

**ЕЛЕКТРОДИНАМІКА. ПРИСТРОЇ НВЧ ДІАПАЗОНУ.
АНТЕННА ТЕХНІКА**

УДК 621.396.674.3

**ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФАР НА ОСНОВІ
ДРУКОВАНИХ КВАЗІ-ЯГІ ВИПРОМІНЮВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

*Видалко О. Є., аспірант; Дубровка Ф. Ф., д.т.н. професор
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна*

**NUMERICAL INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF PHASED ANTENNA
ARRAYS, BASED ON PRINTED QUASI-YAGI RADIATING ELEMENTS**

*Vydalko O. E., postgraduate, Dubrovka F. F., Doctor of Science (Technics), professor
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

Вступ

До сучасних фазованих антенних решіток (ФАР) висуваються жорсткі вимоги по технологічності випромінювальних елементів, їх повторюваності при серійному виробництві та вартості. Найбільш повно задовольняють цим вимогам друковані мікросмужкові антени, які характеризуються компактністю, малою вагою, легкістю компонування з інтегральними мікросхемами, необхідною точністю (завдяки сучасній технології фотолітографії) і порівняно низькою ціною виробництва.

Серед мікросмужкових антен особливої уваги заслуговують друковані антени біжучої хвилі, які, на відміну від резонансних мікросмужкових антен, мають широку смугу робочих частот. Хоча і існує ряд технічних рішень для збільшення смуги робочих частот мікросмужкових антен резонансного типу, але всі вони ускладнюють конструкцію антени, технологію виробництва і збільшують ціну випромінювального полотна.

Широку смугу частот і слабкий взаємний зв'язок у складі ФАР забезпечують друковані квазі-Ягі антени [1-3]. Завдяки таким характеристикам квазі-Ягі антени інтенсивно досліджуються останнім часом з метою їх застосування у ФАР різного призначення [4-5].

У цій роботі представлені результати чисельного дослідження характеристик узгодження і взаємного зв'язку елементів решітки, діаграми спрямованості і можливості ширококутового сканування ФАР, одиничним випромінювальним елементом яких є друкована квазі-Ягі антена. Розміри досліджуваних ФАР вибрані такими, щоб центральна підрешітка була оточена достатньою кількістю елементів для моделювання габаритної антенної решітки. Розраховано частотну залежність модуля коефіцієнта відбиття для центрального елемента решітки і її зміну при скануванні променем, що

наочно демонструє роботу квазі-Ягі антени в складі антенної решітки великих розмірів.

Результати чисельного дослідження характеристик окремого квазі-Ягі випромінювального елемента ФАР

Конструкція друкованої квазі-Ягі антени, що розглядається, показана на рис.1. Вона складається із вхідної мікросмужкової лінії, розташованої в нижній частині рис. 1, мікросмужкового дільника потужності типу Вілкінсона, в одному з вихідних плечей якого створена лінія затримки зі сталим 180° фазовим зсувом. Останній елемент є переходом із несиметричної мікросмужкової лінії на симетричну друковану двопровідну лінію, яка живить симетричний вібратор. Вона має зрізану площину заземлення на нижній стороні підкладки (показана на рисунку штриховою лінією), яка виконує роль екрану. Вважаємо, що антена виготовлена на діелектричній підкладці товщиною 0,635 мм і значенням діелектричної проникності $\epsilon = 10.2$.

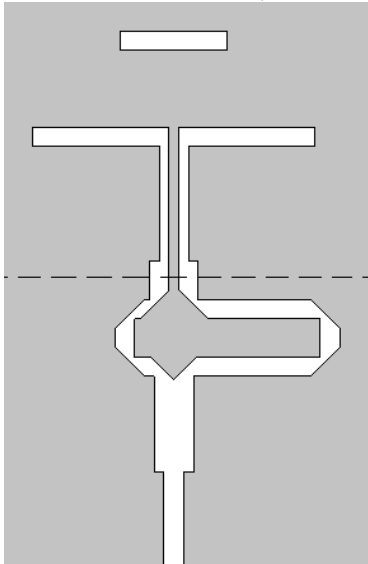


Рис. 1. Конструкція досліджуваної мікросмужкової антени

На рис. 2 зображено розраховані модуль коефіцієнта відбиття і діаграми спрямованості в Е- і Н-площині досліджуваного випромінювача. Оптимізацію характеристик узгодження проведено за допомогою пакету CST Microwave Studio.

На рис. 2,а видно, що оптимізована друкована квазі-Ягі антена є добре узгодженою в широкій смузі робочих частот. Її смуга пропускання по рівню модуля коефіцієнта відбиття $S_{11} = 0,2$ складає 45%. Діаграми спрямованості (рис. 2,б) розраховано на частоті 9,5 ГГц. Ширина діаграми спрямованості на рівні -3 дБ у Е-площині складає 205° , а у Н-площині – 125° . Коефіцієнт підсилення антени 3,8 дБ. Слід зауважити, що майже відсутнє задне випромінювання (рис. 2,б). Отримані характеристики квазі-Ягі антени дозволяють

стверджувати, що вона може слугувати базовим випромінювальним елементом ФАР великих розмірів завдяки широкій смузі робочих частот і широкій діаграмі спрямованості (що забезпечує можливість ширококутового сканування решітки). Ще одними перевагами у її застосуванні є простота конструкції і низька ціна виробництва.

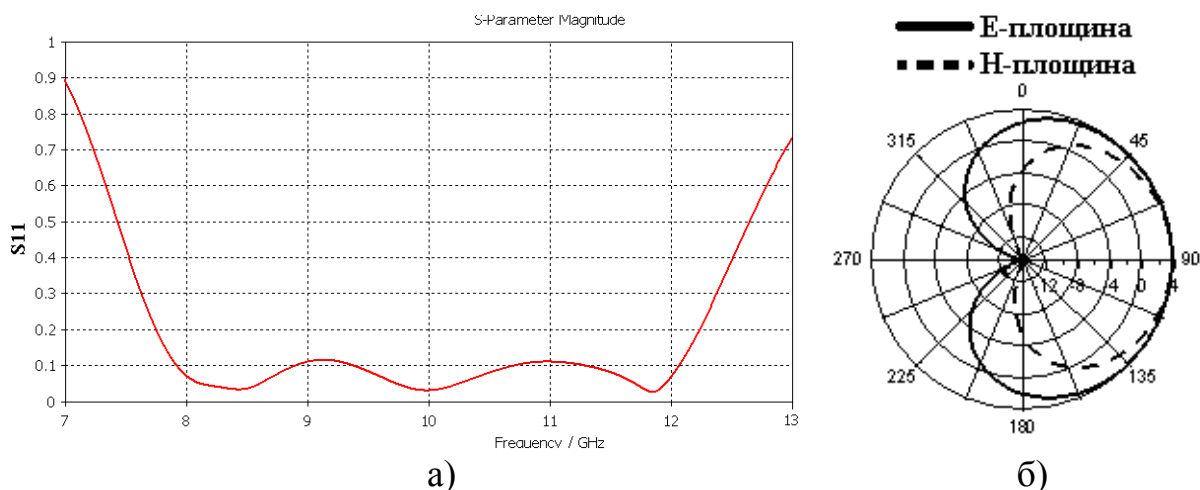


Рис. 2. Розраховані характеристики друкованої Квазі-Ягі антени:

а) частотна залежність модуля коефіцієнта відбиття;

б) діаграма спрямованості на частоті 9,5 ГГц.

У процесі подальших досліджень квазі-Ягі випромінювача було встановлено, що директор, який знаходиться перед вібратором (у верхній частині рис. 1), не суттєво впливає на характеристики випромінювання антени. На рис. 3,а зображено співставлення модуля коефіцієнта відбиття квазі-Ягі антени з директором і без нього, а на рис. 3,б – їх діаграми спрямованості.

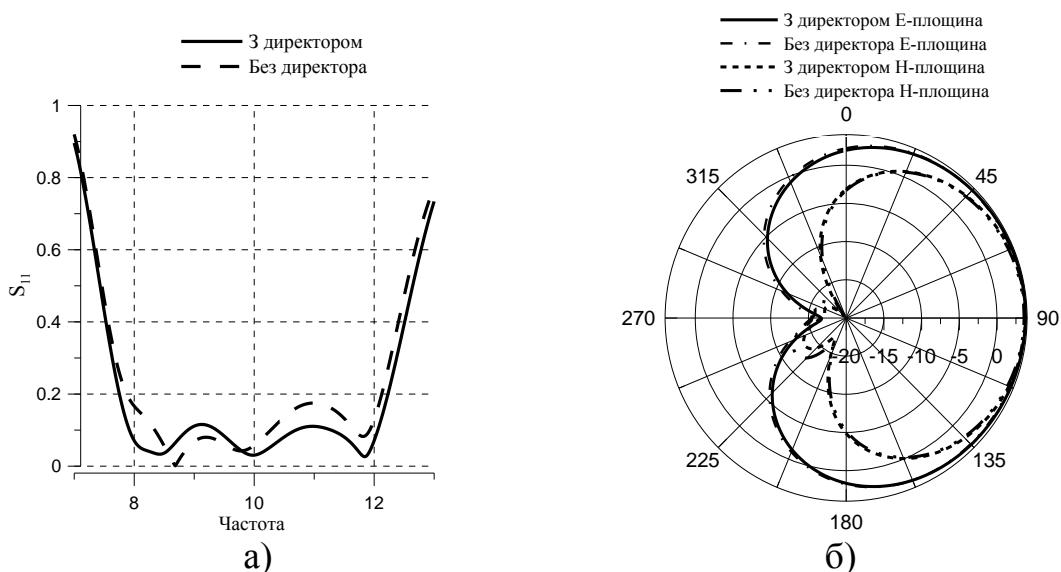


Рис. 3. Характеристики випромінювання Квазі-Ягі антени з директором і без директора:

а) частотна залежність модуля коефіцієнту відбиття;

б) діаграми спрямованості в Е- і Н-площині.

На рис. 3 видно, що смуга робочих частот по рівню $S_{11} = 0,2$ залишилася приблизно тією ж самою, у варіанті антени без директора вона складає 43%. Діаграма спрямованості випромінювача без директора ідентична діаграмі квазі-Ягі антени з директором і має такі ж характеристики випромінювання, окрім коефіцієнта підсилення. У випадку антени без директора він впав на 0,2 дБ і складає значення 3,6 дБ. З отриманих результатів можна зробити висновок, про можливість використання друкованої квазі-Ягі

антени без директора. Саме така антена була обрана для подальших досліджень.

Важливим параметром при проектуванні ФАР великих розмірів є рівень електромагнітного зв'язку між сусідніми елементами. Високий електромагнітний зв'язок впливає на форму діаграми спрямованості і погіршує узгодження кожного антенного елемента, зменшуючи сумарне підсилення решітки. Для дослідження рівня електромагнітного зв'язку між квазі-Ягі антеннами, була змодельована 9-елементна лінійна антенна решітка (АР), що показана на рис. 4. Для неї обрана діелектрична підкладка ТММ10 (торгової марки Rogers Corporation) з відносною діелектричною проникністю $\epsilon = 10.2$ і товщиною 0,635 мм. Відстань між елементами решітки складає $0,4\lambda$ на частоті 9,5 ГГц, що відповідає значенню 12,6 мм.

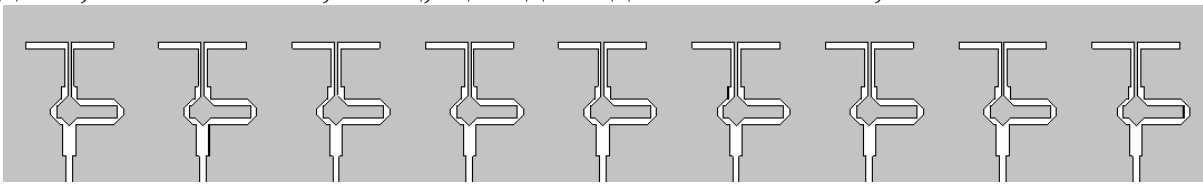


Рис. 4. Досліджувана одновимірна АР.

В ході дослідження була розрахована розв'язка між портами антенних елементів. Її значення, в першу чергу, відображає рівень електромагнітного зв'язку між ними. На рис. 5,а зображено рівень зв'язку (у дБ) 5-го (середнього) елемента решітки з оточуючими його випромінювачами, при синфазному живленні, а на рис. 5,б його частотну залежність модуля коефіцієнта відбиття. Електромагнітний зв'язок симетрично розташованих елементів відносно 5-го випромінювача, однаковий, тому на рис. 5,а наведені лише 4 криві.

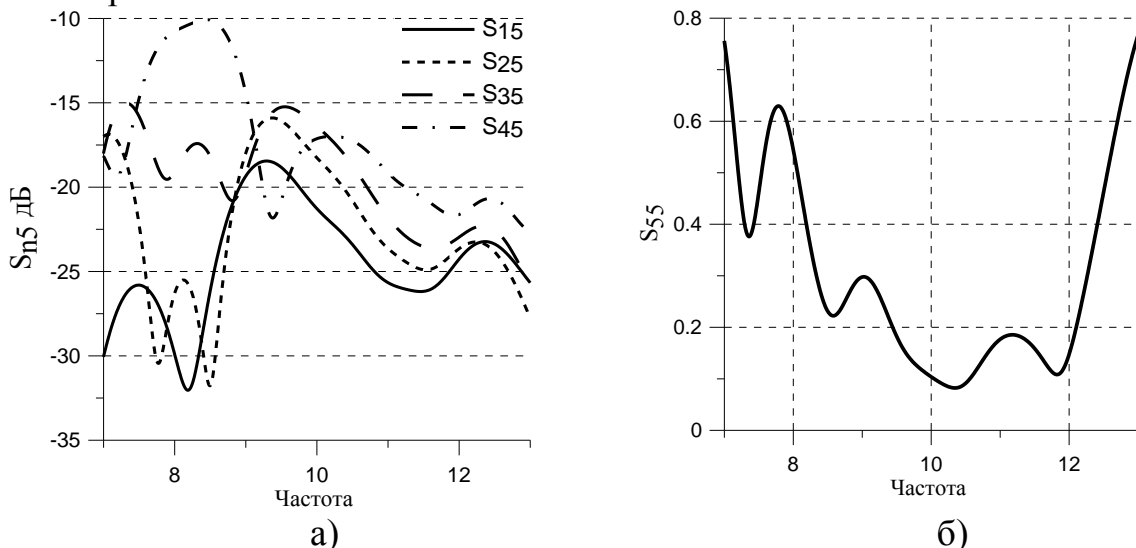


Рис. 5. а) рівень електромагнітного зв'язку 5-го елемента решітки із сусідніми випромінювачами; б) частотна залежність модуля коефіцієнта відбиття 5-го елемента решітки

Як видно на рис. 5,а максимальне значення електромагнітного зв'язку має місце у випадку мінімальної відстані між випромінювачами (S_{45}) і поступово зменшується із збільшенням відстані між ними. Звернемо увагу на

те, що рівень зв'язку елементів решітки з середнім 5-им випромінювачем лежить нижче -15 дБ у всій робочій смузі частот, окрім максимуму S_{45} в околі частоти $8,5$ ГГц, де $S_{45} \leq -10$ дБ. В той же час спостерігається сильний вплив електромагнітного зв'язку на узгодження елементів у решітці. Середній елемент решітки піддається найбільшому впливу з боку решітки випромінювачів і демонструє найгірший варіант зміни частотної залежності коефіцієнта відбиття. Як видно на рис. 5,б узгодження середнього елемента значно погіршилося у порівнянні з випадком одиночної антени (рис. 2,а). Спостерігаємо значне збільшення коефіцієнта відбиття в нижньому діапазоні частот і звуження робочої смуги частот до 25% при $S_{55} \leq 0.2$. На рис. 6 зображено діаграми спрямованості 5-го елемента при синфазному збудженні решітки, розраховані на частоті $9,5$ ГГц. Спостерігаємо помітний вплив електромагнітного випромінювання елементів решітки на діаграму спрямованості середнього елемента. За рахунок інтерференції хвиль має місце утворення вторинних максимумів і розширення діаграми спрямованості в Н-площині. В результаті ширина головного випромінювання по рівню -3 дБ у Е-площині складає 140° , а у Н-площині -166° . Підсилення випромінювача $3,7$ дБ. Із отриманих результатів можна зробити висновок, що квазі-Ягі антена у складі АР має широкі і майже однакові в Е- і в Н-площинах діаграми спрямованості і характеризується відносно незначним взаємним електромагнітним зв'язком. Ці властивості беззаперечно є перевагами квазі-Ягі випромінювачів, як можливих елементів ФАР великих розмірів.

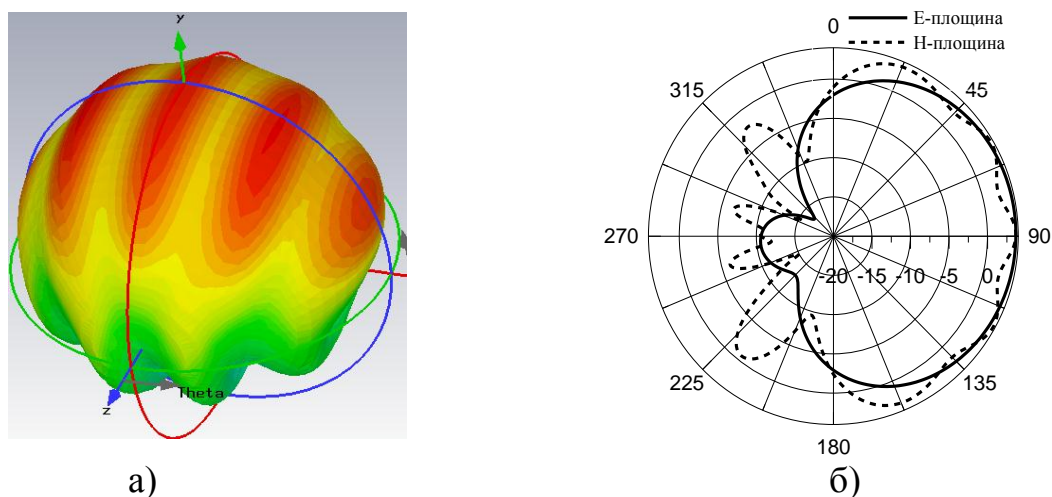


Рис. 6. Діаграма спрямованості 5-го елемента АР, розрахована на частоті $9,5$ ГГц: а) 3D вигляд; б) у Е- і Н-площині.

Результати чисельного дослідження характеристик ФАР на основі друкованого квазі-Ягі випромінювального елемента

Для підтвердження можливості застосування друкованої квазі-Ягі антени в побудові великих ФАР, була змодельована і оптимізована двомірна еквідистантна АР, розміром 11x11 елементів, що показана на рис. 7.

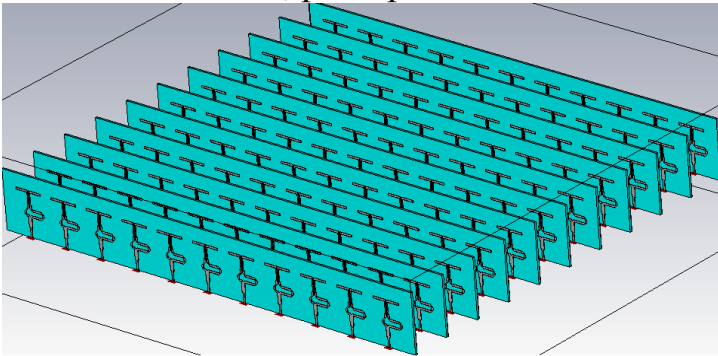


Рис.7. Досліджувана двомірна АР, розмірністю 11x11 елементів.

12,6 мм. Були розраховані характеристики випромінювання і узгодження центрального 61-го елемента решітки (нумерація елементів – послідовно в лінійці і по лінійках) при синфазному живленні решітки і в режимі сканування. Отримані результати для центрального елемента можна узагальнити на оцінку впливу суцільного антенного полотна на узгодження кожного окремого випромінювача в складі ФАР великих розмірів.

На рис. 8 зображені модуль коефіцієнта відбиття для центрального 61-го елемента решітки і його діаграми спрямованості, розраховані на частоті 9,5 ГГц при синфазному живленні кожного елемента. На рис. 8,а видно, що модуль коефіцієнта відбиття центрального елемента дещо збільшився у порівнянні з характеристикою окремого випромінювача і змістився в область високих частот приблизно на 500 МГц. Проте значення S_{61} лежить нижче 0,3 в широкому діапазоні частот, що свідчить про помірний вплив сусідніх елементів на характеристику узгодження досліджуваного центрального випромінювача. За рахунок електромагнітного впливу сусідніх елементів і інтерференції хвиль спостерігаємо невелике спотворення діаграми спрямованості 61-го елемента, як видно на Рис. 8,б. Ширина головного випромінювання по рівню -3 дБ у Е-площині складає значення 130° , у Н-площині – 120° . Підсилення випромінювача збільшилось до 5,4 дБ.

Вважаємо, що АР виготовлена на підкладинці ТММ10 (торгової марки Rogers Corporation) з відносною діелектричною проникністю $\epsilon = 10.2$ і товщиною 0,635 мм. Відстань між елементами решітки складає $0,4\lambda$ на частоті 9,5 ГГц, що відповідає значенню

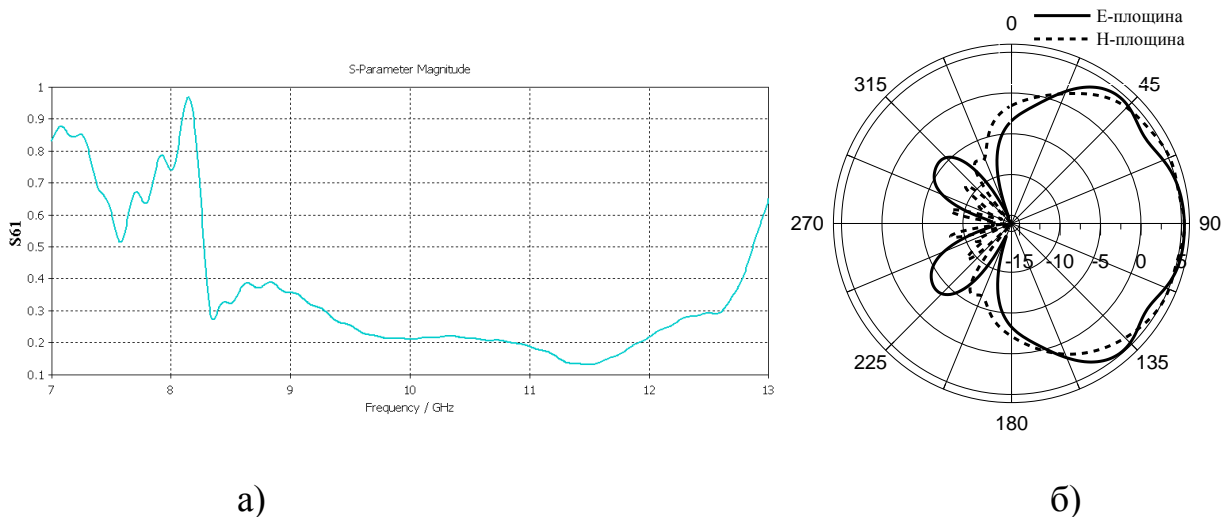


Рис. 8. Розраховані характеристики центрального елемента АР: а) частотна залежність коефіцієнту відбиття; б) діаграма спрямованості в Е- і Н-площині, на частоті 9,5 ГГц.

На рис. 9. зображена діаграма спрямованості АР із 11x11 елементів при синфазному живленні елементів, розрахована на частоті 9,5 ГГц. Підсилення решітки складає 24 дБ з рівнем бічного випромінювання $-13,2$ дБ. Ширина головного пелюстка діаграми спрямованості у Е- і у Н-площинах складає близько 11° .

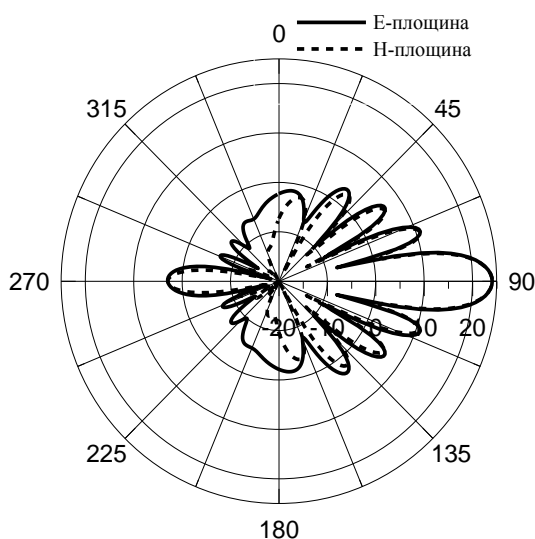


Рис. 9. Діаграма спрямованості дво-мірної АР, розмірністю 11x11 елементів, розрахована на частоті 9,5 ГГц.

Але, при цьому, їх форми спотворюються, а рівень бічного випромінювання піднімається до значень $-6,8$ дБ у Е-площині і $-6,2$ дБ у Н-площині (штрих пунктирна лінія на рис. 10) Коефіцієнт підсилення падає з 24 дБ до 19 дБ. При фазовому зсуві $\Delta\varphi = 120^\circ$ головний пелюсток діаграми спрямованості відхиляється на 55° при скануванні в Е-площині і на 54° – в Н-площині. При цьому діаграма зберігає свою форму, а рівень бічного ви-

Однією із найважливіших тактико-технічних характеристик будь-якої ФАР є максимально можливий діапазон кутового сканування променем. На рис. 10, а і б продемонстровано можливості сканування досліджуваної АР на основі друкованої квазі-Ягі антени у Е- і Н-площинах, відповідно. Зсув фаз $\Delta\varphi$ між сусідніми елементами був встановлений 90° у першому випадку, 120° – у другому і 150° – у третьому, як показано на рис.10. Дослідження проведене на частоті 9,5 ГГц. При максимальному фазовому зсуві $\Delta\varphi=150^\circ$, діаграма спрямованості відхиляється на кут 77° при скануванні у Е-площині і на кут 74° – у

промінювання не перевищує $-11,5$ дБ у Е-площині і $-10,5$ дБ у Н-площині. Коефіцієнт підсилення падає до рівня 22 дБ, порівняно із випадком синфазного збудження елементів. Отже, з отриманих результатів можна зробити висновок, що діапазон сканування АР, побудованих на основі друкованих квазі-Ягі антенах, може складати $\pm 50^0 \dots 60^0$ в обох площинах.

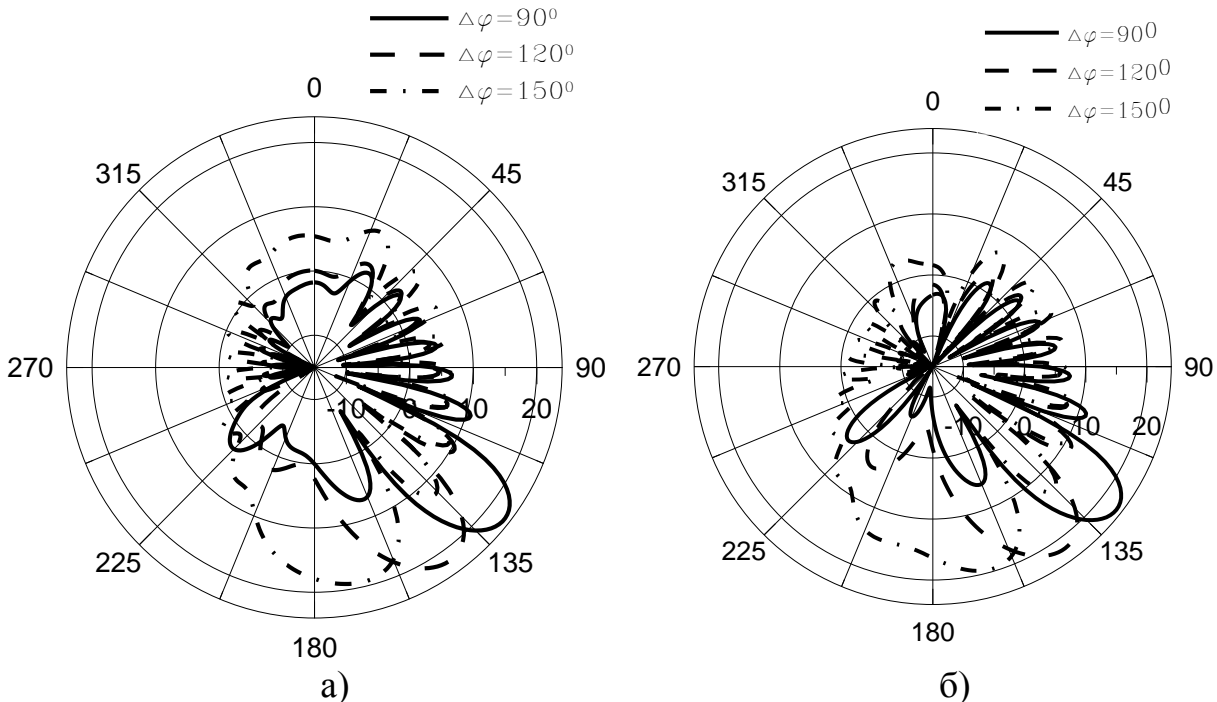


Рис. 10. Сканування променем АР при різному фазовому зсуві $\Delta\varphi$ між елементами: а) сканування в Е-площині; б) сканування в Н-площині.

На рис. 11 зображено частотні залежності модуля коефіцієнта відбиття 61-го елемента при різних значеннях фазового зсуву між елементами для Е- і Н-площин. Зсуви фаз $\Delta\varphi$ між сусідніми елементами були обрані такими самими, як і при дослідженні діапазону сканування АР. На цих рисунках видно, що узгодження випромінювача із збільшенням кута сканування погіршується. Причому сканування в Е-площині має більший вплив на модуль коефіцієнта відбиття S_{61} , ніж у Н-площині. При фазовому зсуві $\Delta\varphi = 150^0$ (кут сканування більше 74^0) спостерігаємо майже повне відбиття при скануванні у Е-площині. Якщо сканування решітки обмежене кутами $\pm 50^0 \dots 60^0$ в обох площинах, то $S_{61} < 0,4$ в широкому діапазоні частот (штрихова лінія на рис. 11).

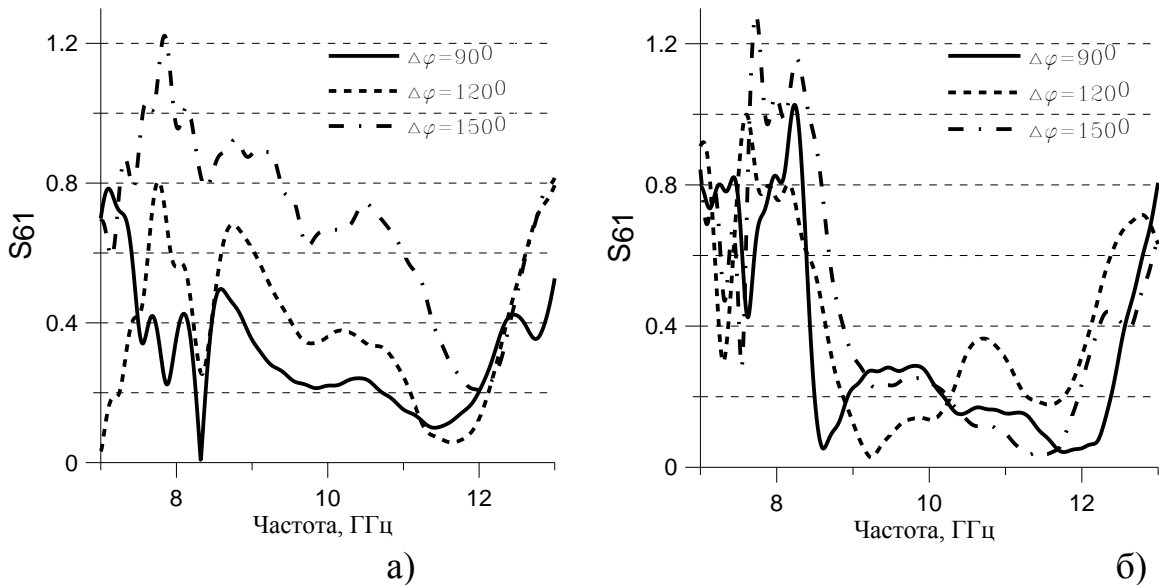


Рис. 11. Зміна частотної залежності модуля коефіцієнта відбиття центрального 61-го елемента ФАР при скануванні: а) сканування в Е-площині; б) сканування в Н-площині.

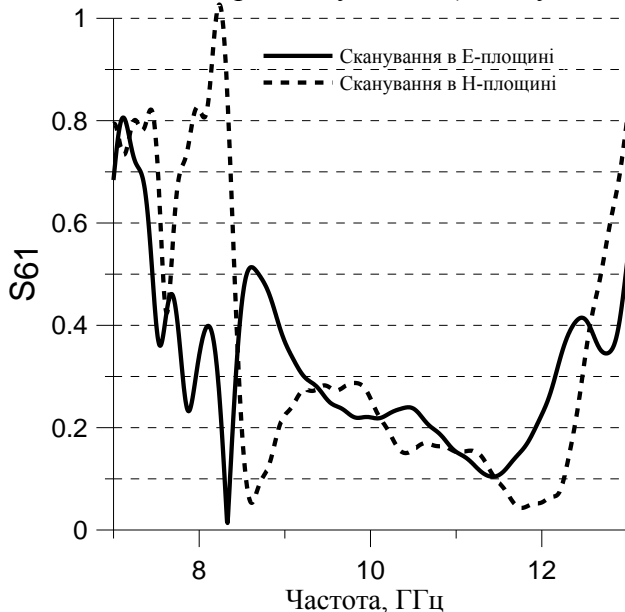


Рис. 12. Частотна залежність коефіцієнта відбиття 61-го елемента АР при скануванні у Е- і Н-площинах

На рис. 12 зображено частотні залежності модуля коефіцієнта відбиття центрального елемента решітки при скануванні у Е- і у Н-площинах при фазовому зсуві між елементами $\Delta\varphi = 90^\circ$. На Рис. 13 зображені розраховані діаграми спрямованості у 3D-виді для цих випадків сканування.

Як видно на Рис. 12 модуль коефіцієнта відбиття нижче рівня 0,3 в широкому частотному діапазоні. Як і в попередньому варіанті, сканування у Е-площині має більший вплив на узгодження середнього елемента решітки, ніж сканування у Н-площині. Розраховані діаграми спрямованості, при фазовому зсуві між елементами $\Delta\varphi = 90^\circ$, відхилились на 38° як у Е- так і у Н-площині. Рівень бічних пелюсток не перевищує -12.4 дБ при скануванні у Е-площині і -11.8 дБ – у Н-площині. Коефіцієнт підсилення решітки зменшився на 1 дБ, у порівнянні з синфазним збудження і складає 23дБ.

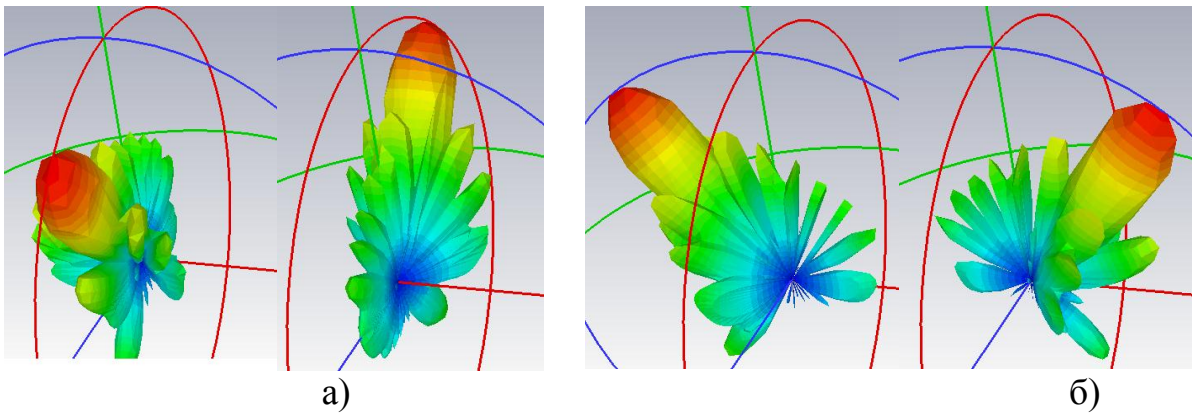


Рис. 13. Діаграми спрямованості АР розмірністю 11х11 елементів, розраховані на частоті 9,5 ГГц: а) сканування у Е-площині; б) сканування у Н-площині.

На рис. 14 і Рис. 15 зображені частотні залежності коефіцієнта відбиття 61-го елемента решітки і розраховані діаграми спрямованості при скануванні в діагональних площинах. Спостерігаємо значне погіршення узгодження центрального елемента в діапазоні частот.

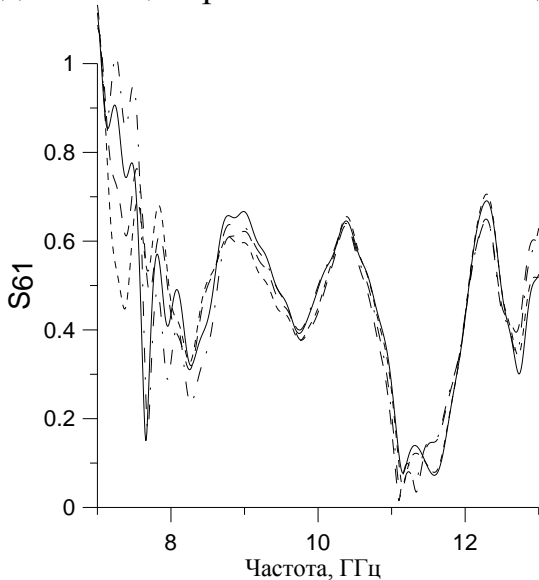


Рис. 14. Частотна залежність модуля коефіцієнта відбиття 61-го елемента АР при скануванні в діагональних площинах

Коефіцієнт підсилення ФАР зменшився на 3 дБ у порівнянні з випадком синфазного збудження і складає 21 дБ, а рівень бічного випромінювання збільшився, в найгіршому випадку, до -11 дБ. Зміщення головного випромінювання по діагоналі відбулося на 40° . Як видно на рис. 14, сканування по діагоналі є найгіршим випадком для узгодження елементів решітки. Їх зв'язок один з одним стає максимальним, і у випадку з досить добре розв'язаними квазі-Ягі елементами. Але загалом цей фізичний ефект притаманний будь-якій ФАР, незалежно від типу випромінювальних елементів.

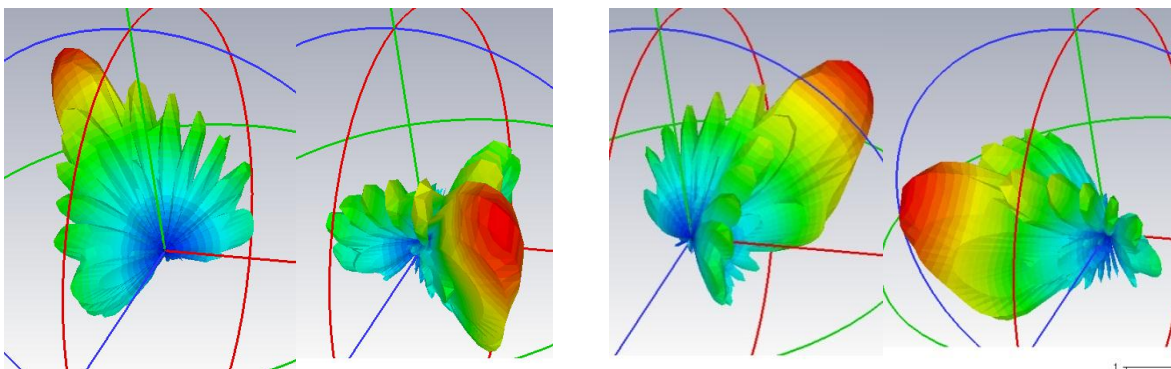


Рис. 15. Діаграми спрямованості АР розмірністю 11х11 елементів, розраховані на частоті 9,5 ГГц при скануванні в діагональних площинах.

Висновки

В роботі чисельно досліджено характеристики випромінювання і узгодження друкованих квазі-Ягі антен як окремих, так і в складі лінійної ФАР із дев'яти елементів та плоскої ФАР із 11x11 елементів. Показано, що друкована мікросмужкова квазі-Ягі антена з її 45% смугою робочих частот і широкою симетричною діаграмою спрямованості є перспективним елементом у побудові великих ФАР. Виявлено суттєвий вплив взаємного зв'язку між елементами ФАР на характеристики узгодження і діапазон сканування, особливо в діагональних площинах. На прикладі ФАР із 11x11 елементів встановлено, що в широкій смузі частот діапазон сканування ФАР на основі квазі-Ягі елементів може сягати $\pm 50^\circ$

Література/References

1. Yongxi Qian W. R. Deal, Koriaki Kaneda and Tatsuo Itoh. A Uniplanar Quasi-Yagi Antenna with Wide Bandwidth and Low Mutual Coupling Characteristics. IEEE 1999 AP-S Int. Symp.Dig., July 1999, pp.924-927.
2. Y. Qian, W.R. Deal, N. Kaneda and Itoh. Microstrip-fed quasi-Yagi antenna with broadband characteristics. Electronic Letters, vol 34, No 23, November 1998, pp. 2194-2196.
3. Kaneda, N., Y. Qian, and T. Itoh. A novel Yagi-Uda dipole array fed by a microstripto-CPS transition. Asia Pacific Microwave.
4. K. Prabhu Kumar, Dr. P. S. Brahmanandam, B. T. P. Madhav, V. Shiva kumar D. Rakesh, T. Raghavendravisnu. Uniplanar Quasi-Yagi Antenna for channel measurements at X-band. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 30th April 2011. Vol.26 No.2
5. J. R. Brianeze, Arismar Cerqueira S. Jr., H. E. Hernández-Figueroa. Modified Quasi-Yagi Antenna for Airborne Radar. Microwaves and Optics Department, School of Electrical and Computer Engineering, State University of Campinas (UNICAMP). Albert Einstein Av., 400, 13083-852, Campinas – SP – Brazil.

Видалко О.С., Дубровка Ф.Ф. Чисельне дослідження характеристик ФАР на основі друкованих квазі-Ягі випромінювальних елементів. У роботі представлені результати чисельного дослідження методом скінченних різниць у часовій області характеристик узгодження і випромінювання квазі-Ягі антени і ФАР розміром 11x11 елементів, побудованої на основі таких випромінювачів. Розрахований електромагнітний зв'язок між елементами АР і показана можливість застосування друкованих квазі-Ягі випромінювальних елементів в побудові ФАР великих розмірів. Показані зміни робочих характеристик випромінювальних елементів у складі ФАР при синфазному збудженні і в режимі сканування, а також кутівий діапазон можливого відхилення головного випромінювання.

Ключові слова: антенні решітки, мікросмужковий випромінювач, квазі-Ягі антена, ФАР.

Видалко О. Е., Дубровка Ф.Ф. Численное исследование характеристик ФАР на основе печатных квази-Яги излучающих элементов. В работе представлены результаты численного исследования методом FDTD характеристик согласования и излучения квази-Яги антенны и ФАР размерностью 11x11 элементов, состоящей из таких излучателей. Рассчитана электромагнитная связь между элементами АР и показана возможность использования печатных квази-Яги излучающих элементов в конструи-

рованих ФАР більших розмірів. Показані змінення робочих характеристик ізлучаючих елементів в складі ФАР при синфазному возбужденні і в режимі сканування, а також кутів діапазон можливого відхилення головного ізлучення

Ключевые слова: антенні решітки, мікрополосковий ізлучач, квазі-Ягі антенна, ФАР.

Vydalko O. E., Dubrovka F. F., Numerical investigation of characteristics of phased antenna arrays, based on printed quasi-Yagi radiating elements.

Abstract. Paper presents numerical investigation of radiation and matching characteristics of a printed quasi-Yagi antenna and 11x11 2D phased array, based on quasi-Yagi radiating elements. Results were obtained by finite-difference time domain method.

The investigation of characteristics basic radiating element of phased array. Calculated matching characteristics and radiation pattern of quasi-Yagi antenna. Also shown mutual coupling between radiating elements by using 1D subarray, which has 9 elements.

The investigation of characteristics of phased antenna array, based on printed quasi-Yagi radiating elements. Calculated radiating characteristics of phased antenna array. Determined the possible range scanning of phased array. Investigated applicability of quasi-Yagi radiating elements in building phased antenna arrays.

Conclusions. Results of investigation have practical direction in solving the problems of constructing large phased antenna arrays.

Keywords: antenna arrays, microstrip antenna, quasi-Yagi antenna, scanning phased antenna arrays.