

АНТЕННІ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ АНТЕННИХ РЕШІТОК: СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ ТА НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ

Інститут технічної механіки

*Національної академії наук України і Державного космічного агентства України
вул. Ляшко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: Irysjska@email.ua*

Антенні решітки – це системи, які складаються з великої кількості антенних елементів, що дозволяють формувати, керувати та скеровувати промінь без фізичного руху антени. Основна концепція антенних решіток полягає у використанні групи окремих антен, кожний елемент якої може змінювати фазу або амплітуду сигналу, що випромінюється. Завдяки цьому з'являється можливість направлено випромінювання та керування кутом основної пелюстки діаграми спрямованості антенної системи. Використання антенних решіток поширене у багатьох сферах, таких як військові радары, супутниковий зв'язок, системи безпеки, Інтернет речей та мобільні комунікації.

Метою даної роботи є аналіз можливостей використання антенних систем на основі антенних решіток та оцінка сучасних тенденцій і напрямів їхнього розвитку.

У статті розглядаються різні види та методи керування антенними решітками, порівнюються їхня ефективність та придатність для використання в різних сферах, зокрема й в системах безпілотних літальних апаратів. Прислідється увага типам антенних решіток, таким як лінійні та плоскі фазовані решітки, а також методам сканування — від цифрових методів до аналогових підходів. У статті також порівнюються методи керування фазою та амплітудою, які включають механічне, цифрове та адаптивне управління антенними решітками. Дані методи дають змогу забезпечити високоточне сканування без фізичного руху антени. Враховується, як ці методи впливають на енергоспоживання, швидкість переміщення сигналу та точність керування. Новизна статті полягає у глибокому порівнянні різних типів антенних решіток та методів керування ними з акцентом на їхнє застосування в умовах динамічного середовища, особливо характерного для безпілотних літальних апаратів. Пропонуються рішення для оптимізації конструкцій антенних решіток, які можуть бути використані у майбутніх системах безпілотних літальних апаратів для покращення якості зв'язку, підвищення точності позиціонування та скорочення часу реакції в умовах швидко змінюваних обставин.

Ключові слова: *антенна решітка, діаграма спрямованості, фаза сигналу, методи керування променем.*

Antenna arrays are systems that consist of a large number of antenna elements to shape, steer, and direct the beam without any physical motion of the antenna. Their basic concept is to use a group of separate antennas, each element of which can change the phase or amplitude of the radiated signal. This makes it possible to direct radiation and control the angle of the main lobe of the antenna system's radiation pattern. The use of antenna arrays is widespread in many areas, such as military radars, satellite communications, security systems, the Internet of Things (IoT), and mobile communications.

The goal of this work is to analyze the possibilities of using antenna systems based on antenna arrays and estimate the current trends and lines of their development.

The article considers various types and methods of antenna array control, compares their efficiency and suitability for use in various areas, including unmanned aerial vehicle (UAV) systems. Attention is paid to the types of antenna arrays, such as linear and planar phased arrays, and to scanning methods - from digital methods to analog approaches. The article also compares phase and amplitude control methods, which include mechanical, digital, and adaptive control of antenna arrays. These methods offer high-

accuracy scanning without any physical motion of the antenna. The effect of these methods on the power consumption, signal speed, and control accuracy is taken into account. The novelty and contribution of this article lie in an in-depth comparison of different types of antenna arrays and methods to control them with emphasis on their application in a dynamic environment typical of UAVs. New solutions are proposed for optimizing antenna array designs, which may be used in future unmanned aerial vehicle systems to improve the communication quality, increase the positioning accuracy, and reduce the response time in rapidly changing circumstances.

Keywords: *antenna array, directional diagram, phase of signal, beam steering methods.*

Вступ. Актуальність використання антенних решіток (АР) зростає у різних технологічних сферах, оскільки ці системи забезпечують високу ефективність, гнучкість та точність управління радіохвилями. Вони застосовуються в умовах, де необхідно точно контролювати напрямок, форму і інтенсивність радіочастотного сигналу, а також забезпечувати стабільний зв'язок в умовах високої динаміки чи перешкод. Найбільш актуальними напрямками застосування антенних решіток є 5G та майбутні мобільні мережі (6G), радарні і супутникові системи, автономні транспортні засоби, безпілотні літальні апарати (БПЛА), військові та оборонні системи, Інтернет речей (IoT). Антенні решітки стали критичними для розвитку сучасних технологій завдяки здатності точно направляти сигнал і адаптуватися до змін у навколишньому середовищі.

Одним із найбільш значущих напрямків застосування АР є використання в радіолокаційних системах [1 – 5]. Радари з АР здатні швидко змінювати напрямок випромінювання і забезпечувати широкий огляд території, що має велике значення для систем протиповітряної оборони (ППО) [6 – 8], де АР використовуються для виявлення та супроводу повітряних об'єктів на великих відстанях, навіть при високій швидкості їх руху. З впровадженням технологій 5G і підготовкою до 6G, антенні решітки стали необхідними для створення ефективних мобільних мереж нового покоління [9 – 12].

Також активно досліджуються адаптивні антенні решітки, які динамічно змінюють свої параметри для покращення якості прийому сигналу. Ці системи, відомі як MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) [13 – 15], використовують адаптацію діаграми спрямованості та інших параметрів для підвищення пропускної здатності та завадостійкості в системах зв'язку. Ці технології дозволяють забезпечити високу пропускну здатність і низьку затримку в зв'язку, що є критичним для безперервного з'єднання з мобільними пристроями, автономними транспортними засобами, дронами та IoT – пристроями [16 – 19]. Для 5G це дає можливість створювати спрямовані промені, що забезпечують швидку та стабільну передачу даних, важливу для високошвидкісного інтернету, мобільних додатків та смарт – систем. Для 6G це дозволить досягти нових рівнів зв'язку, зокрема в умовах мегаструктур міських зон, для безперебійної роботи з мільярдами підключених пристроїв.

Технології використання АР також знайшли своє застосування в супутниковому зв'язку, де важливо точно спрямовувати сигнал на координати Землі або до інших супутників [20 – 22]. У літаках і космічних апаратах АР використовуються для підтримки стабільного зв'язку під час руху, що дозволяє безперервно взаємодіяти з великою швидкістю.

Очевидно, що антенні решітки вже стали невід'ємною частиною сучасних радіотехнічних систем і виявляють значний потенціал для розвитку у майбутніх технологіях, зокрема в 5G, 6G та супутникових мережах. Їх здатність забезпечувати високий рівень точності в управлінні напрямком сигналу, а також адаптувати параметри в реальному часі, робить їх надзвичайно корисними в умовах високої динаміки та швидкості. З огляду на зростаючі вимоги до швидкості передачі даних, зменшення затримок та забезпечення стабільного зв'язку в складних умовах, технології антенних решіток стають ключовими для досягнення інновацій у телекомунікаціях і радіолокаційних системах. Враховуючи швидкий розвиток цих технологій, подальші дослідження зосередяться на створенні більш гнучких і потужних

рішень для інтеграції в нові комунікаційні та оборонні системи, що відкриває нові горизонти для майбутнього зв'язку і безпеки.

Постановка задачі. Метою цієї статті є аналіз можливостей та перспектив використання антенних решіток у сучасних технологіях, зокрема в умовах швидко змінюваних мобільних мереж, таких як 5G та майбутні 6G. Однією з основних задач є дослідження впливу AP на ефективність зв'язку, покращення якості передачі даних та зниження затримок у різних системах, включаючи автономні транспортні засоби, безпілотні літальні апарати, радарні і супутникові системи.

В рамках цієї роботи поставлені такі завдання: оцінити ключові технології та методи формування променя, які використовуються в AP, а також порівняти їх ефективність в умовах динамічного середовища; проаналізувати різні типи антенних решіток (лінійні, плоскі, фазовані тощо) і методи керування сигналом; дослідити можливості інтеграції AP у військові та оборонні технології, зокрема в радарні та системи протиповітряної оборони, та оцінити їх роль у радіоелектронній боротьбі; розглянути перспективи використання антенних решіток для забезпечення стабільного зв'язку в системах, враховуючи вимоги до покриття та точності спрямування сигналу.

Робота також ставить за мету визначити основні тенденції та виклики розвитку технологій AP, вивчаючи їх вплив на майбутні інновації в галузях зв'язку, оборони та супутникових систем. В результаті аналізу буде запропоновано рекомендації щодо оптимізації використання антенних решіток для досягнення високої ефективності та надійності.

Антенні решітки та принципи їхньої роботи. Антенні решітки та принципи їхньої роботи досліджуються вже протягом не одного десятиліття [23, 24]. Тож коротко і узагальнено розглянемо, з чого складається антенна решітка та як вона працює. Антенна решітка являє собою систему з кількох антен або антенних елементів, які розташовуються у певному порядку, щоб сформувати направлену діаграму спрямованості. Застосування антенних решіток має ряд переваг над використанням одиночних антен. Система з N антен може в N разів збільшити коефіцієнт спрямованої дії, а відповідно і підсилення порівняно з однією антеною, а також звузити промінь для підвищення точності визначення кутових координат джерела випромінювання в навігації, радіолокації та інших системах радіокерування. Одна з важливих переваг решіток – можливість швидкого огляду (сканування) простору за рахунок качання променя антени електричними методами (електричного сканування).

Елементи антенної решітки можуть мати різну геометрію та порядок розподілу в системі. У загальному випадку, антенні решітки використовують взаємодію елементів для досягнення необхідних характеристик випромінювання без потреби у фізичному переміщенні самих антен. Розглянемо основні математичні рівняння для опису роботи антенних решіток і побудови їхніх діаграм спрямованості.

Для опису геометрії антенної решітки можна використовувати розташування елементів, що складають систему. Якщо елементи антенної решітки розташовані рівномірно з відстанями d між сусідніми антенами, то можна розрахувати напрямок випромінювання за допомогою рівняння [25] (1):

$$E(\theta) = \sum_{n=1}^N A_n e^{j(kd n \cos(\theta))}. \quad (2)$$

де: $E(\theta)$ – електричне поле в напрямку кута θ , A_n – амплітуда сигналу, який генерується n -м елементом, $k = 2\pi/\lambda$ – хвильовий вектор, n – індекс елемента в решітці (від 1 до N), θ – кут, в якому спостерігається сигнал, d – відстань між елементами решітки.

Це рівняння дає можливість врахувати сигнал від кожного елемента решітки і дозволяє побудувати загальну характеристику випромінювання в залежності від напрямку кута θ .

Якщо всі антени у решітці працюють у злагодженому режимі (з однаковими фазами і амплітудою), максимальний сигнал буде спрямований в певний напрямок, який відповідає максимуму функції $E(\theta)$. Для цього необхідно обчислити значення, яке максимізує вираз для $E(\theta)$. У випадку для лінійної АР це можна зробити шляхом розв'язування наступного рівняння [25] (3):

$$\frac{d}{d\theta} |E(\theta)| = 0. \quad (3)$$

Рішення цього рівняння дозволяє визначити кут θ , при якому випромінювання буде максимальним.

Для антенних решіток з великим числом елементів діаграма спрямованості може бути описана наступним рівнянням [25] (4):

$$|E(\theta)| = \left| \sum_{n=1}^N A_n e^{j(kd n \cos(\theta))} \right|. \quad (4)$$

Максимум цієї функції визначає напрямок, у якому спрямований основний пучок, а мінімуми відповідатимуть напрямкам, де сигнал практично відсутній. Однією з важливих особливостей антенних решіток є можливість змінювати напрямок променя, підлаштовуючи фазові зсуви в окремих елементах решітки. Не беручи до уваги фазовані антенні решітки, навіть у простих антенних решітках можна здійснювати коригування сигналів для оптимізації напрямку або для компенсування впливу перешкод. Це може бути здійснено шляхом зміни амплітуд A_n для кожного елемента або за допомогою застосування певних алгоритмів для оптимізації діаграми спрямованості в реальному часі [26]. Діаграма спрямованості антенної решітки може мати вигляд ширшого або вузького пучка залежно від числа антен та їхнього розташування. Зазвичай, чим більше антен в решітці, тим вузьче буде головний пік діаграми спрямованості. Це дозволяє зосереджувати енергію на певному напрямку, зменшуючи розсіювання сигналу і підвищуючи точність визначення напрямку.

Оскільки антенні решітки можуть спрямовувати сигнал в дуже вузькому «пучку», вони дозволяють створювати дуже точні промені з високою потужністю в конкретному напрямку. Це дає змогу зменшити втрати сигналу через розсіювання, підвищуючи ефективність. Коли використовується антенна решітка для прийому сигналу, вона може збирати сигнали з різних напрямків і з'єднувати їх для покращення якості або точності. Замість того, щоб розглядати лише сигнал з одного напрямку, решітка дозволяє «збирати» сигнал з багатьох точок і посилювати його. У системах зв'язку, наприклад, для мобільних або супутникових мереж, антенні решітки дозволяють сканувати великий простір, забезпечуючи кращу покритість або високу точність зв'язку. Наприклад, антени можуть автоматично фокусувати сигнал на конкретну точку на земній поверхні, як це роблять супутникові антени для прийому сигналів з точних орбітальних позицій.

Види антенних решіток. Антенні решітки можуть бути класифіковані за основними ознаками: геометрії розташування випромінювачів у просторі,

способу їхнього збудження, закономірності розміщення випромінюючих елементів у самій решітці, способу обробки сигналу в решітці, амплітудно – фазовому розподілу струмів (електромагнітного поля) по решітці та типу випромінювачів [24]. Найчастіше в якості випромінювачів використовуються слабонаправлені антени: щілини, рупори, вібратори, діелектричні стрижні. В залежності від мети використання та характеристик роботи, виділяють різні види антенних решіток. Розглянемо основні види, їхні переваги та застосування. Для більшої наочності і структурованості матеріалу наведемо дані за видами антенних решіток у вигляді таблиці (таблиця 1). В даній таблиці представлено інформацію про принципи роботи, переваги, недоліки та сфери використання антенних решіток.

Таблиця 1 – Порівняльна таблиця типів антенних решіток

1	2	3	4	5
Тип антенної решітки	Принцип роботи	Переваги	Недоліки	Сфери використання
Лінійна решітка	Антени розташовані вздовж однієї лінії, випромінювання формується зміною фазового зсуву між елементами.	– Спрямований промінь, – простота конструкції, – використання у вузьких діапазонах частот.	– Менший контроль над випромінюванням у 3D-просторі, – вузька смуга частот.	– Радари, – супутниковий зв'язок, – мобільний зв'язок (5G).
Кругова антенна решітка	Антени розташовані у колі, що дозволяє керувати випромінюванням в азимутальній площині.	– Спрямоване випромінювання, – гарна чутливість у горизонтальній площині.	– Складність фазового керування, – нижча ефективність у порівнянні з фазованими решітками.	– Морські та авіаційні радари, – багатоканальні зв'язкові системи.
Плоска антенна решітка	Антени розташовані у плоскій матриці, що дозволяє керувати випромінюванням у 3D-просторі.	– Висока точність спрямованості, – можливість створення багатопробієвих конфігурацій.	– Висока вартість виробництва, – складність програмного керування.	– Супутниковий зв'язок, – метеорологічні радари, – мобільні комунікації (5G, 6G).
Плоска фазована решітка (ФАР)	Антени розташовані у двох вимірах, фазовий зсув керує напрямком випромінювання в площині.	– Швидке електронне сканування променя, – висока гнучкість спрямованості, – відсутність механічних обертових механізмів.	– Висока вартість виробництва, – складність електронного управління.	– Військові радари, – авіація та космічні комунікації, – системи самонаведення.

1	2	3	4	5
Циліндрична антенна решітка	Анени розташовані на циліндричній поверхні, створюючи 360° покриття.	– Кругова діаграма спрямованості, – можливість одночасного охоплення багатьох напрямків.	– Менший коефіцієнт підсилення у порівнянні з лінійними решітками, – складність калібрування.	– Наземні радіолокаційні системи, – авіаційні системи зв'язку.
Когерентна антенна решітка	Використовує фазовану синхронізацію між антенами для покращення спрямованості випромінювання	– Висока точність і підсилення сигналу, – покращене придушення шуму та перешкод.	– Високі вимоги до фазової синхронізації, – дорожняча реалізації.	– Аерокосмічні системи, – військові системи зв'язку.
Адаптивна антенна решітка	Використовує алгоритми цифрової обробки сигналів для зміни діаграми спрямованості в реальному часі.	– Здатність адаптуватися до перешкод, – покращена якість зв'язку.	– Високі обчислювальні витрати, – складність налаштування.	– 5G та Wi-Fi мережі, – радары нового покоління.
Гібридна антенна решітка	Поєднує характеристики двох або більше типів антенних решіток (наприклад, фазованої та когерентної або адаптивної).	– Поєднує переваги різних технологій, – гнучке управління спрямованістю, – вища ефективність у складних середовищах.	– Висока складність конструкції та управління, – дорожняча розробки та виробництва.	– Багатофункціональні радары, – системи військового зв'язку, – 6G та передові бездротові технології.

Таким чином вибір типу антенних решіток залежить від конкретних вимог: чи потрібно змінювати напрямок променя, чи важлива компактність, чи треба покривати велику сферу або лінію тощо. Фазовані антенні решітки є найбільш універсальними і застосовуються в багатьох високотехнологічних галузях. Інші типи, такі, як плоскі або лінійні, є більш простими й використовуються в конкретних задачах, де складніші рішення не потрібні. Наприклад, лінійні антенні решітки використовуються у мобільному зв'язку (в антенах базових станцій 4G і 5G) та в радіолокаційних системах. Плоскі фазовані решітки (ФАР) забезпечують швидке електронне керування променем і застосовуються у військових радарях, таких як AN/APG – 77 у винищувачах F – 22 Raptor. Циліндричні та кругові решітки вико ристовуються в навігаційних та морських системах, зокрема у корабельних радарях, що забезпечують огляд на 360°. Когерентні та адаптивні антенні решітки знаходять застосування у сучасних супутникових комунікаціях, дозволяючи ефективно пригнічувати перешкоди, наприклад, у системах зв'язку Starlink. Гібридні антенні решітки, що поєднують властивості

фазованих та адаптивних систем, використовуються в багатофункціональних радарах, таких як AESA – радари для авіації та протиповітряної оборони.

Способи управління антенними решітками. Управління антенними решітками є важливим аспектом для досягнення потрібних характеристик променя (наприклад, його напрямку, форми або ширини). Існує кілька основних способів управління антенними решітками, кожен з яких використовує різні технології для змінення параметрів сигналу, що випромінюється або приймається антеною: управління фазою, управління амплітудою, механічне управління, управління частотою, адаптивне і цифрове управління. Розглянемо коротко кожен з даних способів.

Управління фазою (Phase Shifting). Це найпоширеніший метод управління фазованими антенними решітками. Кожен елемент антенної решітки має свій фазовий зсув, який можна регулювати. Зміна фази сигналу, що випромінюється або приймається кожним елементом, дозволяє контролювати напрямок променя. Наприклад, якщо сигнал з кожної антени виходить з однаковою фазою, це дає спрямований променевий пучок. Якщо ж фаза змінюється по певній схемі, промінь можна направити в бажану точку. На рис. 1 [26] схематично зображено, як змінюється напрямок головного променя діаграми спрямованості антенної решітки при фазовому зсуві.

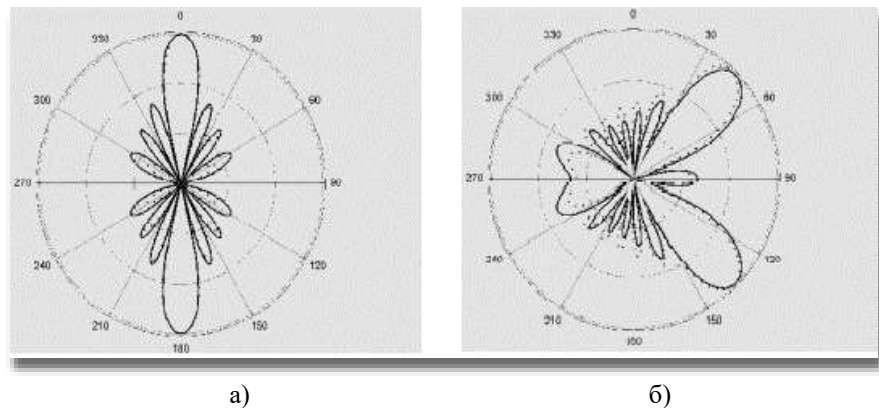


Рис. 1 – Зміна напрямку променя за допомогою зміни фази
(а) – фазовий зсув 0, б) – фазовий зсув 45° в лінійній антенній решітці з 8 елементів [26]

Фазовий зсув між сусідніми антенами змінює інтерференцію хвиль. Це дозволяє направляти промінь без механічного руху антени. Регулювання фазою здійснюється за допомогою фазових шунтів або зсувів. Даний тип управління ФАР використовується для сканування простору (наприклад, в радарах або системах супутникового зв'язку) та забезпечення мобільних комунікацій (наприклад, у 5G).

Управління амплітудою (Amplitude Control). Крім фази, можна контролювати амплітуду сигналу, що випромінюється від кожного елемента антенної решітки. Це дозволяє ще точніше налаштувати напрямок променя, змінюючи його інтенсивність. Якщо амплітуду сигналу на кожному елементі решітки змінювати, то можна створити ефект «згладжування» або «згортання» променя в певний бік. Тобто, якщо амплітуди сигналів від деяких елементів зменшуються, а від інших — збільшуються, то це змінить інтенсивність сигналу в напрямках, що відповідають цим елементам. Це дозволяє зменшити рівень бокових пелюсток, покращити придушення перешкод та впливати на ширину головного променя. У стандартному

випадку, якщо всі випромінювачі мають однакові амплітуди сигналів (рівномірний розподіл), то діаграма спрямованості містить високі бокові пелюстки.

На рис. 2 [27] наглядно представлено загальний вид діаграми спрямованості при рівномірному розподілі амплітуд та при використанні тейлорового розподілу амплітуд елементів антенної решітки.

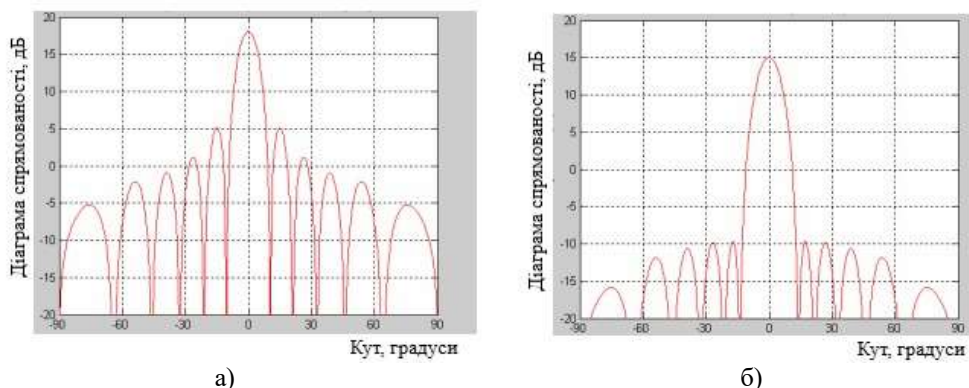


Рис. 2 – ДС при рівномірному (а) та тейлоровому (б) розподілі керування амплітудою антенних решіток [27]

Як видно з рисунку при використанні тейлорового розподілу розширюється головний промінь діаграми спрямованості, а бокові пелюстки стають набагато меншими. Зменшення амплітуд на краях решітки дозволяє знизити рівень цих пелюсток, що важливо для багатьох систем, наприклад, в радіолокації чи зв'язку. Управління амплітудою можна здійснювати за допомогою адаптивних або цифрових регуляторів (це схеми, які змінюють рівень сигналу на кожному каналі антени) та за допомогою адаптивних систем (системи, які аналізують отриманий сигнал і коригують амплітуду для покращення якості зв'язку чи зменшення перешкод). Управління амплітудою широко використовується в адаптивних антенах, де важливо контролювати не лише напрямок, а й потужність сигналу для досягнення кращого покриття або зменшення перешкод.

Механічне управління (Mechanical Steering). У деяких антенних системах (особливо старих типах або в спеціалізованих застосунках) для управління напрямком променя використовуються механічні методи. Це може включати фізичне переміщення всієї антенної решітки або окремих її елементів. Механічне управління полягає в зміні орієнтації антенної решітки або її частин (наприклад, за допомогою сервоприводів або обертальних механізмів). Даний спосіб забезпечує високу точність управління, можливість повного сканування простору, але має повільну реакцію порівняно з електронним управлінням та механічний знос. Використовується зазвичай в класичних радарних системах або в супутникових антенах, де точне налаштування напрямку є критичним, і необхідно орієнтувати антену в певному напрямку.

Управління частотою (Frequency Control). Даний метод управління променем полягає в зміні частоти сигналу, що передається кожним елементом решітки. Якщо сигнали на кожному елементі мають різні частоти, це може вплинути на напрямок і форму променя. Він заснований на тому, що фазова різниця між елементами антенної решітки залежить від частоти сигналу. Зміна частоти змінює довжину хвилі, що призводить до зміни кута

нахилу головного променя. Коли частота збільшується, кут випромінювання зміщується в один бік, а при зменшенні – в інший. Це дозволяє здійснювати сканування без необхідності механічного переміщення антени або зміни фазових зсувів окремих елементів. Це менш поширений метод у порівнянні з управлінням фазою або амплітудою, але він може використовуватися для специфічних цілей, зокрема, для зміни характеристики променя або для створення складних радіолокаційних систем. Наприклад, в 5G та 6G технологіях використання антенної решітки з управлінням частотою дозволяє оптимізувати передавання сигналу, зменшити інтерференцію і покращити якість зв'язку на великих відстанях.

Адаптивне управління (Adaptive Control). Адаптивні антенні решітки здатні самостійно змінювати свої характеристики в залежності від умов, наприклад, для оптимізації прийому сигналу або зменшення шуму. Адаптивні системи використовують алгоритми для автоматичної зміни фазових і амплітудних характеристик в реальному часі на основі аналізу поточного сигналу. Це дозволяє системам «пристосовуватися» до змін в оточенні (перешкоди, рух об'єктів тощо). Адаптивні антенні решітки використовують алгоритми обробки сигналів для динамічного налаштування фазових і амплітудних коефіцієнтів кожного елемента антени. На основі аналізу вхідних сигналів система може змінювати форму та напрямок діаграми спрямованості для: підсилення сигналу від корисного джерела, придушення завад та небажаних сигналів, оптимального розподілу випромінюваної енергії.

В даних системах можуть використовуватись різні способи адаптивного управління, такі як алгоритми мінімізації перешкод, алгоритми просторово-часової обробки сигналів та алгоритми оптимізації променя. В залежності від потреб і використання в системах може застосовуватись той чи інший алгоритм. Адаптивні решітки використовуються в супутникових системах зв'язку, в мобільних мережах (наприклад, в 5G для кращого обслуговування користувачів), а також в радарних і військових системах.

Цифрове управління (Digital Beamforming). Цифрове управління променем ґрунтується на цифровій обробці сигналів для керування фазою та амплітудою випромінювання кожного елемента антенної решітки. На відміну від аналогового фазового керування, де фазові зсуви здійснюються безпосередньо в аналоговій частоті, у цифровому формуванні променя всі обчислення виконуються в цифровому вигляді після оцифрування сигналу.

Серед переваг цифрового управління променем можна виділити: високу точність управління – цифрова обробка дозволяє тонко налаштовувати фазу та амплітуду сигналів, можливість формування декількох незалежних променів (Multi – Beamforming) – один масив антен може випромінювати або приймати сигнали у різних напрямках одночасно, адаптивне керування променем – можливість змінювати напрямок випромінювання в реальному часі залежно від середовища (наприклад, придушення завад), гнучкість і програмне налаштування – цифрові алгоритми дозволяють змінювати характеристики антени без апаратних змін.

Цифрове управління променем є найсучаснішим методом формування діаграми спрямованості антенних решіток. Хоча він вимагає значних обчислювальних ресурсів і є дорожчим у реалізації (необхідність використання дорогих швидкодіючих аналого-цифрових перетворювачів, потребує значної обчислювальної потужності для реального часу), його переваги роблять його незамінним у сучасних комунікаційних, радарних та

супутникових системах. Також варто згадати використання гібридного управління, яке поєднує аналогове і цифрове управління для зменшення витрат і енергозбереження.

Кожен метод управління антенними решітками має свої сильні та слабкі сторони, тому жоден метод не є універсальним – вибір залежить від конкретних вимог щодо вартості, енергоефективності, точності та швидкості роботи. Наприклад, аналогові методи ефективні в простих і дешевих рішеннях, а цифрові підходи ідеальні для динамічних і високоточних систем. Для більшої впорядкованості і узагальнення по тому, де оптимальне застосування різних методів управління променем антенних решіток зобразимо у вигляді таблиці (таблиця 2).

Таблиця 2 – Сфери застосування методів управління променем АР

Метод	Оптимальне застосування
Управління частотою	Супутниковий зв'язок, радіолокація, радіозв'язок, IoT-мережі LPWAN (LoRa, Sigfox).
Управління фазою	Військові радары, системи 5G/6G, супутниковий зв'язок, IoT у розумних містах(розподілені сенсорні мережі).
Управління амплітудою	Радіолокаційні системи, точне прицілювання, багатопроменеві антени, IoT у промисловості (інтелектуальні датчики).
Механічне управління	Супутникові антени, радіотелескопи, морські та авіаційні РЛС, IoT у сільському господарстві (дрони, метеостанції).
Цифрове управління	5G/6G мережі, бойові радары, супутниковий зв'язок, IoT у Smart Home (розумні будинки).
Адаптивне управління	Радіоелектронна боротьба (РЕБ), інтелектуальні радіолокаційні системи, динамічні комунікаційні системи, IoT у транспорті (автономні автомобілі, V2X – комунікація).

Використання АР в системах керування безпілотними літальними апаратами. Використання антенних решіток у 5G для управління безпілотними апаратами є однією з найперспективніших і найсучасніших технологій, що дозволяє значно покращити зв'язок і точність керування такими пристроями [28 – 32]. Оскільки 5G є основою для розвитку мобільних мереж нового покоління, його можливості в управлінні БПЛА відкривають

нові горизонти для широкого застосування в різних сферах – від військових і комерційних операцій до доставки товарів та моніторингу в реальному часі. Одна з найбільших переваг 5G для управління безпілотниками – це зменшення часу затримки сигналу. У порівнянні з попередніми поколіннями зв'язку (3G, 4G), 5G забезпечує затримки в межах 1 мс, що критично для оперативного керування БПЛА в реальному часі. Це дозволяє здійснювати майже миттєве реагування на зміну ситуації, наприклад, під час аварійних ситуацій або складних маневрів. 5G забезпечує високий рівень передачі даних, що важливо для передавання відео в реальному часі з безпілотників (наприклад, для відеоаналітики або відеоспостереження).

Завдяки антенним решіткам, що можуть обробляти великий обсяг інформації одночасно, можна здійснювати високоякісну трансляцію відео, моніторинг даних з датчиків, а також виконувати інші ресурсоємні завдання без втрати якості з'єднання. Антенні решітки дозволяють точно направляти сигнал на безпілотний апарат. Безпілотники зазвичай рухаються швидко, що може призвести до втрати сигналу або зміщення напрямку передавача. У разі використання фазованих решіток можна змінювати напрямок променя без фізичного руху антен. Це дає змогу тримати постійний зв'язок з БПЛА навіть у складних умовах, коли апарат може бути на великій відстані або в русі. Окрім того, покращується стабільність з'єднання та зменшується ймовірність втрати сигналу, оскільки існує можливість автоматично адаптувати напрямок променя в реальному часі, підлаштовуючи його під рух БПЛА. Це означає, що апарат завжди буде під надійним зв'язком, незалежно від того, де він знаходиться і в якому напрямку рухається.

Висновки. З огляду на проведений аналіз, можна виділити кілька важливих висновків щодо використання антенних решіток у сучасних радіотехнічних системах, зокрема в БПЛА.

1. Різні типи антенних решіток дозволяють створювати радіотехнічні системи з оптимальними характеристиками для конкретних задач. Їхні переваги, такі як точне направлення сигналу, можливість адаптації під умови руху, а також зниження втрат при передачі даних, роблять ці технології критично важливими для сучасних та майбутніх застосувань, таких як мобільні зв'язки та супутникові системи.

2. Однією з найбільших переваг використання антенних решіток у системах 5G є здатність підтримувати високоякісні з'єднання навіть в умовах швидкого руху та при передачі великого обсягу даних. Це відкриває нові можливості для управління БПЛА в реальному часі, забезпечуючи майже миттєву реакцію на зміни ситуації та стабільність зв'язку, що критично для безпілотників, які працюють на великих відстанях або в складних умовах.

3. Завдяки високій швидкості передачі даних в мережах 5G, можливість передавати відео в реальному часі з БПЛА на великі відстані та без затримок є надзвичайно важливою для таких застосувань, як відеоспостереження або моніторинг. Завдяки фазованим антенним решіткам, можна автоматично коригувати напрямок променя в реальному часі, що забезпечує стабільний зв'язок із безпілотним апаратом навіть за умов швидкого руху або на великих відстанях.

4. Хоча антенні решітки вже широко використовуються для керування напрямком променя без фізичного руху антен, існує потреба в подальшому вдосконаленні їхніх характеристик для забезпечення більшої точності спрямування, зменшення втрат сигналу та підвищення ефективності в

складних умовах. Розробка нових алгоритмів адаптивного керування фазовими зсувами та більш ефективних фазових шунтів може суттєво поліпшити якість з'єднання і зробити управління більш стабільним та точним в умовах реального часу.

5. Технології антенних решіток, з їх здатністю точно направляти сигнал і адаптуватися до умов реального часу, відкривають нові можливості для різноманітних застосувань, зокрема в БПЛА.

6. Подальші дослідження у напрямку покращення їхніх характеристик, інтеграції з іншими технологіями та оптимізації енергоспоживання можуть привести до значних проривів у багатьох сферах, включаючи оборону, комерцію та науку.

1. Sarath J. V., Bindu (Palakkal) P., Biju K. S., Rani L. Review of antennas used in FPV/WLAN applications. *Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering*. 2021. T. XIV. F. 1. P. 29–40.
2. Meng S., Su X., Wen Z., Dai X., Zhou Y., Yang W. Robust drones formation control in 5G-wireless sensor network using mm-wave. *Hindawi Wireless Communications and Mobile Computing*. 2018. May. 7 pp. <https://doi.org/10.1155/2018/5253840>
3. Oliveira M. T., Miranda R. K., Costa J. P. C. L., Almeida A. L. F., Sousa R. T. Jr. Low-cost antenna array based drone tracking device for outdoor environments. *Hindawi wireless communications and mobile computing*. 2019. 14 p. <https://doi.org/10.1155/2019/5437908>
4. Moschetti P. Increasing drone video down link reliability using phased array technology. Colorado school of mines. Thesis. Golden, Colorado. 2020. 86 p.
5. Kumar A. Drone-based antenna array for service time minimization in wireless networks. *JETIR*. 2019. April. Vol. 6. Is. 4. P. 629–637.
6. Xiao Z., Han Z., Arumugam N., Dobre O. A., Clerckx B., Choi J., He C., Tong W. Antenna array enabled space/air/ground communications and networking for 6G. *IEEE journal on selected areas in Communications*. October 2022. Vol. 40. Is. 10, P. 2773–2804. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2022.3196320>
7. Лебідь С. В., Лазута Р. Р., Коваль О. М. Оцінка ефективності застосування адаптивних антенних решіток у системах радіозв'язку в умовах активної радіоелектронної боротьби. *Збірник наукових праць ВІПІ*. 2020. № 1. С. 46–57.
8. Morcelles K., Malatest B. Comparing SDRs for aerospace and defense electronics. *Microwave Journal*, e – book. April 2024. P. 4–9. URL: <https://www.microwavejournal.com/articles/41210-comparing-sdrs-for-aerospace-and-defense-electronics> (Last accessed: 17.02.2025).
9. Tran H. H., Nguyen T., Ta H. N., Pham D. Ph. Metasurface-based MIMO antenna with compact, wideband, and high isolation characteristics for sub - 6 GHz, 5G applications. *IEEE transactions and journals*. 2023. Vol. 11. 2023. P. 1–8. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10172201> (Last accessed: 12.01.2025). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3292303>
10. Ioannis P. Theoharis advanced antenna system for 5G-enabled cubesats. University of Wollongong. Thesis. 2023. August. 195 p.
11. Ullah R., Ullah S., Kamal B., Faisal F., Ullah R., Choi D., Ahmad A. High-gain vivaldi antenna with wide bandwidth characteristics for 5G mobile and Ku-band radar applications. *Electronics*. 2021. 14 p. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/6/667> (Last accessed: 12.02.2025). <https://doi.org/10.3390/electronics10060667>
12. Naqvi S. I., Hussain N. Antennas for 5G and 6G communications. Chapter in book: *5G and 6G Enhanced Broadband Communications*. July 2022. 24 p. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/6/667> (Last accessed on February 12, 2025).
13. Wang Z., Dong Y. Compact MIMO-antenna using stepped impedance resonator-based metasurface for 5G and Wi-Fi applications. *Microw. Opt. Technol. Lett.* Jan. 2021. Vol. 63. No.1. P. 211–216. <https://doi.org/10.1002/mop.32560>
14. Khan M. S., Shafique M. F., Capobianco A.-D., Autizi E., Shoaib I. Compact UWB - MIMO antenna array with a novel decoupling structure. 10-th international Bhurban conference on applied sciences and technology. Islamabad, Pakistan. 15-th – 19-th January 2013. P. 347–350. <https://doi.org/10.1109/IBCAST.2013.6512176>
15. Desai A., Bui C. D., Patel J., Upadhyaya T., Byun G., Nguyen T. K. Compact wideband four-element optically transparent MIMO antenna for mm - wave 5G applications. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 194206–194217. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3033314>
16. Kishore N., Senapati A. 5G smart antenna for IoT application: A review. *International journal of communication systems*. 2018. Vol. 35, Issue 13. 16 p. <https://doi.org/10.1002/dac.5241>
17. Raad H. An UWB antenna array for flexible IoT wireless systems. *Progress in electromagnetics research*. 2018. Vol. 162. P. 109–121. <https://doi.org/10.2528/PIER18060804>
18. Tubbal F., Matekovits L., Raad R. Antenna designs for 5G/IoT and space applications. *Electronics*. 2022. Vol.11, 2484. 4 p. <https://doi.org/10.3390/electronics11162484>
19. Arnaoutoglou D. G., Empliouk T. M., Kaifas T. N. F., Chrysomallis M. T., Kyriacou G. A review of multifunctional antenna designs for internet of things. *Electronics*. 2024. Vol. 13.3200. 33 p. <https://doi.org/10.3390/electronics13163200>

20. Maral G., Bousquet M., Sun Z. Satellite communications systems. 6-th edition. 2020. P. 325–569. <https://doi.org/10.1002/9781119673811>
21. Natera M. A. S. New antenna array architectures for satellite communications. Chapter in book: Advances in satellite communications. 2011. P. 168–194.
22. Rogstad D. H., Mileant A., Pham T. T. Antenna arraying techniques in the deep space network. Monograph 5: deep space communications and navigation series. 2003. January. 163 p. <https://doi.org/10.1002/047172131X>
23. Josefsson L., Rengarajan S. R. Slotted waveguide array antennas. Theory, analysis and design. The institution of engineering and technology. 2018. 351 p. <https://doi.org/10.1049/SBEW517E>
24. Воскресенский Д. И., Гостюхин В. Л., Максимов В. М., Пономарев Л. И. Устройства СВЧ и антенны. Радио и связь. Москва. 1994. 376 с.
25. Monzingo R. A., Miller T. W. Introduction to adaptive arrays. SciTech Publishing, Inc. Raleigh, NC 27613. 2004. 552 p.
26. Manu O., Dimian M., Graur A. Analysis of beamforming in phased antenna arrays. 10-th International conference on development and application systems. Suceava, Romania. May 27–29, 2010. P. 294–298.
27. Hopkins G. D., Ratner J., Traille A., Tripp V. Aperture efficiency of amplitude weighting distributions for array antennas. Conference paper in IEEE aerospace conference proceedings. April 2007. 9 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/224698919_Aperture_Efficiency_of_Amplitude_Weighting_Distributions_for_Array_Antennas (Last accessed: 02.03.2025). <https://doi.org/10.1109/AERO.2007.352856>
28. Гостюхин В. Л., Трусов В. Н., Гостюхин А. В. Активные фазированные решетки. 3-е издание. Издание «Радиотехника». Москва. 2011. 304 с.
29. Sun X., Blázquez – García R., García – Tejero A., Fernández – González J. M., Burgos – García M., Sierra – Castañer M. Circular array antenna for UAV-UAV communications. 11-th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). March 2017. 4p. <https://doi.org/10.23919/EuCAP.2017.7928819>
30. Wnuk M. Application of the Vivaldi antenna in a linear antenna array for radar systems. Scientific journal of Gdynia maritime university. 2024. No. 132. P. 35–56. <https://doi.org/10.26408/132.03>
31. Hanna S., Yan H., Cabric D. Distributed UAV placement optimization for cooperative line - of - sight MIMO communications. IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP). 12 – 17 May 2019. 5 pp. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2019.8683875>
32. Duan Z., Yang X., Xu Q., Wang L. Time-division multi array beamforming for UAV communication. Wireless communications and mobile computing. April 2022. 13 p. <https://doi.org/10.1155/2022/4089931>
33. Фомін П., Думін О., Плахтій В., Нестеренко М. Надширококутові антенні решітки на випромінювачах Клевина. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2023. Випуск 38. С. 65–73.

Отримано 04.03.2025,
в остаточному варіанті 25.03.2025