DOI 10.15276/imms.v16.no1.135
УДК 621.396.67

Informatics and Mathematical Methods in Simulation
Vol.16 (2026), No. 1, pp. 135-145

МОДЕЛЮВАННЯ АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЛІНІЙНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ

А.В. Садченко, О.А. Кушніренко, О.В. Троянський

Національний університет «Одеська політехніка»
1, Шевченка пр., Одеса, 65044, Україна
Email: koa@op.edu.ua

Досліджено вплив часткового вимкнення випромінювачів лінійної антенної решітки на форму її діаграми спрямованості. Актуальність роботи зумовлена потребою зниження енергоспоживання антенних систем, що працюють в автономних або енергетично обмежених умовах, таких як мобільні радіолокаційні комплекси та безпілотні літальні апарати. Запропоновано критерії оцінювання якості діаграми спрямованості – відносний рівень бокового випромінювання та зменшення амплітуди головного пелюстка. Для синтезу діаграм спрямованості використано дискретне перетворення Фур'є, а об'єктом моделювання стала лінійна еквідистантна решітка з 90 елементів. Результати показали, що вимкнення елементів у центральній частині антенної решітки призводить до суттєвих спотворень діаграми спрямованості, тоді як вимкнення крайових елементів має мінімальний вплив. Встановлено, що характер зміни рівня бокових пелюстків та середньоквадратичного відхилення визначається законом амплітудного розподілу поля в розкриві решітки. Отримані емпіричні залежності дозволяють оцінювати вплив кількості та розташування вимкнених елементів без повного перерахунку діаграми спрямованості та можуть бути використані для розробки алгоритмів адаптивного керування енергоспоживанням фазованих антенних решіток. Додатково у роботі запропоновано аналітичні апроксимації залежностей, що дозволяють швидко оцінювати спотворення діаграми спрямованості. Результати моделювання можуть бути інтегровані у системи реального часу для оптимізації конфігурації решітки залежно від доступної енергії. Сформульований підхід створює підґрунтя для подальших досліджень адаптивних методів керування фазованими антенними решітками у складних умовах експлуатації.
Ключові слова: фазована антена решітка, діаграма спрямованості, бокове випромінювання, енергоспоживання, відключення елементів, амплітудний розподіл, дискретне перетворення Фур'є, моделювання, адаптивне керування.

Вступ. Фазовані антенні решітки (ФАР) посідають ключове місце в сучасних радіоелектронних системах зв'язку, радіолокації та навігації, забезпечуючи можливість формування та динамічного керування діаграмою спрямованості без механічного переміщення антени [1, 2]. Типова ФАР може містити від кількох сотень до кількох тисяч випромінювальних каналів [3], кожен з яких включає атенюатор, фазообертач та випромінювач. Така складність структури забезпечує високі експлуатаційні характеристики, проте водночас істотно підвищує енергоспоживання системи [4–7].

Однією з актуальних задач під час роботи лінійних та фазованих антенних решіток є оптимізація споживаної потужності, що набуває особливого значення у випадках, коли антенна система живиться від автономних джерел енергії – наприклад, у безпілотних літальних апаратах, мобільних комплексах спостереження чи автономних радіолокаційних станціях. Обмежені енергетичні ресурси таких платформ вимагають від антенних систем максимальної ефективності роботи при мінімальних витратах енергії.

Одним із підходів до зниження енергоспоживання є вимкнення частини елементів решітки [8–10], що неминуче призводить до певного погіршення напрямних характеристик, зокрема збільшення рівня бічних пелюсток та зменшення коефіцієнта посилення. Проте за умови правильного вибору конфігурації вимкнених каналів це

погіршення може бути мінімізоване, що відкриває можливість пошуку компромісу між енергетичною ефективністю та якістю формованої діаграми спрямованості [11,12].

Таким чином, дослідження методів часткового вимкнення каналів ФАР без істотної втрати їх функціональних властивостей є важливим напрямом оптимізації сучасних антенних систем, особливо для мобільних та енергетично обмежених застосувань.

Метою даної статті є встановлення кількісної залежності між кількістю та просторовим розташуванням вимкнених каналів лінійної антенної решітки та ступенем погіршення її напрямних характеристик. Особлива увага приділяється оцінюванню змін рівня бокового випромінювання та зниженню амплітуди головного пелюстка при відключенні елементів у різних частинах лінійної решітки.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

– визначити критерії оцінювання якості діаграми спрямованості за відносним рівнем бокового випромінювання та зниженням рівня головного пелюстка при відключенні елементів решітки;

– розробити математичний підхід до моделювання впливу вимкнення каналів, використовуючи дискретне перетворення Фур'є для синтезу діаграми спрямованості;

– провести моделювання для лінійної еквідистантної решітки з 90 елементів, визначивши амплітудно-фазовий розподіл поля в робочому режимі;

– дослідити вплив вимкнення елементів у різних ділянках решітки (у центрі та на краях) на спотворення діаграми спрямованості та виявити закономірності зміни рівня бокових пелюстків та ширини і амплітуди головного пелюстка;

– побудувати залежність рівня бокового випромінювання від індексу вимкненого елемента, використовуючи модель ідеальної діаграми спрямованості;

– проаналізувати результати моделювання та визначити зони розміщення елементів, вимкнення яких мінімально впливає на форму діаграми спрямованості.

Критерії оцінювання якості діаграми спрямованості. Як основні критерії якості лінійної антенної решітки [13] у дослідженні використовуються відносний рівень бокового випромінювання та зниження рівня головного пелюстка. Ці показники дозволяють кількісно оцінити вплив відключення певних каналів на форму діаграми спрямованості та загальну ефективність роботи решітки.

Відносний рівень бокового випромінювання визначає, наскільки інтенсивними є побічні пелюстки порівняно з головним максимумом, і характеризується співвідношенням [14]:

$$\zeta = 20Lg\left(\frac{F(\Theta_{b.\max})}{F(0)}\right),$$

де ζ – значення відносного рівня бокового випромінювання;

$F(\Theta_{b.\max})$ – значення амплітудної функції діаграми спрямованості у напрямку максимуму бокового пелюстка;

$F(0)$ – значення амплітудної функції діаграми спрямованості у напрямку головного максимуму.

Зниження рівня головного пелюстка визначається як:

$$\Delta F = \sqrt{F_{зад}^2(0) - F_{мод}^2(0)},$$

де $F_{зад}^2(0)$ – максимальне значення заданої (необхідної) амплітудної діаграми спрямованості;

$F_{мод}^2(0)$ – максимальне значення модифікованої амплітудної діаграми спрямованості після відключення окремих каналів.

Синтез діаграми спрямованості також виконаємо методом дискретного перетворення Фур'є [15–17].

Як об'єкт дослідження розглянемо лінійну рівновіддалену антенну решітку, що складається з 90 елементів.

Діаграма спрямованості решітки, а також амплітудний і фазовий розподіл поля, розраховані в середовищі *MATLAB*, наведені на рисунку 1.

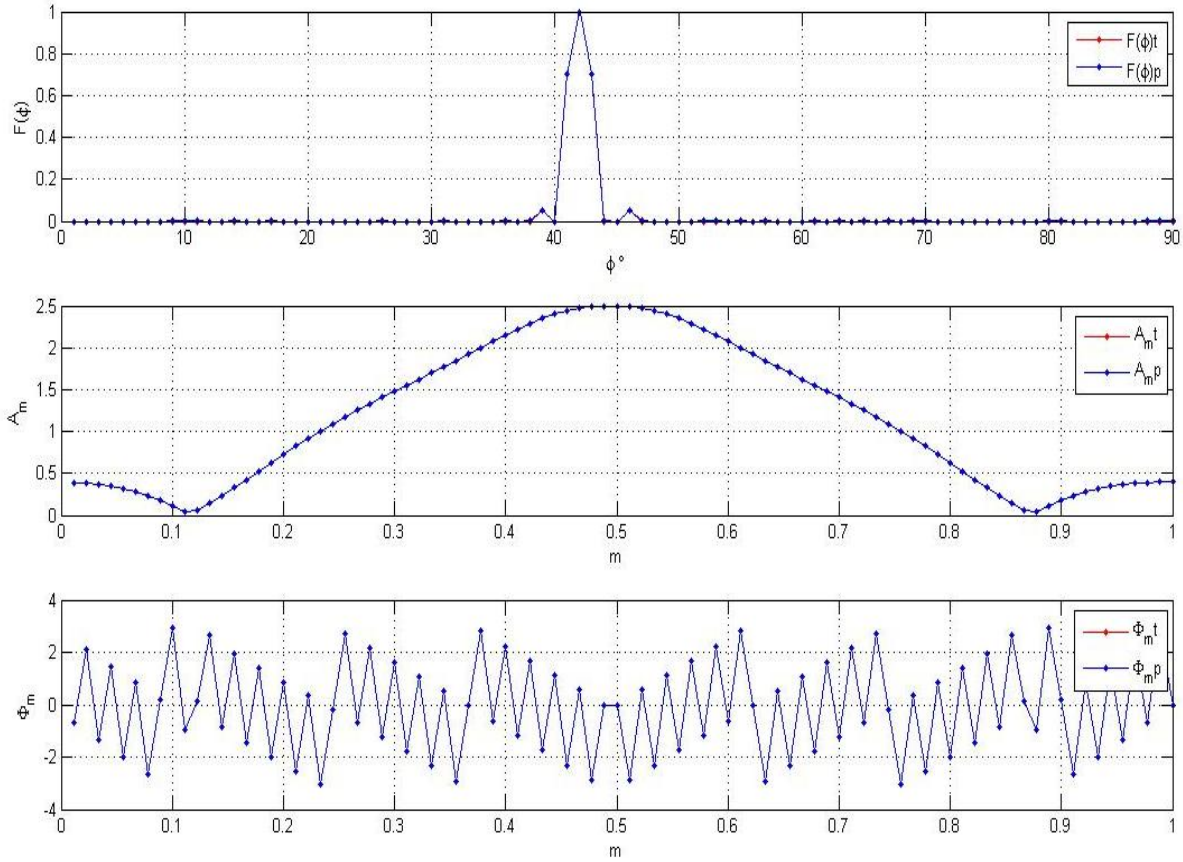

Рис. 1. Діаграма спрямованості, а також амплітудний і фазовий розподіл поля для лінійної антенної решітки з кількістю елементів $N = 90$

Відключення окремих каналів у процесі моделювання здійснюватимемо шляхом обнуління амплітудних та фазових коефіцієнтів елементів із відповідними номерами. Вимоги до забезпечення низького рівня бокового випромінювання зумовлюють застосування спадного до країв закону амплітудного розподілу.

Такий підхід призводить до появи вираженої залежності між тим, які саме елементи відключаються, та тим, яким буде ступінь спотворення діаграми спрямованості**.**

Зокрема, відключення випромінювачів, розташованих у центральній частині решітки**,** призводить до більш істотних деформацій діаграми спрямованості, ніж відключення елементів на периферії. Це пов’язано з тим, що центральні елементи роблять найбільший внесок у формування головного пелюстка, тоді як крайові елементи переважно впливають на рівень бокових пелюстків.

Для ілюстрації цього ефекту на рисунку 2 наведено приклад спотворення діаграми спрямованості у випадку відключення 10 випромінювачів, розміщених у центрі антенної решітки.

Приклад спотворення діаграми спрямованості у разі відключення 10 випромінювачів, розташованих по краях решітки, наведено на рисунку 3.

Із порівняння рисунків 2 і 3 видно, що спотворення форми діаграми спрямованості при відключенні 10 крайніх випромінювачів є незначними. Натомість вимкнення випромінювачів у центральній частині решітки призводить до суттєвого збільшення рівня бокового випромінювання, розширення головного пелюстка та зниження його амплітуди.

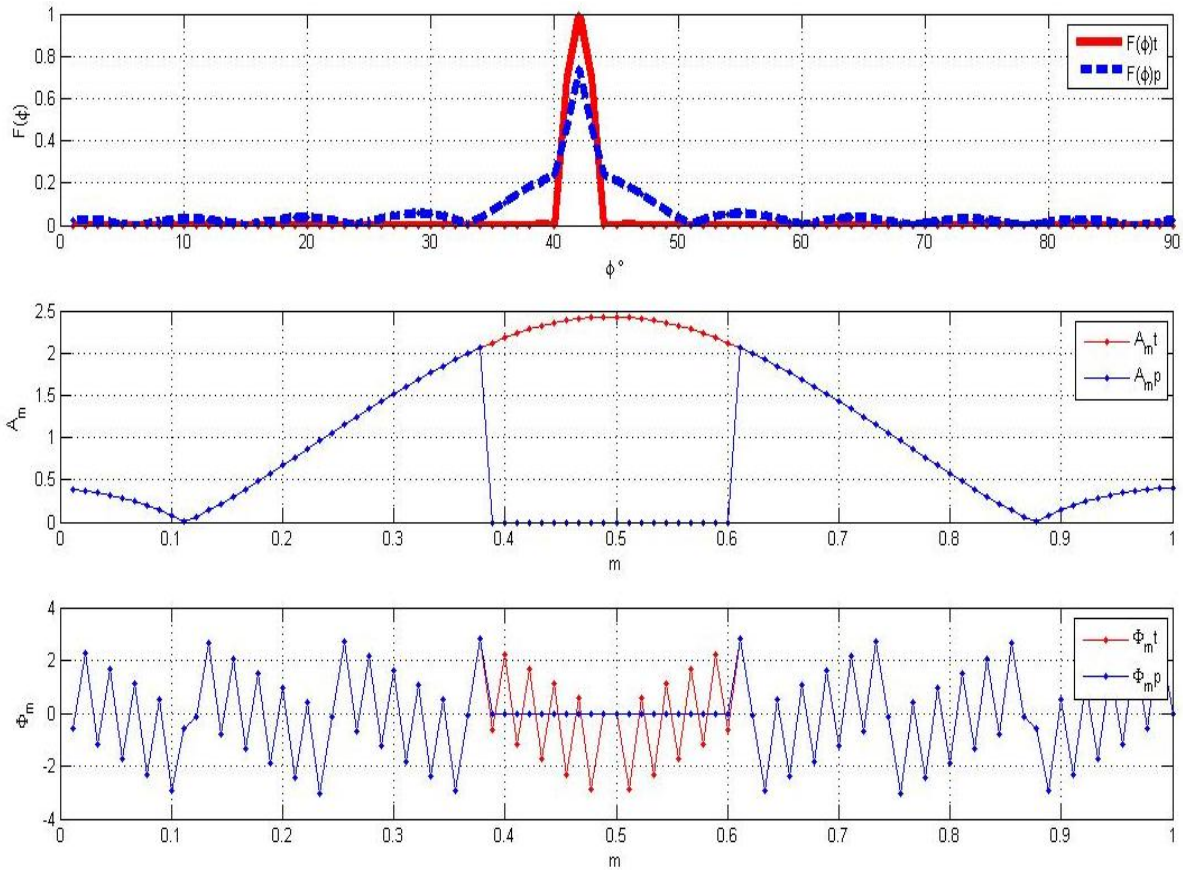

Рис. 2. Спотворення діаграми спрямованості решітки при відключенні випромінювачів у центральній частині решітки

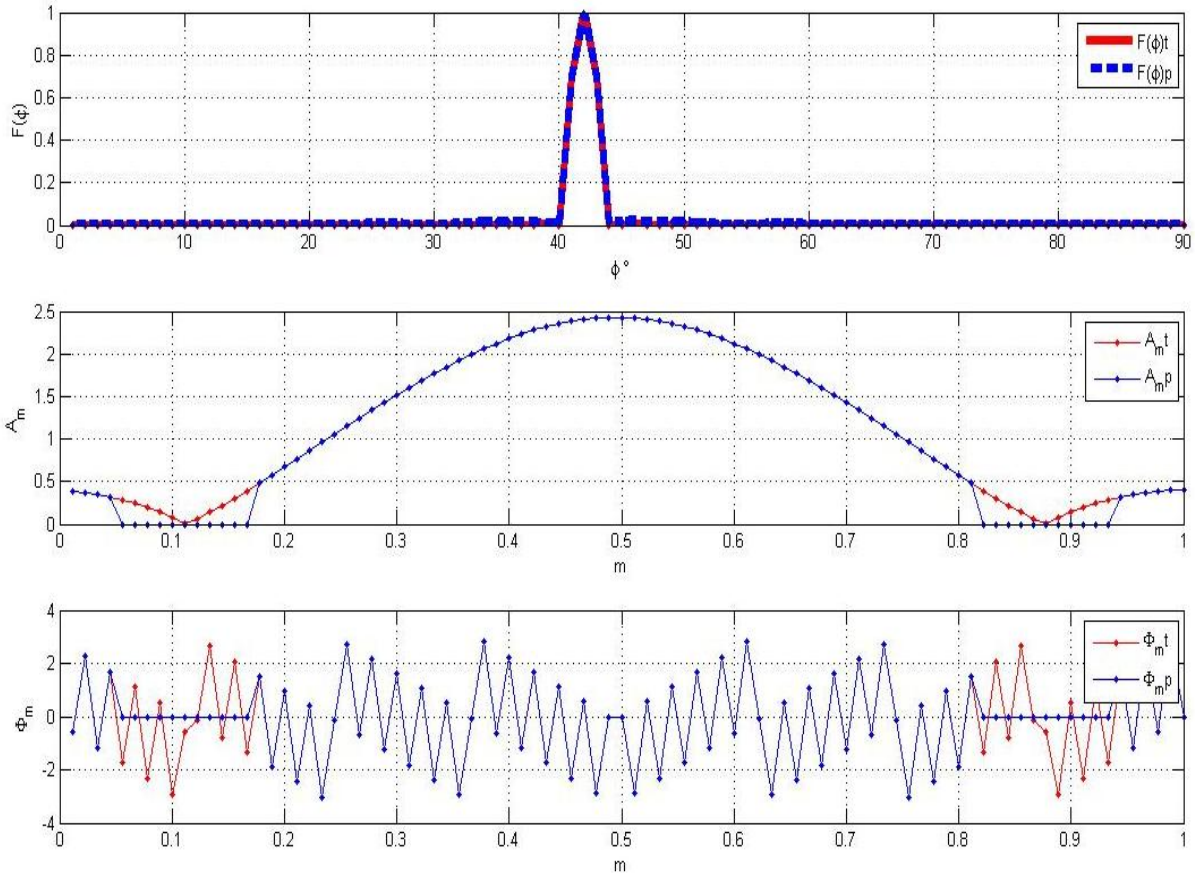

Рис. 3. Спотворення діаграми спрямованості решітки при відключенні 10 випромінювачів, розташованих по краях решітки

Визначимо залежність рівня бокових пелюстків від положення відключеного випромінювача в антенній решітці. Для цього задається діаграма спрямованості ідеальної форми – така, що містить лише головний пелюсток. Закон розподілу поля в апертурі решітки для ідеальної діаграми спрямованості наведено на рисунку 4.

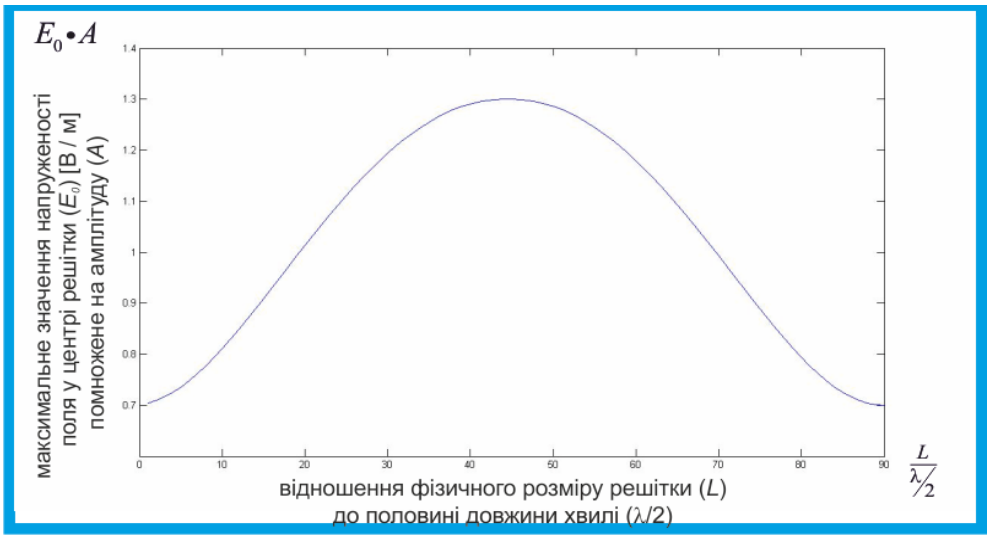

Рис. 4. Закон розподілу поля в розсуві антенної решітки, що містить 90 елементів при умові відповідності розрахункової формі діаграми спрямованості

Результати моделювання залежності рівня бічного випромінювання від положення одного вимкненого випромінювача на лінійній антенній решітці з 90 елементів наведено на рисунку 5.

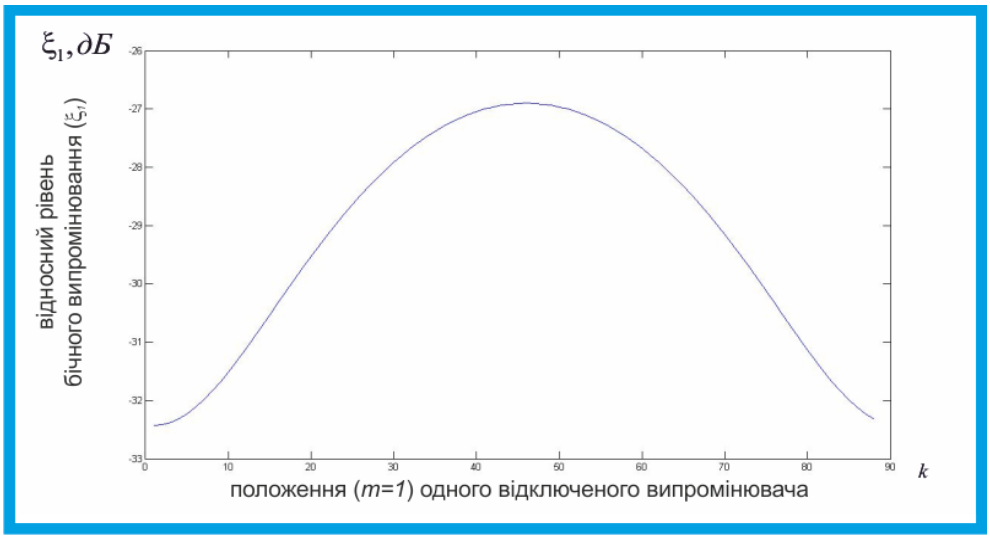

Рис. 5. Залежність рівня бокового випромінювання від положення одного вимкненого випромінювача на лінійній антенній решітці з 90 елементів

Максимальний рівень бічних пелюстків (РБП), що складає приблизно –27 дБ відповідає положенню в центрі решітки.

Розглянемо тепер вплив на рівень бічних пелюсток більшої кількості вимкнених випромінювачів.

Результати моделювання залежності рівня бічного випромінювання від положення десяти вимкнених випромінювачів на лінійній антенній решітці з 90 елементів наведено на рисунку 6.

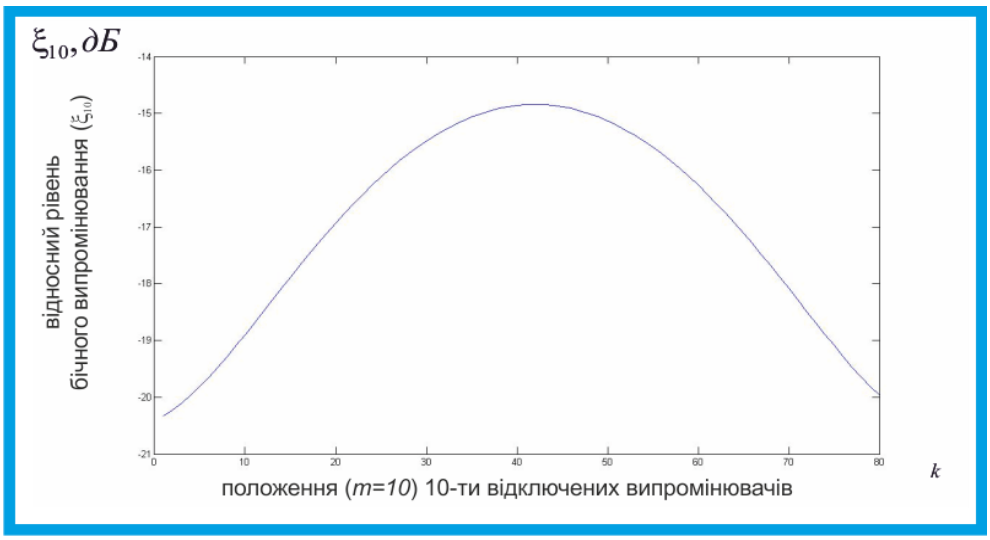

Рис. 6. Залежність рівня бокового випромінювання від положення 10 відключених випромінювачів на лінійній антенній решітці з 90 елементів

Порівняння рисунків 4, 5 та 6 показує ідентичність кривих. Отже, закон зміни рівня бічних пелюсток при відключенні випромінювачів визначається законом розподілу поля у розкриві решітки.

Визначимо вплив кількості відключених випромінювачів на рівень бічних пелюсток. Відповідну залежність показано на рисунку 7. Відключення проводилося симетрично з двох країв решітки.

Отриману залежність можна апроксимувати наступним виразом:

$$\xi_{\max}(m), дБ = (1 - e^{\frac{m}{\xi_{\min}}})\xi_{\min} + \xi_{\min}, m = \overline{0, N}$$

де m – число відключених випромінювачів;

$\xi_{\min}$ – мінімальний рівень бічних пелюсток для цього виду закону розподілу поля в розкриві.

Визначимо залежність середньоквадратичного відхилення (СКВ)отриманої та заданої діаграм спрямованості від положення відключеного випромінювача на решітці.

Для цього також поставимо діаграму спрямованості ідеальної форми – що складається тільки з головної пелюстки. Результати моделювання наведено на рисунку 8 та рисунку 9.

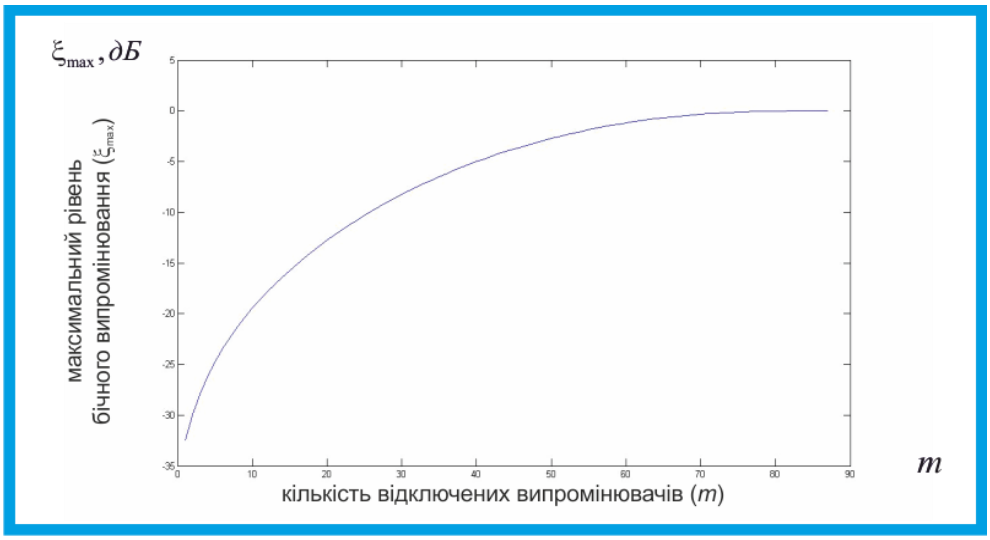

Рис. 7. Залежність РБП від кількості вимкнених випромінювачів у решітці

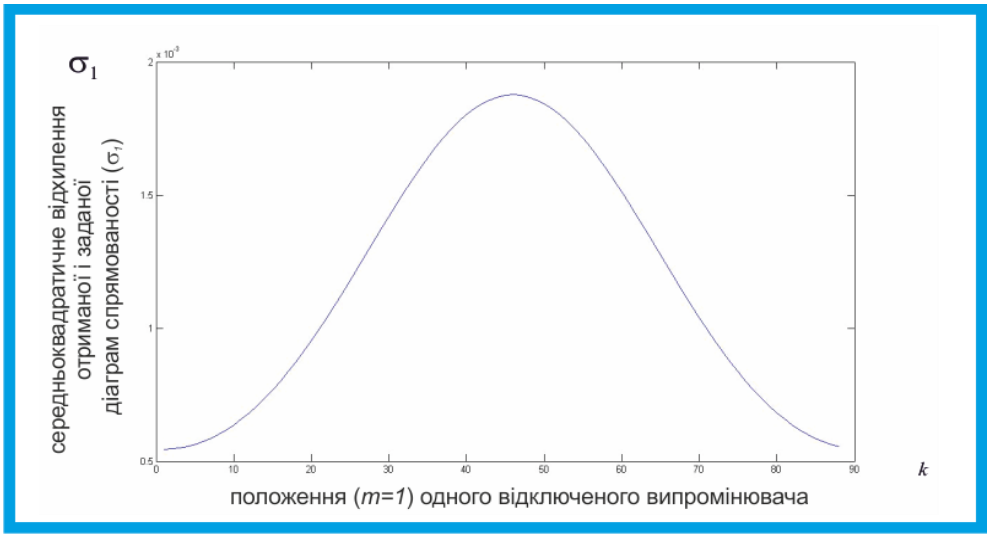

Рис. 8. Залежність середньоквадратичного відхилення отриманої та заданої діаграм спрямованості від положення одного відключеного випромінювача на лінійній антенній решітці з 90 елементів

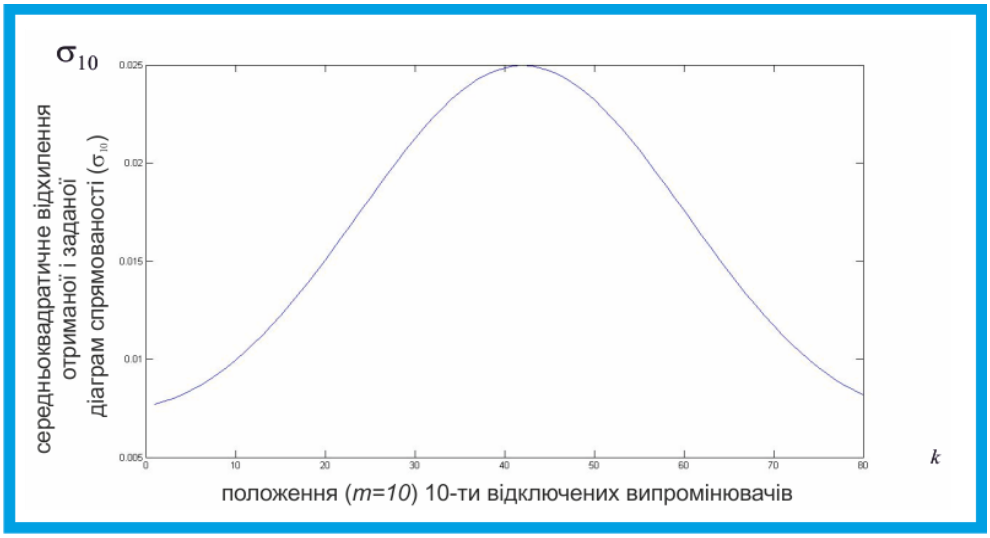

Рис. 9. Залежність середньоквадратичного відхилення отриманої та заданої діаграм спрямованості від положення 10-ти відключених випромінювачів на лінійній антенній решітці з 90 елементів

Порівняння графіків на рис. 8, 9 також показує ідентичність кривих. Отже, закон зміни СКВ, як і рівня бічних пелюсток при відключенні випромінювачів, визначається законом розподілу поля в розкриві решітки.

Визначимо вплив числа відключених випромінювачів на СКВ. Відповідну залежність показано на рисунку 10. Відключення проводилося симетрично з двох країв решітки.

Отриману залежність можна апроксимувати наступним виразом:

$$\delta(m) = \frac{m^2}{N^2}, m = \overline{0, N}$$

де m – число відключених випромінювачів;

N –розмір решітки.

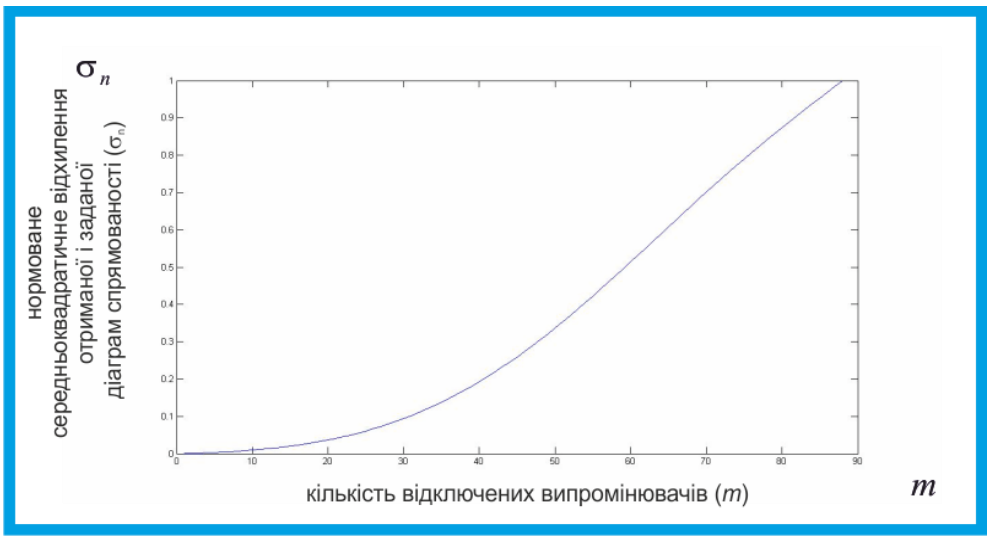

Рис. 10. Залежність нормованого СКВ від кількості вимкнених випромінювачів у решітці

Алгоритм адаптації решітки. З урахуванням проведених досліджень запропоновано наступний алгоритм адаптації ФАР по критерію заданої чи мінімальної потужності.
Початкові дані: необхідна форма діаграми спрямованості та допустимі величини рівня бічних пелюстків - $\xi_д$ та СКВ - $\sigma_д$.

Крок 1. Синтез амплітудних та фазових коефіцієнтів лінійної антенної решітки з використанням дискретного перетворення Фур'є.

Крок 2. Вимкнення (обнуління) m амплітудних коефіцієнтів у відповідності до заданих функціональних залежностей:

$$\xi_{\max} = f(m), \quad \sigma = f(m).$$

Крок 3. Обчислення діаграми спрямованості за модифікованими амплітудними та фазовими коефіцієнтами.

Крок 4. Обчислення середньоквадратичного відхилення та рівня бічних пелюстків для синтезованої діаграми спрямованості.

Крок 5. Перевірка умови чи $\xi < \xi_д$, $\sigma < \sigma_д$:

– якщо умова виконується, збільшуємо значення розміру «ковзного» вікна (кількості відключених випромінювачів) $m = m + 1$ і переходимо на крок 2;

– якщо ні –завершуємо синтез решітки.

Запропонований алгоритм дозволяє конвертувати допустимі втрати в коефіцієнті посилення і рівні бічних пелюстків в кількість та положення вимкнених випромінювачів, що, в свою чергу, дозволить збільшити час автономної роботи радіоелектронного пристрою із антеною решіткою.

Висновки. Проведено комплексне дослідження впливу часткового вимкнення випромінювачів у лінійній фазованій антенній решітці на її напрямні характеристики. Отримані результати дозволяють глибоко оцінити взаємозв'язок між конфігурацією активних елементів, законом амплітудного розподілу поля в апертурі та якістю сформованої діаграми спрямованості.

Передусім було визначено, що вибір критеріїв оцінювання – відносного рівня бокового випромінювання та зниження амплітуди головного пелюстка – дає можливість об'єктивно характеризувати спотворення, що виникають під час часткового відключення елементів решітки. Ці показники є достатньо інформативними для практичних задач оптимізації енергоспоживання, особливо у випадках використання фазованих решіток в автономних або енергетично обмежених системах.

Проведене моделювання в середовищі *MATLAB* показало, що ступінь впливу відключення конкретного елемента суттєво залежить від його положення у структурі антенної решітки. Найбільші деформації діаграми спрямованості спостерігаються при

вимкненні центральних випромінювачів, які забезпечують основний внесок у формування головного пелюстка. Для таких випадків характерне різке збільшення рівня бокових пелюстків, розширення головного пелюстка та помітне зменшення його амплітуди.

На відміну від цього, відключення крайових елементів практично не призводить до значних спотворень. Діаграма спрямованості зберігає форму, а зростання рівня бокового випромінювання є мінімальним. Це підтверджується як візуальним порівнянням графічних залежностей, так і аналізом числових значень рівнів бічних пелюстків та середньоквадратичного відхилення між отриманою та заданою діаграмами.

Додаткове моделювання із застосуванням ідеальної діаграми спрямованості показало, що зміни рівня бокового випромінювання та середньоквадратичного відхилення повністю визначаються законом амплітудного розподілу поля в апертурі антенної решітки. Тобто, форма залежності цих показників від положення вимкненого елемента повторює форму розподілу амплітуд у розкриві. Це дозволяє зробити важливий висновок: оптимальне керування енергоспоживанням ФАР повинно здійснюватися з урахуванням амплітудного профілю розкриву, а саме – відключення мають виконуватися насамперед у тих зонах, де амплітудний внесок елементів мінімальний.

Отримані експериментальні залежності впливу кількості відключених елементів на рівень бокових пелюстків та середньоквадратичне відхилення дозволили сформувати апроксимаційні формули, що можуть бути використані при проектуванні алгоритмів адаптивного керування конфігурацією ФАР. Це створює можливість прогнозувати погіршення напрямних властивостей без виконання повного спектрального синтезу, що є важливою перевагою для систем реального часу.

У підсумку можна стверджувати, що часткове відключення елементів антенної решітки є ефективним засобом зниження її енергоспоживання, за умови дотримання визначених закономірностей розміщення деактивованих елементів. Найбільш придатними для вимкнення є крайові зони, тоді як центральна область повинна залишатися максимально активною. Розроблений підхід та отримані залежності можуть бути використані для створення алгоритмів динамічної адаптації фазованих антенних решіток, здатних забезпечити заданий компроміс між якістю діаграми спрямованості та рівнем споживаної потужності.

Список літератури

1. Шевченко А., Піскунов С., Кригін, О., Назаров, В., Прохоренко С. Аналіз характеристик спрямованості фазованих антенних решіток з осьовою симетрією з гармонічним та негармонічним збудженням. *Випробування та сертифікація*. 2025. №1(7), С.94-104. URL: https://doi.org/10.37701/ts.07.2025.11.
2. Дудуш А. С., Стернат Д. О., Вішарь О. С. Методика дослідження фазованих антенних решіток у системі автоматизованого проектування CST Studio Suite. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України.* 2024. № 1 (54). С. 44-49. URL: https://doi.org/10.30748/nitps.2024.54.06.
3. Hirtenfelder F. Effective Antenna Simulations using Cst Microwave Studio. *2nd International ITG Conference on Antennas*. 2007. P. 239. URL: https://doi.org/10.1109/INICA.2007.4353972.
4. Rütschlin M., Wittig T., Iluz Z. Phased antenna array design with Cst Studio Suite. *10th European Conference on Antennas and Propagation*. 2016. P. 1–5. URL: https://doi.org/10.1109/EuCAP.2016.7481530.
5. Rütschlin M., Tallini D. Simulation for antenna design and placement in vehicles. Antennas, Propagation & RF Technology for Transport and Autonomous Platforms. 2017. P. 1–5. URL: https://doi.org/10.1049/ic.2017.0021.
6. Emadeddin A., Jonsson B. L. G. A New Unit-Cell Architecture Applied to Active Wide-Angle Scanning Phased Array. *15th European Conference on Antennas and Propagation,* 2021. P. 1–4. URL: https://doi.org/10.23919/EuCAP51087.2021.9411390.

7. Weiland T., Timm M., Munteanu I. A practical guide to 3-D simulation. *IEEE Microwave Magazine*. 2008. V. 9. No. 6. P. 62–75. URL: https://doi.org/10.1109/MMM.2008.929772.
8. Understanding Time Domain Meshing in CST MICROWAVE STUDIO®. URL: https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=578c450ceeae3937441b63a1&assetKey=AS%3A385033333428224%401468810508239.
9. Electromagnetic systems modeling. Dassault Systems. URL: https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/electromagnetic-systems/
10. Williams J. S. Electronic Scanned Array Design. *SciTech Publishing*, 2020. 331 p.
11. Chen S., Schmiedel H. RF Antenna Beam Forming. Focusing and Steering in Near and Far Field. *Springer*. 2023. 141 p. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-67081-7_5.
12. Wang W.Q. Frequency Diverse Array Antenna: New Opportunities. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2015. V. 57. No.2. P. 145-152. URL: https://doi.org/10.1109/MAP.2015.2414692.
13. Liu G., Huang H., Wang W.Q. Frequency diverse array radar in counteracting mainlobe jamming signals. *IEEE Radar Conference*. 2017. P. 1228-1232. URL: https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944392.
14. Zhu Y., Liu L., Lu Z., Zhang S. Target Detection Performance Analysis of FDA-MIMO Radar. *IEEE Access*. 2019. V. 7. P. 164276-164285. URL: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2943082.
15. Карлов В.Д., Леонов І.Г., Лукашук О.В., Шевченко А.Ф. Метод математичного моделювання характеристик спрямованості вісесиметричних активних антенних решіток (на прикладі кругової циліндричної антенної решітки великих електричних розмірів). *Системи озброєння і військова техніка*. 2008. №1(13). С. 97-102. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2008_1_23.
16. Çetiner R., Hizal A., Tiğrek R. F., Narrow band wide angle scanning circular FDA radar. *European Radar Conference*. 2017. P. 231-234. URL: https://doi.org/10.23919/EURAD.2017.8249189.
17. Li W., Cui C., Ye X., Shi X., So H. Quasi-Time-Invariant 3-D Focusing Beampattern Synthesis for Conformal Frequency Diverse Array. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2020, V. 68. No. 4. P. 2684-2697. URL: https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2955199.

MODELING OF THE ALGORITHM FOR OPTIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION OF A LINEAR ANTENNA ARRAY

A.V. Sadchenko, O.A. Kushnirenko, O.V. Troyanskiy

National Odesa Polytechnic University
1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine
Email: koa@op.edu.ua

The article investigates the influence of partial deactivation of radiating elements in a linear phased antenna array on the shape of its radiation pattern. The relevance of this work is driven by the need to reduce the power consumption of antenna systems operating in autonomous or energy-constrained environments, such as mobile radar complexes and unmanned aerial vehicles. The study proposes criteria for evaluating radiation pattern quality, namely the relative sidelobe level and the reduction of the main lobe amplitude. The radiation pattern synthesis is performed using the discrete Fourier transform, and the modeled object is a linear equidistant array consisting of 90 elements. The results demonstrate that disabling elements in the central region of the array leads to significant distortions of the radiation pattern, whereas deactivating edge elements has a minimal effect. It is shown that the behavior of the sidelobe level and the root-mean-square deviation is determined primarily by the amplitude distribution law in the array aperture. The obtained empirical relationships make it possible to evaluate the impact of the number and position of deactivated elements without a full recompilation of the radiation pattern and can be used for developing adaptive power-management algorithms for phased antenna arrays. Additionally, analytical approximations of key dependencies are proposed, enabling rapid assessment of pattern distortions. The modelling results can be integrated into real-time systems for optimizing array configuration based on available energy resources. The presented approach provides a foundation for further research on adaptive control methods for phased antenna arrays under complex operating conditions.

Keywords: phased antenna array, radiation pattern, sidelobe level, power consumption, element deactivation, amplitude distribution, discrete Fourier transform, modelling; adaptive control.