

ABSTRACT

Luo Yiyang. **Sparse Antenna Array Design Based on Special Matrix Operations**. Qualification scholarly paper: a manuscript. Thesis submitted for obtaining the Doctor of Philosophy degree in Natural Sciences, Speciality 105 – Applied Physics and Nanomaterials. V. N. Karazin Kharkiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2023.

The purpose of the research. The dissertation work is devoted to the development of new methods to construct sparse planar antenna arrays (AAs), which can be used for multiple functions, specially for radiotelescopes (8–80 MHz). A series of direct and simple methods for designing such sparse planar AA were proposed. Non-equidistant sparse AAs constructed on the structure of Latin Squares and its Triangular matrix are the most satisfactory results currently available. A method for their construction, which is different from the past, are proposed. The properties of this type of AA, which ensure full coverage of spatial frequencies at a high degree of rarefaction with a sufficiently small lateral radiation, are thoroughly examined. The **innovativeness and highlights** of this dissertation is summarized as follows:

- 1) The inaugural use of a Latin square matrix in constructing an AA.
- 2) Pioneering combination of circular difference sets and Latin square matrices for planar sparse arrays.
- 3) Novel integration of the Latin square matrix and its lower triangular matrix in constructing a planar sparse array.
- 4) The proposed matrix method, in contrast to iterative and deletion-based optimization approaches, offers an efficient, direct, and straightforward method for AA design.
- 5) A novel matrix approach attains full spatial frequency coverage in a sparse planar antenna array tailored for radio astronomy.

The outline of the main content of the thesis is as follows:

In **CHAPTER 1**, the research history of radiowave propagation, antenna theory, linear AA, and planar AA were reviewed. Some parameters used in this thesis (including radiation pattern, main beam width, average side lobe level, filling factor, redundancy, spatial frequency), etc. are explained. And the traditional matrix-based method of constructing antenna arrays is explained.

In **CHAPTER 2**, the feasibility of constructing non-uniform AA based on Latin squares is explored. The algorithm used for computing the coordinates of the AA, based on “Latin” squares, mirrors the approach employed in AA constructed from “Magic” squares. This algorithm is grounded in using the matrix element values that generate (form the square) as the basis for the interferometer created by adjacent elements. While the resulting AA provide complete coverage of the spatial frequency in the AA element placement area, they exhibit a substantial redundancy coefficient. Radiation patterns of the generated AA are studied, and side lobe levels of the obtained non-uniform AA are assessed. Mitigating redundancy in AA based on Latin squares has a minimal impact on the main lobe width. However, it significantly reduces fill and redundancy coefficients while notably increasing the average side lobe levels. The possibility of synthesizing large AA based on component squares using embedded Latin squares is demonstrated. Characteristics of the obtained grids are examined under additive and multiplicative shifts, as well as rotation (transposition). It is shown that employing mutual rotations of individual layers within the synthesized grid can enhance its characteristics. The study establishes that AAs with the most favorable characteristics are those obtained by embedding a magic square through additive shifts of elements in a Latin square, resulting in the formation of a new Latin square. This remains true even when employing rotation operations (transposition). The results open new possibilities for creating non-uniform antenna grids with low fill and redundancy coefficients and acceptable side lobe levels, surpassing the characteristics of previously utilized non-uniform planer AA based on cyclic-difference sets (CDS). New avenues are proposed in the presented approach and

methodology, including the use of Greco-Latin (Eulerian) orthogonal squares as starting elements, offering promising possibilities for further exploration.

In **CHAPTER 3**, the construction of non-equidistant Antenna Arrays (AAs) based on Latin squares with CDS as elements, employing the traditional algorithm presented in CHAPTER 1. The resulting AAs demonstrate nearly complete spatial frequency coverage with a minimal redundancy factor. Notably, AAs based on Latin squares utilizing CDS as elements outperform other configurations, offering new possibilities for AA with reduced filling and redundancy coefficients. The synthesis of large AAs using Latin squares with CDS as element were also explored, highlighting improvements in performance and increased flexibility in design parameter adjustments. The proposed synthesis approaches hold potential applications in designing low-frequency radio telescopes, radar complex, and systems monitoring seismic and atmospheric activity.

In **CHAPTER 4**, a novel Antenna Array (AA) synthesis method, based on the Latin square and its triangular matrix, was proposed and has been demonstrated as a direct and efficient approach for sparse AA synthesis. This method ensures full spatial frequency coverage, reduces array compactness and the overall number of arrays, while maintaining effective control over side lobes. The synthesized array exhibits a narrow main lobe and low side lobe levels, making it versatile for various applications, including radar, communications, radio astronomy, radiotherapy, remote sensing, automotive, medical imaging, navigation, and more. Despite the large number of AA elements synthesized using this method, the array maintains a fixed geometry, displaying consistent characteristics when rotated on a plane.

In **CHAPTER 5**, a comparative analysis was conducted using the example of an antenna element designed for a 25MHz radio astronomical telescope. The novel approaches to constructing non-equidistant planar sparse AAs utilizing mathematical constructions such as Magic squares, Latin squares (including elements in the form of CDS), were proven to offer several unique properties. Firstly, the methodology is characterized by simplicity and efficiency, steering

clear of the intricate nonlinearity associated with traditional sparse AA design. Instead, it employs straightforward mathematical concepts like matrix multiplication, nesting, and element generation, resulting in a straightforward and effective AA design process. Secondly, the methodology exhibits regularity and scalability, as the mathematical concepts employed can be expanded with increasing order, allowing for the synthesis of large AAs. Thirdly, it combines nonlinearity and multidimensionality, representing a nonlinear approach using linear forms (matrices) for AR design. The method's multidimensional nature enables the generation of coordinate matrices of varying sizes, making it adaptable to multidimensional constraints. Finally, this innovative approach holds significant future potential, providing a new paradigm for AA design with clear foundations, transparency, and the prospect for further development. It opens the door to a comprehensive AA optimization design system, accommodating additional mathematical concepts, modifications, and replacements. With a sufficient number of projected AAs and a high matrix order, it can facilitate the creation of knowledge bases for AA classification, systematic studies on the characteristics of sparse AAs, and the geometric distribution of their elements.

In the **CONCLUSION** a comprehensive review of the entire thesis is presented. The thesis introduces a set of novel direct design methods for sparse planar AAs based on special matrices, highlighting their numerous advantages (especially, low cost, low side lobe level, low redundancy while ensuring complete spatial frequency coverage) and versatile applications (especially in the field of radio astronomy and monitoring for the atmosphere and Geospace). The prospects for applying these methods are discussed, emphasizing their potential benefits in various scenarios. However, critical shortcomings in current research are also discussed, including: 1) the absence of specific measurements in real-world situations, 2) a lack of in-depth understanding of specific application scenarios and constraints, 3) the need for further development of the mathematical nature of generating sparse arrays based on special matrices, the necessity for comparative analyses of arrays using different types of antennas as antenna units, and 4) the

requirement for in-depth analysis and consideration of signal processing systems (such as phase shifters and signal amplifiers) in the integration of sparse antenna array designs. These identified areas for improvement serve as valuable directions for future research and development in the field.

Key words: Antenna, Array Design, Radiation Pattern, Signal Processing, Spatial Filter, Radiowave Propagation, Radio Astronomy.

АНОТАЦІЯ

Ло Іян. **Проектування та оптимізація антенної решітки за допомогою спеціальних матриць.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали (Галузь знань 10 – Природничі науки). – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2023.

Мета дослідження. Дисертаційна робота присвячена розробці нових методів побудови розріджених планарних антенних решіток (АР), які можуть бути використані для багатьох функцій, зокрема для радіотелескопів (8–80 МГц). Серія прямих і простих методів проектування таких розріджених були запропоновані плоскі АР. Нееквідистантні розріджені АР, побудовані на основі структури латинських квадратів та їх трикутної матриці, є найбільш задовільним результатом, отриманим на теперішній час. Запропоновано новий метод побудови АР, що істотно відрізняється від раніше відомих. Досконально досліджено властивості АР такого типу, які забезпечують повне покриття просторових частот, при високому ступені розрідження з досить малим бічним випромінюванням. **Наукова новизна та практична значимість** результатів дисертаційної роботи полягають у наступному:

- 1) Вперше використано латинську квадратну матрицю при побудові АР.
- 2) Запропоновано піонерську комбінацію циклічних різницевих множин і латинських квадратних матриць для плоских розріджених АР.
- 3) Використано нову інтеграцію латинської квадратної матриці та її нижньої трикутної матриці при побудові плоскої розрідженої АР.

4) Розроблений матричний метод, на відміну від ітераційних підходів і підходів до оптимізації на основі видалення, пропонує ефективний, прямий і простий метод для проектування АР.

5) Новий матричний підхід забезпечує повне охоплення просторових частот у розрідженій планарній антенній решітці, призначеної для потреб радіоастрономії.

Структура та зміст дисертаційної роботи:

У **РОЗДІЛІ 1** зроблено огляд робіт у галузі досліджень поширення радіохвиль, теорії антен, методів побудови лінійних АР і планарних АР. Наведено роз'яснення щодо деяких параметрів, які використовуються в дисертаційній роботі включаючи: діаграму спрямованості, ширину основної пелюстки, середній рівень бокових пелюсток, коефіцієнт заповнення, надмірність, просторові частоти, що покриваються тощо. Розглянуто традиційний матричний метод побудови антенних решіток. Наведено перелік завдань, що вирішуються у дисертаційній роботі.

У **РОЗДІЛІ 2** досліджується доцільність побудови нерівномірної АР на основі латинських квадратів. Алгоритм, що використовується для обчислення координат АР на основі «латинських» квадратів, відображає підхід, який використовується в АР, побудованих із використанням «магічних» квадратів. Цей алгоритм ґрунтується на використанні значень елементів матриці, що генеруються (утворюють квадрат), як основа для інтерферометра, створеного сусідніми елементами. У той час як результуючі АР забезпечують повне покриття просторової частоти в області розміщення елементів АР, вони мають значний коефіцієнт надмірності. Вивчено діаграми спрямованості генерованої АР та оцінено рівні бічних пелюсток отриманої неоднорідної АР. Зменшення надмірності в АР на основі латинських квадратів має мінімальний вплив на ширину головної пелюстки. Проте це значно зменшує коефіцієнти заповнення та надмірності, водночас помітно збільшуючи середні рівні бічних пелюсток. Продемонстровано можливість

синтезу великих АР на основі вкладених (складових) квадратів з використанням вбудованих латинських квадратів. Характеристики отриманих решіток досліджено при адитивних і мультиплікативних зсувах, а також повороті (транспонуванні). Показано, що використання взаємних поворотів окремих шарів у межах синтезованої решітки може покращити її характеристики. Дослідним шляхом встановлено, що найбільш сприятливі характеристики мають АР, отримані при вбудовуванні магічного квадрата шляхом адитивного зсуву елементів у латинському квадраті, що приводить до утворення нового латинського квадрата. Це залишається вірним навіть при використанні операцій обертання (транспонування). Отримані результати відкривають нові можливості для створення неоднорідних антенних решіток з низькими коефіцієнтами заповнення та надлишковості й прийнятними рівнями бічних пелюсток, що перевершують характеристики неоднорідних планарних АР на основі циклічно-різницевих множин (ЦРМ), що використовувались раніше. Представлений підхід і методологія пропонує нові шляхи, включаючи використання греко-латинських (ейлерових) ортогональних квадратів як вихідних елементів, що відкривають перспективні можливості для подальших досліджень.

У **РОЗДІЛІ 3** розглянуто побудову нееквідистантних АР на основі латинських квадратів із ЦРМ в якості елементів, з використанням алгоритму, представленого у РОЗДІЛІ 1. Отримані АР демонструють майже повне покриття просторових частот з мінімальним коефіцієнтом надмірності. Слід відзначити, що АР на основі латинських квадратів із використанням ЦРМ в якості елементів мають істотні переваги над іншими конфігураціями, пропонуючи нові можливості для АР зі зниженим коефіцієнтом заповнення та надмірності. Крім того було досліджено синтезування великих АР з використанням латинських квадратів із ЦРМ в якості елементів. Доведено, що це сприятиме покращенню продуктивності та гнучкості корегування параметрів конструкції. Запропоновані підходи до синтезу мають потенційне застосування при проектуванні низькочастотних радіотелескопів,

радіолокаційних комплексів і систем моніторингу сейсмічної та атмосферної активності.

У **РОЗДІЛІ 4** було запропоновано новий метод синтезу АР, заснований на використанні латинського квадрата та його трикутної матриці, який продемонстрував прямий та ефективний підхід для синтезування розрідженої АР. Запропонований метод забезпечує повне просторове частотне покриття, зменшує компактність АР та загальну кількість АР, зберігаючи ефективний контроль над бічними пелюстками. Синтезована АР демонструє вузьку головну пелюстку і низькі рівні бічних пелюсток, що робить її універсальною для різноманітного застосування, включаючи радіолокацію, зв'язок, радіоастрономію, радіотерапію, дистанційне зондування, автомобільну промисловість, медичну візуалізацію, навігацію тощо. Незважаючи на велику кількість елементів АР, синтезованих за допомогою цього методу, АР зберігає фіксовану геометрію, демонструючи узгоджені характеристики при обертанні на площині.

У **РОЗДІЛІ 5** було проведено порівняльний аналіз на прикладі антенного елемента, призначеного для радіоастрономічного телескопа 25 МГц. Доведено, що нові підходи до побудови нееквідистантних плоских розріджених АР із використанням математичних конструкцій, таких як магічні квадрати, латинські квадрати (включаючи елементи у формі ЦРМ), мають ряд унікальних властивостей. По-перше, методологія характеризується простотою й ефективністю, уникаючи складної нелінійності, що пов'язана з традиційною конструкцією розріджених АР. Натомість вона використовує прості математичні концепції, такі як множення матриць, вкладення та генерація елементів, що приводить до простого та ефективного процесу проектування АР. По-друге, методологія демонструє регулярність і масштабованість, оскільки математичні концепції, що використовуються можуть бути розширені зі збільшенням порядку, дозволяючи синтезувати великі АР. По-третє, запропонований методика поєднує в собі нелінійність і багатовимірність, представляючи нелінійний

підхід із використанням лінійних форм (матриць) для проектування АР. Багатовимірна природа методу дозволяє генерувати координатні матриці різного розміру, що робить його адаптованим до багатовимірних обмежень. Нарешті, цей інноваційний підхід має значний майбутній потенціал, що забезпечить нову парадигму проектування АР з чіткими основами, прозорістю та перспективою подальшого розвитку. Це відкриває нові можливості для комплексної системи оптимізації конструкції АР, що містить додаткові математичні концепції, модифікації та заміни. При достатній кількості спроектованих АР та високому порядку матриці це може сприяти створенню баз знань для класифікації АР, систематичних досліджень характеристик розріджених АР та геометричного розподілу їх елементів.

У **ВИСНОВКАХ**, виокремлено основні результати отримані в дисертаційній роботі. Дисертація містить набір нових методів прямого проектування для розріджених планарних АР на основі спеціальних матриць, в роботі підкреслено їх численні переваги, зокрема невелику вартість, малий рівень бічних пелюсток, низьку надлишковість при забезпеченні повного покриття просторової частоти та різноманітність застосувань, зокрема в галузі радіоастрономії і моніторингу атмосфери та геокосмосу. Розглянуто перспективи подальшого застосування запропонованих методів, підкреслено їх потенційну вигоду при різних сценаріях. Однак, при числених перевагах, слід відзначити деякі недоліки поточних досліджень, зокрема: 1) відсутність конкретних вимірювань у реальних умовах, 2) відсутність глибокого розуміння конкретних сценаріїв застосування та можливих обмежень, 3) необхідність подальшого розвитку математичної природи створення розріджених решіток на основі спеціальних матриць, необхідність порівняльного аналізу решіток, що використовують як антенні блоки різні типи антен, 4) необхідність більш глибокого аналізу та розгляду систем обробки сигналів (таких як фазообертачі та підсилювачі сигналу) в інтегрованій конструкції розріджених АР. Ці визначені області для вдосконалення, що не були предметом досліджень даної дисертаційної

роботи, є актуальними напрямками для майбутніх досліджень і розробок у цій галузі.

Ключові слова: антена, проектування решітки, просторовий фільтр, діаграма спрямованості, обробка сигналу, поширення радіохвиль, радіоастрономія, радіолокація.