

УДК 621.396.677.85

Лінза Ротмана Ку-діапазону із 4-ма вихідними портами

Мельник Т. Й., Сушко О. Ю.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна

E-mail: tarasmelnuk17@gmail.com, o.y.sushko@gmail.com

Розглянута лінза Ротмана Ку-діапазону, яка використовується для живлення антенної системи з метою формування багатопрменевої діаграми спрямованості. Узгодження лінзи за параметром S_{11} досягає < -10 дБ у робочому діапазоні частот. Для отриманої геометрії лінзи кут сканування антени, що має чотири лінійні решітки на частоті 11.7 ГГц становить $-20^\circ \dots +20^\circ$ за теоретичними даними та $-25^\circ \dots +25^\circ$ відповідно до даних вимірювань. Провал між сусідніми пелюстками діаграми спрямованості не перевищує 10 дБі при підсиленні 19 дБ. Відстань між елементами решітки становить 10 мм. Вхідний опір портів становить 50 Ом. Теоретичний аналіз та електродинамічне моделювання складових антени виконано з використанням повнохвильового методу скінченних різниць в часовій області. Прототип решітки антени виготовлений на діелектричній підкладці FR-4 з розмірами 51×46 мм та товщиною діелектрика 500 мкм і мідної металізації 35 мкм. Це забезпечує можливість пасивного сканування простору в діапазоні $\pm 20^\circ$. Отримано діаграму спрямованості та характеристики коефіцієнту стоячої хвилі (КСХ) антенної решітки при збудженні першого порта за допомогою спектроаналізатора та векторного аналізатора кіл. Проведено порівняльний аналіз результатів електродинамічного моделювання та експерименту. Надані результати моделювання характеристик випромінювання та узгодження, які якісно узгоджуються із даними експерименту. Розроблену антенну систему можна використати у вузькосмугових системах передачі даних Ку-діапазону частот.

Ключові слова: лінза Ротмана; антенна система; багатопроменева діаграма спрямованості

DOI: [10.20535/RADAP.2023.91.5-11](https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.91.5-11)

Вступ

Лінза Ротмана (надалі – лінза) використовується у багатопромених системах завдяки своїй простоті та ефективності сканування простору декількома променями одночасно. Структура лінзи дозволяє радіолокаційним системам одночасно отримувати інформацію про цілі у кількох напрямках без механічного повороту антени та без фазозсувачів, тому її часто застосовують в радіолокаційних системах.

Лінза це дешевий варіант утворення променя, який самостійно перемикається без допомоги фазообертачів, які є досить дорогі. За допомогою лінзи Ротмана можна відстежувати декілька об'єктів одночасно, кожна антена, яка під'єднана до виходу лінзи, може виконувати прийом-передачу даних.

Для проектування лінзи Ротмана застосовуються різні підходи реалізації. В статті [1] описано хвилевідну структуру лінзи Ротмана. Конструкція лінзи вміщає в собі 13 вхідних та 12 вихідних портів, інші порти фіктивні із відповідним навантаженням. Використовується підкладка RF-60ТС зменшення габаритів конструкції. Максимальне підсилення в дальній зоні становить 23.2 дБ при цьому втрати

становлять 2.5 дБ в межах області сканування $\pm 40^\circ$ та 3.4 дБ в області сканування $\pm 50^\circ$.

У роботі [2] викладено проект мережі живлення на основі хвилеводів на вищих типах хвиль для ширококутових радарів та систем радіорозвідки. У структурі лінзи присутні три вхідних та вихідних порти. В діапазоні частот від 7 до 10 ГГц коефіцієнт відбиття переважно нижчий -10 дБ.

У статті [3] представлено хвилевід інтегрований в підкладці (SIW) на основі діелектричної підкладки Rogers 5880. Прототип системи має в собі лінзу Ротмана із семи вхідних, дев'яти вихідних та восьми фіктивних портів із навантаженням 50 Ом. Змодельовані результати на частоті 10 ГГц демонструють сканування семи променів $0^\circ, \pm 8^\circ, \pm 16^\circ, \pm 24^\circ$.

В іншій роботі [4] було розроблено хвилевідну структуру лінзи, яка приймає сигнал з одного напрямку і автоматично його передає назад в тому ж напрямку без руху лінзи. Розроблена така структура для супутникового зв'язку 5G.

За допомогою декількох лінз можна досягнути формування променів, які в тривимірному просторі можуть виявляти ціль із роздільною здатністю 2.5 см на відстані 12.5 м [5]. Створено решітку із десяти малих рупорних антен, які стоять в ряд, до

яких у кожен із семи роз'ємів під'єднуються лінзи Ротмана. Робоча смуга частот системи — 34–40 ГГц.

В статті [6] представлено аналітичну модель дизайну лінзи Ротмана з точним аналізом зворотних втрат портів та їх фазових центрів в надширокопосмуговому діапазоні від 3.1 ГГц до 10.6 ГГц.

У статті [7] описується розроблена лінза, яка працює на центральній частоті 5 ГГц. Конструкція лінзи Ротмана складається з семи вхідних та восьми вихідних портів на основі матеріалу Dupont 951. Кут сканування лінзи становить 64° .

Система 5G у статті [8] використовує спрямовану передачу на частотах міліметрових хвиль. Завдяки конструкції лінзи Ротмана, яка сконструйована на частотах від 25 до 31 ГГц, отримано максимальну фазову похибку $< 0.1^\circ$. Лінза розроблена таким чином, що може створювати 7 керованих променів з кроком 10° , при чому загальний кут огляду становить 60° . Антенна решітка створена для лінзи досягає підсилення понад 11 дБі у всьому діапазоні частот, а на центральних частотах підсилення може досягати до 20 дБі. Систему розроблено на діелектричній підкладці RT Duroid 5880.

У статті [9] розроблена комбінована багатопротена антенна система на основі антени Вівальді. Лінза розроблена для формування семи променів під кутами 0° , $\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$ і $\pm 30^\circ$, яка працює на частоті 16 ГГц і смузі частот 1 ГГц.

Вартість лінзи в основному визначається вартістю діелектричної підкладки, що також визначає втрати внесені лінзою. Основні переваги таких лінз — це їх легкість виготовлення, низька вартість, мала вага і широкопосмуговість. Із проведеного аналізу літератури видно, що в основному використовуються діелектричні підкладки із низкими втратами типу Rogers, особливо на частотах вище 10 ГГц.

Оскільки лінза є структурою біжучої хвилі, її розміри мають бути близько кількох довжин хвиль, щоб забезпечити належну функціональність. Це призводить до жорстких вимог до розміру лінзи Ротмана, який може визначатися вартістю та розміром доступної підкладки. Тому на нижчих частотах лінзи Ротмана часто не практичні через значні габаритні розміри.

Проведений аналіз показує, що спектр застосування лінз Ротмана широкий. У літературі в основному розглядається окремі випадки різних структур лінзи Ротмана, виконаних для мереж 5G та Кадіапазонів частот. Кількість променів здебільшого становить біля 10, тоді як кут сканування близько 60° градусів. Обмежено висвітлена інформація стосовно застосування лінз Ротмана для супутникового діапазону частот. Не представлено універсальної методики проектування таких структур. Саме тому, актуальним є проектування лінзи Ротмана для супутникового діапазону частот 10.7–12.75 ГГц, а також детальний розгляд підходів до проектування антенних систем на основі лінз Ротмана.

Результати

Метою роботи є верифікація умов моделювання лінзи на основі проведеного експериментального дослідження виготовленої структури антенної решітки із лінзою Ротмана.

Основною особливістю антенної решітки із лінзою Ротмана є незалежні промені один від одного, які сканують простір із вузькими діаграмами спрямованості та підсиленням 20 дБі.

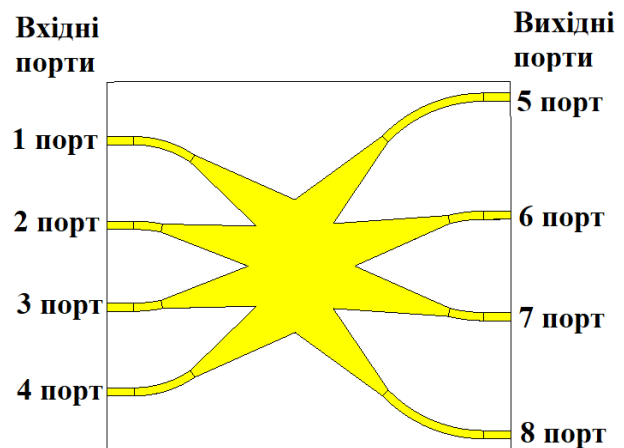


Рис. 1. Геометрія лінзи Ротмана

На Рис. 1 показана модель лінзи Ротмана Кудіапазону із чотирма входами та виходами, що зображені відповідно ліворуч і праворуч лінзи.

Для подальшого використання обрано спроектувати лінзу Ротмана розраховану таким чином, щоб максимальний сектор сканування променів досягав $\pm 20^\circ$, провал між сусідніми пелюстками діаграми спрямованості не перевищував 10 дБі при підсиленні 19 дБ.

Антенна має 4 вхідних порти/роз'єми. При збудженні першого, за допомогою лінзи Ротмана створюється такий розподіл фаз, який відповідає напрямку променя в $+20^\circ$ градусів. При збудженні 2-го роз'єму напрямком діаграми спрямованості (ДС) решітки вже $+5^\circ$ градусів. Для 3-го і 4-го вхідних портів напрямки ДС відповідно -5° і -20° градусів. Відповідно, якщо ми знімаємо інформацію одночасно із 4-х вхідних роз'ємів, то отримуємо дані від кожного променя із кожного з 4-х напрямків незалежно.

Для проектування використовується діелектрична підкладка FR-4 товщиною 0.5 мм із відносною діелектричною проникністю 4.3. Розміри підкладки становлять 51x46 мм. Товщина мідної металізації становить 35 мікрометрів. Відстань між елементами решітки (вихідними портами) було вибрано 10 мм. Вхідний опір портів вибрано рівним 50 Ом.

На Рис. 2 зображено результати моделювання узгодження вхідних портів в робочому діапазоні частот від 10.7 до 12.7 ГГц. Отримано задовільне узгодження всіх вхідних портів лінзи (< -10 дБ),

при чому узгодження крайніх портів (1 та 4) суттєво краще ніж центральних портів (2 та 3).

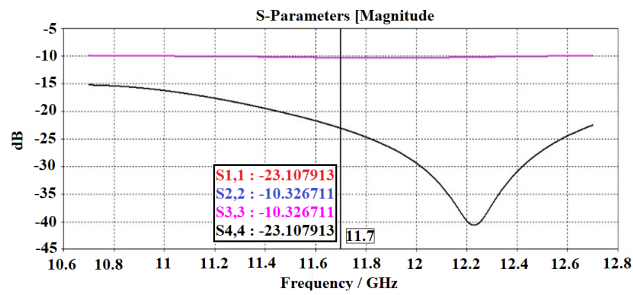


Рис. 2. Результат моделювання узгодження вхідних портів лінзи Ротмана

При подачі сигналу на перший порт фазові зсуви між вихідними портами приблизно рівні – 90 градусів на частоті 11.7 ГГц (Рис. 3, Рис. 4).

Тобто між 5 та 6 портами 101.5° , між 6 та 7 портами 85.6° , між 7 та 8 портами 89.1° . Дані зсуви фаз забезпечують сканування простору в діапазоні 40 градусів.

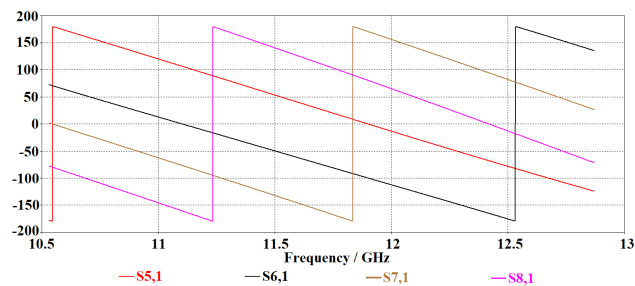


Рис. 3. Фази коефіцієнтів передачі при збудженні з першого порта

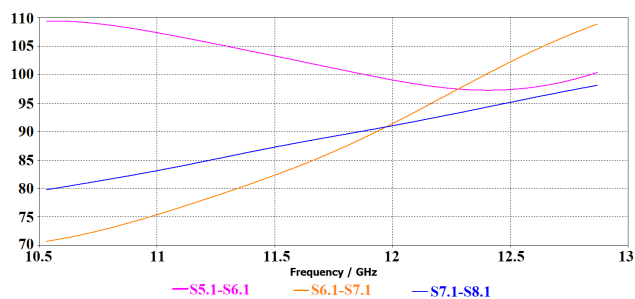


Рис. 4. Різниця фаз при збудженні з першого порта

При подачі сигналу на другий порт різниця фаз між п'ятим та шостим портом становить 42 градуси, між шостим та сьомим портом – 24.3 градуси, між сьомим та восьмим портом – 16 градусів (Рис. 5, Рис. 6).

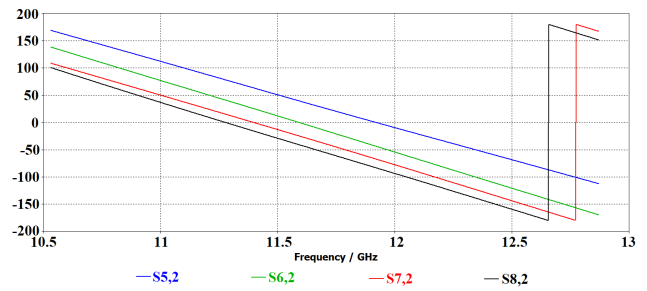


Рис. 5. Фази коефіцієнтів передачі при збудженні з другого порта

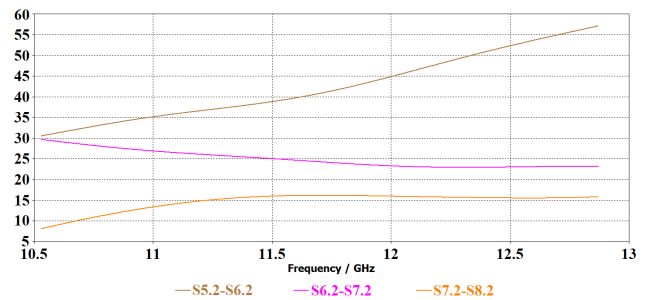


Рис. 6. Різниця фаз при збудженні з другого порта

Антенами на виходах лінзи Ротмана слугують решітки на основі смужкових елементів (Рис. 7).

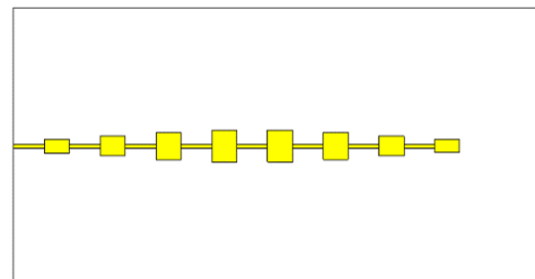


Рис. 7. Резонансна лінійна решітка із восьмима патч-елементами

Патч-елементи з'єднані між собою смужковою лінією із опором 50 Ом. Робоча частота 11.7 ГГц. Опір порту становить 50 Ом.

Ширини патчів:

- | | |
|-------------|-------------|
| 1 – 3.27 мм | 2 – 4.66 мм |
| 3 – 6.45 мм | 4 – 7.58 мм |
| 5 – 7.58 мм | 6 – 6.45 мм |
| 7 – 4.66 мм | 8 – 3.27 мм |

Розрахована спрямованість антени на частоті 11.7 ГГц становить 14.8 дБі, а ширина головного пелюстка по рівню -3 дБ – 77.6 градусів у Н-площині, та 15.8 градусів у Е-площині (Рис. 8, Рис. 9).

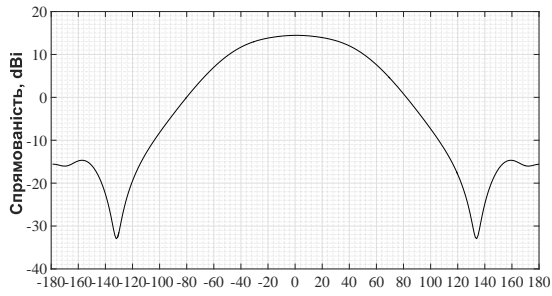


Рис. 8. Діаграма спрямованості в Н-площині

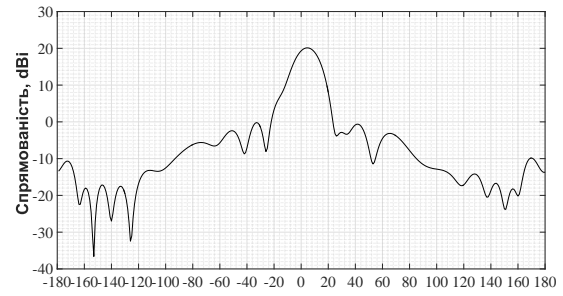


Рис. 12. Діаграма спрямованості решітки із чотирьох лінійних структур в Е-площині

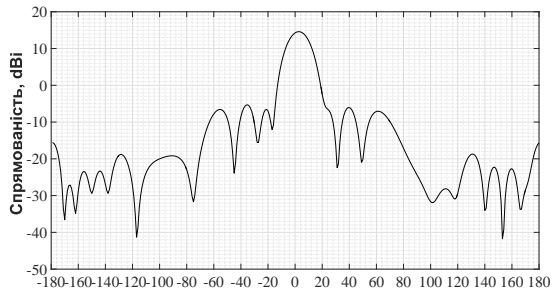


Рис. 9. Діаграма спрямованості в Е-площині

Розраховано відстань між лінійними решітками, яка рівна половині довжини хвилі.

На Рис. 10 зображено чотири лінійні структури, які рознесені на розраховану відстань 12.8 мм.

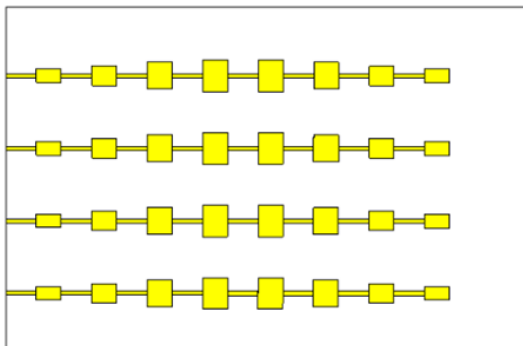


Рис. 10. Чотири лінійних решітки із 8-ми смужкових елементів

Діаграми спрямованості решітки зображені на Рис. 11–13.

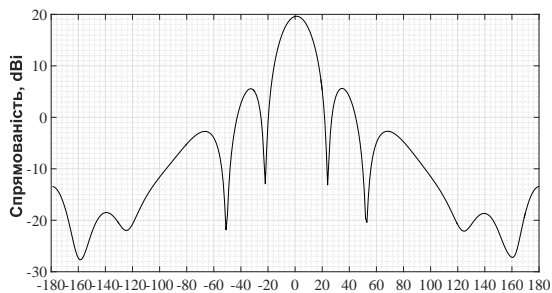


Рис. 11. Діаграма спрямованості решітки із чотирьох лінійних структур в Н-площині

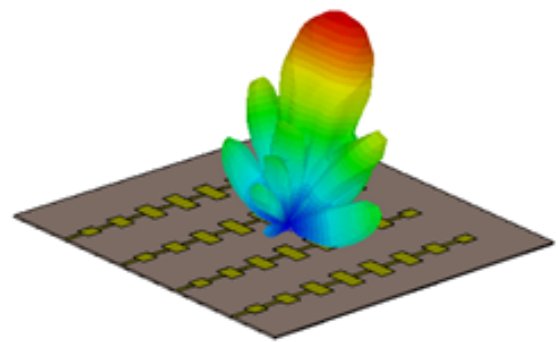
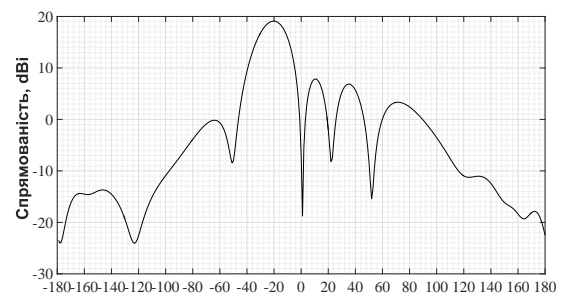


Рис. 13. 3D діаграма спрямованості решітки із чотирьох лінійних структур

За рахунок збільшення кількості до чотирьох лінійних решіток діаграма спрямованості звужується, а ширина головної пелюстки по рівню -3 дБ у Н-площині становить 19.8 градусів, у Е-площині – 17 градусів, підсилення – 20.1 дБі.

Змінюючи напрям головної пелюстки за допомогою лінзи Ротмана, яка слугує пасивним фазообертачем, можна сканувати простір.

На Рис. 14, Рис. 15 зображені відхилення діаграми спрямованості з фазовими зсувами на антенній решітці, які зняті із вихідних портів лінзи.

Рис. 14. Діаграма спрямованості із чотирьох лінійних смужкових решіток в Н-площині із відхиленням головної пелюстки на -21 градус

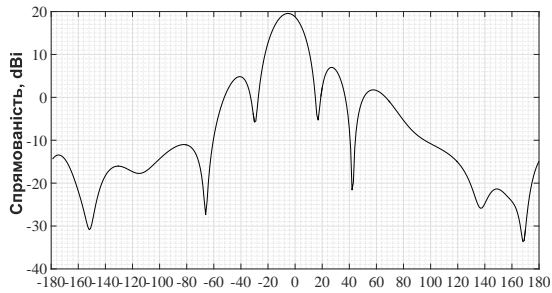


Рис. 15. Діаграма спрямованості із чотирьох лінійних смужкових решіток в Н-площині із відхиленням головного пелюстка -6 градусів

Для з'єднання даних структур спроектовано мікросмужковий перехід (Рис. 16), де кожна мікросмужка вносить однаковий фазовий набіг хвилі, що можна спостерігати на Рис. 17. Габарити переходу становлять 60×30 мм. Центральні мікросмужкові переходи спроектовано синусоподібно, за рахунок такої форми досягається стабільність зсувів фаз лінзи, при цьому не збільшуються габарити переходу. Крайні вхідні та вихідні мікросмужкові переходи рознесені на відстані вихідних портів лінзи Ротмана та вхідних портів антенної решітки відповідно.

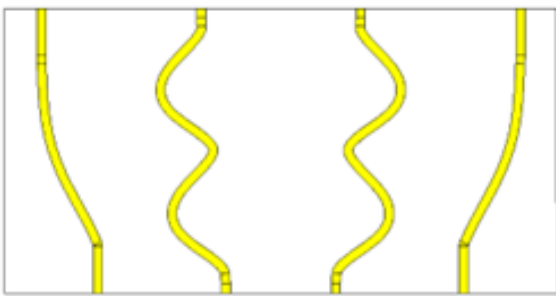


Рис. 16. Мікросмужковий перехід між лінзою Ротмана та антенною решіткою

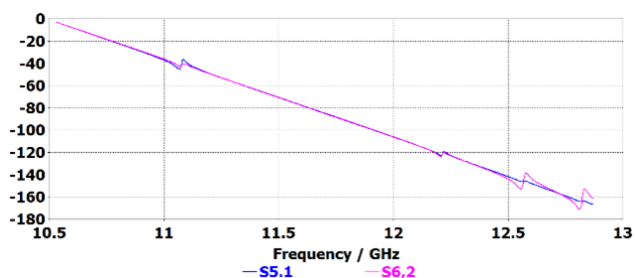


Рис. 17. Різниця фаз між портами мікросмужкового переходу

На Рис. 18 зображено модель лінзи Ротмана та антенної решітки з'єднаних за допомогою мікросмужкового переходу.

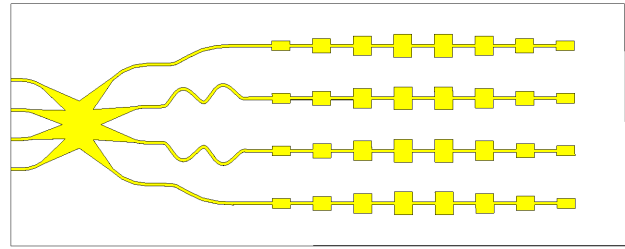


Рис. 18. Модель лінзи Ротмана та антенної решітки із чотирьох лінійних смужкових елементів

Габаритні розміри даної антени становлять:

- Довжина – 200 мм;
- Ширина – 80 мм;
- Товщина – 0.57 мм.

На Рис. 19–20 зображено відхилення головного пелюстка діаграми спрямованості в Н-площині на 20 та 6 градусів при збудженні першого та другого порта відповідно.

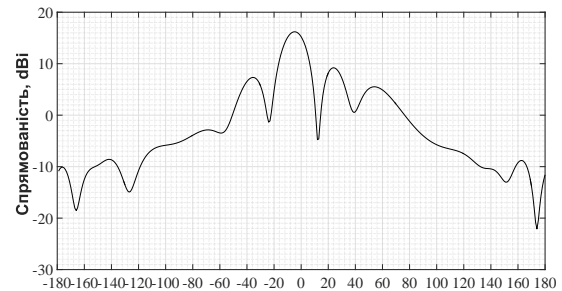


Рис. 19. Діаграма спрямованості при збудженні першого порту лінзи Ротмана

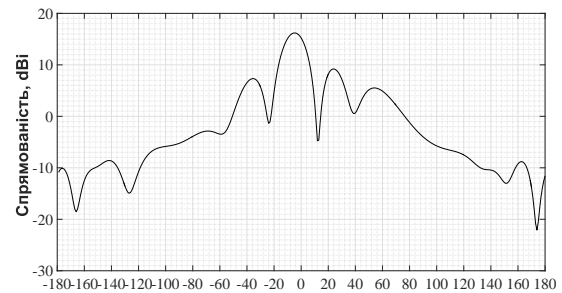


Рис. 20. Діаграма спрямованості при збудженні другого порту лінзи Ротмана

Діаграми спрямованості при збудженні 3-го та 4-го портів дзеркальні відносно головного напрямку порівняно із ДС на Рис. 19–20.

Згідно з даними моделювання виготовлено прототип даної антени (Рис. 21). Перед проведенням вимірювань, наприклад, першого порта потрібно узгодити всі інші входи антени на 50 Ом. Для цього на перший вхідний порт проведено монтаж SMA роз'єму, а на інші порти узгоджене навантаження із резисторів 0201 (Рис. 22, Рис. 23).

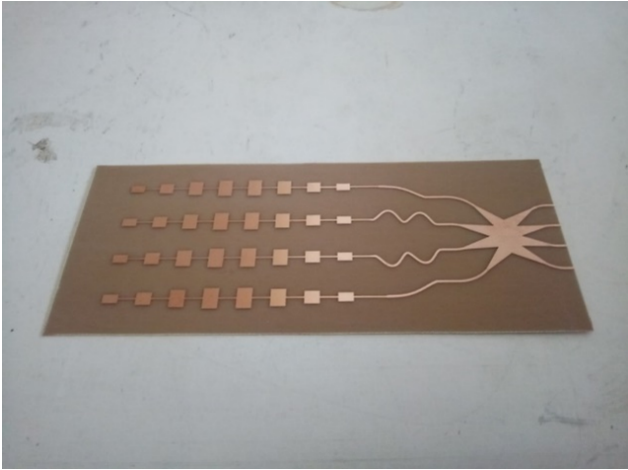


Рис. 21. Виготовлений прототип антенної решітки на основі лінзи Ротмана



Рис. 22. Під'єднаний SMA роз'єм до першого порта лінзи Ротмана

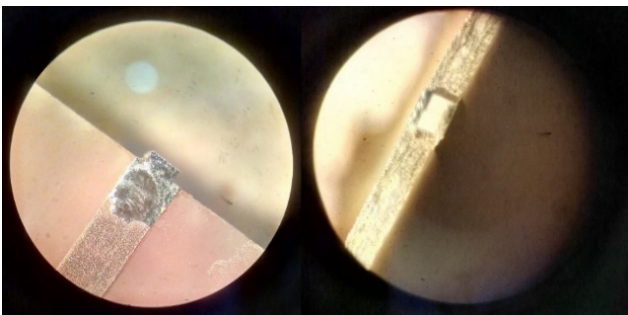


Рис. 23. Вигляд узгодженого навантаження через мікроскоп

Отримано такі характеристики коефіцієнту стоячої хвилі (КСХ) антенної решітки: на центральній частоті 11.7 ГГц КСХ рівне 1.24 (Рис. 24), узгоджується із теоретичними даними, де синя крива – змодельований коефіцієнт стоячої хвилі, червона – коефіцієнт стоячої хвилі вимірний у лабораторних умовах.

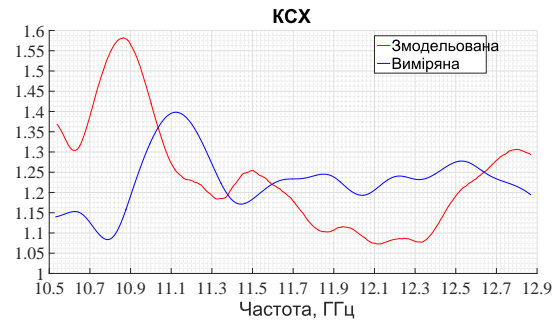


Рис. 24. Коефіцієнт стоячої хвилі антенної решітки у діапазоні 10.5–12.9 ГГц

Також виміряна діаграма спрямованості при збудженні з першого порта у лабораторних умовах. Вимірювальною антеною слугувала стандартна рупорна антена П6-23. Повертаючи антенну решітку, за допомогою спектроаналізатора отримано значення діаграми спрямованості, для порівняння приведено теоретичні та практичні дані на Рис. 25.

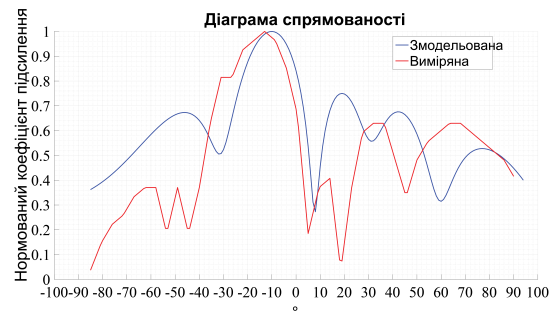


Рис. 25. Діаграми спрямованості антенної решітки зняті у лабораторних умовах та із моделювання

При збудженні першого порта отримали відповідне відхилення діаграми спрямованості, яке становить 20° для моделювання та 25° при експериментальному вимірюванні. В порівнянні із моделюванням відхилення більше на 5° . Це спричинене тим, що реальна діелектрична проникність могла відрізнитися від тієї, що використовувалась при моделюванні. Також тому, що вимірювання проводились не у безлунному середовищі. Різниця між результатами моделювання та експериментом в певній мірі також спричинена неточністю виготовлення конструкції. Конструктивні елементи антенної триноги та кабелю живлення також вносять свій вклад у відмінність між моделюванням та експериментом.

Висновки

В даній роботі розраховано електродинамічні характеристики лінзи Ротмана для Ku-діапазону. Узгодження лінзи по параметру S_{11} досягнуто < -10 дБ в робочому діапазоні частот. Для отриманої геометрії лінзи Ротмана кут сканування для решітки із 4-х лінійних решіток на частоті 11.7 ГГц становить $-20 \dots +20$ градуси за даними моделювання, та $-25 \dots +25$ градуси згідно даних вимірювань.

Виготовлено готовий прототип антенної решітки на діелектричній підкладці FR-4 із товщиною діелектрика 0.5 мм. Зняті експериментальні дані, характеристики КСХ антенної решітки: на центральній частоті 11.7 ГГц КСХ рівне 1.24. При збудженні першого порта отримано відхилення 25° головного пелюстка.

Новизна роботи полягає в тому, що при не ідентичності різниць фаз між сусідніми портами на 16 градусів (або 18%) лінза із заданою антенною решіткою зберігає свої характеристики сканування та узгодження. Оптимальна міжелементна відстань решітки для таких структур може становити більше ніж половина довжини хвилі при збереженні задовільних характеристик випромінювання. Експериментально отримано широкий кут сканування рівний 50 градусів при збереженні коефіцієнту відбиття від входів антени < -10 дБ. Також показано та проаналізовано особливості та відмінності між результатами повнохвильового моделювання та експериментальними вимірюваннями характеристик узгодження та випромінювання лінзи Ротмана із вузькосмуговою антенною системою, які корисно враховувати НВЧ розробникам.

В подальшому буде проведена оптимізація фазових характеристик лінзи.

References

- [1] Wang R., Yang F., Yang P. and Yan Y. (2019). Design of a Rotman lens antenna array for wide-scan and beam uniformity applications. *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, pp. 1877-1878. DOI: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888825.
- [2] Knott P. (2008). Design of a ridged waveguide feed network for a wideband Rotman lens antenna array. *IEEE Radar Conference*, pp. 1-4. doi: 10.1109/RADAR.2008.4720857.
- [3] Pourahmadazar J., Denidni T. (2015). X-band Substrate Integrated Rotman Lens with $\pm 24^\circ$ scanning capability. *2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, pp. 232-233. DOI:10.1109/APS.2015.7304502.
- [4] Gleaves M. (2018). Rotman Lens' Electronic Beam Steering Aims at 5G Signals. *Microwaves & RF*.
- [5] Schulwitz L., Mortazawi A. (2010). A Tray Based Rotman Lens Array with Beamforming in Two Dimensions for Millimeter-Wave Radar. *2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, pp. 850-853. DOI: 10.1109/ARRAY.2010.5613264.
- [6] Lambrecht A., Beer S., Zwick T. (2010). True-Time-Delay Beamforming with a Rotman-Lens for Ultrawideband Antenna Systems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 58, No. 10, pp. 3189-3195. DOI: 10.1109/TAP.2010.2052558.
- [7] Tudosie G., Vahldieck R. (2006). An LTCC-Based Folded Rotman Lens for Phased Array Applications. *2006 Asia-Pacific Microwave Conference*, pp. 2106-2109. DOI: 10.1109/APMC.2006.4429828.
- [8] Ershadi S. E., Keshtkar A., Bayat A., Abdelrahman A.H., Xin H. (2018). Rotman lens design and optimization for 5G applications. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, Vol. 10, Iss. 9. DOI: 10.1017/S1759078718000934.
- [9] Hosseini S. A. R., Firouzeh Z. H. and Maddahali M. (2014). Design of Rotman Lens Antenna at Ku-Band Based on Substrate Integrated Technology. *Journal of Communication Engineering*, Vol. 3, Iss. 1, pp. 33-44.

Ku-Band Rotman Lens with 4 Output Ports

Melnyk T. Y., Sushko O. Yu.

The Ku-band Rotman lens, which is used to feed the antenna system for the purpose of forming a multi-beam radiation pattern, is presented. S_{11} parameter of the Rotman lens reaches < -10 dB in the operating frequency range. For the obtained lens geometry, the scanning angle of the antenna with four linear arrays at a frequency of 11.7 GHz is $-20 \dots +20$ degrees according to modelling, and $-25 \dots +25$ degrees according to measurements. The dip between adjacent lobes of the radiation pattern does not exceed 10 dBi while gain is 19 dB. The distance between the array elements is 10 mm. The input impedance of the ports is 50 ohms.

Theoretical analysis and electrodynamic modeling of antenna components is performed using the full-wave finite-difference method in the time domain.

The antenna array prototype is made on an FR-4 dielectric substrate with dimensions of 51×46 mm and a dielectric thickness of $500 \mu\text{m}$ and copper metallization of $35 \mu\text{m}$. This provides the possibility of passive scanning in the range of $\pm 20^\circ$.

The radiation pattern and VSWR of the antenna array are obtained when the first port was excited using a spectrum analyzer and a vector network analyzer. A comparative analysis of the results of electrodynamic modeling and experiment are carried out. The results of modeling the radiation characteristics and matching are presented, which are qualitatively consistent with the experimental data.

The developed antenna system can be used in narrowband data transmission systems of the Ku frequency range.

Keywords: Rothman lens; antenna system; multibeam radiation pattern