

ЖИВЛЕННЯ АНТЕННИХ РЕШІТОК НА ОСНОВІ ЛІНЗ РОТМАНА (ОГЛЯД)

А.В. Булашенко, аспірант,

Ф.Ф. Дубровка, д-р техн. наук, професор,*

*Шосткинський інститут Сумського державного університету,
м. Шостка;*

**Національний технічний університет України «КПІ», м Київ*

ВСТУП

Багатопробе́на 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 із високою роздільною здатністю, одночасного сканування декількома незалежними променями, керування формою ДС та інше. Метою цього дослідження є аналітичний огляд схем живлення багатопробених антенних решіток на основі лінз Ротмана, можливості їх застосування та подальшого розвитку.

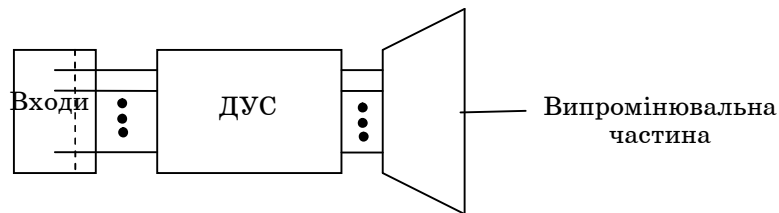


Рисунок 1 - Структурна схема БАР

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

За способом реалізації випромінювальної 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 із малими бічними пелюстками. До недоліків належать: низький рівень перетину сусідніх пелюсток, громіздкість конструкції та велика маса. До складу решітчастих БАР входить ДУС у вигляді схем матричного типу. Найбільш відомі схеми живлення багатопробе́них 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 один щодо 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 пелюстків, частотно-залежне положення променів у просторі. Тому останнім часом все більше для живлення багатопроменевих антенних решіток використовують ДУС у вигляді лінз Ротмана [2].

ПРИНЦИП ДІЇ ЛІНЗИ РОТМАНА

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 випромінювальних елементів. Вони з'єднані відрізками височастотних кабелів визначеної довжини з окремими випромінювальними 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 із них відповідає визначеному напрямку променя у просторі.

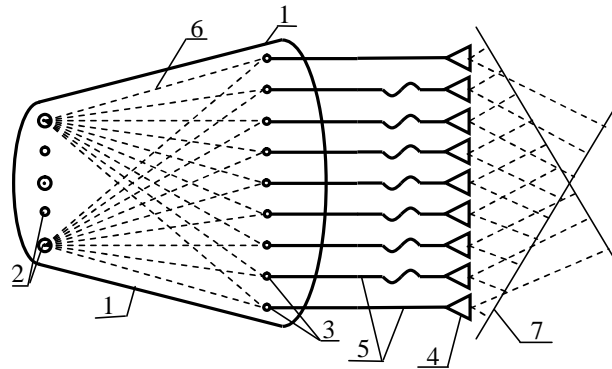


Рисунок 2 - Схематичне зображення лінзи Ротмана: 1 - лінза; 2 - входи променів; 3 - входи випромінювальних елементів; 4 - випромінювальні елементи; 5 - кабелі, що з'єднують випромінювальні елементи з їх входами; 6 - траєкторії променів; 7 - фронт хвилі на вході лінзи

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

Головна перевага лінзи Ротмана в її широкосмуговості, оскільки вона має не залежне від частоти регулювання променя. Смуга частот обмежується лише смугою пропускання її елементів та незгодженням 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 потрібно 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.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

У роботі [3] розглянутий прототип лінзи Ротмана на частоті 37ГГц, що складалася з 34 входів решітки та 19 променів. Відстань між елементами становила 0,478см, максимальний кут сканування - 22,2°, фокусна довжина - 17,34 см. Головне завдання полягало в тому, щоб досягти низького рівня бічних пелюсток (менше -30дБ). На рис. 3 показано залежності амплітуди променів (у дБ) від кута сканування на частотах 37ГГц та 36,8ГГц відповідно.

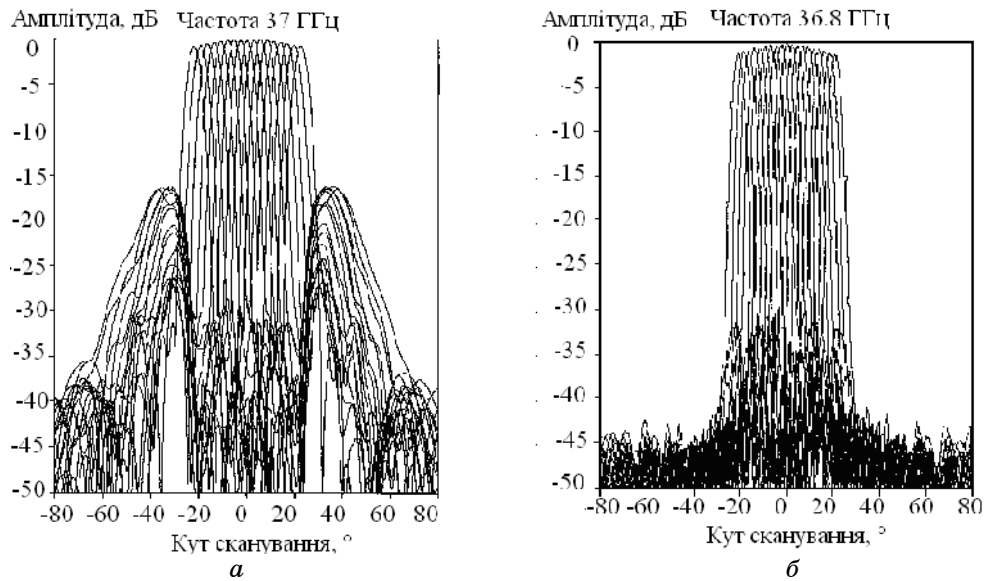


Рисунок 3 - Залежність амплітуди від кута сканування

Робота [4] присвячена розгляду математичних співвідношень при побудові БАР на основі лінз Ротмана. У роботі [5] була реалізована лінза Ротмана з 7 портами променів та 7 портами решітки у діапазоні від 18 до 23 ГГц для поверхневої хвилі ТМ₀-типу, щоб уникнути втрат у провіднику та діелектрику в області повітряної оболонки лінзи. Лінза може сформувати зразки променів в секторі приблизно $\pm 20^\circ$, але його можливості сканування можуть бути обмежені поздовжнім електричним полем. На рис. 4 зображена залежність потужності (в дБ) від кута сканування на частоті 20.5 ГГц.

До сьогодні було створено багато різних лінз Ротмана, але ми зупинимося на мікросмужкових лінзах Ротмана. У 1992 Пітерсон запропонував смужкову лінію для реалізації лінзи Ротмана [3]. Такі реалізації базуються на поперечній хвилі ТЕМ 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].

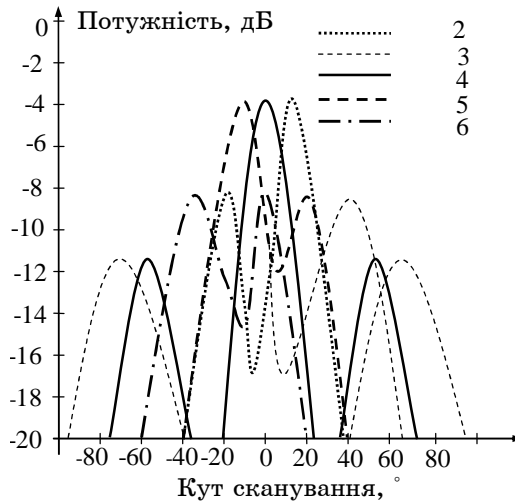


Рисунок 4 - Залежність потужності від кута

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.

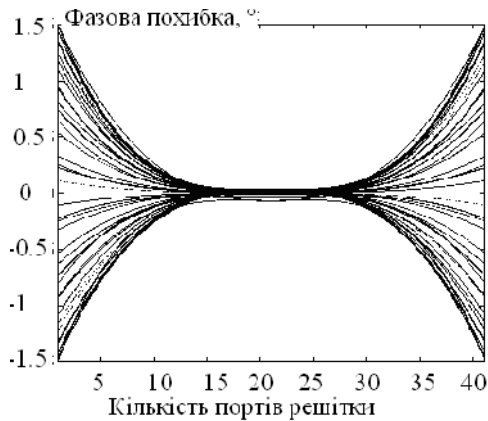


Рисунок 5 - Графік фазової похибки

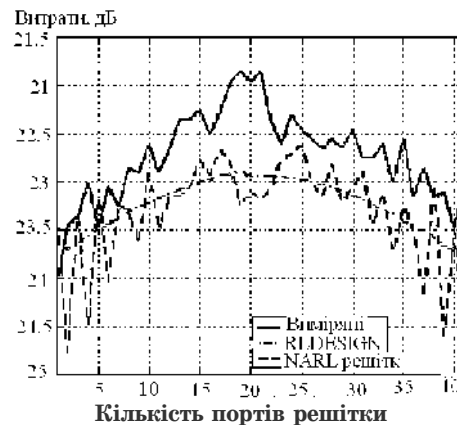


Рисунок 6 - Розподіл амплітуди центрального порту променя

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

Нещодавно були введені деякі види синтезованих хвилеводів на діелектричній підкладці (рис. 7), такі як підкладка 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 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 щільної 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 подане на рис. 8.

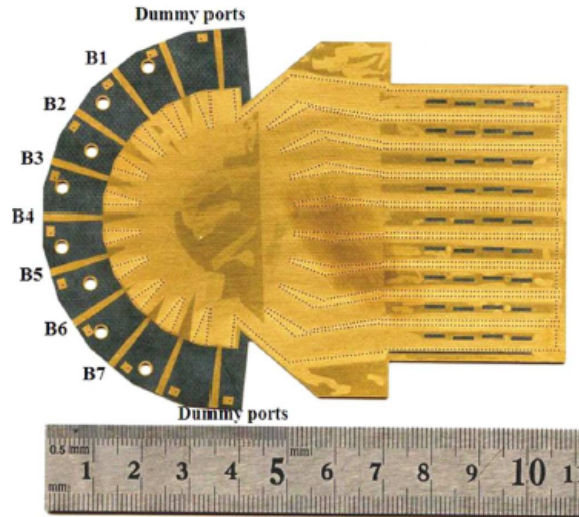


Рисунок 7 - Фотографія багатопроменевої антени на SIW

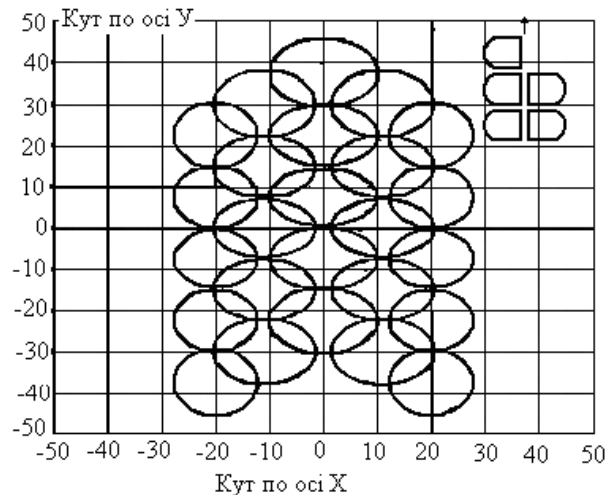


Рисунок 8 - 4 X 5- променеве охоплення у двовимірній площині з шириною смуги у 5 дБ

Лінзи Ротмана на SIW із 7 входними 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 охоплення 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 безмісячній мікрохвильовій камері, як показано на рис. 9. Там також існує явище погіршення форми випромінювального променя через вплив інших антен та пластини, що підтримує. Це погіршує роботу цілої системи. Модель двовимірного охоплення 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.

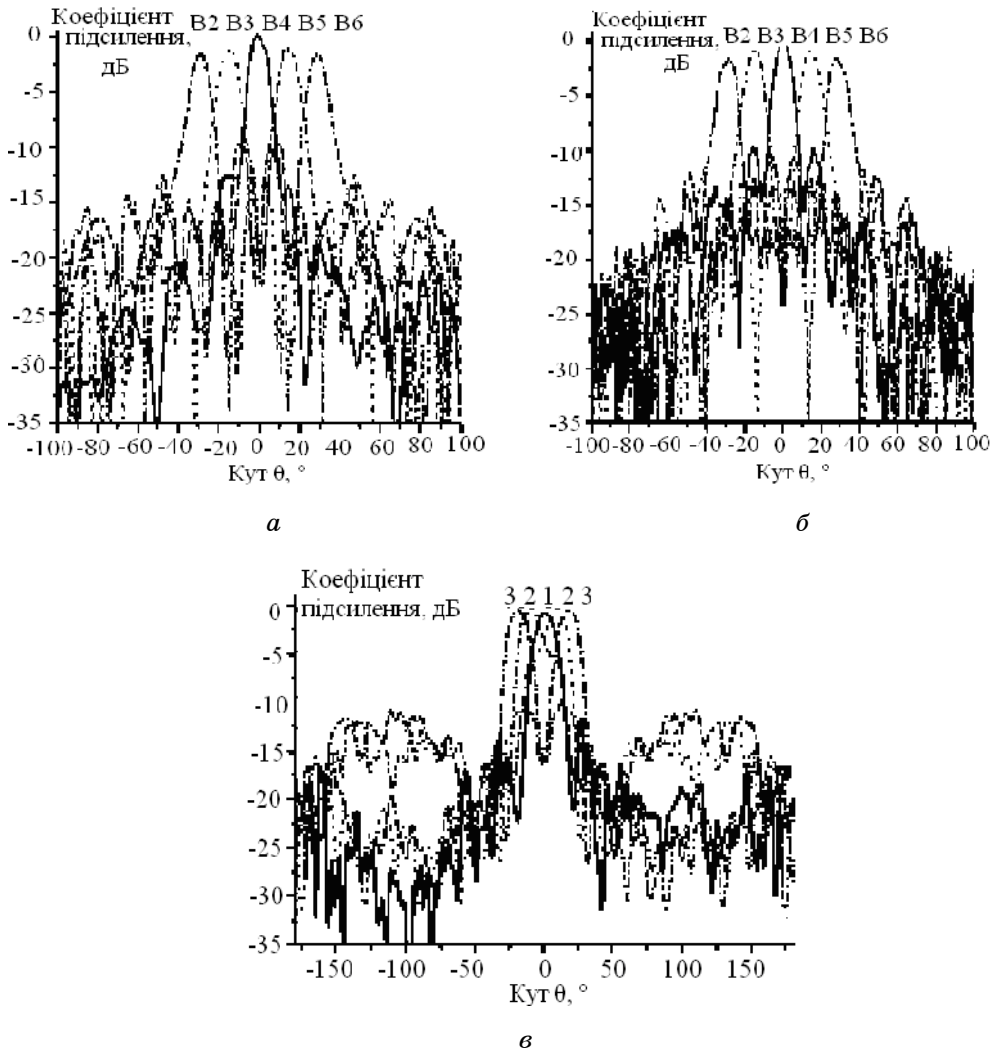


Рисунок 9 - Виміряні характеристики випромінювання двовимірної багатопроменевої антени на 28.5 ГГц: у E-площині антени 1 (а); у E-площині моделі антени 2 (б); у H-площині, збудженій портом B4, кожної антени (в)

Для забезпечення сумісності з шириною смуги частот багатопроміневих ліній елементи решітки повинні працювати у смузі

частот 4:1 чи більше, бажані кутові сектори повинні бути до 120° [2]. Для застосувань у радіоподавленні та радіопротидії бажана колова поляризація, щоб бути чутливою до різних видів поляризації. Для усунення формування бічних пелюсток решітки, коли решітка сканує у широкому куті, інтервал між елементами не повинен перевищувати величину приблизно $0,5 \lambda_{min}$, де λ_{min} - довжина хвилі на найвищій робочій частоті.

Найбільш популярним методом отримання колової поляризації в ширококутовій решітці є використання лінійно поляризованих випромінювальних елементів, розміщених перед апертурою. Були розроблені багатопластинчасті поляризатори, що працюють у смузі частот з перекриттям 4:1.

На рис. 10 а зображена лінійна решітка, що складається з 38 горизонтально поляризованих двогребінчастих рупорів у Е-площині. Вона забезпечує сектор 20° по куту місця та 90° – по азимуту. Решітка працює з перекриттям по частоті 2:6:1. Для збудження хвилі на гребенях використовується лінійний з'єднувальний перехід.

У роботі [24] розглянута лінійна решітка у Н-площині із семи вертикально поляризованих двогребінчастих елементів. Вона забезпечує сектор 60° по куту місця та 120° – 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. Випромінювання здійснюється безпосередньо від мікросмужки. Коли решітка збуджується лінзами Ротмана, одержуємо приблизно 120° по азимуту та 120° – по куту місця.

Розглядаючи фактори втрат, складності та обмеження структури, можна стверджувати, що багатопроменева антена на SIW, побудована на лінзах Ротмана, може підтримувати тільки п'ять - десять променів уздовж однієї площини. Таким чином, за необхідності покрити широкий сектор з десятками або сотнями променів, потрібно 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 пелюсток менше -30 дБ, максимальний сектор по куту місця 120° , а максимальний сектор по азимуту 120° .

Подальший розвиток лінз Ротмана полягає у розробленні конструкцій лінз для роботи їх у діапазонах частот більше 37 ГГц, створення конструкцій лінз із зменшенням відбиття сигналу від бічних стін та із зменшенням взаємного впливу сусідніх стінок.

SUMMARY

Nowadays Rotman lenses are the best power supply circuits for construction broadband (with overlapping on frequency 2:1 and more) multibeam antenna arrays. Many lenses Rotman in different ranges of frequency (to 37 GHz) are developed. The maximum quantity of inputs in existing samples 41, the maximum number of beams 46, a minimum level of lateral petals is less-30dB, the maximum sector on a corner of a place 120° , and the maximum sector on 120° .

Key words: Rotman lense, ranges of frequency, lateral petals, corner, azimuth.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: учеб. пособие для вузов / под ред. Д. И. Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2003. – 632с.
2. Rotman W. Wide-angle microwave lens for line source applications / W. Rotman, R. Turner // IEEE Transactions Antennas Propagation. - November, 1963. - Vol. 11, No. 6. - P. 623-632.
3. Peterson A. F. Scattering matrix integral equation analysis for the design of a waveguide Rotman lens / A. F. Peterson // IEEE Transactions on antennas and propagation. - 1999. - Vol. 47, No. 5. – P. 870-878.
4. Hansen R. C. Design trades for Rotman lenses / R. C. Hansen // IEEE Transactions on antennas and propagation. - 1991. - Vol. 39, No. 4 - P. 464-472.
5. Park C. S. TM_0 mode surface wave excited dielectric slab Rotman lens/ Park C. S., Kim J., Min S. // IEEE Antennas and wireless propagation letters. - 2007. - Vol. 6. – 584-587 p.
6. Kim S. Piezoelectric transducer controlled multiple beam phased array using microstrip Rotman lens / Kim S., Zepeda P., Chang K. // IEEE Microwave and wireless components letters. - 2005. - Vol. 15, No. 4. – P.247-249.
7. Kim J. Dielectric slab Rotman lens / Kim J., Cho C. S., Barnes F. S. // IEEE Microwave and wireless components letters. - 2005. - Vol. 15, No. 5. – pp. 348-350.
8. Simon P. S. Analysis and synthesis of Rotman lenses / P. S. Simon// 22nd AIAA International Communications Satellite systems conference and exhibit 2004, 9-12 May. - Monterey, California, USA.
9. Hall L. Rotman lens for mm-wavelengths / Hall L., Hansen H., Abbott D. // Proceedings of SPIE. - 2002. - Vol. 4935. – P. 215-221.
10. Design and analysis of microstrip line Rotman lenses / Rotman R., Green Y., Israel Y., Lee J. F., Lin T. Y., Lee S. C. // Electro Science laboratory.
11. Rotman lens with equal height of array and feed contours / Singhal P. K., Sharma P. C., Gupta R. D. // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2003.- Vol. 51, No. 8. - P. 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. The experimental system PALES: signal separation with a multibeam-system based on a Rotman lens / Josef G. Worms, Peter Knott and Dirk Nuessler // IEEE Antennas and Propagation Magazine. - 2007. - Vol. 49, No. 3.– P. 95-107.
14. Takashi Katagi. An improved design method of Rotman lens antennas / Takashi Katagi, Seiji Mano, Shin-ichi Sato // IEEE Transactions on antennas and propagation. -1984. - Vol. AP-32, No. 5. – P. 524-527.
15. Tao Y.M. Lens-fed multiple beam array for millimeter wave Indoor Communications / Y.M. Tao, G.Y. Delisle // IEEE Trans. On Antennas and propagation. - 1997. - Vol. AP-32, No. 5. - P. 2206-2209.
16. Gagnon D. R. Procedure for correct refocusing of the Rotman lens according to Shell's law / David R. Gagnon // IEEE Antennas and Propagation Magazine. - 1989.- Vol. 37, No. 3. - P. 390-392.
17. Remez J. Dual-polarized wideband widescan multibeam antenna system from tapered slotline elements array / Jacob Remez, Avigdor Segal and Refael Shansi // IEEE Antennas and wireless propagation letters. - 2005. - Vol. 4.– P. 293-296.
18. Schulwitz L. A new low loss Rotman lens design using a graded dielectric substrate / Lora Schulwitz, Amir Mortazawi // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. - 2008. - Vol. 56, No. 12. – P. 2734-2741.
19. A V-band beam-steering antenna on a thin-film substrate with a flip-chip interconnection / Sanghyo Lee, Sangsub Song, Youngmin Kim, Jangsoo Lee, Chang-Yul Cheon, Kwang-Seok Seo, Youngwoo Kwon // IEEE Microwave and wireless components letters. - 2008. - Vol. 18, No. 4.– P. 287-289.
20. Metz C. Fully integrated automotive radar sensor with versatile resolution / Carsten Metz, Jens Grubert, Johann Heyen // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. - 2001. - Vol. 49, No. 12.– P. 2560-2565.
21. Substrate integrated waveguide (SIW) Rotman Lens and its Ka-band multibeam array antennas applications /Yu Jian Cheng, Wei Hong, Ke Wu, Zhen Qi Kuai, Chen Yu, Ji Xin Chen, Jian Yi Zhou and Hong Jun Tang// IEEE Transactions on antennas and propagation. - 2008. - Vol. 56, No. 8.– P. 2504-2513.
22. Design considerations and technology assessment of phased-array antenna systems with RF MEMS from automotive radar applications / Joerg Schoelbel, Thomas Buck, Mathias Remann, Markus Ulm, Martin Schneider, Anne Jourdain, Geert J. Carchon// IEEE Transactions on microwave theory and techniques. - 2005. - Vol. 53, No. 6.– P. 1968-1975.
23. Design of a Rotman lens fed network to generate a hexagonal lattice of multiple beams / Kwok Kee Chan, Sudhakar K. Rao // IEEE Transactions on antennas and propagation. - 2002. - Vol. 50, No. 8.– P. 1099-1108.
24. Rotman lens design and simulation in software / Christopher W. Penney // IEEE Microwave magazine. - 2008. – P. 138-149.
25. Archer D.H. Lens-fed multiple beam arrays // Microwave Journal. - 1984. - Vol. 27.– P. 171-194.

Надійшла до редакції 7 червня 2010 р.