

УДК 621.396.96:551.508.8

**СТАН НАУКИ І ТЕХНІКИ РАДІОАКУСТИЧНОГО
ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРИ ТА НАПРЯМКИ
ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗОНДУВАЛЬНИХ СИГНАЛІВ**

Шамрай А.П.

e-mail: anton.shamrai@nure.ua

Науковий керівник – д.т.н., проф. Карташов В.М.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МІРЕС
м. Харків, Україна

This work analyzes the current state of radio-acoustic sounding (RASS) of the atmosphere. While modern commercial systems (e.g., Metek, Remtech, Scintec) demonstrate high technological capabilities in temperature profiling, they face fundamental physical limitations, such as the acoustic wave wind drift and Bragg condition violations. To overcome these challenges, the synthesis of vector sounding oscillations is proposed. Joint analysis of acoustic and electromagnetic signals in abstract functional spaces enables the creation of optimal sounding signals adapted to variable atmospheric conditions, significantly improving overall RASS efficiency.

Вступ. Дослідження атмосферного пограничного шару (АПШ), в якому відбувається механічна взаємодія та термодинамічний обмін рухомих повітряних мас із підстилаючою поверхнею, є вкрай важливим для метеорології, екології та авіації. Одним із найперспективніших методів дистанційного отримання оперативної інформації про вертикальні профілі температури та швидкості вітру є радіоакустичне зондування (РАЗ). Історія розвитку цього методу у світі та в Україні, починаючи з 1961 року, була спрямована на створення надійних комплексів для безперервного моніторингу [1]. Фізичною основою методу є розсіяння електромагнітних хвиль на періодичних неоднорідностях діелектричної проникності повітря, які створюються потужним акустичним хвильовим фронтом [2, 3]. Проте, незважаючи на значний розвиток теоретичної бази, ефективність існуючих локаційних засобів залишається недостатньою при роботі у складних погодних умовах, що робить актуальним аналіз стану сучасної техніки та розробку нових підходів до синтезу сигналів [4].

Аналіз стану техніки (комерційні системи РАЗ). Сучасні системи РАЗ є складними апаратно-програмними комплексами, які зазвичай реалізуються як радіолокаційні розширення (додатки) до існуючих акустичних локаторів (содарів) або радарних профайлерів. Аналіз продукції провідних фірм дозволяє виділити ключові тенденції розвитку апаратної частини.

Німецька компанія Metek GmbH пропонує систему Temperature Profiler RASS як ідеальне розширення для сімейства доплерівських содарів PCS.2000. Система використовує радар безперервного випромінювання (CW RADAR) для вертикального зондування віртуальної температури та

ідентифікації висоти інверсійних шарів. Передавачі працюють на частотах 915 МГц або 1290 МГц із роздільними антенами діаметром 1.8 м або 2.4 м, що дозволяє проводити вимірювання на висотах від 40 до 1000 метрів із високою точністю (похибка температури ≤ 0.3 К) [5]. Англійська компанія Biral (партнер Metek) також пропонує цю інтегровану систему для вивчення температурної стратифікації та оцінки концентрації забруднювачів.

Французько-американська компанія Remtech Inc. випускає системи RASS для дистанційного вимірювання профілів температури, які додаються до їхніх содарів RA-0 або RA-5. Система Remtech також базується на СВ-радарі, що дозволяє отримувати точні дані на висотах до 1500 метрів (мінімальна висота 100 м) з точністю 0.2° С. Пристрій відрізняється енергоефективністю (споживання всього 200 Вт) і компактністю (вага 120 кг).

Компанія Scintec розробляє рішення RASS як для радарних профайлерів (серії LAP 3000/8000), так і для содарів (моделі SFAS, MFAS, XFAS). Ця апаратура дозволяє отримувати вертикальні температурні профілі з високою просторовою роздільною здатністю, використовуючи багаточастотне зондування та передові фазовані антенні решітки.

Проблематика та обмеження існуючих систем. Незважаючи на потужне апаратне забезпечення комерційних систем, вони мають принципові фізичні обмеження. Найважливішим серед існуючих обмежень систем РАЗ є вітровий знос плями розсіяного радіосигналу внаслідок переміщення акустичного хвильового пакета під дією вітру [3]. Іншою критичною проблемою є порушення умови просторового синхронізму (умови Бреґґа) по трасі зондування [2]. У реальній атмосфері через зміну температури змінюється довжина акустичної хвилі, що викликає розлад умови Бреґґа в області хвильових частот [3]. Це призводить до втрати когерентності та різкого падіння потужності відбитого сигналу.

Існуючі системи намагаються вирішити ці проблеми здебільшого на етапі прийому або нарощуванням потужності, однак помилки у виборі зондувальних сигналів на етапі проектування усунути алгоритмічно вкрай важко. Зондувальні сигнали (акустичний та електромагнітний) мають різну фізичну природу, що вимагає їх спільного і глибокого аналізу [4].

Синтез векторних зондувальних коливань і структур обробки. У зв'язку з виявленими недоліками, синтез векторних зондувальних коливань і структур обробки сигналів систем радіоакустичного зондування атмосфери має високу актуальність. Для подолання проблем розладу умови Бреґґа пропонується новий підхід: процес взаємодії акустичних та електромагнітних сигналів описується за допомогою функціонального аналізу в абстрактному математичному просторі [4].

Оскільки в системах РАЗ випромінюється пара сигналів, вони розглядаються сумісно як єдиний вектор. Розроблено математичну модель, що визначає відстань між векторами зондувальних сигналів у такому просторі, де аргументами є просторова координата та параметр розладу умови Бреґґа.

га. Дослідження поверхонь відстаней показує, що при використанні традиційних прямокутних імпульсів з крутими фронтами, у функціональному просторі виникають значні бічні пелюстки. Це призводить до погіршення зв'язку сигналів при флуктуаціях параметрів атмосфери. Натомість, синтез сигналів із гаусовими формами обвідних забезпечує гладку монотонну поверхню відстаней без бічних пелюсток, що гарантує стабільне зближення векторів сигналів та надійне виконання умов розсіювання.

Вдосконалення структур обробки полягає у переході до адаптивних багатоканальних пристроїв, де опорний сигнал для кожного каналу формується з урахуванням сукупності значень параметра розладу умови Брегга [4]. Це дозволяє врахувати внутрішню структуру розсіяного сигналу і значно підвищити точність оцінки метеорологічних параметрів.

Висновки. Проведений аналіз стану комерційної апаратури показує, що подальший розвиток систем РАЗ потребує відходу від емпіричного підбору зондувальних посилок. В рамках [4] доведено, що математичний апарат функціональних просторів дозволяє спільно аналізувати електромагнітний та акустичний сигнали. Синтез векторних коливань (наприклад, перехід до гаусових обвідних) та застосування багатоканальної адаптивної обробки ефективно вирішує проблеми порушення умови Брегга та підвищує загальну точність і дальність дії комплексів нового покоління.

Список використаних джерел:

1. Bradley S. Atmosphere Acoustic Remote Sensing. Principles and Application. CRC Press. 2007. 267 p.
2. Latatits 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. Ситнік О.В., Карташов В.М. Радіотехнічні системи. Навч. посібник. Х.: Сміт, 2009. 448 с.
4. 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. pp. 372-376.
5. Temperature Profiler RASS (METEK GmbH). URL: <https://metek.de/product-group/rass/> (access date 27.01.2026).