

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.396.67+621.396.946 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.184-189](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.184-189)

В. К. Бондарчук, А. М. Мацуй, проф., д-р техн. наук, **В. М. Каліч**, проф., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: barbaross2@ukr.net

Методи електромагнітного тестування та діагностики радіоантен покоління 5G

Виконано огляд ключових технологій телекомунікаційних бездротових систем п'ятого покоління, особливості яких вимагають зміни в підходах до тестування радіо компонентів. Зроблено порівняльний огляд сучасних підходів до післявиробничого неінвазійного тестування активних антенних систем та можливостей використання елементів машинного навчання для підвищення ефективності виявлення дефектів.

5G, електромагнітне тестування, ОТА, машинне навчання, виявлення дефектів

Постановка проблеми. Сучасні телекомунікаційні мережі широко використовують активні антенні системи для передачі інформації, а з їх розвитком, особливо через нові і нові вимоги до кількості передаваної інформації та швидкості передачі зростає складність цих систем. Особливо в останніх стандартах мереж 5 покоління, в яких потрібно використовувати системи massive MIMO (mMIMO), які представляють собою масиви антен міліметрового діапазону, кількість елементів в яких досягає сотні і більше.

Незважаючи на те, що mMIMO існують вже декілька десятиліть, досі не вирішено питання їх ефективного тестування, при мінімізації часу та витрат. Збільшення кількості елементів в антенній системі та зменшення їх лінійних розмірів призводить до того, що класичні методи тестування, не можуть бути використані через збільшення часу та загальної складності тестувальної системи. В даній статті розглядаються сучасні неінвазійні методи тестування та виявлення дефектів радіоантен п'ятого покоління.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вимоги до об'ємів даних та швидкості їх передачі ростуть з кожним новим поколінням телекомунікаційних мереж, а це в свою чергу призводить до ускладнення структури телекомунікаційного обладнання, що підвищує можливу кількість точок відмови. Основним завдання післявиробничого тестування та діагностики антен є зменшення кількості браку та ефективне виявлення дефектів. При чому існують обмеження на час діагностики, розміри тестувальних стендів, та людських ресурсів, які задіяні в тестуванні. У зв'язку з чим ведеться розробка методів, які дозволяють зменшити кількість операцій під час тестування, оптимізувати обчислення параметрів сигналу, що передається або приймається [1], автоматизувати частину процесів тестування за допомогою використання робототехніки або використати елементи машинного навчання для більш глибокої діагностики [2].

Постановка завдання. Метою даної статті є огляд основних елементів систем п'ятого покоління та методів, які використовуються для електромагнітного тестування та діагностики активних антенних систем для виявлення дефектів.

Виклад основного матеріалу. 5G представляє собою п'яте покоління бездротових систем, стандартом цієї технології визначено New Radio (далі - NR) у 2018 році [3]. Мережі п'ятого покоління зазвичай працюють в діапазоні частот від 24 ГГц до 40 ГГц та використовують massive MIMO для розширення ємності та покриття. Мережі

5G, що використовують технологію mmWave або міліметрових хвиль, можуть забезпечити достатню пропускну здатність (діапазон частот 5G mmWave) для збільшення кількості пристроїв, підключених до Інтернету, і з цієї причини 5G mmWave розширює сферу їх застосування, наприклад, автономні транспортні засоби, телемедицина, управління дорожнім рухом, криті торгові центри, освітні центри, стадіони, конференц-центри та інші види використання, що потребують передачі великого об'єму даних. До ключових елементів 5G відносять [4]:

Millimeter-Wave (mmWave). Технологія міліметрових хвиль є ключовою технологією для стільникового зв'язку п'ятого покоління (5G). Вона використовує радіочастоти в діапазоні NR FR-I (від 410 МГц до 7,125 МГц) та FR-II (від 24 ГГц до 52 ГГц). Ці вищі діапазони дозволяють збільшити швидкість передачі даних, зменшити затримку та збільшити пропускну здатність. Проблема використання технології mmWave полягає в тому, що вищі частоти мають коротші довжини хвиль, а це означає, що сигнали більш схильні до згасання через перешкоди, такі як будівлі та рослинність. Щоб подолати цю проблему мережі що використовують технологію mmWave, зазвичай потребують більшої кількості базових станцій або точок доступу, які встановлюються ближче одна до одної.

Також сигнали mmWave більш чутливі до перешкод від інших бездротових сигналів, а також до метеорологічних умов, таких як дощ і туман. Щоб зменшити ці проблеми мережі 5G що використовують технологію mmWave, застосовують передові методи обробки сигналів і формування променя (beamforming) для фокусування сигналів у певних напрямках, що покращує якість сигналу та зменшує перешкоди. Незважаючи на ці проблеми, технологія mmWave пропонує значні переваги для мереж 5G, включаючи вищу швидкість передачі даних, меншу затримку та підвищену ємність.

MIMO/m-MIMO. Принцип роботи системи зв'язку з MIMO полягає у одночасному використанні великої кількості передавальних і приймальних елементів, що дозволяє проводити просторову і часову обробку сигналів, ефективніше використовувати потужність передавача і зменшувати вплив завад (рис.1).

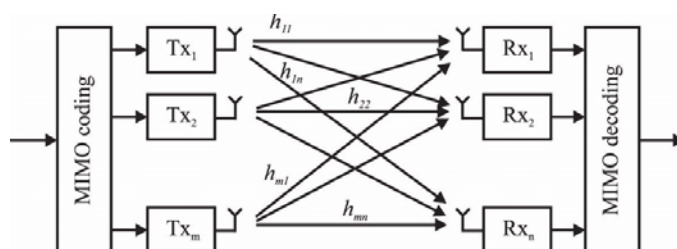


Рисунок 1 – Принципова структура активної антенної системи з MIMO

Джерело: https://www.researchgate.net/figure/The-transmission-of-information-flow-scheme-for-MIMO-systems_fig1_332435957

Massive MIMO працює за допомогою складних алгоритмів обробки сигналів для розділення різних сигналів, що передаються та приймаються кількома антенами. В пристроях 5-ого покоління кількість цих елементів може доходити до декількох сотень, але через обмеження в лінійних розмірах передавача і приймача відбувається зменшення розміру самих передавальних елементів, які об'єднуються в масиви елементів.

Beamforming. Beamforming або формування променя передбачає спрямовану передачу та прийом сигналів між базовою станцією та користувацьким обладнанням. Воно використовує кілька антен для створення вузьких променів, які можна спрямувати на певних користувачів або пристрої, а не для трансляції сигналів у всіх напрямках. Це дозволяє операторам забезпечувати вищі швидкості передачі даних, краще покриття та ефективніше використовувати доступний спектр. Формування променя є критично важливою технологією для міліметрових хвиль (mmWave), які використовуються в деяких мережах 5G для забезпечення надзвичайно високих швидкостей передачі даних.

Міліметрові хвильові частоти мають високі втрати на поширення, а це означає, що вони легко поглинаються об'єктами на своєму шляху, такими як будівлі та дерева. Формування променя дозволяє операторам подолати ці втрати на поширення, спрямовуючи сигнал на певних користувачів або пристрої, а не для трансляції його в усіх напрямках (рис.2).

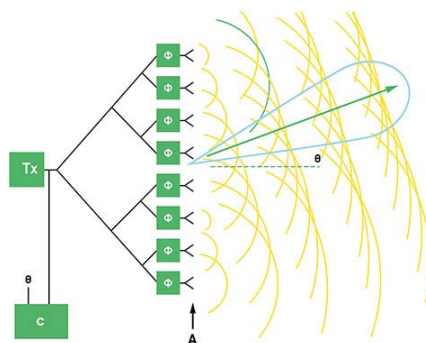


Рисунок 2 – Принципова схема активної антенної системи з адаптивним формуванням променя сигналу
Джерело: <https://my.avnet.com/abacus/solutions/markets/communications/5g-solutions/5g-beamforming/>

Класифікація методів тестування і виявлення дефектів. Якщо казати про забезпечення якості 5G-антен, то під час виробництва використовуються велика кількість методів для гарантування їх надійності та ефективності. Ретельне тестування дозволяє виявляти дефекти ще на ранніх етапах, що значно знижує ймовірність браку на виході з виробництва. Крім того, сучасні технології відкривають нові можливості для автоматизації та підвищення точності діагностики. Частина з методів полягає в структурному аналізі виробу, до них належать візуальна інспекція (за допомогою видимого світла, ультразвуку, рентгенівського випромінювання), термографія (аналіз температурних аномалій, які виникають під час використання приладу), контроль геометрії тощо.

Одним з непрямих методів, який використовують, являє собою електромагнітне сканування. Цей метод ефективно ідентифікує відхилення в характеристиках випромінювання окремих елементів, що може свідчити про наявність дефектів.

В попередніх стандартах основним методом електромагнітного сканування антенних систем був conductive-методу, який полягав у використанні дротового з'єднання від передавачів антенної системи до вимірювального обладнання. Але у випадку 5G через використання mMIMO кількість передавачів/приймачів збільшилась, а їх лінійні розміри зменшились, що значно підвищило складність дротового під'єднання передавально-приймачних елементів, вартість цього процесу, особливо в людських ресурсах, які задіяні, а також в деяких випадках взагалі унеможливило дротове підключення.

Якщо казати про електромагнітне тестування антен без фізичного підключення виділяють два підходи [5]:

Тестування в ближньому полі (Near-Field). Передбачає вимірювання електромагнітного поля поблизу антени, де хвильовий фронт ще не став плоским. Цей метод дозволяє отримати детальну інформацію про розподіл поля, що особливо корисно для складних антенних систем, таких як фазовані решітки. Однак для отримання характеристик у дальньому полі необхідно застосовувати математичні перетворення, наприклад, перетворення Фур'є. Це додає складності до процесу тестування та вимагає високої точності вимірювань.

Тестування в дальньому полі (Far-Field). У дальньому полі електромагнітні хвилі мають плоский фронт, що спрощує аналіз характеристик випромінювання антени. Для забезпечення умов дальнього поля необхідно розмістити антену на відстані, що перевищує дистанцію Фраунгофера, яка визначається за формулою:

$$d = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1)$$

де D – найбільший лінійний розмір антени, λ – довжина хвилі.

Це може вимагати великих анехоїчних (anechoic) камер, особливо для антен, що працюють на міліметрових хвилях.

Найбільш поширеним методом електромагнітного сканування та діагностики антен є REV (Relative Element Value) [6]. Він полягає у вимірюванні амплітуд та фаз сигналів, що випромінюються кожним окремим елементом активної антенної решітки і у порівнянні результуючого поля, створеного антенною, при контрольованій зміні фази або амплітуди одного елемента, у той час як всі інші елементи залишаються незмінними. До переваг цього методу належить насамперед відсутність необхідності в фізичному підключенні та висока точність, але через те, що кожен елемент налаштовується окремо, збільшується час, необхідний для налаштування кожного елемента, що особливо відчутно у Massive MIMO системах.

Загалом тестування через повітря називають Over-The-Air (OTA)-тестування. Воно є ключовим етапом у процесі сертифікації та контролю якості сучасних бездротових пристроїв. OTA-тестування є обов'язковим для 5G-пристроїв, оскільки багато з них мають інтегровані антени без можливості прямого підключення. Такий підхід дозволяє оцінити реальні характеристики випромінювання в умовах, близьких до експлуатаційних. 3GPP (об'єднання телекомунікаційних організацій, яке займається розробкою стандартів для мобільного зв'язку) визначає три основні методи OTA-тестування [7]:

- пряме тестування в дальньому полі (DFF): потребує великої відстані між пристроєм та вимірювальним обладнанням, що може бути непрактично для міліметрових хвиль;

- непряме тестування в дальньому полі (CATR): використовує параболічні рефлектори для створення умов дальнього поля в компактному просторі, що зменшує розміри необхідної камери;

- перетворення з ближнього поля в дальнє (NFTF): застосовує математичні методи для обчислення характеристик дальнього поля на основі вимірювань у ближньому полі [8].

Кожен з цих методів має свої переваги та обмеження, і вибір залежить від конкретних вимог тестування. Порівняння OTA-методів показано в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняння методів OTA-тестування

Метод тестування	Переваги	Недоліки
<i>DFF</i>	Простота реалізації	Великі розміри камери, високі втрати шляху
<i>CATR</i>	Компактність, зменшені втрати	Складність конструкції, висока вартість
<i>NFTF</i>	Можливість тестування в обмеженому просторі	Високі вимоги до точності вимірювань та обчислень

Джерело: розроблено авторами

Оскільки кількість даних отримуваних під час електромагнітного сканування антен збільшується, і питома вага кожного елемента активної антени відповідно зменшується, то класичні математичні методи вже не справляються з вимірюванням, і тому останнім часом почали широко використовувати інтелектуальні методи (ШІ) діагностики, які використовують дані, отримані під час OTA-тестування, для виявлення та прогнозування дефектів у 5G-антенах. Ці методи включають машинне навчання, аналіз великих даних та предиктивну аналітику.

Машинне навчання: класифікація дефектів за допомогою нейронних мереж дозволяє класифікувати дефекти антен на основі аналізу сигналів, отриманих під час

ОТА-тестування. Наприклад, використання глибоких нейронних мереж (DNN) для аналізу базових сигналів у фазі та квадратурі дозволяє швидко та точно виявляти несправні елементи в антенних масивах [2]. Згорткові нейронні мережі (CNN) було запропоновано використовувати для аналізу записаного радіосигналу [9] та діагностики активних антен [10], що дозволяє детектувати тип та характер отриманих даних.

Аналіз великих даних: виявлення закономірностей у виникненні дефектів. Аналіз великих обсягів даних, отриманих під час ОТА-тестування, дозволяє виявляти закономірності та тренди, пов'язані з виникненням дефектів у 5G-антенах, а оскільки характер сигналу, що передається залежить від кожного компоненту передавача, то можна локалізувати причину дефектів сигналу за допомогою використання методів обробки та аналізу даних, таких як кластеризація та асоціативний аналіз.

Предиктивна аналітика: прогнозування відмов антен. Предиктивна аналітика використовує історичні дані ОТА-тестування для прогнозування майбутніх відмов антен. Моделі машинного навчання, такі як регресійний аналіз та дерева рішень, дозволяють передбачити ймовірність виникнення дефектів, що сприяє своєчасному технічному обслуговуванню та зменшенню простой обладнання.

Інтеграція інтелектуальних методів діагностики в процес ОТА-тестування 5G-антен значно підвищує ефективність виявлення та прогнозування дефектів, що сприяє покращенню якості та надійності телекомунікаційного обладнання.

Висновки. В статті було проведено аналіз існуючих методів електромагнітного тестування і засобів телекомунікаційних мереж п'ятого покоління 5G. Встановлено, що впровадження даних систем призвело до ускладнення активних антенних систем і, як наслідок, до ускладнення процесу тестування та діагностики. Порівняння методів електромагнітного тестування та діагностики дозволило визначити їх основні переваги і недоліки. Виявилось, що деякі класичні методи стали неможливими у масовому виробництві, в той же час, як процес електромагнітного тестування потребує вдосконалення та оптимізації. Найбільш перспективними є методи оптимізації з використанням елементів машинного навчання. Тому метою подальших досліджень є розробка автоматичної системи тестування та діагностики, яка буде використовувати інтелектуальні методи.

Список літератури

1. Parini C. G., Gregson S. F. Recent *Advances in Compressive Sensing for Production Test and Antenna Diagnostics of 5G Massive MIMO Antennas* : [презентовано на 2024 Annual Symposium of the Antenna Measurement Techniques Association (AMTA), листопад 2024 р.]. URL: https://nextphasemeasurements.com/wp-content/uploads/2024/11/AMTA_2024_PNF_CS_Paper-ver6.pdf (дата звернення: 13.04.2025).
2. Nielsen M. H., Zhang Y., Xue C., Ren J., Yin Y., Shen M., Pedersen G. F. *Robust and Efficient Fault Diagnosis of mm-Wave Active Phased Arrays using Baseband Signal* // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2022. Vol. 70, No. 7. P. 5044–5053. DOI: [10.1109/TAP.2022.3179898](https://arxiv.org/abs/2306.04360). URL: <https://arxiv.org/abs/2306.04360> (дата звернення: 13.04.2025).
3. Sultan A. *5G System Overview* / 3GPP. (Серпень 2022). URL: <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview> (дата звернення: 14.04.2025).
4. Raj T., Mishra R., Kumar P., Kapoor A. *Advances in MIMO Antenna Design for 5G: A Comprehensive Review*. Sensors. 2023. Vol. 23, No. 14. Article ID 6329. DOI: [10.3390/s23146329](https://www.mdpi.com/1424-8220/23/14/6329). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/14/6329> (дата звернення: 14.04.2025).
5. LitePoint. *LitePoint's Complete Guide to 5G OTA Testing*. 2019. URL: <https://www.litepoint.com/wp-content/uploads/2019/07/5G-OTA-article-060419-web.pdf> (дата звернення: 12.04.2025).
6. Mano S., Katagi T. *A method for measuring amplitude and phase of each radiating element of a phased array antenna* // Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications). 1982. Vol. 65, No. 5. P. 52–59. DOI: [10.1002/ecja.4410650508](https://doi.org/10.1002/ecja.4410650508).
7. 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network. NR Base Station (BS) Conformance Testing Part 2: Radiated Conformance Testing. Release 15. TS 38.141-2 V15.6.0. 2020.
8. Lin L., Loughran K., Bondarchuk V. *OTA Test and Calibration of Millimeter Wave Antenna Arrays*. *Microwave Journal*. (Серпень 2024). URL: <https://www.microwavejournal.com/articles/42445-ota-test-and-calibration-of-millimeter-wave-antenna-arrays> (дата звернення: 17.04.2025).
9. O'Shea T. J., Corgan J., Clancy T. C. *Convolutional Radio Modulation Recognition Networks*. arXiv preprint arXiv:1602.04105. 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1602.04105> (дата звернення: 15.04.2025).

10. Zheng G., Zhang Q., Li S. Failure Diagnosis of Antenna Array Using Residual Convolutional Neural Network. 2021 International Applied Computational Electromagnetics Society (ACES-China) Symposium. 2021. P. 1–2. DOI: [10.23919/ACES-China52398.2021.9581935](https://doi.org/10.23919/ACES-China52398.2021.9581935)

References

1. Parini, C. G., & Gregson, S. F. (2024, November). *Recent advances in compressive sensing for production test and antenna diagnostics of 5G massive MIMO antennas*. Presented at the 2024 Annual Symposium of the Antenna Measurement Techniques Association (AMTA). https://nextphasemeasurements.com/wp-content/uploads/2024/11/AMTA_2024_PNF_CS_Paper-ver6.pdf
2. Nielsen, M. H., Zhang, Y., Xue, C., Ren, J., Yin, Y., Shen, M., & Pedersen, G. F. (2022). Robust and efficient fault diagnosis of mm-wave active phased arrays using baseband signal. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(7), 5044–5053. <https://arxiv.org/abs/2306.04360>
3. Sultan, A. (2022, August). *5G system overview*. 3GPP. <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview>
4. Raj, T., Mishra, R., Kumar, P., & Kapoor, A. (2023). Advances in MIMO antenna design for 5G: A comprehensive review. *Sensors*, 23(14), 6329. <https://doi.org/10.3390/s23146329>
5. LitePoint. (2019). *LitePoint's complete guide to 5G OTA testing*. <https://www.litepoint.com/wp-content/uploads/2019/07/5G-OTA-article-060419-web.pdf>
6. Mano, S., & Katagi, T. (1982). A method for measuring amplitude and phase of each radiating element of a phased array antenna. *Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications)*, 65(5), 52–59. <https://doi.org/10.1002/ecja.4410650508>
7. 3GPP. (2020). *NR base station (BS) conformance testing Part 2: Radiated conformance testing* (TS 38.141-2 V15.6.0; Release 15).
8. Lin, L., Loughran, K., & Bondarchuk, V. (2024, August). OTA test and calibration of millimeter wave antenna arrays. *Microwave Journal*. <https://www.microwavejournal.com/articles/42445-ota-test-and-calibration-of-millimeter-wave-antenna-arrays>
9. O'Shea, T. J., Corgan, J., & Clancy, T. C. (2016). Convolutional radio modulation recognition networks. *arXiv preprint arXiv:1602.04105*. <https://arxiv.org/abs/1602.04105>
10. Zheng, G., Zhang, Q., & Li, S. (2021). Failure diagnosis of antenna array using residual convolutional neural network. In *2021 International Applied Computational Electromagnetics Society (ACES-China) Symposium* (pp. 1–2). <https://doi.org/10.23919/ACES-China52398.2021.9581935>

Viktor Bondarchuk, Anatolii Matsui, Prof., Dr. tech. sci., **Viktor Kalich**, Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Analysis of Electromagnetic Testing and Defect Detection Tools for 5G Generation Radio Antennas

The purpose of this article is to review the key elements of fifth-generation (5G) wireless systems and the methods used for electromagnetic testing and defect detection of active antenna systems. Due to the introduction of massive MIMO technologies and millimeter-wave (mmWave) communication in 5G networks, traditional testing approaches are no longer effective, prompting the need for new non-invasive methods. The article aims to analyze current approaches to post-production non-invasive testing of active antenna systems and explore the potential of machine learning elements to enhance the efficiency of defect detection.

The study begins with an overview of the technological features of 5G systems, including the use of millimeter-wave frequency bands, massive MIMO antenna arrays, and beamforming techniques, which have increased the complexity of telecommunication equipment. A classification of electromagnetic testing methods is provided, comparing conductive testing methods with non-invasive Over-The-Air (OTA) techniques such as Direct Far-Field (DFF), Compact Antenna Test Range (CATR), and Near-Field to Far-Field (NFTF) transformations. The paper also discusses the use of electromagnetic scanning, including Relative Element Value (REV) methods, for diagnosing antenna defects without physical connections. Given the increasing volume of testing data, the work highlights the integration of machine learning techniques, including deep neural networks and convolutional networks, for defect classification, big data analysis for pattern detection, and predictive analytics for forecasting antenna failures. Special attention is given to how artificial intelligence methods enhance the effectiveness and accuracy of defect diagnosis in modern 5G systems.

In conclusion, the study shows that the growing complexity of active antenna systems in 5G networks necessitates the evolution of testing methodologies. Traditional conductive approaches are no longer viable for large-scale production, and non-invasive OTA testing has become the standard. Electromagnetic scanning, combined with machine learning techniques, significantly improves defect detection rates and diagnostic accuracy. Integrating intelligent diagnostic methods into the 5G antenna testing process enables better quality control, reduced production losses, and enhanced reliability of telecommunication equipment.

5G, electromagnetic testing, OTA testing, machine learning, defect detection

Одержано (Received) 11.04.2025

Прорецензовано (Reviewed) 25.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 02.05.2025