

В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, Р.О. БОБНЄВ

МЕТОДИ АКУСТИЧНОГО ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРИ З ВИКОРИСТАННЯМ АНТЕННИХ РЕШІТОК

Вступ

Системи акустичного зондування (АЗ) атмосфери – содари є відносно недорогим і ефективним засобом дистанційного вимірювання параметрів атмосфери. Системи АЗ дозволяють вимірювати швидкість і напрямок вітру, параметри турбулентності, вологість атмосферного повітря [1, 2]. Метод базується на зондуванні атмосфери акустичними хвилями, формуванні сигналу, розсіяного природними атмосферними турбулентними неоднорідностями, прийомі розсіяного акустичного сигналу та визначенні параметрів атмосфери за параметрами розсіяного сигналу [1].

Моніторинг атмосфери з використанням систем АЗ здійснюється в інтересах авіації, екології, радіозв'язку, радіолокації. Основні фактори, що обмежують ефективність функціонування систем акустичного зондування, – значне затухання акустичних хвиль в атмосфері, яке має суттєву частотну залежність, та вплив зовнішнього акустичного шуму на роботу содарів [3,4].

Метод АЗ розвивається вже декілька десятиліть, з початку 60-х років минулого століття. Розроблено фізичні основи методу, сформовано принципи побудови систем акустичного зондування. Спочатку системи виконувалися, як правило, стаціонарними і будувалися з використанням безперервних за простором дзеркальних антен. З розвитком електроніки та комп'ютерної техніки зменшилася вага, габаритні розміри станцій, з'явилися мобільні варіанти акустичних локаторів [5, 6]. Розробка ефективних п'єзоелектричних акустичних випромінювачів забезпечила можливість створення дискретних за простором акустичних антен – антенних решіток (АР) [7]. Застосування фазованих акустичних антенних решіток дозволяє здійснювати електричне управління променем діаграми спрямованості при вимірюванні швидкості і напрямку вітру методом зондування в кількох напрямках. Раніше, при використанні дзеркальних акустичних антен, випромінювання сигналу в різних напрямках здійснювалося шляхом механічної зміни орієнтації антен.

З появою АР з'явилася також можливість реалізації методів адаптивної антенної обробки з метою підвищення захищеності содарів від завад. Однак використання акустичних антенних решіток у содарах має ряд особливостей, тому перш ніж впроваджувати методи акустичного зондування атмосфери з використанням АР на практиці, необхідно провести додаткові дослідження з метою з'ясування меж потенційних можливостей содарів, що відкриваються, шляхом виконання математичного комп'ютерного моделювання розроблених методів та їх подальшої експериментальної перевірки.

1. Аналіз методів і систем акустичного зондування атмосфери

Публікації, присвячені методу акустичного зондування атмосфери, з'явилися на початку 60-х років минулого століття [1, 5]. Внаслідок інтенсивного розвитку методу АЗ у різних країнах були створені теоретичні основи методу, сформульовані принципи побудови систем акустичного зондування та розроблена узагальнена структура содарів. На початковому етапі системи акустичного зондування атмосфери, як правило, виконувалися стаціонарними, їх будували з використанням безперервних за простором дзеркальних акустичних антен.

Методи та засоби захисту содарів від перешкод (звукоізоляційні бленди, укриття різного роду), що використовувались на початкових етапах розвитку методу АЗ, мали ряд недоліків: значні габаритні розміри та вага, складність транспортування, недостатня ступінь захисту від перешкод, що потрапляють у головний і боковий пелюстки діаграми спрямованості. Усе це в значній мірі впливає на якісні показники системи в цілому [5, 6].

Значним драйвером удосконалення систем АЗ є використання останніх досягнень електроніки, теорії обробки сигналів та комп'ютерної техніки. Використання науково-технічних досягнень у зазначених областях дозволяє розробляти багатофункціональні, зручні в управлінні та експлуатації станції.

Поява ефективних п'єзоелектричних акустичних випромінювачів, які дозволяють здійснювати випромінювання акустичних хвиль в атмосферу, забезпечила можливість використання антенних решіток у содарах [7 – 9]. Попередні спроби побудови акустичних антенних решіток у содарах на основі електродинамічних випромінювачів не були успішними. Електродинамічні випромінювачі характеризуються значним впливом погодних умов на їх роботу та нестабільністю фазочастотних характеристик.

Застосування фазованих п'єзоелектричних акустичних антенних решіток (ААР) у содарах дозволяє шляхом електричного управління променем діаграми спрямованості реалізувати методику зондування в кількох напрямках для вимірювання швидкості та напрямку вітру [10 – 12]. Раніше, при використанні дзеркальних акустичних антен, випромінювання сигналу в різних напрямках здійснювалося шляхом механічної зміни орієнтації антен.

Важливою перевагою систем зондування з АР є можливість як електронного управління променем (променями) діаграми спрямованості, так і можливість реалізації адаптивної просторової вибірковості залежно від наявної заводої обстановки, що дозволяє формувати «нулі» діаграми спрямованості в напрямку перешкоди, забезпечує можливість суттєво підвищити захищеність систем акустичного зондування від перешкод [11 – 13]. Наразі існує ряд закордонних систем акустичного зондування з АР та електронним управлінням променем діаграми направленості [15]. При цьому адаптивні методи просторово-часової обробки сигналів у них практично не використовуються. Тому розробка методів і засобів адаптації систем акустичного зондування атмосфери до метеорологічної та заводої обстановки, що змінюється, є актуальним науково-прикладним завданням сучасної теорії та техніки акустичного зондування.

В даний час содари для зондування атмосфери виробляються рядом науково-виробничих фірм [14 – 17]. Наприклад, содари марки FAS фірми Scintec є імпульсними акустичними локаторами [16]. Структурна схема содарів XFAS, FFAS, SFAS, які працюють у різних діапазонах частот і мають різну максимальну дальність дії, включає в себе плоску антенну решітку, модуль попередньої обробки сигналів та переносний комп'ютер для подальшої обробки результатів вимірювання параметрів атмосфери. Усі содари марки FAS (XFAS, FFAS, SFAS) аналогічні за конструкцією і відрізняються розмірами, вагою, діапазоном висот зондування та значенням роздільної здатності.

Кількість антенних елементів в антенній решітці содарів складає, як правило, кілька десятків (зазвичай 50-60 випромінювачів) [17]. Содари працюють у діапазоні частот від 600 до 5000 Гц. Помилки вимірювання швидкості вертикального вітру становлять 0,03...0,1 м/с, горизонтального вітру – 0,1...0,3 м/с, помилка вимірювання напрямку вітру складає 2-3 градуси. Максимальна висота зондування залежить від використовуваної частоти випромінювання і досягає 5000 м.

Содари FAS є представниками нової серії содарів, які використовують у якості антенної системи плоску фазовану антенну решітку. При порівняно невеликих розмірах (72×74×25 см) і масі 32 кг содар MFAS забезпечує вимірювання тривимірних профілів швидкості вітру та параметрів турбулентності з досить високими характеристиками. Діапазон висот зондування – від 15 до 1000 м, просторове розділення – від 10 м.

Плоска акустична антенна решітка, що входить до складу содарів серії FAS, є інновацією компанії Scintec. Оригінальне виконання елементів решітки, показане на рис. 1, базується на використанні концепції оберненого рупора, що забезпечує досить добре узгодження з атмосферою, дозволяє досягти покращення направлених властивостей антенної системи, збільшення динамічного діапазону та коефіцієнта перетворення електричної енергії в акустичну, а добре демпфування робить антенну систему менш чутливою до впливу опадів [16].

Кожен з елементів антенної решітки оснащений малoshумливим попереднім підсилювачем для випромінювання та прийому коливань. З метою зменшення впливу електромагнітних наводок попередні підсилювачі розташовуються в безпосередній близькості від елементів решітки.

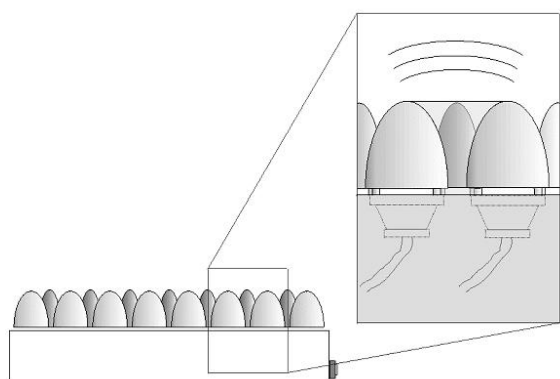


Рис. 1. Акустична антенна решітка фірми Scintec

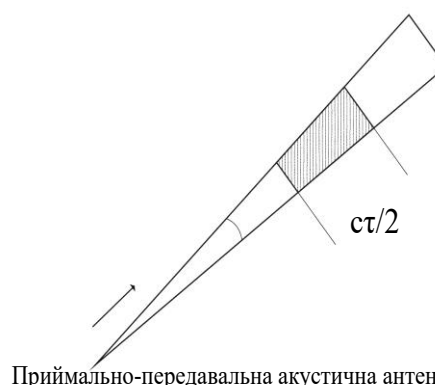


Рис. 2. Промінь діаграми спрямованості акустичної антени при зондуванні атмосфери

Акустичні локатори німецької фірми Metek – PCS.2000 (PCS.2000-24, PCS.2000-64). PCS.2000 є мінісодарами, призначеними для вимірювання швидкості вітру та характеристик турбулентності [14]. В якості антени в PCS.2000-24 та PCS.2000-64 використовуються акустичні плоскі ФАР, що складаються з 24 та 64 антенних елементів відповідно. Содари дозволяють вимірювати вертикальні профілі вітру в діапазоні висот від 15 до 1000 м. Особливістю серії акустичних локаторів PCS.2000 є можливість віддаленого доступу до вимірюваних даних. Для цього в содарах застосовано радіомодем GSM-стандарту.

В США фірмою AeroVironment розроблено та серійно виробляються содари – Model 4000, MiniSODAR з 32-елементною ФАР в якості антени. В Японії розроблено та введено в експлуатацію мобільний содар KAP-1000, реалізований з використанням ФАР [17].

Схема акустичного зондування атмосфери в одному напрямку представлена на рис. 2. Радіальна (по променю діаграми спрямованості антени) складова швидкості вітру в досліджуваному обсязі атмосфери визначається співвідношенням [18]

$$\vec{V}_r = \frac{c}{2 \cdot f} \cdot f_d, \quad (1)$$

де c – швидкість поширення звуку в повітрі; f_d – доплерівський зсув частоти зондувального сигналу; f – частота прийнятого акустичного сигналу.

Вимірювання радіальної швидкості вітру здійснюється в обсязі простору, обмеженому за дальністю величиною $ct/2$ (t – тривалість зондувального імпульсу), а в поперечному напрямку – тілесним кутом випромінювання (прийому) діаграми спрямованості акустичної антени локатора.

Найчастіше швидкість і напрямок вітру в атмосферному прикордонному шарі за допомогою содарів визначають методом зондувань у трьох різних напрямках [19]. В результаті такого зондування для кожного висотного шару атмосфери виконуються три вимірювання, результати яких входять у систему трьох рівнянь з трьома невідомими – ортогональними складовими швидкості вітру. Далі система рівнянь розв'язується відносно шуканих параметрів – складових швидкості вітру. Кількість зондувань може бути і більшою, ніж три, при цьому зберігається можливість визначення трьох невідомих атмосферних параметрів, а точність їх визначення зростає.

2. Постановка задачі дослідження

Розроблення останнім часом п'єзоелектричних випромінювачів, що забезпечують ефективне випромінювання акустичних хвиль у повітряне середовище, дало змогу створити акустичні антенні решітки та інтегрувати їх у структуру акустичного локатора, що виконує завдання дистанційного зондування атмосфери. Використання фазованих акустичних антенних решіток у структурі содара дає змогу здійснювати електричне сканування променем діаграми спрямованості під час вимірювання швидкості та напрямку вітру методом зондування в декількох напрямках. З'являється також можливість реалізації одночасного зондування атмосфери в декількох напрямках. Такий метод зондування підвищує оперативність і суттєво скорочує час, необхідний для вимірювання профілів швидкості та напрямку вітру. Крім того, підвищуються якісні характеристики результатів вимірювань, зумовлені виконанням послідовного зондування в різних напрямках.

З появою АР забезпечується також можливість реалізації методів адаптивного просторового оброблення сигналів з метою підвищення завадозахищеності содарів. Однак використання акустичних антенних решіток у содарах має і низку особливостей, зумовлених виконанням одночасного зондування в кількох напрямках, особливостями поля акустичних завад, наявністю суттєвої рефракції під час поширення акустичних хвиль в атмосфері. Тому необхідно провести додаткові дослідження з метою реалізації значних потенційних можливостей содарів, що відкриваються, при використанні акустичних антенних решіток. Необхідно розробити адекватні математичні моделі акустичних сигналів, виконати математичне комп'ютерне моделювання методів, що розробляються, і здійснити їх подальшу експериментальну перевірку.

3. Метод одночасного зондування атмосфери у кількох напрямках

У задачах радіолокації, де напрямок приходу корисного сигналу зумовлений наявністю дискретних зосереджених цілей, а оптимізація здійснюється, наприклад, за критерієм максимуму відношення сигнал-перешкода на виході антени [18, 20], у задачах акустичного зондування атмосфери напрямок випромінювання зондувального сигналу і напрямок приймання розсіяних акустичних сигналів може змінюватись у деяких доволі широких межах. При цьому звукові хвилі, що зондують простір, розсіюються на природних турбулентних неоднорідностях середовища, які розподілені практично ізотропно в атмосфері. Ця обставина є фізичною передумовою для виконання зондування атмосфери в різних напрямках, які можна вибирати залежно від наявної метеорологічної або завадостійкої обстановки.

Розглянемо особливості зондування атмосфери акустичними локаторами, у складі яких використовуються акустичні антенні решітки. Нехай є ААР з N акустичними елементами. Вектор вагових коефіцієнтів (ВВК) антенної решітки $\vec{Z}^T = [Z_1, Z_2, \dots, Z_N]$, що формує діаграму спрямованості антени, в умовах, коли в середовищі присутній тільки власний шум приймача антенних елементів, повністю збігається з вектором управління (вектором кореляції) $\vec{V}(\beta_0)$, який визначає вигляд, форму діаграми спрямованості $E(\beta_0, \beta)$ системи та напрямок її головної пелюстки. При цьому максимум діаграми спрямованості припадає на напрямок β_0 . Вираз, що визначає вектор керування системи, має вигляд [18]

$$\vec{V}^T = [V_1, V_2, \dots, V_N], \quad (2)$$

де елемент вектору управління V_k записується у вигляді $V_k = v_k \cdot \exp(j[2\pi(\kappa - 1)d \cdot \sin\theta_0]/\lambda)$, $k = 1, \dots, N$.

Значення коефіцієнтів v_k , що описують розподіл акустичного поля апертурою антенної системи, обирають таким чином, щоб забезпечити необхідну форму і параметри діаграми спрямованості – основної та бічних пелюсток. Якщо, наприклад, розподіл поля по апертурі буде рівномірним, «стілоподібним», то значення параметрів $v_k=1$, $k = 1, \dots, N$, $\beta=0$ і рівень

першої бічної пелюстки діаграми спрямованості становитиме -13,5 дБ, а діаграма спрямованості антенної системи описуватиметься співвідношенням [6]

$$|E(\beta_0, \beta)| = |\vec{S}^T \cdot \vec{V}^*(\beta_0)| = \left| \sum_{k=1}^N v_k \cdot \exp\left(\frac{j(k-1)2\pi d}{\lambda} [\sin \beta - \sin \beta_0]\right) \right|, \quad -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2, \quad (3)$$

де d – відстань між елементами антенної решітки; λ – довжина хвилі акустичного сигналу.

Вектор корисного сигналу \vec{S} у формулі (3) являє собою вектор-стовпчик сигналів одичної амплітуди, які приймає антенна решітка з напрямку β (або які випромінюються в зазначеному напрямку). Зміна (оптимізація) значень коефіцієнтів v_k дає змогу змінювати форму діаграми спрямованості, домагаючись необхідної її форми, або максимізувати коефіцієнт спрямованої дії антенної решітки.

Багатопелюсткова діаграма спрямованості (рис.3), що формується за допомогою акустичної антенної решітки содара, яка забезпечує виконання одночасного зондування атмосфери в декількох різних напрямках, визначається формулою

$$\left| \sum_{i=1}^l E(\beta_i, \beta) \right| = \left| \sum_{i=1}^l \vec{S}^T \cdot \vec{V}^*(\beta_i) \right| = \left| \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^N v_k \cdot \exp\left(\frac{j(k-1)2\pi d}{\lambda} [\sin \beta - \sin \beta_i]\right) \right|, \quad (4)$$

де β_i – напрямок i -го зондування.

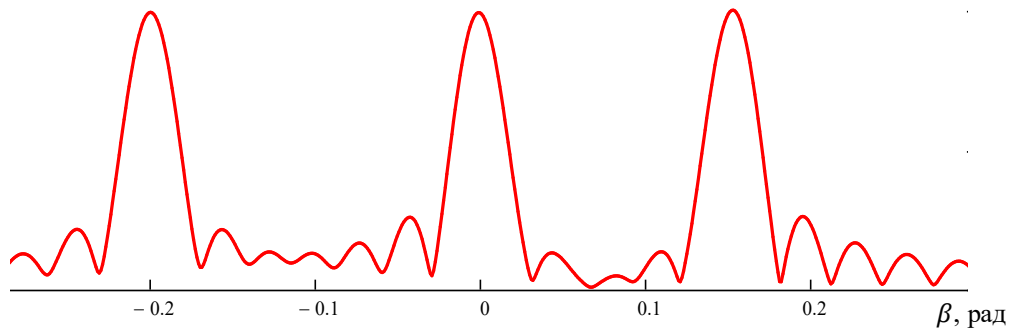


Рис. 3. Діаграма спрямованості антенної решітки содара, що забезпечує одночасне зондування атмосфери в трьох різних напрямках на частоті 1140 Гц

Діаграма спрямованості акустичної антенної решітки (рис. 4), що забезпечує виконання одночасного зондування атмосфери в декількох різних напрямках і на різних частотах зондувального сигналу, описується співвідношенням

$$\left| \sum_{i=1}^l E(\beta_i, \beta) \right| = \left| \sum_{i=1}^l \vec{S}^T \cdot \vec{V}^*(\beta_i) \right| = \left| \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^N v_k \cdot \exp\left(\frac{j(k-1)2\pi d}{\lambda_i} [\sin \beta - \sin \beta_i]\right) \right|, \quad (5)$$

де β_i – напрямок i -го зондування, λ_i – довжина хвилі, яка визначає частоту зондування в i -му напрямку).

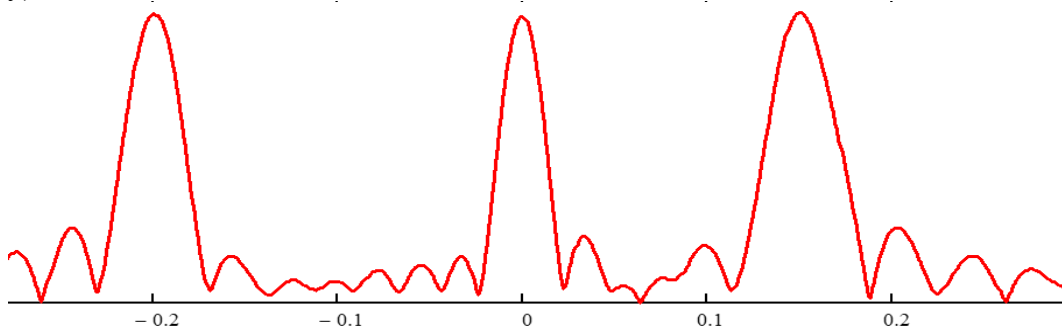


Рис. 4. Діаграма спрямованості антенної решітки содара, що забезпечує одночасне зондування атмосфери в трьох різних напрямках і на трьох різних частотах (1140 Гц, 1460 Гц, 930 Гц)

Як випливає з рис. 4, оскільки зондування атмосфери в різних напрямках здійснюється на різних частотах, то і ширина кожного променя багатопелюсткової діаграми спрямованості при цьому формується різна.

4. Реалізація адаптивної просторової вибіркості у содарах

Розглянемо можливості використання антенних решіток содарів для боротьби із зовнішніми акустичними завадовими коливаннями, що формуються різноманітними зовнішніми джерелами акустичного випромінювання.

У цьому разі акустична решітка содара використовується як адаптивна акустична антенна решітка (АААР). За появи джерел зовнішніх акустичних перешкод діаграма спрямованості АААР видозмінюється таким чином, що в напрямках, з яких діють джерела зовнішніх шумів, у діаграмі спрямованості антени формуються локальні мінімуми – «нулі». При цьому, рівень кожного мінімуму діаграми спрямованості та швидкість адаптації антенної решітки залежатимуть від величини відношення «завада-тепловий шум», а оптимальний у сенсі максимуму відношення «сигнал-завада» ВВК обчислюється згідно з виразом

$$\vec{Z}_{opt}(\beta_0) = \eta \cdot \vec{R}^{-1} \cdot \vec{V}^*(\beta_0), \quad (6)$$

де η – комплексний нормувальний множник; $\vec{R} = E\{\vec{N}^* \cdot \vec{N}^T\}$ – кореляційна матриця суміші зовнішньої активної шумової завади і власного шуму приймальних елементів акустичної решітки; $\vec{N}^T = [n_1, n_2, \dots, n_N]$ – вектор миттєвих значень напруг завади на виходах елементів акустичної антенної решітки; \vec{V} – вектор управління діаграмою спрямованості АААР.

Вираз (6), що визначає процес адаптації антенної решітки, є відомим вінерівським рішенням в області просторової фільтрації корисного сигналу на фоні перешкод. Адаптація, або знаходження оптимального значення ВВК АААР відповідно до зазначеного алгоритму, здійснюється в паузах між приходом корисних луна-сигналів, що несуть інформацію про стан атмосфери. Таким чином, цей алгоритм адаптації виявляється практично інваріантним до структури і параметрів розсіяного, а також зондувального акустичних сигналів за умови, що вказані сигнали є вузькосмуговими в просторово-часовому сенсі.

Якщо ця умова не виконується, то алгоритм адаптації акустичної антенної решітки содара буде значною мірою залежить від властивостей зондувального та розсіяного акустичного сигналів. Коли сигнал є відносно вузькосмуговим, прийнятий просторово-часовий сигнал відповідає умові факторизації (вузькосмуговості в просторово-часовому сенсі), часова і просторова структури сигналу в цьому разі розділяються і можливе роздільне виконання спочатку просторової, а потім і часової обробки.

Умова факторизації просторово-часового акустичного сигналу записується у вигляді [21]

$$|R(0)|^{-2} \int_{-\infty}^{\infty} |R(\tau)|^2 d\tau = \tau_{ef} \gg \Delta t_{max} \quad , \quad (7)$$

де $R(\tau)$ – часова автокореляційна функція акустичного сигналу, що приймається; τ_{ef} – ефективна ширина пелюстки автокореляційної функції; Δt_{max} – максимальний час затримки акустичного сигналу під час поширення його вздовж апертури антенної решітки. Для широкосмугового в просторово-часовому сенсі акустичного сигналу умова факторизації не виконується і розділення обробки на просторову і часову неможливе.

Результати моделювання процесу адаптації акустичної антенної решітки під час впливу на вхід системи шумоподібної акустичної завади, що діє з напрямку 40 градусів, показано на рис. 5. Як видно, вихідна діаграма спрямованості акустичної антенної решітки в процесі адаптації видозмінюється, і в напрямку дії акустичної завади формується «нуль» діаграми спрямованості, внаслідок чого співвідношення сигнал-шум на виході системи обробки підвищується та поліпшуються умови приймання корисного сигналу, що несе інформацію про стан атмосфери.

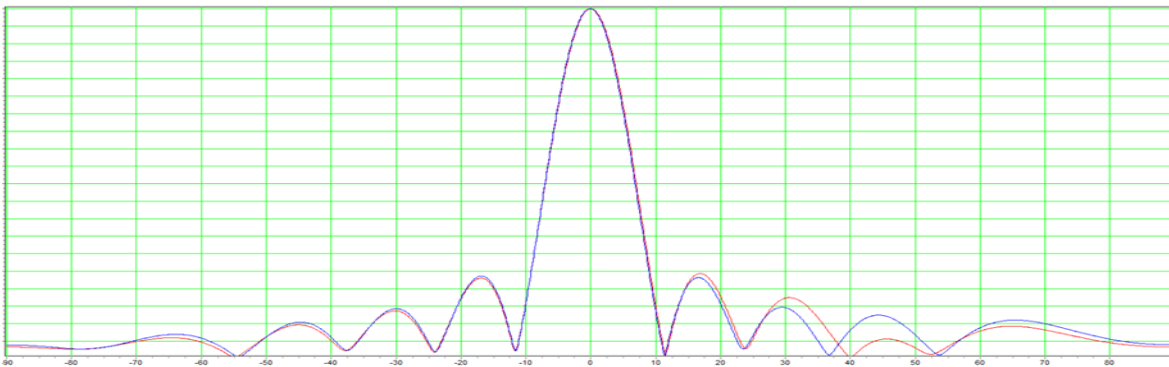


Рис. 5. Діаграми спрямованості акустичної антенної решітки:
1 – неадаптованої; 2 – адаптованої, під час впливу акустичної завади з напрямку 40 градусів

Висновки

1. Метод дистанційного акустичного зондування атмосфери інтенсивно розвивається в останні десятиліття. Він надає можливість отримувати висотні профілі швидкості та напрямку вітру, профілі характеристик турбулентності атмосфери. Результати зондування можуть бути використані для метеорологічного забезпечення зльоту і посадки літальних апаратів, метеорологічного забезпечення екологічних завдань запобігання забрудненню повітря, у задачах вивчення атмосферних процесів.

2. Техніка акустичного зондування також динамічно розвивається останнім часом. Внаслідок інтеграції досягнень електроніки та комп'ютерної техніки в структуру акустичного локатора, він став менш габаритним, легшим, більш функціональним. Розроблення ефективних п'єзоелектричних акустичних випромінювачів забезпечило можливість створення акустичних антен содарів у вигляді антенних решіток, що справило значний вплив на структуру акустичного локатора і надає змогу суттєво розширити його потенційні можливості. Процес, що розглядається, можна порівняти зі зміною технічного вигляду і можливостей систем радіолокації та систем радіозв'язку під час впровадження в них антенних решіток.

Однак використання акустичних антенних решіток у содарах має і низку особливостей, зумовлених можливістю виконання одночасного зондування в кількох напрямках, особливостями поля акустичних завад, наявністю суттєвої рефракції під час розповсюдження акустичних хвиль в атмосфері. Тому необхідно провести додаткові дослідження з метою реалізації значних потенційних можливостей содарів, що відкриваються, під час використання акустичних антенних решіток: розробити адекватні математичні моделі акустичних сигналів, виконати математичне комп'ютерне моделювання методів, що розробляються, та їхню подальшу експериментальну перевірку.

3. Розглянуто методи дистанційного зондування атмосфери содарами з антенною решіткою при виконанні одночасного зондування у декількох напрямках. Розроблено адекватні математичні моделі акустичних сигналів і методів багатоканального зондування, виконано математичне комп'ютерне моделювання процесів зондування. Проаналізовано запропонований метод при виконанні одночасного зондування атмосфери в декількох напрямках на одній частоті, а також при використанні різних частот зондувальних сигналів у різних напрямках. Реалізація розглянутих методів на практиці забезпечить підвищення оперативності та скорочення часу вимірювання характеристик атмосфери.

4. Виконано математичне моделювання методів адаптивної просторової вибіркової акустичних локаторів з адаптивною антенною решіткою. Показано їхні значні потенційні можливості. Реалізація таких методів на практиці дозволить суттєво підвищити завадозахищеність акустичних локаторів, особливо за їхньої роботи в умовах складної заводової обстановки, наприклад в умовах аеропорту або в межах мегаполісу.

Список літератури:

1. Bradley S. Atmosphere Acoustic Remote Sensing. Principles and Application. CRC Press. 2007. 267 p.
2. Lataitis R.J. Theory and Application of a radio-acoustic sounding system (RASS): NOAA Technical Memorandum ERL WPL-230 // Nat. Oceanic and Atmos. Admin. Environ, Res. Labs. Boulder, CO, 1993. 207 p.
3. Kartashov V.M., Tikhonov V.A., Oleinikov V.N. Signal processing in radio electronic systems for remote monitoring of the atmosphere. Kharkiv, KNURE, 2014. 312 p.
4. Remtech Radio Acoustic Sounding System (RASS) for remote sensing of temperature. URL: <https://remtechinc.com/wp-content/uploads/RASS3.pdf>.
5. Kartashov V., Babkin S., Kartashov A., Pershyn Y. Development of the Atmosphere Radio-Acoustic Sounding Method in Ukraine and in the World in the Period of 1961-2000 // 2023 IEEE 6th International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, UkrMiCo 2023, 13–15 November 2023, Kyiv, Ukraine. P. 372–376. DOI: 10.1109/UkrMiCo61577.2023.10380339
6. Карташов В.М. Моделі і методи обробки сигналів систем радіоакустичного і акустичного зондування атмосфери. Харків : ХНУРЕ, 2011. 234 с.
7. Kartashov V.M. Estimation of Signal Parameters Scattered by an Acoustic Wave Packet // Telecommunications and Radio Engineering., 2004. Vol. 61, №2. P. 125–129.
8. Muradyan P., Richard Coulter R. Radar Wind Profiler (RWP) and Radio Acoustic Sounding System (RASS) Instrument Handbook. March, 2020. Environmental Science Division, Argonne National Laboratory. 20 p. URL: https://www.arm.gov/publications/tech_reports/handbooks/rwp_handbook.pdf.
9. Kartashov V.M. Signal Scattering Functions of Atmospheric Sounding System // Telecommunications and Radio Engineering, 2003, Vol. 59, №7-8-9, pp. 88–94.
10. Kartashov V. M., Tikhonov V. A., Voronin V. V. Features of Construction and Application of Complex Systems for the Atmosphere Remote Sounding // Telecommunications and Radio Engineering. 2017. Vol. 76, №8. P.743–749.
11. V. Kartashov, V. Oleynikov, I. Korytsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin. Processing of Wide Band Acoustic Signals During Detection of Unmanned Aerial Vehicles // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). Kharkiv, Ukraine, September 21 – 25, 2020. Vol. 1 on 2020 IEEE 12th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). P. 35–39.
12. Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision/ O. Sergiyenko, J.C. Rodriguez-Quiñonez, IGI Global, 2016. 341p.
13. Oleynikov V. N , Zubkov O. V., Kartashov V. M., Korytsev I. V., Babkin S. I., Sheiko S. A. Investigation of detection and recognition efficiency of small unmanned aerial vehicles on their acoustic emission // Telecommunications and Radio Engineering. 2019. Vol. 78, Issue 9. P. 759–770.
14. Doppler SODAR PCS.2000. URL: <https://metek.de/product-group/doppler-sodar/>.
15. Remtech introduces the miniature PA-XS acoustic wind profiler. URL: <https://remtechinc.com/>.
16. Wind Profilers. URL: <https://www.scintec.com/catalogs/wind-profilers>
17. AeroVironment Inc. URL: <http://www.aerovironment.com>
18. Ситнік О.В., Карташов В.М. Радіотехнічні системи : навч. посіб. Харків : Сміт, 2009. 448 с.
19. Chandrasekhar Sarma, T. V., Narayana Rao, D., Furumoto, J., and Tsuda, T. Development of radio acoustic sounding system (RASS) with Gadanki MST radar – first results // Ann. Geophys. 2008. Vol. 26. P. 2531–2542. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-2531-2008>
20. Kartashov V.M., Tikhonov V.A., Voronin V.V. and Tymoshenko L.P. Complex model of random signal in problems of acoustic sounding of atmosphere // Telecommunications and Radio Engineering. 2016. V. 75, Iss. 20. P.1885–1892.
21. Beyrich F., Engelbart D., Gorsdorf U., Neisser J. Simultaneous Measurements of Vertical Profiling Systems-a Contribution to the “Lindenberg Column // Proc. 8th Int. Symp. on Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere and Oceans (ISARS). Moscow, 1996. P. 3.73–3.78.

Надійшла до редколегії 19.01.2025

Відомості про авторів:

Карташов Володимир Михайлович – д-р техн. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем; Україна; email: volodymyr.kartashov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8335-5373>

Бобнів Роман Олександрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем; Україна; email: _roman.bobniev@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9322-9722>