

УДК 621.396.96:551.508.8

**АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ НАУКИ І ТЕХНІКИ
У ГАЛУЗІ РАДІОАКУСТИЧНОГО ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРИ
З ВИКОРИСТАННЯМ КВАЗІНЕПЕРЕРВНИХ
ЗОНДУЮЧИХ СИГНАЛІВ**

Кондрашов І. Є.

e-mail: ihor.kondrashov@nure.ua

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

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

The current state of science and technology in the field of radio-acoustic sounding (RAS) of the atmosphere is examined, with a specific focus on systems utilizing quasi-continuous sounding signals. The transition from traditional pulsed radars to quasi-continuous signals, such as Frequency-Modulated Continuous Wave (FMCW), allows for a significant reduction in peak power while improving altitude resolution and minimizing blind zones. The study reviews the physical principles of the Bragg scattering effect, evaluates the technical advantages of quasi-continuous radars, and analyzes modern commercial solutions from leading manufacturers (Metek, Biral, Remtech, Scintec). Key engineering challenges, including acoustic wave wind drift compensation and real-time signal processing, are discussed, outlining prospects for the integration of modular RAS systems in contemporary meteorological monitoring.

Моніторинг термодинамічних параметрів атмосфери, зокрема профілів температури та швидкості вітру, є критично важливим завданням для сучасної метеорології, екології та забезпечення безпеки авіаційних польотів. Серед методів дистанційного зондування радіоакустичне зондування (РАЗ) виділяється високою точністю та можливістю безперервного отримання даних у режимі реального часу.

Особливу роль такі системи відіграють при дослідженні прикордонного шару атмосфери, де відбуваються основні процеси тепло- та масообміну між поверхнею Землі та атмосферою. Отримання оперативної інформації про вертикальні профілі температури та швидкості вітру дозволяє покращити прогнозування погодних умов, моделювання атмосферної турбулентності та контроль екологічного стану повітряного середовища.

Сучасний розвиток радіоелектроніки зумовив перехід від традиційних імпульсних радіолокаторів до використання квазінеперервних зондуючих сигналів (зокрема FMCW), що дозволило вирішити проблеми "мертвих зон" та високого енергоспоживання.

Метод РАЗ базується на явищі розсіювання електромагнітних хвиль на штучно створених акустичних неоднорідностях показника заломлення атмосфери. Акустичний випромінювач генерує звукову хвилю, а радіоло-

катор випромінює електромагнітну хвилю в тому ж напрямку.

Акустична хвиля створює періодичні зміни густини та показника заломлення повітря, що формує рухому дифракційну решітку для радіохвиль. У результаті взаємодії електромагнітної хвилі з такою структурою виникає когерентне розсіювання, інтенсивність якого визначається параметрами акустичного поля та характеристиками радіолокаційної системи [1].

Ефективне відбиття радіохвилі відбувається за умови виконання просторового синхронізму (умови Брегга)

$$\lambda_e = 2 \lambda_a \quad (1)$$

де λ_e – довжина електромагнітної хвилі, λ_a – довжина акустичної хвилі. Вимірюючи доплерівський зсув частоти відбитого сигналу, система визначає швидкість звуку, що дозволяє обчислити віртуальну температуру повітря.

У системах з квазінеперервним сигналом передавач випромінює безперервний сигнал із модульованою частотою. Відбитий сигнал змішується з випромінюваним, утворюючи сигнал різницевої частоти, пропорційний дальності до акустичного фронту. Загальний вигляд частотно-модульованого сигналу може бути представлений як

$$s(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \pi k t^2) \quad (2)$$

де f_0 – початкова частота сигналу, k – швидкість зміни частоти (коефіцієнт девіації).

Основними перевагами таких систем є зниження пікової потужності (достатньо передавачів потужністю від кількох міліват до кількох ват.), висока роздільна здатність, мінімізація мертвої зони, збір даних можливий з висот 10-20 метрів.

Крім того, використання квазінеперервних сигналів дозволяє значно підвищити відношення сигнал/шум, що є особливо важливим при зондуванні слабких акустичних неоднорідностей атмосфери [2]. Це забезпечує більш стабільну роботу системи у складних метеорологічних умовах.

Теоретичні переваги сучасних методів зондування активно впроваджуються провідними світовими виробниками метеорологічного обладнання. Характерною тенденцією ринку є модульність: системи РАЗ постаються як опціонально доповнення до існуючих вітрових профайлерів (содарів або радарів) [3, 5].

Симбіоз Содар-Радар: Більшість виробників (Scintec, Biral) йдуть шляхом об'єднання акустичних та електромагнітних систем в єдиний комплекс. Це дозволяє одночасно і з високою точністю отримувати профілі вітру та температури.

Компенсація вітрового зносу: У системах на зразок Remtech активно використовуються фазовані решітки для керування акустичним променем, що утримує акустичний фронт у межах діаграми спрямованості радара навіть за сильного вітру [4].

Усі розглянуті комплекси використовують потужні DSP-процесори для виділення слабких відбитих сигналів на фоні шумів, що є критичним при використанні сигналів малої потужності.

Цифрова обробка сигналів у сучасних системах РАЗ включає кореляційний аналіз, спектральну обробку та адаптивну фільтрацію, що дозволяє підвищити точність визначення параметрів атмосфери та зменшити вплив завад різної природи [2].

Перехід до квазінеперервних зондуючих сигналів є домінуючою тенденцією у розвитку систем радіоакустичного зондування. Аналіз ринку на прикладі систем від Metek, Biral, Remtech та Scintec свідчить про перехід від громіздких монолітних радарів до гнучких, модульних комплексів. Сучасне обладнання інтегрує FMCW-радары (радары з безперервним частотно-модульованим сигналом) з содарами, забезпечуючи моніторинг прикордонного шару атмосфери з високою просторовою роздільною здатністю, мінімальними сліпими зонами та зниженим енергоспоживанням.

Подальший розвиток систем радіоакустичного зондування пов'язаний із удосконаленням алгоритмів обробки сигналів, використанням широкомутових зондувальних сигналів та інтеграцією таких систем із іншими засобами дистанційного зондування атмосфери.

Список використаних джерел:

1. Kallistratova, M. A. Physical grounds for acoustic remote sensing of the atmospheric boundary layer // Lecture Notes in Earth Sciences. 1997. Vol. 69. P. 3–34.
2. Карташов В.М. Моделі і методи обробки сигналів систем радіоакустичного і акустичного зондування атмосфери. Харків : ХНУРЕ, 2011. 230 с.
3. RASS for Radar Wind Profilers. URL: <https://www.scintec.com/catalogs/rass-for-radar-wind-profilers/> (дата звернення 22.10.2025).
4. Remtech Radio Acoustic Sounding System (RASS) for remote sensing of temperature. URL: <https://remtechinc.com/wp-content/uploads/RASS3.pdf> (дата звернення 24.10.2025).
5. Temperature Profiler RASS. URL: <https://metek.de/product-group/rass/> (дата звернення 27.01.2026).