielectric substrate // IEEE Transactions on microwave theory and techniques, Vol. 56, No. 12, December 2008. – pp. 2734 – 2741.

19. Sanghyo Lee, Sangsub Song, Youngmin Kim, Jangsoo Lee, Chang-Yul Cheon, Kwang-Seok Seo, Youngwoo Kwon. A V-band beam-steering antenna on a thin-film substrate with a flip-chip interconnection // IEEE Microwave and wireless components letters, Vol. 18, No. 4, April 2008. – pp. 287 – 289.

20. Carsten Metz, Jens Grubert, Johann Heyen. Fully integrated automotive radar sensor with versatile resolution // IEEE Transactions on microwave theory and techniques, Vol. 49, No. 12, December 2001. – pp. 2560 – 2565.

21. Yu Jian Cheng, Wei Hong, Ke Wu, Zhen Qi Kuai, Chen Yu, Ji Xin Chen, Jian Yi Zhou and Hong Jun Tang. Substrate integrated waveguide (SIW) Rotman Lens and its Ka-band multibeam array antennas applications // IEEE Transactions on antennas and propagation, Vol. 56, No. 8, August 2008. – pp. 2504 – 2513.

22. Joerg Schoelbel, Thomas Buck, mathias Remann, Markus Ulm, Martin Schneider, Anne Jourdain, Geert J. Carchon. Design considerations and technology assessment of phased-array antenna systems with RF MEMS from automotive radar applications // IEEE Transactions on microwave theory and techniques, VOL. 53, No. 6, July 2005. – pp. 1968 – 1975.

23. Kwok Kee Chan and Sudhakar K. Rao. Design of a Rotman lens fed network to generate a hexagonal lattice of multiple beams // IEEE Transactions on antennas and propagation, Vol. 50, No. 8, August 2002. – pp. 1099 – 1108.

24. Christopher W. Penney. Rotman lens design and simulation in software // IEEE Microwave magazine, December 2008. – pp. 138 – 149.



25. Archer D. H. Lens-fed multiple beam arrays // Microwave Journal, vol. 27, September 1984. – pp. 171 – 194.

*Булашенко А. В. Багатопроменеві антенні решітки на основі лінз Ротмана. Подано огляд сучасних схем живлення багатопроменевих антенних решіток на основі лінз Ротмана. Головна увага зосереджена на мікросмужкових лінзах.*

**Ключові слова:** багато променева антенна решітка, лінза Ротмана.

*Булашенко А. В. Многолучевые антенные решетки на основе линз Ротмана. Приведен обзор современных схем питания многолучевых антенных решеток на основе линз Ротмана. Главное внимание сосредоточено на микрополосковых линзах.*

**Ключевые слова:** многолучевая антенная решетка, линза Ротмана.

*Bulashenko A. V. Multibeam arrays on the basis of Rotman lenses . The paper gives a review of modern feed circuits multibeam antennas based on Rotman lens. The main attention has been concentrated to possibilities of microstripe lens.*

**Key words:** multibeam array, Rotman lens.