

## ВИСНОВОК

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів  
дисертації Ло Іяна (Luo Yiyang)  
на тему «Проектування та оптимізація  
антенної решітки за допомогою спеціальних матриць»  
на здобуття ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали  
з галузі знань 10 – Природничі науки**

### **1. Обґрунтування вибору теми дослідження та її зв'язок із планами наукових робіт університету.**

Нееквідистантні антенні решітки (АР), включаючи розріджені лінійні АР та розріджені планарні АР, допомагають зменшити кількість елементів антени, зберігаючи при цьому високу точність та знижуючи бічні пелюстки.

Робота, спрямована на розробку нових методів побудови нееквідистантних АР за допомогою набору спеціальних матриць. Нові розріджені планарні АР були створені з використанням матриць магічних/латинських квадратів, їх вкладеної матриці, матриці латинського квадрата з використанням циклічних різницевих множин (ЦРМ) як елементу, та трикутної матриці латинського квадрата. З методологічної точки зору використано спеціальну математичну концепцію (матриця/квадрат) для побудови антенної решітки. Це цікавий, неординарний підхід, що створює передумови інноваційного прориву у сфері розробки радіотелескопів, радіолокаторів та антенних систем і є актуальним на сьогодні.

В останні роки конструювання нетрадиційних розріджених планарних решіток (АР) стало тенденцією з багатьма перевагами, яких немає в звичайних еквідистантних антенних решітках. Оскільки доцільність застосування розріджених решіток була очевидною, почали розробляти відповідні методи, проте їх повне теоретичне обґрунтування досі відсутнє. Розріджена АР може розглядатися як результат проріджування еквідистантної АР, загальна кількість активних елементів якої зменшено, без суттєвого погіршення якості системи. Досі у багатьох випадках проектують розріджені АР, спочатку спроектувавши еквідистантні АР, а потім використовують серію методів для скорочення елементів (проріджування решітки), таких як: генетичний алгоритм (ГА), оптимізація з використанням моделі біогеографії, підхід заснований на майже різницевих множинах, метод рою частинок (МРЧ), Мурашиний алгоритм, ітеративний алгоритм перетворення Фур'є, і навіть гібридний метод, заснований на ітеративному перетворенні Фур'є та диференціальній еволюції. Деякі з них вже введені в експлуатацію та дали змогу досягти добрих результатів: ефективно знизити вагу, енергоспоживання, тепловиділення та економічні витрати на АР.

Проте, ці підходи засновані на застосуванні методів оптимізації, що належать до методів припасування, і це, по суті, унеможливорює безпосереднє проектування розріджених АР. Традиційний метод прямого проектування решіток розглядає проблему дизайну АР як багатовимірну нелінійну локальну оптимізацію. Незважаючи на кількість витраченого часу, енергії та ресурсів, проведення багаторазових ітерацій, результати все ще залишаються незадовільними. З огляду на

це наразі існує гостра потреба у розробці формального, простого та ефективного методу.

**Метою** роботи є розробка методик створення та оптимізації двовимірних нееквідистантних розріджених антенних решіток на основі матриць спеціального вигляду для повного покриття просторових частот при малих значеннях коефіцієнту заповнення та надмірності, що мали б змогу використовуватися в низькочастотних радіотелескопах та декаметрових радіолокаторах.

Для досягнення цієї мети були поставлені та вирішені наступні **завдання**:

•1) Проаналізувати сучасний стан проблеми моделювання двовимірних нееквідистантних антенних решіток для низькочастотних радіотелескопів та радіолокаторів;

•2) Створити методики, що дозволяють трансформувати значення матриць спеціального вигляду в координати елементів антенної решітки (АР) і комп'ютерну програму для розрахунку характеристик отриманих АР таких як:

а) Розрахувати діаграму спрямованості (ДС), її ширина та середній рівень бокових пелюсток;

б) Визначити просторові частоти, що покривають та створити методику їх доповнення до повного покриття;

в) Оцінити коефіцієнти заповнення та надмірності.

•3) Провести моделювання антенних решіток на базі матриць спеціального вигляду (латинських квадратів, магічних квадратів, трикутних матриць) та зіставити характеристики отриманих АР з отриманими раніше із використанням циклічних різницевих множин.

•4) Зіставити характеристики отриманих із використанням запропонованого підходу АР на основі спеціальних матриць з характеристиками раніш відомих нееквідистантних АР.

•5. Розглянути можливість застосування розріджених планарних АР на основі спеціальних матриць.

**Об'єктом дослідження** є метод проектування розріджених планарних антенних решіток на основі спеціальних матриць для застосування в радіоастрономії та радіолокації.

**Предмет дослідження** – визначення та оптимізація параметрів нееквідистантних антенних решіток, таких, як діаграми спрямованості, коефіцієнти заповнення та надмірності для проєктованих АР в декаметровому діапазоні хвиль.

**Методи дослідження.** В роботі для вирішення поставлених завдань були використані методи сучасної радіофізики, обчислювальної електродинаміки і математичної фізики:

– методи статистики для аналізу характеристик отриманих при проектуванні двовимірних нееквідистантних АР;

– «жадібний» алгоритм (для доповнення та видалення координат АР);

– матричні операції (перетворення, обергання, розширення, вкладення) (використання спеціальної матриці для генерації координатної АР);

– методика аналізу розподілу згортки та гістограми (для визначення та аналізу розподілу просторової частоти АР).

Також у роботі використовувались числові методи комп'ютерної математики та фізичне моделювання.

Робота виконувалася на кафедрі теоретичної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна в рамках п'яти держбюджетних науково-дослідних тем та гранту Національного фонду досліджень України № 2020.02/0015.

## **2. Формулювання наукового завдання, нове вирішення якого отримано в дисертації.**

Дисертацію Ло Іяна (Luo Yiyang) присвячено розв'язанню актуальної наукової задачі – розробці нових методів побудови нееквідистантних АР за допомогою набору спеціальних матриць, зменшенню кількості елементів антени при збереженні високої точності та зниження рівня бічних пелюсток.

## **3. Наукові положення, розроблені особисто дисертантом, та їх новизна.**

1) Представлено ряд нетрадиційних, прямих, простих методів генерації плоскої розрідженої антенної решітки на основі спеціальних матриць (магічних та латинських квадратів, трикутної матриці).

2) Запропоновано можливе рішення для подальшої оптимізації існуючої наземної системи спостереження з кількома обладнаннями та антенами (збільшення продуктивності та зменшення споживання).

3) Створено методику та розроблено алгоритм доповнення АР елементами для забезпечення повного просторового покриття частот.

4) Оцінено характеристики АР сконструйованих на основі спеціальних матриць та показано, що деякі з них (зокрема АР, отримані за допомогою латинського квадрата та його трикутної матриці) мають суттєво кращі характеристики (за кількістю елементів, коефіцієнтами надмірності та заповнення).

## **4. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.**

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, результатів і висновків дисертації не викликає сумнівів і визначається наступним:

- 1) коректністю постановки задач;
- 2) використанням добре відомих та апробованих методів сучасної радіофізики, математичної статистики та числових методів комп'ютерної математики;
- 3) погодженням результатів чисельного моделювання та експериментальних досліджень.

## **5. Рівень теоретичної підготовки здобувача, його особистий внесок у вирішення конкретного наукового завдання. Рівень обізнаності здобувача з результатами наукових досліджень інших учених.**

Аналіз тексту дисертації, зокрема, першого розділу дозволяє стверджувати, що здобувач добре обізнаний у сучасних дослідженнях за темою дисертаційної роботи,

що представлені у наукових публікаціях, та чітко визначив місце власного дослідження серед них.

Навички з планування та проведення експериментальних досліджень та високий рівень теоретичної підготовки здобувача підтверджуються великим обсягом виконаних ним оригінальних та актуальних досліджень, які вимагали оволодіння добре відомими методами сучасної теорії статистичної радіофізики, розробки нових методів розв'язання актуальних задач прикладної радіофізики та наноматеріалів,

що полягає у встановленні фізичних закономірностей поширення інфразвукових хвиль і фізичних моделей, які найбільш адекватно відповідають експериментальним вимірюванням.

Особистий внесок здобувача у публікаціях із співавторами чітко і зрозуміло описаний у тексті дисертаційної роботи і дозволяє стверджувати, що основні результати дисертаційної роботи були отримані здобувачем особисто.

#### **6. Наукове та практичне значення роботи.**

*Наукове значення отриманих результатів* полягає в створенні методик, які дозволяють переводити значення матриць спеціального вигляду в числові координати компонентів антенної решітки та комп'ютерної програми для розрахунку характеристик антен, моделюванні антенних решіток на базі матриць спеціального вигляду (латинських квадратів, магічних квадратів, трикутних матриць) та зіставити характеристики отриманих антенних решіток з отриманими раніше із використанням циклічних різницевих множин. Розглянуто можливість застосування розріджених планарних антенних решіток на основі спеціальних матриць.

*Зазначені методи* відкривають нові можливості для створення антенних решіток з унікальними характеристиками, що можуть бути застосовані в сучасних комунікаційних та радіотехнічних системах. Їх потенційна цінність полягає в здатності задовольняти вимогам широкого кола потреб.

*Особистий внесок здобувача* полягає в розробці математичних моделей та їх оптимізації, оцінюванні можливостей застосування моделей, аналізі результатів моделювання, виконанні чисельних розрахунків, написанні відповідних розділів у звітах з НДР, статтях і тезах доповідей, а також участі в інтерпретації та обговоренні отриманих результатів.

*Зміст роботи.* Дисертація складається зі Вступу, 5 розділів і Висновків.

*Публікації.* Матеріали дисертації опубліковані у 12 наукових працях, серед яких 1 стаття у науковому фаховому виданні України, 2 – праці в зарубіжних наукових спеціалізованих виданнях (входять до міжнародних наукометричних баз Scopus/Web of Science), 7 – матеріалів доповідей на 5 конференціях (зокрема 6 тез, що входять до наукометричних баз Scopus та Web of Science).

Значна частина результатів дисертації увійшла в підсумкові звіти по науково-дослідним роботам кафедри теоретичної радіофізики, для яких отримані акти про впровадження результатів досліджень.

## **7. Використання результатів роботи.**

Результати дисертації, як складова частина науково-дослідних робіт, що виконувалися на кафедрі теоретичної радіофізики, знайшли впровадження в Інституті радіофізики та електроніки ім.О. Я. Усикова Національної академії наук України, а також у навчальному процесі при викладанні низки спеціальних курсів.

## **8. Повнота викладу матеріалів дисертації в публікаціях та особистий внесок здобувача в публікації.**

Матеріали дисертації опубліковані у 12 наукових працях, серед яких 1 стаття у науковому фаховому виданні України, 2 – праці в зарубіжних наукових спеціалізованих виданнях (входять до міжнародних наукометричних баз Scopus/Web of Science), 7 – матеріалів доповідей на 5 конференціях (зокрема 6 тез, що входять до наукометричних баз Scopus та Web of Science).

### **Наукові праці в наукових фахових виданнях України:**

1. Guo Q. Nonequidistant two-dimensional antenna arrays synthesized using latin squares and cyclic difference sets/ Q. Guo, **Y. Luo**, V. Lutsenko and Y. Zheng // Radio Physics and Electronics. – 2019. – Volume 24, Issue 1. – Pp. 12–23. <https://doi.org/10.15407/rej>

(Особистий внесок здобувача: ідея та методика перетворення значень латинських квадратів в координати антенної решітки, створення комп'ютерної програми для моделювання, проведення розрахунків, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення статті)

### **Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації**

2. Kravchenko V. Nonequidistant Two-Dimensional Antenna Arrays Based on Magic Squares / V. Kravchenko, V. Lutsenko, I. Lutsenko, I. Popov, **Y. Luo**, A. Mazurenko // Journal of Measurement Science & Instrumentation. – 2017. – Volume 8, Issue 3. – Pp. 244–253. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8042.2017.03.006>

(Особистий внесок здобувача: методика перетворення значень магічних квадратів в координати антенної решітки, створення комп'ютерної програми для моделювання, проведення розрахунків, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення статті)

3. Kravchenko V. Nonequidistant two-dimensional antenna arrays based on Latin squares / V. Kravchenko, V. Lutsenko, I. Popov, **Y. Luo** // Journal of Measurement Science & Instrumentation. – 2019. – Volume 10, Issue 1. – Pp. 38–48. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8042.2019.01.006>

(Особистий внесок здобувача: методика перетворення значень латинських квадратів в координати антенної решітки, створення комп'ютерної програми для моделювання, проведення розрахунків, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення статті)

**Наукові праці в наукових виданнях, які індексуються в наукометричних базах WoS/SCOPUS:**

4. **Luo Y.** New method for designing non-equidistant plane antenna arrays with full coverage of spatial frequencies based on latin squares and their triangular matrix / **Y. Luo**, V. Lutsenko, S. Shulga // Telecommunications and Radio Engineering. – 2021. – Volume 80, Issue 6. – Pp. 15–28. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.2021036647>

(Особистий внесок здобувача: методика конструювання та оптимізації нееквідистантних антенних решіток з використанням латинських квадратів та трикутних матриць, створення комп'ютерної програми для моделювання, проведення розрахунків, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення статті)

5. Lutsenko V. Interference to active-passive radar systems created by emissions from HF and VHF broadcasting stations / V. Lutsenko, I. Lutsenko, A. Soboliak, I. Popov, An. Nguyen, **Y. Luo** // Telecommunications and Radio Engineering. – 2020. – Volume 79, Issue 10. – Pp. 829–845. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v79.i10.10>

(Особистий внесок здобувача: створення комп'ютерної програми для обробки результатів експериментальних досліджень, моделювання, проведення розрахунків, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення статті).

**Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (Тези доповідей на наукових конференціях)**

6. Lutsenko V. Nonequidistant two-dimensional antenna arrays are based on magic squares / V. Lutsenko, I. Popov, I. Lutsenko, **Y. Luo**, A. Mazurenko // 2016 9th International kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW). – 2016. – Pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/MSMW.2016.7538080>

(Особистий внесок здобувача: запропонував ідею використання магічних квадратів для побудови антенних, методика перетворення їх значень в координати решітки, створення комп'ютерної програми для моделювання, проведення розрахунків, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення тез)

7. Xuan An. Nonequidistant two-dimensional antenna arrays are based on latin squares for registration of cosmic, atmospheric and lithospheric radiation / An. Xuan, V. Lutsenko, **Y. Luo**, I. Popov // The International Conference on Research Development and Cooperation for Geophysics, Hanoi, October 18-22, 2017 / Vietnam Journal of Marine Science and Technology. – 2017. Volume. 17, No. 4B. – Pp. 14–20. <https://doi.org/10.15625/1859-3097/17/4B/12987>

(Особистий внесок здобувача: запропонував ідею використання латинських квадратів для побудови решіток, методика перетворення їх значень в координати решітки, створення комп'ютерної програми для моделювання, проведення розрахунків, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення тез)

8. **Luo Y.** Nonequidistant Two-Dimensional Antenna Arrays Based on the Structure of Latin Squares Taking Cyclic Difference Sets as Elements / **Y. Luo**, Q. Guo, V. Lutsenko, Y. Zheng // 2019 European Microwave Conference in Central Europe (EuMCE). – 2019. – Pp. 427–430.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8874813/references#references>

(Особистий внесок здобувача: ідея побудови нееквідистантних антенних решіток на основі латинських квадратів, методика перетворення їх значень в координати решітки, створення комп'ютерної програми для моделювання, проведення розрахунків, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення тез)

9. Lutsenko V. Characteristics of Interference to Active-Passive Radar Systems from Emissions of HF and VHF Broadcast Stations / V. Lutsenko, I. Lutsenko, A. Soboliak, I. Popov, An. Nguyen, **Y. Luo** // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). – 2020. – Pp. 259-262. <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252795>

(Особистий внесок здобувача: Ідея використання методу кепстра та вейвлет-перетворення для аналізу високочастотних радіосигналів, створення комп'ютерної програми для моделювання, проведення розрахунків, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення тез)

10. **Luo Y.** Design and Optimization of Sparse Planar Antenna Arrays Based on Special Matrices / **Y. Luo**, V. Lutsenko and S. Shulga // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). – 2020. – Pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252753>

(Особистий внесок здобувача: ідея побудови АР на основі спеціальних матриць, методика перетворення їх значень в координати АР, створення комп'ютерної програми для моделювання, проведення розрахунків, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення тез)

11. Lutsenko V. GNSS Signal Use for Sea Waves Monitoring / V. Lutsenko, I. Lutsenko, I. Popov, **Y. Luo**, An. Nguyen, Q. Guo, Y. Zheng // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). – 2020. – Pp. 768–771. <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252723>

(Особистий внесок здобувача: створення комп'ютерної програми для моделювання, проведення розрахунків, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення тез)

12. **Luo Y.** Observation Theory and Result Analysis of Sea Surface Wind Speed by Pulse Radar / **Y. Luo**, V. Lutsenko, S. Shulga, I. Lutsenko, An. Nguyen // 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW 2022). – 2022. – Pp. 634-637. <https://doi.org/10.1109/UkrMW58013.2022.10036961>

(Особистий внесок здобувача: ідея обчислення швидкості вітру за допомогою різницевої матриці, створення комп'ютерної програми для моделювання, проведення розрахунків, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення тез).

Результати дисертаційної роботи повністю відображено в публікаціях.

На підставі вивчення тексту дисертації здобувача, наукових праць здобувача та Протоколу контролю оригінальності (перевірку наявності текстових запозичень виконано в антиплагіатній інтернет-системі [Strikeplagiarism.com](http://Strikeplagiarism.com)) встановлено, що дисертаційна робота виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності.

#### **9. Апробація матеріалів дисертації.**

Матеріали дисертаційної роботи були представлені та доповідалися на наступних міжнародних конференціях:

– 2019 European Microwave Conference in Central Europe (EuMCE 2019) (Prague, Czech Republic, 13–15 May 2019).

– 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW-2020): 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS-2020) (Kharkiv, Ukraine, 22–27 June 2020).

– 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW-2022): 2022 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS-2022) (Kharkiv, Ukraine, 22–27 June 2020).

#### **10. Оцінка структури, мови та стилю дисертації.**

Дисертація є цілісною роботою, написаною науковим стилем мовлення з коректним застосуванням сучасної наукової термінології. Стил ь викладення матеріалів дисертації є доступним для сприйняття. Результати досліджень викладені логічно й послідовно. Зміст, структура, оформлення дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44), наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій».

#### **11. Відповідність змісту дисертації спеціальності з відповідної галузі знань, з якої вона подається до захисту.**

Зміст дисертації відповідає Паспорту спеціальності 105 – Прикладна фізика та наноматеріали (10 – Природничі науки) згідно з напрямками досліджень:

– Поширення хвиль у багатошарових і неоднорідних структурах і надрешітках,

– Поля та хвилі у відкритих системах,

– Стаціонарні та нестаціонарні випадкові процеси та сигнали.



За своїм фаховим спрямуванням, науковою новизною і практичною значимістю дисертаційна робота Ло Іян (Luo Yiyang) відповідає спеціальності 105 – Прикладна фізика та наноматеріали (10 – Природничі науки).

## 12. Рекомендація дисертації до захисту.

Дисертаційна робота **Ло Іян (Luo Yiyang)** «Проектування та оптимізація антенної решітки за допомогою спеціальних матриць» відповідає вимогам, передбаченим «Порядком присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44).

Враховуючи високий рівень виконаних досліджень, актуальність теми роботи, наукову новизну результатів та їх наукове та практичне значення, рішення фахового семінару кафедри теоретичної радіофізики, космічної радіофізики та прикладної електродинаміки факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна дисертація **Ло Іян (Luo Yiyang)** «Проектування та оптимізація антенної решітки за допомогою спеціальних матриць» рекомендується до захисту в спеціалізованій вченій раді для здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали з галузі знань 10 – Природничі науки.

В.о. завідувача кафедри теоретичної радіофізики  
факультету радіофізики, біомедичної електроніки та  
комп'ютерних систем Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна, к.ф.-м.н., доц.



Вячеслав ХАРДІКОВ

Секретар  
кафедри теоретичної радіофізики  
факультету радіофізики, біомедичної електроніки та  
комп'ютерних систем Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна,  
к.ф.-м.н., доц.



Ольга БАГАЦЬКА