

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ТОЛСТИХ ЄЛИЗАВЕТА ГЕННАДІЇВНА

УДК 621.396.96: 551.51: 621.391.8

ДИСЕРТАЦІЯ
**УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ РАДІОАКУСТИЧНОГО
ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРИ**

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Є.Г. Толстих

Науковий керівник: Карташов Володимир Михайлович, доктор технічних наук,
професор

Харків – 2018 р.

АНОТАЦІЯ

Толстих Є.Г. Удосконалення моделей та методів радіоакустичного зондування атмосфери. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі вдосконалення моделей і методів радіоакустичного зондування атмосфери (РАЗ), які дозволять підвищити точність вимірювання характеристик атмосфери та визначити якісні показники їх вимірювання, а також обґрунтовано використовувати системи РАЗ на практиці.

Застосування комбінованої обробки сигналів систем РАЗ – доплерівської та кореляційної, забезпечує можливість дистанційної реєстрації висотних профілів вертикальної складової швидкості вітру. Введення в антенний пристрій системи РАЗ розподіленого акустичного випромінювача дозволяє одночасно вимірювати і горизонтальну складову швидкості вітру. Нова методика метрологічної атестації систем РАЗ, ґрунтується на метрологічній атестації основних пристроїв системи, що визначають похибку вимірювання інформаційного параметра відбитого сигналу системи. з урахуванням того, що сумарна похибка вимірювань метеорологічної величини, яка визначається похибками окремих пристроїв, в цілому не повинна перевищувати заданої для даного засобу.

Запропоновано метод прийому, який заснований на пасивній радіолокації плями розсіяних електромагнітних коливань, сфокусованих сферичними хвильовими фронтами акустичного пакету. На основі цього методу прийому сигналів розроблено метод вимірювання швидкості горизонтального вітру і його напрямку. Застосування подібних систем в практиці метеоспостережень забезпечує отримання вхідних даних – вертикальних градієнтів температури і швидкості вітру – для моделей

турбулентної дифузії викидів природного та антропогенного характеру, що забруднюють атмосферу, а також прогнозування дальності їх перенесення.

Проведена оцінка впливу видів зондуючих електромагнітного і акустичного сигналів на потенційну точність оцінки параметрів атмосфери. Дисперсія оцінки значень параметрів атмосфери залежить від значення параметра розстроювання умови Брегга, при якому формується приймальний радіосигнал. Зі збільшенням значень параметра розстроювання умови Брегга в атмосфері спостерігається ускладнення структури відбитого сигналу та має місце кутова модуляція сигналу. Така поведінка пояснюється впливом двох факторів: по-перше, енергія відбитого сигналу зі зменшенням тривалості акустичного сигналу зменшується повільніше при великих значеннях параметра розстроювання умови Брегга; по-друге, зі зменшенням тривалості акустичного зондуючого сигналу має місце тенденція спрощення структури відбитих від нього радіосигналів. Має місце залежність дисперсії від тривалості акустичного сигналу. Зі зменшенням тривалості акустичного сигналу значення дисперсії зростає.

Розроблено метод фільтрації миттєвих профілів температури, одержуваних системою РАЗ, що дозволяє зменшити час, який витрачається на отримання температурних профілів атмосфери з необхідною достовірністю, і дозволить виключити з результатів вимірювань похибки, які обумовлені нестационарним характером протікання атмосферних процесів.

Отримані в роботі моделі і методи можуть бути використані для вдосконалення існуючих і створення нових систем радіоакустичного зондування.

Розроблені метод фільтрації «миттєвих» профілів температури і метод прийому та обробки сигналів у системах РАЗ атмосфери, що заснований на пасивній радіолокації плями розсіяних електромагнітних коливань впроваджені в навчальний процес на кафедрі «Медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем» Харківського національного університету радіоелектроніки та при виконанні двох планових науково-

дослідних робіт, які виконувалися в Харківському національному університеті радіоелектроніки відповідно до тематичного плану Міністерства освіти і науки України, впроваджені: спосіб радіоакустичного зондування, який заснований на пасивній радіолокації плями розсіяних електромагнітних сигналів; методи вимірювання швидкості вертикального та горизонтального вітру системами радіоакустичного зондування, при застосуванні комбінованої обробки розсіяних сигналів – доплерівської і кореляційної; аналіз методичних похибок, що виникають за рахунок апіорної невизначеності висотного розподілу метеорологічних величин при реєстрації вертикальних профілів температури і вологості повітря з використанням кореляційної обробки прийнятих сигналів.

Ключові слова: радіоакустичне зондування, атмосфера, кореляційна обробка, пасивна локація.

ABSTRACT

Tolstykh Yelyzaveta. Improvement of models and methods of radio acoustic sensing of the atmosphere. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical science by specialty 05.12.17 – Radio Engineering and Television Systems. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2018.

Dissertation is devoted to solving a relevant scientific problem related to the improvement of models and methods of radio-acoustic sounding (RAS) the atmosphere, which will increase the accuracy of atmospheric characteristics measurement and determine the qualitative factors of their measurement, as well as substantiate the use of the RAS systems in practice.

The application of the combined Doppler and correlation signal processing in RAS systems provides the possibility of remote registration of wind velocity's vertical component high-altitude profiles. Usage in the RAS system's antenna of the distributed acoustic emitter also allows measuring simultaneously the horizontal

component of the wind velocity. The new method of system RAS metrological certification is based on the metrological certification of the system's main devices which determine the measurement error in the information parameter of the system reflected signal taking into account the fact that the total error of measurements of the meteorological value, which is determined by the errors of individual devices, in general should not exceed that specified for the given means.

The method of reception based on passive radar location of scattered electromagnetic oscillations spots and focused by spherical wave fronts of the acoustic package is proposed. The method of the measurement of horizontal wind speed and its direction was developed based on this method of reception of signals. The application of such systems in the practice of meteorological observations provides obtaining of the input data (vertical gradients of temperature and wind speed) for models of turbulent diffusion of natural and anthropogenic emissions polluting the atmosphere, as well as forecasting the range of their transfer.

The estimation of probing electromagnetic and acoustic signals waveforms influence on the potential accuracy of atmospheric parameters is carried out. The dispersion of the values of atmospheric parameters depends on the value of disintegration parameter of the Bragg's law, with the formation of a close radiosignal. There is an angle modulation of the signal and the complexity of the reflected signal structure is observed with the increase of the value of disintegration parameter of the Bragg's law in the atmosphere. This behaviour is due to the influence of two factors: firstly, the energy of the reflected signal decreases more slowly with large value of disintegration parameter of the Bragg's law with a decrease in the duration of the acoustic signal; and secondly, with a decrease in the duration of the acoustic probe signal there is a tendency to simplify the structure of the reflected radio signals from it. There is a dependence of the dispersion on the duration of the acoustic signal. With a decrease in the duration of the acoustic signal, the value of the dispersion increases.

The method of filtering the instantaneous temperature profiles obtained by the RAS system is developed. It allows reduce the time spent on obtaining the

atmosphere temperature profiles with the required reliability, and allow exclude errors from the measurement results.

The obtained models and caused by the unsteady nature of atmospheric processes methods can be used to improve the existing and to create new radio acoustic sounding system.

Both method of filtration of "instant" temperature profiles and the method of reception and processing of signals in systems of radiation of the atmosphere, based on passive radar of spots of scattered electromagnetic oscillations, have been developed in the educational process at the Department of Mediaengineering and Informational Radioelectronic Systems of the Kharkiv National University of Radio Electronics and in the performance of two scheduled research works carried out at the Kharkiv National University of Radio Electronics in accordance with the thematic plan Ministry of Education and Science of Ukraine introduced: radioacoustic sensing method that is based on passive radar spots scattered electromagnetic signals; Methods of measuring the velocity of vertical and horizontal winds by radio-acoustic sensing systems, using a combined processing of scattered signals both Doppler and correlation; analysis of methodological errors arising from a priori uncertainty of the altitude distribution of meteorological values when registering vertical profiles of temperature and humidity using correlation processing of received signals.

Keywords: radio acoustic sounding, atmosphere, correlation processing, passive radar location.

Список публікацій здобувача:

1. Выбор модели измерения скорости звука для оптимального линейного фильтра систем радиоакустического зондирования атмосферы В.М. Карташов, Д.Н. Куля, М.В. Кушнир, Е.Г. Толстых // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. техн. сб. Харьков, 2013. №173. С. 63-68.

2. Карташов В.М., Бабкин С.И., Толстых Е.Г. Расширение возможностей систем радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. техн. сб. Х.: ХНУРЭ, 2014. №179. С. 5-9.

3. Selection of the Model for Varying Speed of Sound for the Optimal Linear Filter of Atmosphere Radio Acoustic Sounding Systems / V.M. Kartashov, D.M. Kulia, M.V. Kushnir, E.G. Tolstyh // Telecommunications and Radio Engineering. New York, 2014. Vol. 73(9). P. 803-812.

4. Карташов В.М., Бабкин С.И., Толстых Е.Г. Пассивная локация пятна рассеянных сигналов при радиоакустическом зондировании атмосферы // Прикладная радиоэлектроника. Науч. техн. журнал. Х.: ХНУРЭ, 2015. Т. 14, №1. С. 59-63.

5. Карташов В.М., Бабкин С.И., Толстых Е.Г. Проблемы метрологической аттестации средств дистанционного зондирования атмосферы // Системы обработки информации: сб. науч. трудов. Х.: Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, 2015. вып. 6 (131). С.88-91.

6. Карташов В.М., Куля Д.Н., Толстых Е.Г. Потенциальная точность оценки информационного энергетического параметра сигнала в системах радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. техн. сб. Харьков, 2015. №182. С. 13-18.

7. Методические погрешности измерения метеовеличин при корреляционной обработке сигналов систем радиоакустического зондирования. Сообщение 1 / В.М. Карташов, С.И. Бабкин, Е.Г. Толстых, Н.Г. Лепеха // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. техн. сб. Харьков, 2015. №183. С. 18-23.

8. Systematic errors in measurement of meteorological variables in correlation processing of signal of radio acoustic sounding systems / V.M. Kartashov, S.I. Babkin, Y.G. Tolstykh, N.G. Lepaha // Telecommunications and Radio Engineering. New York, 2016. Vol. 75(9). P. 835-843.

9. Карташов В.М., Бабкин С.И., Толстых Е.Г. Методические погрешности измерения метеовеличин при корреляционной обработке сигналов систем радиоакустического зондирования. Сообщение 2 // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. техн. сб. Харьков, 2017. №189. С. 136-140.

10. Патент на винахід № 110446 «Спосіб дистанційного вимірювання вертикальної швидкості вітру радіоакустичним зондуванням атмосфери» Зареєстровано 25.12.2015. МПК G01S 13/95 (2006.1). Винахідники: Бабкін С.І., Карташов В.М., Толстих Є.Г.

11. Патент на винахід № 110858 «Пристрій для дистанційної реєстрації вертикального профілю температури атмосферного повітря». Зареєстровано 25.02.2016. МПК G01S 13/95 (2006.1). Винахідники: Бабкін С.І., Карташов В.М., Кушнір М.В., Толстих Є.Г.

12. Патент на винахід № 115725 «Спосіб визначення вологості повітря радіоакустичним зондуванням атмосфери» Зареєстровано 11.12.2017. МПК G01S 13/95 (2006.1). Винахідники: Бабкін С.І., Карташов В.М., Толстих Є.Г.

13. Толстых Е.Г. Моделирование алгоритмов оптимальной линейной фильтрации при различных моделях полезного сигнала // Радиотехника и молодежь в XXI веке: материалы XVIII междунар. молодежного форума, 14-16 апреля 2014 г. Х.: ХНУРЭ, 2014. Т. 3. С. 173-174.

14. Толстых Е.Г. Обоснование выбора модели полезного сигнала при использовании алгоритмов оптимальной линейной фильтрации // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций (РТ-2014): материалы 10-й междунар. молодёжной науч.-техн. конф., 12-17 мая 2014 г. Севастополь: СевНТУ, 2014. С. 51.

15. Толстых Е.Г. Расширение возможностей систем радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника и молодежь в XXI веке: материалы XIX междунар. молодежного форума, 20-22 апреля 2015 г. Х.: ХНУРЭ, 2015. Т. 3. С. 44-45.

16. Tolstykh Y. G., Babkin S. I. Antenna device for radio acoustic sensing with passive radiolocation // Proceedings of 2015 X Anniversary International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), April 21-24, 2015. Kharkiv, 2015. P. 249-250.

17. Карташов В.М., Шпоняк Р.С., Толстых Е.Г. Моделирование случайных процессов с использованием модели авторегрессии // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: матеріали 14 міжн. наук.-техн.конф., 5-10 червня 2015 р. Одеса, Хмельницький: ХНУ, 2015. С. 45-46.

18. Толстых Е.Г. Измерение горизонтального ветра при радиоакустическом зондировании атмосферы // Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті: матеріали ХХ міжнар. молодіжний форум, 19-21 квітня 2016 р. Х.: ХНУРЕ, 2016. Т. 3. С. 64-65.

19. Карташов В.М., Бабкин С.И., Толстых Е.Г. Измерение метеопараметров с использованием пассивной радиолокации пятна в системах РАЗ // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Матеріали 16 міжнар. наук.-техн. конференції 10-15 червня 2016 р. Одес. нац. акад. зв'язку ім. О.С. Попова. Одеса, Хмельницький: ХНУ, 2016. С. 57-58.

20. Карташов В.М., Тихонов В.А., Воронин В.В., Толстых Е.Г. Комплексирование систем дистанционного зондирования атмосферы // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: тези доповідей VIII Міжнародної науково-практичної конференції, 21-23 вересня 2016 р. Запоріжжя: ЗНТУ, 2016. С. 47-48.

21. Толстых Е.Г., Карташов В.М. Исследование качественных характеристик измерения параметров сигнала в системах РАЗ // 6-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», МРФ-2017. Конференция «Радиолокация. Спутниковая навигация. Радиомониторинг». Сборник научных трудов. Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, Издательство «Точка», 2017. С. 174-177.

22. Individual scans fusion in virtual knowledge base for navigation of mobile robotic group with 3D TVS / Mykhailo Ivanov, Oleg Sergiyenko, Vladimir Kartashov, Yelizaveta Tolstykh et al. // 6-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», МРФ-2017. Конференция «Радиолокация. Спутниковая навигация. Радиомониторинг». Сборник научных трудов. Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, Издательство «Точка», 2017. С. 55-60.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	14
ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ НАУКИ І ТЕХНІКИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРИ	23
1.1 Акустичні системи вітрового зондування атмосфери	23
1.2 Оптичні вітрові профайлери	27
1.2.1 Некогерентні доплерівські лідари	28
1.2.2 Когерентні доплерівські лідари	28
1.3 Радарні вітрові профайлери	30
1.3.1 Мобільна атмосферна РЛС вертикального зондування S-діапазону.	32
1.3.2 Профайлер AP1000.....	34
1.3.3 Станція LAR-3000.....	37
1.4 Метод радіоакустичного зондування	38
1.4.1 Суть методу РАЗ	38
1.4.2 Відомі системи РАЗ	42
1.4.3 Кореляційна обробка сигналів.....	55
1.4.4 Основні обмеження методу та систем РАЗ	59
1.4.5 Необхідність метрологічної атестації систем дистанційного зондування	59
1.4.6 Зменшення часу осереднення профілів	60
1.5 Висновки до першого розділу.....	61
РОЗДІЛ 2	
МЕТРОЛОГІЧНА АТЕСТАЦІЯ ЗАСОБІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРИ	64
2.1 Постановка задачі.....	64

2.2 Підходи щодо створення методик метрологічної атестації засобів дистанційного зондування атмосфери	65
2.3 Метрологічна атестація акустичних локаторів	68
2.4 Метрологічна атестація систем радіоакустичного зондування атмосфери.....	68
2.5 Висновки до другого розділу	74

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ СИСТЕМ РАДІОАКУСТИЧНОГО ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРИ	76
---	----

3.1 Вимірювання вертикальної швидкості вітру.....	77
3.1.1 Метод вимірювання вертикальної швидкості вітру	77
3.1.2. Оцінка похибок вимірювання вертикальної швидкості вітру	81
3.2 Вимірювання профілів температури при кореляційній обробці сигналів систем радіоакустичного зондування	83
3.2.1 Методика зондування і обробка сигналів.....	84
3.2.2 Оцінка впливу атмосфери на точність вимірювання метеовеличин. Реєстрація вертикальних профілів температури повітря.....	85
3.3 Вимірювання профілів вологості атмосфери	92
3.3.1 Аналіз розрахункової формули.....	92
3.3.2 Вплив атмосферної турбулентності	95
3.3.3 Вплив горизонтального вітру на похибку вимірювань.....	98
3.3.4 Вплив вертикальних градієнтів температури повітря і швидкості вітру	99
3.4 Висновки до третього розділу.....	100

РОЗДІЛ 4

МЕТОД ПРИЙОМУ РОЗСІЯНИХ СИГНАЛІВ.....	102
4.1 Фізичні передумови методу прийому розсіяних сигналів в системах РАЗ. Локація плями розсіяних коливань	103
4.2 Конфігурація антенного пристрою.....	104
4.3 Вимірювання горизонтальної швидкості вітру.....	106

4.4 Похибка вимірювання швидкості вітру	111	
4.5 Висновки до четвертого розділу	114	
РОЗДІЛ 5		
ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОЦІНЮВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ ПРОФІЛІВ МЕТЕОПАРАМЕТРІВ.....		115
5.1 Аналіз точності оцінки інформаційного енергетичного параметра сигналу.....		115
5.1.1 Співвідношення для розрахунку потенційної точності вимірювання параметрів сигналу.....		115
5.1.2 Залежність потенційної точності вимірювання параметрів сигналу від виду зондуючих сигналів		116
5.1.3 Вплив енергетичного характеру інформаційного параметра на потенційну точність оцінки.....		122
5.2 Фільтрація миттєвих профілів метеопараметрів.....		123
5.2.1 Постановка задачі.....		123
5.2.2 Моделі профілів метеопараметрів.....		124
5.2.3 Рівняння лінійної фільтрації оцінок швидкості звуку в системах РАЗ.....		128
5.2.4 Вибір моделі зміни швидкості звуку.....		129
5.3 Висновки до п'ятого розділу		134
ВИСНОВКИ.....		137
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		141
ДОДАТОК А		
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ.....		156
ДОДАТОК Б		
СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....		160

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЕС	Атомна електростанція
АЗ	Акустичне зондування
АЗЧ	Апаратура звукової частоти
АОІ	Апаратура обробки інформації
АП	Антенний пристрій
АЦП	Аналого-цифровий перетворювач
ВЗ	Вертикальне зондування
ЗБ	Збудник
ЗГ	Генератор, що задає
КДЛ	Когерентний доплерівський лідар
КТ	Комутатор
МШП	Малощумний підсилювач
ПК	Персональний комп'ютер
ПВЧ	Підсилювач верхньої частоти
ПНЧ	Підсилювач нижньої частоти
ПП	Підсилювач потужності
РАЗ	Радіоакустичне зондування
РЛС	Радіолокаційна станція
РПП	Радіопередавальний пристрій
РПрП	Радіоприймальний пристрій
СЗ	Синтезатор частот
ТЕЦ	Теплоелектроцентраль
ФОЧ	Формувач опорних частот
ФДЧ	Фільтр доплерівської частоти
RASS	(Radio Acoustic Sounding System) Система радіоакустичного зондування
WT RASS	Вітро-температурна радіоакустична система

	зондування
RWP	(Radar Wind Profilers) Вітровий радіолокаційний профайлер
SODAR	(Sonic Detection And Ranging) Акустичний радар

ВСТУП

Актуальність теми.

Погода і клімат планети Земля визначаються динамічними процесами, які відбуваються в атмосфері, і безпосередньо впливають на життя і діяльність людини. Отримання інформації про розподіл метеорологічних параметрів в атмосфері можливе за допомогою контактних та дистанційних методів вимірювань [1]. На даний час значного поширення набули дистанційні методи зондування, які дозволяють при малих експлуатаційних витратах вести з поверхні землі тривалі безперервні вимірювання у всьому шарі зондування і таким чином контролювати динаміку атмосферних процесів [2].

Метод радіоакустичного зондування атмосфери дозволяє дистанційно реєструвати профілі основних метеорологічних величин – температури і вологості повітря, швидкості і напрямку вітру [3]. Протягом тривалого часу цей метод розвивався на базі доплерівської радіолокації пакета акустичних хвиль, який поширюється в атмосфері в напрямку зондування. Однак ряд особливостей, властивих доплерівській радіолокації просторово розподілених неоднорідностей, які створюються звуковою хвилею, помітно ускладнили впровадження його в практику метеоспостережень.

Практичне використання методу і систем РАЗ при вирішенні актуальних задач стримується також відсутністю методик метрологічної атестації засобів радіоакустичного дистанційного вимірювання метеорологічних параметрів атмосфери. Існує необхідність в удосконаленні методів обробки сигналів, в розробці нових ефективних методів вимірювання швидкості вертикального і горизонтального вітру системами РАЗ і оцінки показників якості отриманих за їх допомогою характеристик.

Найбільш потужним обмеженням існуючих систем РАЗ по дальності є виніс плями розсіяних коливань з апертури приймальної антени. Час отримання температурних профілів системами РАЗ зараз складає десятки

хвилин, а іноді і одиниці годин. При виконанні зондування протягом такого часу в результатах вимірювань з'являється похибка, обумовлена нестаціонарністю процесів, які протікають в атмосфері.

Таким чином, актуальною є науково-прикладна задача щодо вдосконалення моделей і методів РАЗ атмосфери, які дозволять підвищити точність вимірювання характеристик атмосфери та визначити якісні показники їх вимірювання, а також обґрунтовано використовувати системи РАЗ на практиці.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційні дослідження пов'язані з плановими держбюджетними НДР, що виконувались в Харківському національному університеті радіоелектроніки: «Створення технологій побудови багатофункціонального радіотехнічного комплексу для екологічного моніторингу» ДР №0114U002697 (2014-2015 роки), «Розробка нових інформаційно-вимірювальних систем і технологій координатно-часового і метеорологічного забезпечення та зв'язку» ДР №011U002541, (2016-2017 роки), у яких здобувач був виконавцем.

Мета та задачі досліджень

Метою досліджень є удосконалення моделей і методів радіоакустичного зондування атмосфери, що дозволять підвищити точність вимірювання характеристик атмосфери та визначити якісні показники їх вимірювання.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися такі задачі:

1. Розробити підходи і методи метрологічної атестації систем РАЗ атмосфери, що дозволить обґрунтовано використовувати їх на практиці.
2. Розробити метод вимірювання вертикальної швидкості вітру з використанням кореляційної обробки розсіяних сигналів і оцінити його методичні похибки.
3. Виконати аналіз показників якості систем РАЗ з вимірювання профілів температури і вологості повітря з використанням кореляційної обробки сигналів.

4. Розробити метод прийому розсіяних сигналів, що заснований на пасивній локації плями прийнятих коливань.

5. Розробити метод фільтрації «миттєвих» профілів температури, які одержуються системою РАЗ, з метою зменшення часу, що витрачається на отримання температурних профілів з необхідною достовірністю.

Об'єктом дослідження є процес зондування атмосфери акустичними і електромагнітними хвилями.

Предметом дослідження є моделі і методи радіоакустичного зондування атмосфери системами РАЗ і аналіз їх показників якості.

Методи дослідження. В роботі використані методи теорії статистичних рішень для синтезу оптимальних алгоритмів обробки сигналів систем РАЗ, теорії поширення хвиль у турбулентній атмосфері, методи теорії оптимальної лінійної фільтрації, числові методи аналізу, комп'ютерне моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Запропоновані нові ефективні методи вимірювання швидкості вертикального та горизонтального вітру системами РАЗ, які відрізняються від відомих методів застосуванням комбінованої обробки розсіяних сигналів – доплерівської і кореляційної, що дозволяє розширити можливості систем РАЗ по вилученню нової інформації з даних радіоакустичного зондування атмосфери.

2. Вперше запропоновано новий метод прийому та обробки сигналів у системах РАЗ атмосфери, який заснований на пасивній радіолокації плями розсіяних електромагнітних коливань, сфокусованих сферичними хвильовими фронтами акустичного пакета. Новизна методу полягає в тому, що для прийому розсіяного сигналу при зносі пакету акустичних хвиль вітром, на відміну від відомих методів, які використовують матрицю приймальних антен, використовується одна приймальна антена. Цей метод дозволяє підвищити якість і оперативність отримання інформації.

3. Запропонована нова методика метрологічної атестації систем РАЗ, яка на відміну від відомих, ґрунтується на метрологічній атестації основних

пристроїв системи, які визначають похибку вимірювання інформаційного параметра відбитого сигналу системи.

4. Удосконалено метод фільтрації «миттєвих» профілів температури, які одержуються системою РАЗ, який, на відміну від відомих, дозволяє значно зменшити час, що витрачається на отримання температурних профілів з необхідною достовірністю.

Практичне значення отриманих результатів.

Отримані в роботі результати можуть бути використані під час модернізації існуючих та створення нових радіоакустичних систем зондування атмосфери. Вони дозволять підвищити точність та оперативність вимірювань параметрів атмосфери.

Застосування комбінованої обробки сигналів систем РАЗ – доплерівської і кореляційної, забезпечує реальну можливість дистанційної реєстрації висотних профілів вертикальної складової швидкості вітру. Введення в антенний пристрій системи РАЗ розподіленого акустичного випромінювача розширює можливості даного метода і дозволяє одночасно вимірювати і горизонтальну складову швидкості вітру.

Вартість створення апаратури РАЗ, в якій використовується метод пасивної радіолокації плями розсіяних сигналів і одна приймальна антена, значно нижча вартості побудови цілого антенного поля приймальних антен, що досить часто використовується при створенні систем радіоакустичного зондування.

Метод вимірювання горизонтальної швидкості вітру системою РАЗ з пасивною радіолокацією плями розсіяних сигналів перспективний при організації та проведенні екологічного моніторингу прикордонного шару атмосфери. Застосування подібних систем в практиці метеоспостережень забезпечує отримання вхідних даних – вертикальних градієнтів температури і швидкості вітру – для моделей турбулентної дифузії викидів природного та антропогенного характеру, що забруднюють атмосферу, а також прогнозування дальності їх перенесення.

Запропонована методика метрологічної атестації систем дистанційного радіоакустичного зондування дозволяє розрахунковим шляхом отримувати якісні показники систем та більш обґрунтовано і акцентовано використовувати їх при вирішенні різноманітних наукових та прикладних завдань.

Найбільш доцільним є використання таких перспективних систем РАЗ для метеорологічного забезпечення екологічного моніторингу атмосфери в районах розміщення ТЕЦ, АЕС, великих майданчиків сховищ енергоносіїв (нафти, газу та ін.), над якими заборонені будь-які польоти.

Застосування оптимального лінійного фільтра в системах РАЗ дозволяє згладжувати миттєві значення температури і отримувати оцінки вертикального профілю температури при меншій кількості вертикальних зондувань. Вимога зменшення часу осереднення профілів полягає в тому, що значний час призводить до помилки внаслідок нестационарності процесів в атмосфері.

Результати дисертаційних досліджень впроваджені в ХНУРЕ при виконанні держбюджетної НДР, а також в навчальному процесі на кафедрі МІРЕС ХНУРЕ (Додаток А).

Особистий внесок здобувача.

Основні наукові результати, які викладені в дисертації, отримані здобувачем самостійно або за його безпосередньої участі.

В роботі [4] розглянуті підходи до проведення метрологічної атестації засобів дистанційного зондування атмосфери, які використовують електромагнітні та (або) акустичні хвилі. В [5] проведена оцінка можливості реєстрації за допомогою методу РАЗ швидкості вертикальних потоків, інформація про яку необхідна для підвищення точності дистанційної реєстрації ряду метеорологічних величин, зокрема, температури повітря в прикордонному шарі атмосфери. В роботах [6-8] виконано аналіз методичних похибок, що виникають за рахунок апріорної невизначеності висотного розподілу метеорологічних величин при реєстрації вертикальних профілів температури і вологості повітря з використанням кореляційної обробки прийнятих сигналів систем РАЗ. В роботі [9] розглянуто метод прийому

розсіяних сигналів, що заснований на пасивній локації плями розсіяних коливань. В [10,11] розглядається можливість застосування методів оптимальної лінійної фільтрації в системах РАЗ атмосфери з урахуванням особливостей оцінюваного процесу. В роботі [12] виконано аналіз потенційної точності оцінки параметра умови Брегга при використанні кореляційного методу в системах РАЗ.

В патентах [13-15] здобувач брав участь в розробці способу дистанційного вимірювання вертикальної швидкості вітру радіоакустичним зондуванням атмосфери, способу визначення вологості повітря радіоакустичним зондуванням атмосфери та пристрою для дистанційної реєстрації вертикального профілю температури атмосферного повітря.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи були представлені, доповідались й обговорювались на міжнародних конференціях і форумах, а саме на: 18-му, 19-му, 20-му міжнародних молодіжних радіоелектронних форумах «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті» (Харків, 2014 р., 2015 р., 2016 р.) [16-18]; 10-й міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій РТ-2014 року» (Севастополь, 2014 р.) [19]; Proceedings of 2015 X Anniversary International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT) (Kharkiv, 2015 р.) [20]; 14-му, 16-му міжнародних науково-технічних конференціях «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (Затока, 2015 р., 2016 р.) [21,22]; 8-й міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (Запоріжжя, 2016) [23]; 6-му міжнародному радіоелектронному форумі (МРФ-2017) «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку» (Харків, 2017) [24,25].

Публікації. Результати дисертації опубліковано в 22 наукових роботах: 7 статей – у фахових виданнях України; 2 статті – в зарубіжних журналах

(Scopus); 3 патенти на винаходи; 10 тез доповідей у матеріалах міжнародних форумів і конференцій, з яких 1 індексується в науковій базі Scopus.

Структура дисертаційної роботи.

Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновку і списку використаних джерел. Загальний обсяг становить 163 сторінок. Дисертація містить 33 рисунки і 3 таблиці. Список використаних джерел налічує 134 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ НАУКИ І ТЕХНІКИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРИ

Забезпечення контролю екологічної та метеорологічної ситуації в режимі моніторингу та реалізація технологій мезомасштабного і короткострокового прогнозування стану атмосферного прикордонного шару вимагають застосування нових інструментальних засобів та використання створених на їх основі програмно-апаратних систем для визначення метеорологічних параметрів атмосфери та контролю кількісного складу утворень в атмосферному повітрі.

У розділі виконано аналіз відомих методів і засобів дистанційного зондування атмосфери [1-3,26-33]: содарів, які функціонують з використанням акустичних хвиль; лідарів, що використовують оптичне випромінювання; радіолокаторів, що випромінюють та приймають радіохвилі; радіоакустичні системи, які комбінують акустичне і електромагнітне випромінювання. Усі зазначені дистанційні методи зондування засновані на випромінюванні хвиль, які при поширенні через атмосферу розсіюються в зворотньому напрямку і реєструються приймачем.

За результатами виконаного аналізу методу і систем радіоакустичного зондування атмосфери сформульовані основні задачі дослідження.

1.1 Акустичні системи вітрового зондування атмосфери

Акустичні системи вітрового зондування атмосфери називають содарами. При акустичному зондуванні до атмосфери випромінюється короткий пакет звукових хвиль, який при поширенні розсіюється на неоднорідностях атмосфери. Джерелом неоднорідностей в атмосфері є неоднорідності поля вітру і температури, які в першу чергу пов'язані з

турбулентними рухами [34-40]. Відбиті звукові хвилі реєструються акустичним приймачем, що розташований, як правило, поблизу джерела випромінювання (моностатичний содар). За часом затримки відбитого сигналу визначають дальність розсіювачів R , за потужністю відбитого сигналу можна судити про інтенсивність турбулентності, а за доплерівським зсувом частоти – визначати проекцію вітру на напрям зондування. Тривалість випромінюваного імпульсу зазвичай лежить в інтервалі $\Delta\tau_u = 0.05 - 0.3$ секунди. З урахуванням того, що швидкість поширення звуку становить приблизно $C = 340$ м/с, отримуємо, що роздільна здатність по відстані такої системи буде доволі високою

$$R = \frac{C\Delta\tau_u}{2} = 8 - 55\text{м}.$$

При акустичному зондуванні формування відбитого сигналу відбувається шляхом розсіяння акустичних хвиль на дифракційних решітках, така решітка складається з природних температурно-вітрових неоднорідностей атмосфери. Виявлення розсіювання виконується за умови Брегга, яка вимагає виконання певного співвідношення періоду решітки з довжиною хвилі, яка розсіюється, рівною 0,5. Виконання такого співвідношення можливо при наявності в атмосфері температурно-вітрових неоднорідностей, масштаб яких відповідає умові Брегга, що забезпечує синфазне складання потужності розсіяних акустичних хвиль [3].

Оскільки для прийому використовуються високочутливі мікрофони, важливо ізолювати приймач від сторонніх шумів. Для цього навколо содара створюється досить громіздкий поглинаючий екран. Моностатичні содари мають випромінювач та приймач, суміщені в одному місці. При цьому для отримання двох компонентів вітру потрібно або два і більше випромінювачів, або необхідно повертати монособдар на платформі [26, 41].

Сучасні содари нерідко використовують антенну систему з трьома випромінювачами, один з яких спрямовано вертикально, а два інших – під кутом до горизонту (на північ і на захід). Останнім часом створені содар з мінівипромінювачами у вигляді плоскої антенної решітки, або у вигляді фазованої антенної решітки [41-45].

Перші комерційні зразки содарів з'явилися у 70-х роках.

Сучасні маловисотні содари мають максимальну висоту зондування до 200 м і зазвичай використовуються для обслуговування вітряних електростанцій [43]. Прикладом можуть служити содари TRITON (США) (рис.1.1), PCS.2000-24/LP (Німеччина), 4000 WE (США) та інші.



Рисунок 1.1 – Трипроменевий содар TRITON

Друга група содарів з висотою зондування до 1000 метрів використовується для метеорологічних та екологічних цілей [44]. До їх числа відносяться, наприклад: XFAS, MFAS, SFAS (Німеччина); PCS.2000 (Німеччина) (рис.1.2); PAO-5 (Франція-США); Echosonde 300, 600, 600 PA (Англія-США); Волна-3 (Росія), ЛАТАН-3 (Росія) та інші.



Рисунок 1.2 – Доплер SODAR PCS.2000

Доплерівський SODAR PCS.2000 [45] дозволяє вимірювати вертикальні профілі вітру та турбулентності, контролювати рівні інверсії і отримувати класи стійкості в діапазонах висоти $15 \text{ м} \geq 1000 \text{ м}$. Потужний ПК контролює випромінювання, обробляє та передає дані. SODAR PCS.2000 – надійний, економічно ефективний інструмент для оперативних налаштувань та короткострокових вимірювань. Малопотужна версія Doppler SODAR PCS.2000 ідеально підходить для мобільного автономного профілювання на віддалених об'єктах.

Можна виділити також пересувні содари. Як правило, вони встановлюються на спеціальному причепі, який буксується автомобілем, що дозволяє встановлювати його в короткі терміни в різних місцях [43]. Приклади комерційних зразків: PCL.2000-24/LP (Німеччина), TRITON-mobil (США); TORAGON AB (Швеція-Німеччина); 4000 WS/WE (США) та інші.

Перевагою содарів є їх відносна простота і не дуже висока вартість, вони досить надійно забезпечують вимірювання швидкості та напрямку вітру в діапазоні висот від 20 до 200-800 метрів при відносно високій вертикальній роздільній здатності (близько 5-50 метрів). Чисельні порівняльні випробування підтвердили ці характеристики.

До недоліків слід віднести те, що сигнал, який випромінюється (зазвичай в діапазоні 1-10 кГц) є чутним для людського вуха і викликає неприємні відчуття, тому содар рекомендується використовувати поза населеними пунктами. Гранична висота зондування дуже залежить від метеорологічних умов під час вимірювань, знижується при наявності температурних інверсій в атмосферному прикордонному шарі, при сильній турбулентності та сильних вітрах. Вимірювання вельми чутливі до сторонніх звуків, тому їх практично неможливо проводити при високому рівні фонових шумів і при наявності рідких опадів.

1.2 Оптичні вітрові профайлери

Оптичні вітрові профайлери називають лідарами. Лідарні засоби для вітрових вимірювань можна розділити на недоплерівські і доплерівські [46].

Недоплерівські вимірювання засновані на реєстрації зсуву максимуму взаємної просторово-часової кореляційної функції інтенсивності, отриманої на різних рівнях конуса зондування, що описує лазерний промінь у напрямку близькому до вертикалі. Фактично відбувається спостереження за переміщенням відбиваючих неоднорідностей в горизонтальній площині. За часом і напрямком зсуву неоднорідностей проводиться оцінка швидкості та напрямку вітру на заданій висоті зондування [47,48].

Недоліком такого методу є можливе невиконання умови стаціонарності поля відбиваності при горизонтальному переміщенні розсіювачів. При перенесенні аерозолів до іншої ділянки конуса, за рахунок турбулентності та вертикальних переміщень, центр ваги неоднорідностей зміщується не так, як середній вітер, що призводить до наростання похибок вимірювань або неможливості їх проведення. Ймовірно, тому дані методи вітрового зондування досі не знайшли серійного застосування.

1.2.1 Некогерентні доплерівські лідари

Некогерентні доплерівські лідари реєструють сигнал, розсіяний на аерозолях або молекулах повітря. Розсіяне випромінювання збирається телескопічним приймачем та аналізується на інтерферометрі [49,50]. При цьому відбувається пряме детектування сигналу на різних частотах (каналах). Вимірюється доплерівський зсув частоти прийнятого сигналу, за яким визначають проекцію вітру на напрям зондування. При кінчному зондуванні це дозволяє визначати і швидкість, і напрямок вітру на різних висотах. Якщо розсіювання відбувається на аерозолях, то отримують досить вузький по спектру сигнал, який зручно інтерпретувати. На великих висотах, де аерозолів майже немає, основний сигнал формується при розсіянні на молекулах повітря. Ця властивість є перевагою методу в порівнянні з доплерівськими лідарами, які не можуть працювати без аерозолів. Однак, при молекулярному розсіянні спектр сигналу набагато ширше, ніж при аерозольному розсіянні, через що реєстрація доплерівського зсуву стає проблемною, і потрібне довгострокове накопичення сигналу для аналізу.

1.2.2 Когерентні доплерівські лідари

У разі когерентних доплерівських лідарів (КДЛ) розсіяне на аерозольних частинках випромінювання зондуючого пучка після проходження через приймальну апертуру телескопа змішується з опорним пучком і подається на чутливий майданчик детектора. З коливань, які виникають в ланцюзі детектора фотоструму за допомогою вузькосмугового частотного фільтра, виділяється сигнал (ехосигнал), що несе інформацію щодо доплерівського зсуву частоти. Таким чином, в КДЛ використовується лазерне гетеродування [51]. Необхідною умовою такого гетеродування є виконання жорстких вимог щодо узгодження хвильових фронтів полів розсіяного випромінювання та опорного пучка в площині чутливого майданчика детектора. Ефективність гетеродування залежить від розміру майданчика когерентності розсіяного випромінювання по відношенню до площі поперечного перерізу опорного

пучка. Посилення інтенсивності турбулентних пульсацій показника заломлення повітря в атмосфері може привести до значного зменшення радіусу просторової когерентності розсіяного в атмосфері зондуючого випромінювання в площині телескопа і, як результат, до падіння відношення сигнал-шум до рівня, при якому вимірювання вітру стає неможливим. З висотою коефіцієнт аерозольного зворотнього розсіювання зменшується, і у вільній атмосфері він може стати настільки малим, що інформація про вітер може бути отримана або при досить великих потужностях зондуючого лазерного випромінювання, або з використанням спеціальних процедур обробки вихідних даних при тривалих лідарних вимірах.

Зондуючий лазерний пучок може бути як безперервного, так і імпульсного випромінювання, тобто когерентні доплерівські лідари за цією ознакою поділяються на два типи: 1) безперервний КДЛ, 2) імпульсний КДЛ. Загальним недоліком безперервних доплерівських лідарів є погана роздільна здатність за дальністю, масштаб якої можна порівняти з самою дальністю. Перевагою імпульсних доплерівських лідарів є компактність та оперативність отримання даних, менші обмеження на просторову та часову роздільну здатність одержування даних, проте сильна турбулентність та опади різко знижують дальність вимірювань (рис 1.3) [52].



Рисунок 1.3 – Імпульсний вітровий лідар нового покоління ПЛВ-2000

1.3 Радарні вітрові профайлери

Вітрові радіолокаційні профайлери Radar Wind Profilers (RWP) використовують такі діапазони частот [53,54]:

1. 30–60 МГц (довжина хвилі 10м–5м);
2. 400–550 МГц (довжина хвилі 0.75–0.55м);
3. 900–1300 МГц (довжина хвилі 0.3м–0.23м).

З метою метеозабезпечення збройних сил розроблено доплерівський вітровий радіолокаційний профайлер, що працює в діапазоні 35 ГГц (довжина хвилі 8 мм).

Фізика формування сигналу в радарях відрізняється від содарів і лідарів тим, що за час імпульсу зондування, який має значення 10^{-6} с, розсіювачі встигають зрушити на кілька мікронів. У порівнянні з довжиною хвилі радіолокаторів – це незначна величина, тому імпульс висвітлює наче застиглий в просторі ансамбль розсіювачів. Радар зазвичай випромінює пакет з декількох сотень імпульсів з періодом повторення $\tau_{повт}$, який пов'язаний з дальністю зондування R_{\max} співвідношенням

$$R_{\max} = \frac{c \tau_{повт}}{2},$$

де c – швидкість світла, (звичайні масштаби $\tau_{повт} = 10^{-3}$ с, тоді $R_{\max} = 150$ км).

У фазовому детекторі приймальної системи реєструється фаза кожного імпульсу, яка змінюється від імпульсу до імпульсу за рахунок зміщення частинок протягом $\tau_{повт}$. В результаті на приймачі реєструється послідовність імпульсів, обвідна яких і дає доплерівський сигнал. Такий режим вимірювань називають імпульсно-когерентним.

Однак, при такому режимі існує обмеження іншого роду. Пов'язане воно з вимогою, що за період повторення імпульсів частки не повинні зсуватися

занадто сильно. Максимально допустимий зсув не повинен перевищувати чверть довжини хвилі радіолокатора. Це пов'язано з тим, що має бути не менше двох відліків на період синусоїди. З цієї вимоги випливає умова

$$\frac{1}{\tau_{повт}} = \frac{4V_{\max}}{\lambda}.$$

Чим більше діапазон вимірюваних швидкостей, тим вище повинна бути частота повторення імпульсів. При цьому, очевидно, буде знижуватися максимальна однозначна дальність зондування R_{\max} . В результаті для імпульсно когерентних радіолокаційних станцій (РЛС) характерно наступне обмеження

$$V_{\max} R_{\max} = \frac{c\lambda}{8}.$$

З цього співвідношення випливає, що для вимірювання високих швидкостей на великих відстанях слід вибирати як можна більшу довжину хвилі. А перехід в сантиметровий або міліметровий діапазон, що дуже привабливий з точки зору ступеня взаємодії випромінювання з розсіювачами, буде обмежувати або дальність, або максимальну швидкість, яка вимірюється.

Для таких систем розсіювачами є дрібна та велика аерозоль, опади будь-якого типу і практично більшість типів хмар. Найкращі технічні показники такі вимірювачі демонструють в несприятливих погодних умовах, при сильному вітрі, при опадах, туманах, хмарності, тобто в тих умовах, коли інші типи профайлерів або не працюють, або втрачають заявлену точність.

Перевагою розглянутих вимірювачів є:

- компактність та низьке енергоспоживання;
- працездатність в несприятливих та небезпечних метеоумовах;
- надійність системи: забезпечується працездатність незалежно від погодних умов при температурі від мінус 40 до плюс 55 °С, вологості до 95%, на висоті до 3000 м над рівнем моря, при наземному вітрі до 30 м/с.

Недоліком міліметрових радіолокаційних систем є можливість пропуску вимірювань внаслідок слабого відбитого сигналу в спокійній метеорологічній ситуації, у ясній безхмарній атмосфері, слабкому вітрі.

1.3.1 Мобільна атмосферна РЛС вертикального зондування S-діапазону

Застосування РЛС вертикального зондування (ВЗ) необхідно для забезпечення безпеки польотів поблизу аеропортів, спостереження за станом атмосфери в околицях атомних електростанцій, а також під час надзвичайних ситуацій. РЛС ВЗ широко застосовуються для метеорологічних спостережень і прогнозування небезпечних природних явищ [55].

Макет мобільного РЛС ВЗ, що розроблено на кафедрі МІРЕС ХНУРЕ, має ряд істотних відмінностей від інших типів РЛС ВЗ. У ньому застосовується квазікогерентна схема вимірювання доплерівської частоти, здійснюються поляриметричні вимірювання, а також застосовано магнетронний передавач. Крім цього, РЛС ВЗ S-діапазону є низькопотенційною, має невеликі масогабаритні показники та низьке енергоспоживання. Високий рівень автоматизації роботи станції дозволяє проводити безперервні вимірювання без присутності обслуговуючого персоналу. Конструктивно макет РЛС складається з двох частин: обладнання, що встановлюється всередині транспортного засобу; та антенна система з передавачем, що встановлюється на причепі або в кузові автомобіля.

Антенна система РЛС – це дві прямофокусні параболічні дзеркальні антени діаметром 1.8 м, які забезпечені захисними блендами висотою 1 м. Зовнішній вигляд антеною системи зображений на рис. 1.4.

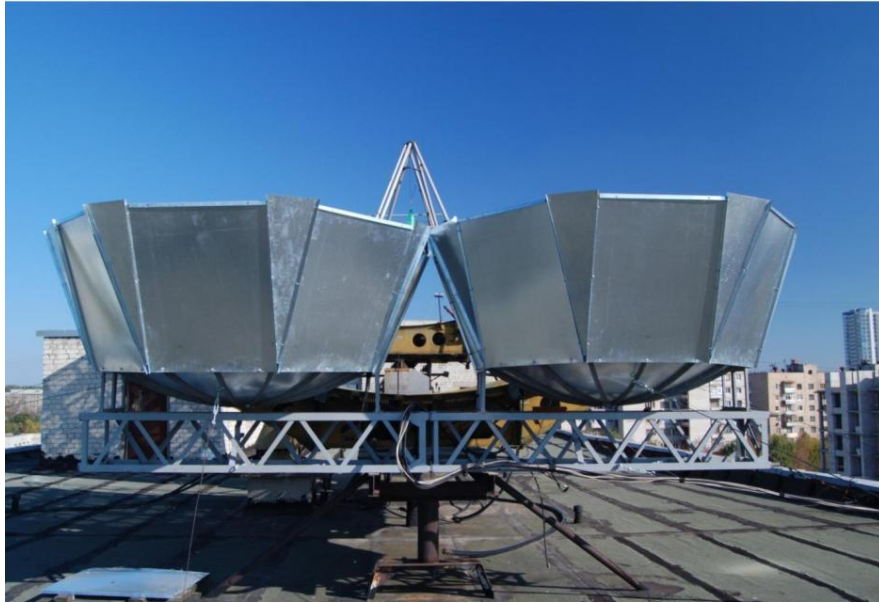


Рисунок 1.4 – Антенна система макета РЛС ВЗ, яка встановлена на даху будівлі

Передавальний пристрій РЛС – це функціонально закінчений модуль, який виконано на базі магнетрона. Передавальний пристрій має невеликі геометричні розміри та встановлюється в фокальній точці передавальної антени, що дозволяє усунути додаткові втрати. Радіоприймальний пристрій реалізований за схемою супергетеродина з подвійним перетворенням частоти і додатковим квазікогерентним каналом по другій ПЧ. На рис. 1.5 зображено апаратно-програмний комплекс РЛС ВЗ.

Зразок РЛС ВЗ, що розроблений в ХНУРЕ відрізняється використанням магнетронного передавача, вартість якого набагато нижче, ніж когерентних передавачів аналогічної потужності. Вимірювання доплерівських характеристик сигналу здійснюється квазікогерентним методом, який не вимагає високої стабільності та когерентності передавача.

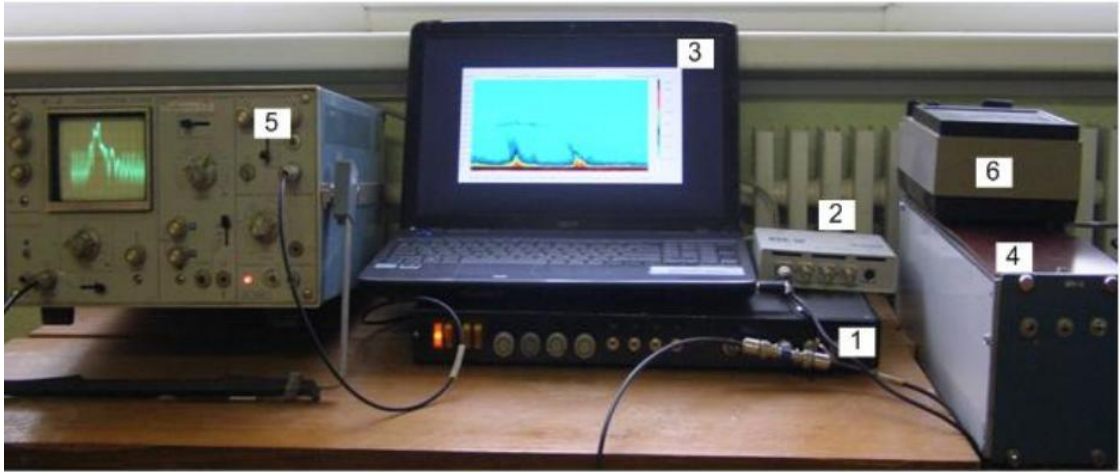


Рисунок 1.5 – Апаратно-програмний комплекс портативної РЛС ВЗ S-діапазону: 1 — радіоприймальний пристрій та блок синхронізації, 2 — АЦП E20-10, 3 — термінал обробки і зберігання інформації, 4 — блок живлення передавача, 5 — контрольний осцилограф, 6 — індикатор потужності передавача.

1.3.2 Профайлер AP1000

Профайлер AP1000 (рис 1.6) досить точно та достовірно вимірює вітер і температуру в нижніх шарах тропосфери [56]. Передові технології і висока продуктивність роблять його ідеальним інструментом для метеорологічних служб, науково-дослідних інститутів, аеропортів, електростанцій, хімічної промисловості та військового застосування. Висока ефективність та міцність антенної решітки, що виконана з твердого алюмінію, надійність радіочастотних підсилювачів, повністю цифровий пристрій обробки проміжних частот та універсальне, зручне управління програмним забезпеченням APRun є характерними особливостями радара. Існують модифікації AP1000 з 2 променями, 5 променями та з інноваційною технологією 2 x 3 променя DoubleSwing.



Рисунок 1.6 – Профайлер AP1000

Для максимальної продуктивності AP1000 може бути розширений WT RASS (вітро-температурною радіоакустичною системою зондування). На відміну від традиційних RASS, WT RASS працює з багатопроменевими фазованими акустичними антенами що значно покращує якість вимірювань вітру. З використанням WT RASS, дані профілів вітру, температури і турбулентності можуть бути отримані з досить високою точністю. Малий час усереднення і несприйнятливість до опадів, шуму або змін атмосферного зворотного розсіювання роблять AP1000 з WT RASS першою по-справжньому оперативною системою вимірювання профілів для таких практичних задач, як вимір зсуву вітру поблизу аеропортів або поширення прогнозів для промислового реагування на надзвичайні ситуації.

Профайлер AP1000 складається з модулів і може легко транспортуватися і монтуватися без підйомних кранів або спецтехніки. Модульна конструкція також дозволяє поліпшити обладнання для використання до 5 променів, технології DoubleSwing або розширення WT RASS в економному виконанні.

Таблиця 1.1

Основні технічні характеристики вітрового локатора AP1000

Назва параметра	Значення	Примітка
1	2	3
Робоча частота	1290 МГц	Зміна за окремою домовленістю із замовником

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
Вихідна потужність	600Вт, 1200Вт або 2400Вт	Максимальна потужність
Конструкція антени	Подвійна антенна решітка, 2 x 144 елемента (опціонально 2 x 218 елементів)	Можливе використання технології DoubleSwing
Кількість променів	2 або 5 променів, або 2 x 3 променів за технологією DoubleSwing	Залежно від виконання
Кут нахилу променя	0° та ±15°	Вертикальні і похилі промені
Обробка проміжних частот	14 біт	повністю цифрова
Роздільна здатність по дальності	≥37,5м	Вибирається з допомогою ПО
Мінімальна дальність	100м	Залежно від налаштувань
Максимальна дальність	8000м	номінально
Середня дальність	Від 1000 до 4000 м	Залежно від моделі, налаштувань і навколишнього обстановки
Час усереднення	Від 1 до 60 хв	вибирається користувачем
Точність вимірювання швидкості вітру	±0,5 до 1 м/с	Залежно від налаштувань
Точність вимірювання напрямку вітру	±5 до 10°	Залежно від налаштувань
Розміри (вага) антени	452 см x 252 см x 110 см (245 кг)	Розбірна
Розміри (вага) фазорегулятора	65 см x 45 см x 98 см (52 кг)	
Розміри (вага) радіочастотного підсилювача	65 см x 45 см x 98 см (68 кг) 125 см x 45 см x 98 см (125 кг) 125 см x 55 см x 138 см (175 кг)	600 Вт 1200 Вт 2400 Вт
Розміри (вага) пристрою обробки сигналів радара	41 см x 27 см x 72 см (28 кг)	
Робоча температура: антени, радіочастотного підсилювача, фазорегулятора	-30 до +50°C	Обладнання знаходиться на вулиці
Робоча температура: пристрій обробки сигналів радара	+5 до +35°C при відносній вологості повітря <98%	Обладнання знаходиться в приміщенні
Необхідна потужність	Від 1 до 2 кВт, від 100 до 240 напруга змінного струму	Залежно від виконання

1.3.3 Станція LAP-3000

Широке застосування на сьогоднішній день отримала станція LAP-3000 (рис 1.7), що працює на частоті 1290 МГц (Фінляндія) [57].



Рисунок 1.7 – LAP-3000

LAP3000 надійно забезпечує отримання безперервних вертикальних профілів горизонтальної швидкості вітру, вертикальної швидкості вітру та параметрів турбулентності в прикордонному і атмосферному прикордонному шарах.

Антенa LAP-3000 не має рухомих частин, що забезпечує довгострокову надійність та безпеку. Для підвищення продуктивності системи в більш прохолодних кліматичних умовах пропонується нагрів антени.

Новий цифровий сигнальний процесор для профілів вітру SIRP Digital IF Processor був спеціально розроблений для профілометрів радіолокаційного вітру. Він поєднує в собі когерентну компенсацію перешкод ACNS, 16-бітове двійкове кодування імпульсів, гаусові фільтри і вільно програмовані висотні ворота. Роздільна здатність вертикального діапазону може бути встановлена

на значення менше 50 м. Досить сучасний ACNS дозволяє боротись з різними перешкодами і покращує якість даних на ділянках, схильних до перешкод.

Нове програмне забезпечення для роботи SIRP здійснює взаємодію з комп'ютером за допомогою порту USB 3.0, підтримуючи максимальну швидкість передачі даних. У декількох режимах можна одночасно використовувати різні налаштування щодо тривалості імпульсу, імпульсного кодування та формування імпульсу. Це дозволяє одному профілювальнику вітру одночасно підтримувати різні додатки. Опція автоматичного налаштування оптимізує налаштування без необхідності взаємодії з користувачем. Різні графічні представлення даних, формати виведення даних та параметри передачі даних відповідають усім потребам.

В системі можливе розширення RASS, що дозволяє здійснювати вимірювання температури атмосферного повітря.

1.4 Метод радіоакустичного зондування

1.4.1 Суть методу РАЗ

Відмінною особливістю методу радіоакустичного зондування від інших неконтактних дистанційних методів зондування атмосфери є використання штучно створюваної звуковими хвилями періодичної структури щільності повітря (отже, і коефіцієнта заломлення), яка поширюється в атмосфері зі швидкістю звуку. Відомості щодо основних метеорологічних величин знаходять шляхом аналізу доплерівського зсуву частоти і амплітуди розсіяних на звуковій носії електромагнітних хвиль. Метод та апаратура РАЗ з успіхом можуть бути використані для дослідження термодинамічних процесів, що протікають в атмосфері над сушею і океаном, прогнозування несприятливих метеорологічних ситуацій, що призводять до підвищених рівнів забруднення атмосферного повітря промисловими викидами, метеорологічного забезпечення зльоту і посадки літаків, прогнозування умов поширення ультракоротких радіохвиль.

Перші повідомлення про реалізацію методу РАЗ з'явилися у 1961 р [58,59]. У роботах було викладено суть методу, наведено структурну схему моностатичної системи ЕМАСО (electromagnetic-acoustical), розглянуто можливості вимірювання швидкості і напрямку вітру за допомогою трьох рознесених в просторі систем. Однак система ЕМАСО не виправдала покладених на неї надій, що висота зондування склала лише 30 м. Тому подальші дослідження методу РАЗ були припинені і поновилися тільки на початку сімдесятих років.

Саме в ці роки він отримав розвиток в Харківському інституті радіоелектроніки. На підставі теоретичних та експериментальних досліджень методу, аналізу невдалої розробки системи ЕМАСО в 1969 році була створена перша в Європі мобільна бістатична система РАЗ [2], що дозволяє з поверхні Землі вимірювати висотний розподіл температури повітря, швидкості і напрямку вітру до висот близько 100 м з високою просторовою роздільною здатністю.

Сутність радіоакустичного методу зондування атмосфери полягає в тому, що в атмосферу випромінюються короткі посилки звукових хвиль, швидкість і напрямок яких вимірюються за допомогою доплерівського локатора. На шляху свого поширення звукові хвилі створюють періодичну зміну діелектричної проникності повітря (внаслідок послідовного його стиснення та розрядження), яке здатне розсіювати електромагнітні хвилі з когерентним складанням фаз в разі виконання умови Брегга [3]

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_n} = 2 \sin \frac{\theta}{2}, \quad (1.1)$$

де λ_e – довжина електромагнітної хвилі; λ_n – довжина звукової хвилі; θ – кут розсіювання електромагнітних хвиль. У разі нормального падіння $\left(\frac{\theta}{2} = 90^\circ\right)$

відношення (1.1) набуває вигляду $\frac{\lambda_e}{\lambda_n} = 2$. При цьому спостерігається максимум розсіювання електромагнітної енергії від звукової посилки. Швидкість звуку C в нерухомому повітрі визначається модифікованою формулою Лапласа [60]

$$C = [\chi \cdot RT / \mu]^{\frac{1}{2}} = 20,0789 \cdot a \sqrt{T} a,$$

де $\chi = \frac{c_v}{c_p}$ – відношення теплоємностей при постійному обсязі і постійному тиску; μ – молекулярна вага; R – універсальна газова постійна, T – температура, К; a – коефіцієнт, який слабо залежить від вологості повітря. При наявності вітру

$$C = 20,0789 a \sqrt{T} \pm V_p,$$

де V_p – складова швидкості вітру в напрямку поширення звуку.

Вимірюючи доплерівській зсув частоти радіосигналу і враховуючи, що температура є скалярною, а вітер – векторною величиною, можна окремо визначити температуру повітря, швидкість та напрям вітру, при застосованні багаторазового зондування. Значна різниця швидкостей поширення електромагнітної та звукової хвиль дозволяє при розгляді умов розсіювання радіохвиль на періодичній структурі показника заломлення повітря, зробити припущення щодо нерухомості останньої.

У методі РАЗ необхідно встановити залежність коефіцієнта відбиття електромагнітних хвиль від параметрів апаратури та середовища в межах зондування. До моменту розробки методу та апаратури РАЗ [59] була отримана наступна залежність

$$\rho^2 = \delta N^2 \frac{I}{I_0},$$

де $\rho^2 = p_{\text{прин}} / p_{\text{пер}}$ – коефіцієнт відбиття електромагнітної хвилі від звукової посилки; $p_{\text{прин}}$ – потужність прийнятого приймачем радіосигналу; $p_{\text{пер}}$ – вихідна потужність передавача радіосигналу; N – число хвиль в звуковій посилці; I – інтенсивність звукової хвилі в точці відзеркалення; I_0 – порогове значення інтенсивності звукової хвилі, $\left(I_0 = 10^{-16} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2} \right)$; δ – постійна відзеркалення для повітря $(\delta = 8,87 \cdot 10^{-27})$.

Системи РАЗ прикордонного шару атмосфери є оперативними в моніторингу, вельми інформативними (по числу вимірюваних метеовеличин) і можуть бути виконані в мобільному варіанті.

При зондуванні атмосфери з використанням методу та апаратури РАЗ накопичуються величезні масиви метеоданих, що надходять у великому темпі, для обробки яких необхідно розробляти нові, науково обґрунтовані методики.

На сьогоднішній день не існує універсальних радіолокаційних засобів, що дозволяють проводити вимірювання вітру від рівня землі у всьому шарі тропосфери при будь-яких погодних умовах. Кожен тип вимірників має діапазон умов, в яких він працює, та свої переваги і недоліки.

Таким чином, при вимірюванні параметрів атмосфери класичними методами мають місце значні помилки вимірювання. Для зменшення помилок вимірювання було запропоновано радіоакустичне зондування атмосфери.

Метод радіоакустичного зондування атмосфери розробляється для дистанційної реєстрації профілів основних метеорологічних величин – температури і вологості повітря, швидкості і напрямку вітру. Протягом тривалого часу цей метод розвивався на базі доплерівської радіолокації пакета акустичних хвиль, що поширюється в атмосфері в напрямку зондування.

Однак ряд особливостей, властивих методу РАЗ, помітно ускладнили впровадження його в практику метеоспостережень.

Зокрема, це необхідність безперервної підтримки умови Бреґга при поширенні акустичного пакета по трасі зондування; при цьому досягається потенційна точність реєстрації температури повітря [3]. Різні способи підтримки умови Бреґга або знижують оперативність реєстрації профілю [61,62], або ускладнюють технічну реалізацію методу [63]. Другою особливістю методу РАЗ є те, що, на відміну від радіолокації точкових цілей, при якій формується поле розсіяних сигналів, при радіолокації акустичного пакета на підстилаючій поверхні формується пляма розсіяних сигналів, розміри і положення яких визначаються шириною діаграм спрямованості радіо- і акустичного передавачів, висотою зондування і метеоумовами, в яких проводиться зондування.

Недоліки доплерівської радіолокації пакета акустичних хвиль:

- частота доплерівського зсуву прийнятого сигналу не збігається з частотою синусоїдального заповнення зондуючого акустичного пакета;
- похибка реєстрації профілю температури в точках, де порушується умова Бреґга, може досягати 1 – 2 К [3];
- зниження інтенсивності розсіювання радіохвиль від пакета акустичних хвиль веде до зниження відношення сигнал / шум на виході радіоприймача, що особливо істотно при великій протяжності пакета.

1.4.2 Відомі системи РАЗ

Система радіоакустичного зондування (Radio Acoustic Sounding System) (RASS) складається з содара та радару. Оскільки все це розташовується на близькій відстані, великі зусилля витрачаються на розв'язку випромінювача і приймача радіолокатора. Звичайна висота зондування вітру не перевищує 1 км.

RASS є досить ефективним інструментом для наукових досліджень різних явищ в атмосфері, тому що одночасно дає інформацію щодо профілів

вітру і температури. Однак досвід використання RASS показав, що він є не оптимальним приладом для проведення мережевих метеорологічних спостережень. Це, в першу чергу, пов'язано з сильною залежністю точності вимірювань від метеорологічних умов. Радіоакустичне вимірювання практично неможливо проводити вже при середньому вітрі, при випаданні опадів, а також при високому шумовому фоні [3].

В ХНУРЕ були розроблені та створені п'ять модифікацій мобільних систем. Дві з них, які працювали в десятисантиметровому діапазоні радіохвиль, були призначені для вимірювання температури, швидкості та напрямку вітру похилим зондуванням в двох або трьох напрямках [64,65].

Перша модифікація РАЗ-1 (1969 рік), загальний вигляд якої наведено на рис. 1.8, використовувалась для експериментального дослідження можливостей методу та обробки результатів температурно-вітрового зондування [66]. Апаратура розміщувалась в кузові автомобіля, антенна система була змонтована на даху кузова.

Загальний вигляд системи РАЗ-2 (1974 рік) [65] наведено на рис. 1.9. Антенна система була змонтована на лафеті зенітної установки, який транспортувався автомобілем, в його кузові розміщувалася апаратура РАЗ та система дистанційного керування антенами.



Рисунок 1.8 – РАЗ-1



Рисунок 1.9 – РАЗ-2

Наступна модифікація системи РАЗ-3 (1978 рік) мала пристрій компенсації вітрової рефракції звукового випромінювання [67]. Антенний пристрій розташовувався на даху фургона, в якому знаходилась апаратура. Фургон міг обертатись по азимуту в межах $0-360^{\circ}$ (рис.1.10).



Рисунок 1.10 – РАЗ-3

В якості акустичної передавальної антени була використана 64 елементна звукова решітка. Для визначення вертикальних профілів температури повітря, швидкості та напрямку вітру застосовувалося зондування за методиками «Траса» і «Точка».

Тактичні та технічні характеристики систем РАЗ-1, РАЗ-2 і РАЗ-3 наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Тактичні та технічні характеристики систем РАЗ-1, РАЗ-2 і РАЗ-3

Характеристика	РАЗ-1	РАЗ-2	РАЗ-3
1	2	3	4
Гранична висота зондування, м	100	200	250
Мінімальна висота зондування, м	15	20	15
Вимірювані параметри	Т, V, φ	Т, V, φ	Т, V, φ
Похибка вимірювання параметрів, σ	–	0,5К; 1 м/с; 10^0	0,5К; 1 м/с; 10^0
Роздільна здатність, м	7	3,5 ...27	3,5 ...27
Споживана потужність, кВт	2,5	2,5	3
Габаритні розміри, м	4x2x1,8	4x2x1,8	2,4x2x1,5

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4
Маса, т	2,0	2,0	1,5
Кількість обслуговуючого персоналу, чол.	2	2	2
радіоканал			
Робоча частота, ГГц	3,0	3,0	3,0
Потужність, що підводиться до антени, Вт	3	4	4
Відносна нестабільність частоти	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$
Розв'язка між передавальним і приймальними трактами, дБ	80	100	100
Ширина діаграм спрямованості, град.	7	7	7
Порогова чутливість приймача, дБ / Вт	-125	-130	-135
звуковий канал			
Робоча частота, кГц	6,8	6,8	6,8
Відносна нестабільність частоти			$2 \cdot 10^{-4}$
Електрична потужність, що підводиться до акустичного випромінювача, Вт	300	500 ...1000	500 ...1000
Ширина діаграми спрямованості акустичної синфазної решітки, град.	10	7	7
Тривалість звукових посилок, мс	20	40, 80	10,20,40,80
Період проходження звукових посилок, з	1	1	1 та 2

Система РАЗ-4 (1984 рік) призначалась для вимірювання вертикальних профілів температури і вологості повітря, швидкості і напрямку вітру, відновлення профілів показника заломлення повітря, визначення рівня турбулентності атмосфери. Апаратура РАЗ представляла собою двохчастотний доплерівській локатор, який працює послідовно на двох кратних частотах 1,5 і 3,0 ГГц. [68]. Структурна схема системи представлена на рис. 1.11.

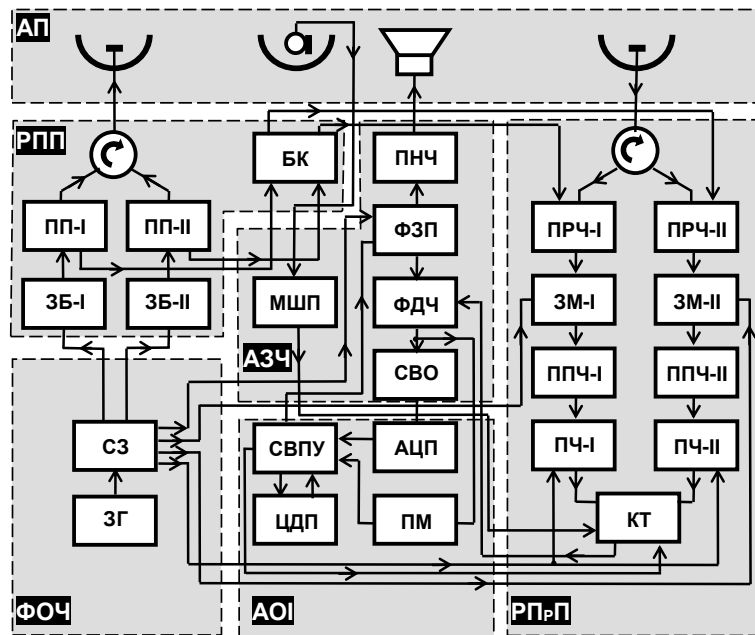


Рисунок 1.11 – Структурна схема системи РАЗ-4

Система РАЗ-4 містить:

- антенний пристрій (АП) з двох дзеркальних радіолокаційних антен, акустичних антен параболічної приймальної та фазованої передавальної решітки;

- радіопередавальний пристрій (РПП), що працює в безперервному режимі на двох фіксованих частотах 1500 і 3000 МГц, складається з двох збудників (ЗБ-I), (ЗБ-II) і підсилювачів потужності (ПП-I), (ПП-II), навантаженням яких є загальна дзеркальна параболічна антена з двохвібраторним опромінювачем і стрижневим рефлектором;

- двохканальний радіоприймальний пристрій (РПрП), входами підключений до ідентичної передавальної дзеркальної антени та до радіопередавачів, а виходами – до комутатора (КТ);

- формувач опорних частот (ФОЧ) з кварцового високостабільного генератора (ЗГ) і синтезатора частот (СЗ), що грає роль джерела сигналів для радіопередавального пристрою та формувача гетеродинних напруг для радіоприймального пристрою;

- малошумний підсилювач (МШП), вбудований в систему содара;

– апаратуру звукової частоти (АЗЧ) з блоками аналогової обробки сигналів доплерівської частоти, що виробляє посилення і селекцію по частоті сигналів з виходу радіоприймального пристрою (ФДЧ), детектування (СВО) при одночасному формуванні сигналу зондування звукової частоти, рівної доплерівської, і блок формування потужних звукових посилок (ПНЧ);

- апаратуру обробки інформації (АОІ) для аналого-цифрової обробки ехо-сигналів доплерівської частоти (АЦП), (ПМ), збору та обробки первинної інформації, управління процесом зондування та реєстрації вихідної інформації (СВПУ), (ЦДП).

Додатковим елементом структурної схеми, замкнутим на оператора системи, є блок управління місцем розташування акустичного випромінювача, що забезпечує управління механізмом переміщення перетворювача уздовж осі, перпендикулярної до лінії, що з'єднує фазові центри антен радіопередавального та радіоприймального пристроїв (на рис. 1.11 не показано).

Використання режиму безперервного випромінювання в двохчастотному доплерівському радіолокаторі системи РАЗ обумовлено вузькосмуговістю радіоакустичного методу взагалі та вимогою забезпечення найменшої «мертвої» зони зокрема. Перевагами такого рішення є, по-перше, вузька ширина спектра випромінюваних радіосигналів (завдяки чому спрощується задача електромагнітної сумісності апаратури РАЗ), по-друге, знижується гострота проблеми боротьби з радіоперешкодами, а також спрощується побудова блоків обробки сигналів при вузьких смугах пропускання частотно-виборчих і підсилюючих трактів [2]. Однак перераховані переваги супроводжує складна проблема – безпосереднє просочування енергії радіопередавального пристрою, а також супутніх їй шумів в приймально-підсилювальний тракт системи РАЗ. Це тягне за собою необхідність оснащення системи спеціальними пристроями і елементами, що мінімізують величину енергії, що просочується задля забезпечення необхідної чутливості

радіокерованого пристрою, та, додатково, введення до складу радіопередавача блоку компенсації просочування (БК).

Двохчастотність радіопередавального пристрою і блоку формування звукових посилок, двоканальність радіоприймального пристрою і блоку аналогової обробки сигналів доплерівської частоти є наслідком вимог способу вимірювання вологості повітря методом РАЗ, який передбачає випромінювання в атмосферу звукових посилок різних частот і стеження за ними за допомогою двухчастотного доплерівського радіолокатора, при співвідношенні довжин звукових і електромагнітних хвиль, рівним двом.

Наявність у пристрої для формування опорних частот синтезатора СЗ, який виробляє сигнал збудження радіопередавального пристрою і гетеродинні сигнали приймального пристрою при відносній нестабільності останніх не нижче $5 \cdot 10^{-9}$, дозволило поряд з мінімізацією рівня шумів радіопередавача і гетеродинних напруг приймача вирішити задачу забезпечення сталості співвідношення довжин звукових та електромагнітних хвиль. Ця задача вирішується зміною звукових робочих частот у блоці апаратури аналогової обробки сигналів доплерівської частоти, які виконують, одночасно з функціями основної частотно-селектуючої ланки двухчастотної системи РАЗ, роль формувача сигналів звукових частот при величині відносної нестабільності частоти не більше 10^{-5} . Стробування безперервних сигналів звукових частот і отримання коротких імпульсів, із заданою частотою, тривалістю та періодом повторення, проводиться блоком формування звукових посилок (ФЗП), який збуджує фазовану решітку електроакустичних перетворювачів, яка підключена до його виходу через ПНЧ.

Загальний вигляд радіоакустичного апаратурного комплексу представлено на рис. 1.12. Зміна положення точки випромінювання звукових посилок досягається горизонтальним переміщенням решітки електроакустичних перетворювачів в поєднанні з обертанням апаратурної kabini навколо вертикальної осі, що проходить через середину прямої, яка з'єднує точки випромінювання та прийому електромагнітних коливань.

Операції обертання та переміщення здійснюються відповідними механізмами за командою блоку управління місцем розташування акустичного випромінювача або оператором системи РАЗ.

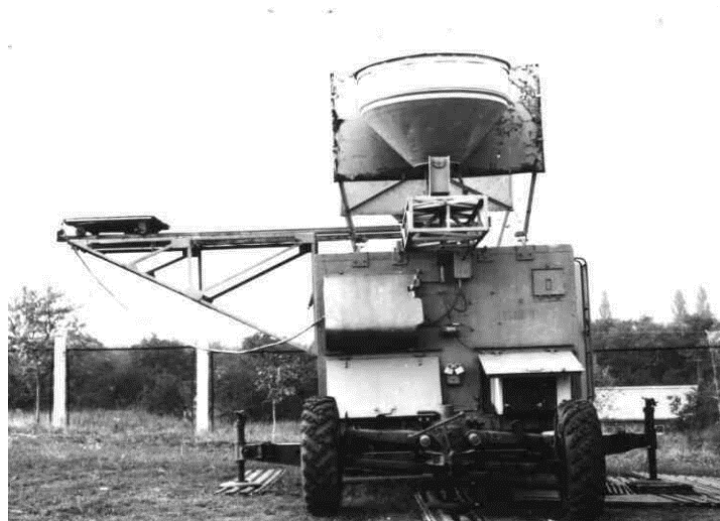


Рисунок 1.12 – Загальний вигляд радіоакустичного апаратурного комплексу

Апаратура обробки інформації (АОІ) виробляє аналого-цифрове перетворення вихідних сигналів блоку аналогової обробки сигналів доплерівської частоти, здійснює програмоване введення одержуваних цифрових масивів в міні-ЕОМ, вивід цифрової інформації після обробки на друк, а також запуск блоку формування звукових посилок.

Основні тактичні та технічні параметри двохчастотної системи РАЗ представлено в табл. 1.3. Всі блоки та вузли комплексу розміщені в апаратурній кабіні, що повертається (рис 1.13). На даху кабіни встановлено приймальна та передавальна радіолокаційні антени, рознесені на 2,4 м і для зменшення прямого просочування розділені щитами з радіопоглинаючого матеріалу. Також на рухомому візку розміщена акустична передавальна антена, яка може переміщатись за допомогою електричного приводу уздовж поперечної виносної ферми. Приймальна акустична шумозахисна антена розташована поблизу апаратурної кабіни, на даху допоміжного автомобільного причепа. Тактичні та технічні характеристики системи РАЗ-4 наведено в табл. 1.3.

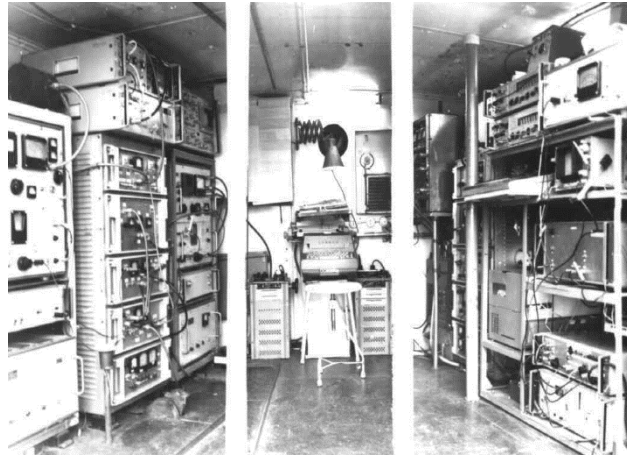


Рисунок 1.13 – Блоки і вузли комплексу

Таблиця 1.3

Тактичні та технічні характеристики системи РАЗ-4

Тактичні характеристики	Значення
1	2
Гранична висота зондування:	
Десятисантиметровий канал, м	250
Двадцятисантиметровий канал, м	550
Мінімальна висота зондування:	
Десятисантиметровий канал, м	15
Двадцятисантиметровий канал, м	20
Роздільна здатність:	
Десятисантиметровий канал, м	3,5...27
Двадцятисантиметровий канал, м	3,5...27
Вимірювані параметри	$T, V, \varphi, H, N, C_s^2$
Похибка вимірювання параметрів, δ	0,3К, 1м/с, 100,10 %, 3Нед.
Габаритні розміри, м	2,4x2x1,5
Маса, т	1,5
Споживана потужність, кВт	3,0
Кількість обслуговуючого персоналу, чол	2
Радіоприймальний пристрій	
Робочі частоти	1500, 3000 МГц
Середній коефіцієнт шуму	4,2
Порогова чутливість	135 дБ/Вт
Перехідне загасання між каналами	34 дБ
Ширина головної пелюстки діаграм спрямованості на частотах 1500 і 3000 МГц відповідно	14^0 та 7^0
Відносна нестабільність частоти гетеродинних сигналів	$5 \cdot 10^{-9}$
Смуга частот головного підсилювача проміжної частоти для обох частотних каналів	1 МГц
Смуги частот підсилювачів доплерівської частоти по каналах 1500 і 3000 МГц відповідно	0,6 кГц та 1,2 кГц

Продовження таблиці 1.2

1	2
Радіопередавальний пристрій	
Потужність, що підводиться до антени на частотах 1500 і 3000 МГц відповідно	5 Вт та 5 Вт
Відносна нестабільність частоти по обом частотним каналам	$5 \cdot 10^{-9}$
Рівень гармонік в вихідних сигналах	-60 дБ
Розв'язка між частотними каналами	36 дБ
Зміна вихідної потужності на кожній з частот після 40-хвилинного прогріву	0,003 дБ
Ширина головної пелюстки діаграм спрямованості на частотах 1500 і 3000 МГц відповідно	14° та 7°
Канал звукової частоти	
Середні значення робочих частот	3,4 кГц та 6,8 кГц
Інтервал перебудови частоти випромінюваних звукових посилок на робочих частотах 3,4 і 6,8 кГц відповідно	0,6 кГц та 1,2 кГц
Відносна нестабільність частоти	$2 \cdot 10^{-5}$
Звуковий тиск на відстані 10 м для обох робочих частот	122 Дб
Ширина головної пелюстки акустичної передавальної антени на частотах 3,4 і 6,8 кГц відповідно	14° та 7°
Рівень перших бічних пелюсток	-20 дБ та -24 дБ
Тривалість звукових посилок для обох каналів	80, 40, 20, 10 мс
Період проходження звукових посилок в автономному режимі	1,0 та 2,0 с
Ширина головної пелюстки акустичної приймальної антени на частоті 3,4 кГц	12°
Рівень бічних пелюсток приймальної акустичної антени в напрямку 90°	-34 дБ
Канал аналогової обробки ехо-сигналів	
Середні значення робочих частот	3,4 кГц та 6,8 кГц
Смуга аналізу за рівнем 0,5	150 Гц
Частота аналізу	128 кГц
Динамічний діапазон при обробці амплітуди	60 дБ
Реальна чутливість акустичного приймача	$2 \cdot 10^{-9}$ В
Робоча смуга акустичного приймача	100 Гц

Для зниження похибки реєстрації висотного розподілу температури повітря методом РАЗ, що виникає за рахунок вертикальної складової швидкості вітру при дослідженні анізотропії дрібномасштабної турбулентності в атмосферному прикордонному шарі, створена система комплексного акустичного та радіоакустичного зондування (1998 рік). Структурна схема

комплексної системи представлено на рис. 1.14. Вона складається з системи РАЗ-5 температурного зондування (блок 1), акустичного локатора для вимірювання вертикальних потоків повітря і визначення анізотропії дрібномасштабної турбулентності (блок 2) та блоку 3 обробки і представлення даних на базі ПК [69].

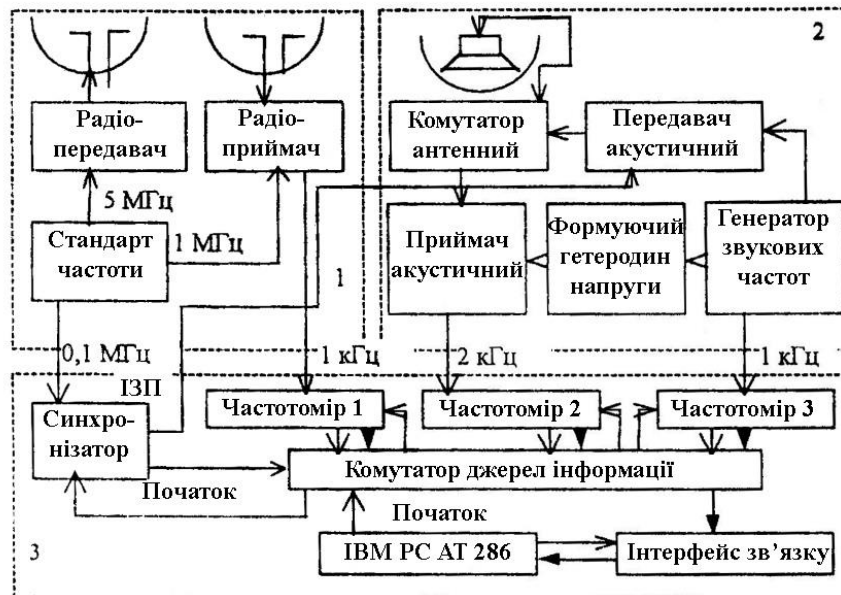


Рисунок 1.14 – Структурна схема системи РАЗ-5

Доплерівський локатор комплексної системи АЗ-РАЗ працює на частоті 440 МГц. Радіопередавач функціонує відповідно до принципу переносу стабільних високочастотних коливань опорного (стандарт частоти) генератора до ПВЧ-діапазону; вихідна електрична потужність передавача – 5 Вт. Для забезпечення можливості реєстрації вертикальних профілів температури повітря в нижній частині прикордонного шару передавач радіолокатора працює в режимі безперервного випромінювання хвиль. До складу радіоприймача з «нульовою» проміжною частотою входять антенний підсилювач радіочастоти, двухдіодний змішувач та підсилювач доплерівської частоти; чутливість приймача в смузі 300 Гц складає близько 1 мкВ.

Середня робоча частота акустичного локатора 1 кГц. Електрична потужність акустичного передавача – 100 Вт, режим роботи – імпульсний (тривалість імпульсу 70 мс).

Приймач содара побудований за відомим принципом стабілізації проміжної частоти. Чутливість акустичного приймача становить 0,5 мкВ в смузі частот 20 Гц. Антенний пристрій комплексу включає в себе передавальну та приймальну антени радіоканалу, які рознесені на відстань 5 м і екрановані одна від одної, а також приймально-передавальну акустичну антену із захисною шахтою, яка розміщена між антенами радіоканалу. В якості антен для обох локаторів використовують довгофокусні параболічні дзеркала діаметром 1,8 м. До блоку обробки даних, окрім комп'ютера РС АТ 286, входять комутатор джерел інформації, три частотоміра, інтерфейс зв'язку з комп'ютером та синхронізатор, який дозволяє задавати період зондування (2 с), крок реєстрації інформації по висоті – 34 м при температурному РАЗ і 17 м при акустичному зондуванні, а також черговість передачі даних зондування від джерел інформації в ПК.

Комплексне зондування за допомогою описаної системи включає в себе: випромінювання (за сигналом синхронізатора ІЗП-імпульсу запуску передавача) акустичного імпульсу; прийом відбитого від нього електромагнітного сигналу та частини енергії цього імпульсу, розсіяною на температурних неоднорідностях атмосфери; виділення доплерівських зрушень частоти прийнятих радіо- і акустичних сигналів; вимір їх миттєвого значення; обчислення вертикальної складової швидкості вітру за даними акустичного зондування; розрахунок швидкості звуку за даними РАЗ; введення в отримане значення швидкості звуку поправки, що враховує вертикальну складову швидкості вітру; обчислення одиничного значення температури повітря. Такий розрахунок проводиться для всіх висотних рівнів; при цьому здійснюється узгодження висот акустичного та радіоакустичного зондування висоти реєстрації

$$H_{AZ} = (T_3 K - \tau_3 + T_{вим} / 2) C_1 / 2,$$

$$H_{PAZ} = ((\tau_i + \tau_{вим}) / 2 + T_3 (N - 1)) C_1,$$

де T_3 – період тимчасового стробування, K – номер рівня зондування; τ_3 – час затримки акустичного імпульсу; $T_{вим}$ – час вимірювання доплерівського зсуву акустичного сигналу; C_1 – приземна швидкість звуку; τ_i – часова тривалість акустичного імпульсу; $\tau_{вим}$ – час вимірювання доплерівського зсуву радіоакустичного сигналу; N – номер рівня зондування.

У розробленій апаратурі використовуються наступні параметри зондування: $T_3 = 0,1$ с; $\tau_3 = 0,03$ с; $T_{вим} = \tau_{вим} = 0,01$ с; $\tau_i = 0,07$ с. Різниця в рівнях висот акустичного і радіоакустичного зондування становить не більше 0,85 м.

Обробка методики в умовах натурального експерименту показала, що вона може бути застосована в тих умовах комплексного зондування, коли за всіма висотними зареєстрованими рівнями є достатні амплітудні рівні акустичного і радіоакустичного відбитих сигналів. При розвитку температурної інверсії ці умови виконуються тільки в районі верхньої межі інверсії.

Для експериментального дослідження можливості застосування двохчастотного зондування з метою дистанційного вимірювання вологості повітря фазовим методом розроблена та постійно модернізується апаратура сумісного зондування, що включає до себе двохчастотний акустичний локатор та одночастотну систему радіоакустичного зондування. Акустичний локатор призначався, зокрема, для експериментального підтвердження існування фазових зрушень в атмосфері при її двохчастотному зондуванні.

1.4.3 Кореляційна обробка сигналів

При кореляційному способі обробки сигналів, що використовується при отриманні вертикальних профілів температури повітря, значення швидкості акустичного пакета в атмосфері визначається відповідно до виразу [70]

$$C = \frac{2\pi f_n}{\frac{4\pi f_e}{c} - q}, \quad (1.2)$$

де f_n – частота синусоїдального заповнення акустичного пакета; f_e – робоча частота радіолокатора; c – швидкість поширення радіохвиль; q – параметр розстроювання умови Брегга.

Задача оцінювання швидкості звуку, відповідно до запропонованого алгоритму, по суті, зводиться до оцінювання значення параметра q , який виступає як енергетичний параметр, що характеризує обидві складові векторного зондуючого коливання та стан середовища.

Загальноприйнятої методики розрахунку похибки оцінки величини q на даний час немає. Ця величина оцінюється по максимуму кореляційного інтеграла, отриманого шляхом перемноження опорної напруги, сформованої для деякого значення q , з реальною вихідною напругою радіоприймального пристрою, отриманою з заданої висоти зондування [71].

Основним параметром при кореляційній обробці, який визначає точність фіксації параметра q , є відношення сигнал/шум, тому що від відношення сигнал/шум залежить похибка визначення параметра q .

При реєстрації вертикальних профілів температури повітря слід мати на увазі можливі значення вертикального градієнта температури повітря в реальних умовах зондування.

У зв'язку з цим дуже важливим при використанні кореляційного способу реєстрації вертикального профілю температури методом РАЗ стає число

градацій параметра розстроювання Брега, необхідне для забезпечення заданої роздільної здатності по температурі, і, відповідно, число каналів кореляційного прийому. На рис. 1.15 приведена схема багатоканального алгоритму для реалізації формування оцінок максимальної правдоподібності інформаційного параметра.

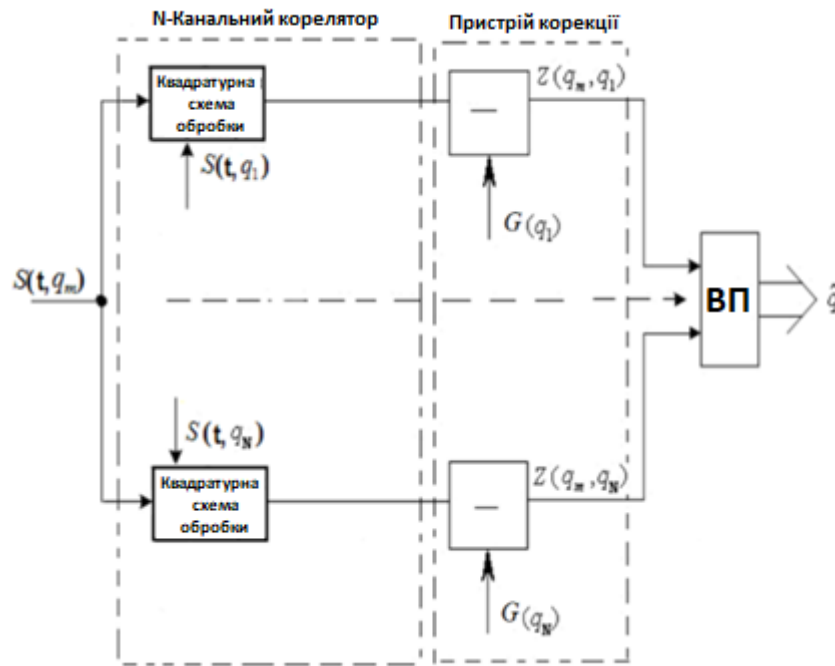


Рисунок 1.15 – Схема формування оцінок максимальної правдоподібності інформаційного параметра q

Схема складається з N – канального корелятора: в якості опорних сигналів використовуються коливання $S(t, q_N)$, сформовані з використанням функції розсіювання $F(r, q)$, і приведені до тимчасового вигляду з використанням виразу

$$t = \frac{r}{c},$$

де r – просторова координата, c – швидкість світла. Функція розсіювання $F(r, q)$ визначається виразом (1.3) [72].

Вихідний сигнал схеми обробки (рис. 1.15) описується виразом

$$Z(q_m, q_i) = |S(q_m, q_i)| - \frac{1}{2} G(q_i), i = 1, N,$$

де $S(q_m, q_i) = \int_0^T S(t, q_m) \cdot S(t, q_i) dt$ – функція взаємної кореляції вхідного корисного сигналу і опорного сигналу; $G(q_i) = \int_0^T S^2(t, q_i) dt$ – енергія опорного сигналу, відповідно до значень енергії якого здійснюється корекція сигналу корелятора.

Схема обробки містить вирішальний пристрій (ВП), який визначає канал з найбільшим значенням вихідної напруги, отриманим після корекції вхідного сигналу корелятора. Після цього приймається рішення щодо значення параметра q , що характеризується опорним сигналом, що найближче співпав за формою до отриманого сигналу. Далі визначається швидкість звуку за формулою (1.2), з використанням отриманого в результаті процедури оцінювання значення параметра розстроювання умови Брегга q .

Розсіяна на звуці радіохвиля являє собою взаємну кореляційну функцію взаємодіючих електромагнітного та акустичного коливань за позовжною просторовою координатою

$$F(r, q) = \int_{-\infty}^{\infty} E(2r' - r) S(r') e^{jqr'} dr', \quad (1.3)$$

де $q = 2k_e - k_s$ – параметр розстроювання умови Брегга; $k_s = \frac{2\pi f_s}{c_s}$ – хвильове

число для звуку; $k_e = \frac{2\pi f_e}{c}$ – хвильове число електромагнітної хвилі;

r – зміщення сигналів по координаті «дальність»; $E(2r' - r)$ – просторова обвідна радіосигналу; $S(r')$ – просторова обвідна акустичного сигналу.

Як випливає з (1.3) r, q – основні параметри, що характеризують простір розсіяних сигналів, все їх можливе різноманіття для заданих видів функцій E і S . Причому, вплив середовища виявляється інтегральним чином через параметр q , значення якого залежить від усіх метеовеличин, що впливають на швидкість звуку – температура, вологість, швидкість вітру, тиск і т.д. Іншими словами, вплив середовища представлено одним параметром, що спрощує модель і робить її більш зручною для проведення «системних, інженерних» досліджень.

Двовимірна взаємкореляційна функція характеризує основні властивості пари зондуючих сигналів, що складається з акустичного та електромагнітного коливань. Вона містить у собі інформацію щодо форми обвідної та просторової протяжності розсіяного радіосигналу, про діапазони можливих значень параметра розстроювання умови Бреґга, у котрому амплітуда розсіяної хвилі не виходить за певні рамки, та ряд інших важливих показників.

Особливість функції полягає в тому, що вона описує розсіяні сигнали в просторі; зондувальні коливання, що входять у вираз (1.3), також містять в якості аргументу координату r , а не час t . У той же час отримані за допомогою функції просторові характеристики сигналів досить легко перетворюються в часові характеристики. Використання просторового представлення сигналів і двовимірної взаємкореляційної функції диктується тією обставиною, що саме просторовими характеристиками визначаються можливості взаємодії сигналів (умова Бреґга), а також результати і особливості цієї взаємодії.

1.4.4 Основні обмеження методу та систем РАЗ

Основний вплив на зниження ефективності роботи систем РАЗ з класичною схемою антенного пристрою, яка містить передавальну, приймальну антени радіолокатора і акустичний випромінювач, надає горизонтальний вітер та його поворот з висотою, що призводить до зносу пакету акустичних хвиль. Так, вже при швидкості горизонтального вітру 4-5 м/с вимір метеовеличин методом зондування в чотирьох напрямках стає практично неможливим [73]. При радіоакустичному зондуванні атмосфери звичайні для радіолокації методи автосупроводу практично непридатні через специфіку радіолокаційного супроводу такого пакета в реальній атмосфері .

Для отримання профілів швидкості вітру і температури повітря у всьому прикордонному шарі і вище авторами роботи [74], запропоновано використовувати поле приймальних радіоантен. Хоча поле приймальних антен і дозволяє розширити висотний діапазон реєстрованих методом РАЗ вертикальних профілів метеорологічних величин до висоти приблизно 20 км, однак ряд істотних недоліків (величезна кількість дорогих антен, розгалужене кабельне господарство, великі експлуатаційні витрати та ін.) вимагають пошуку інших, більш ефективних, методів виконання вимірювань з використанням систем РАЗ.

1.4.5 Необхідність метрологічної атестації систем дистанційного зондування

З використанням методу РАЗ були створені способи і технічні засоби кількісного виміру основних метеорологічних величин – температури і вологості повітря, швидкості і напрямку вітру [3,75]. Однак широкого впровадження в практику метеорологічних спостережень і досліджень з фізики атмосфери ці методи і засоби поки не знайшли.

Системи дистанційного зондування є нестандартизованими засобами вимірювання, а для оцінки достовірності одержуваної метеорологічної інформації (наприклад, на предмет придатності її для використання в

синоптичних розрахунках), необхідно мати методики метрологічної атестації для кожного виду вимірювальних пристроїв. Відсутність на сьогоднішній день таких методик метрологічної атестації не дозволяє коректно порівнювати між собою результати вимірювань, виконаних різними експериментаторами, ставить під сумнів трактування та пояснення ними процесів, що відбуваються в атмосфері, не дає можливості єдиного підходу до проектування засобів дистанційного зондування того чи іншого класу.

На сьогоднішній день відомо ряд систем радіоакустичного зондування, що дозволяють досліджувати вертикальний розподіл температури повітря і вимірювати швидкість і напрям вітру аж до верхньої межі стратосфери, проводити вимірювання вологості повітря при слабкій турбулентності атмосфери. Під час отримання метеорологічної інформації з даних зондування в системах РАЗ використовуються такі параметри відбитого сигналу: амплітуда, доплерівський зсув частоти або його фаза. Природно припустити, що метрологічні характеристики систем РАЗ повинні бути пов'язані з цими параметрами сигналу, і чим краще метрологічні характеристики системи, тим точніше вимірюються параметри сигналу, і тим точніше проводяться вимірювання.

Для сертифікації апаратури РАЗ, створеної з метою вимірювання тієї чи іншої метеорологічної величини, існує ряд проблем необхідності коректного вибору і обґрунтування нормованої метрологічної характеристики. При організації метрологічної атестації необхідно вирішити питання про те, як проводити атестацію: системи РАЗ в цілому або її основних пристроїв – радіопередавача, радіоприймача, генератора потужних імпульсів в атмосфері, вимірювача інформаційного параметра прийнятого радіосигналу, реєстратора.

1.4.6 Зменшення часу осереднення профілів

Вимога зменшення часу осереднення профілів полягає в тому, що значний час призводить до помилки внаслідок нестационарності процесів в атмосфері.

В літературі по дистанційним методам зондування атмосфери висловлюється думка [76 та ін.], що шляхом виконання багаторазових вимірювань деякої величини і подальшого усереднення результатів цих вимірювань можна отримати значне підвищення точності оцінки метеопараметру. Насправді це твердження повністю виконується тільки для складової похибки, викликані випадковою апаратною помилкою, для якої справедливо відомий вираз

$$\sigma_r^2 = \frac{\sigma^2}{m},$$

де σ_r^2 – результуюча дисперсія; σ^2 – дисперсія одиничного вимірювання; m – число вимірювань.

В умовах нестаціонарного протікання атмосферних процесів збільшення числа вимірювань з метою зменшення помилки після перевищення деякого інтервалу часу призведе до зростання результуючої похибки.

Похибки, які викликані нестаціонарністю процесів у атмосфері, мають місце і при визначенні профілю повного вектора швидкості вітру в радіолокаційних профілометрах шляхом зондування в декількох напрямках.

Таким чином, актуальною є задача щодо розробки методів зондування обробки отриманих результатів вимірювань, що дозволяють одержувати профілі метеопараметрів в атмосфері протягом часу квазістаціонарності процесів, що спостерігаються.

1.5 Висновки до першого розділу

Системи дистанційного зондування атмосфери з використанням акустичних та електромагнітних хвиль мають значні потенційні можливості та можуть бути використані для вирішення множини існуючих наукових та прикладних задач.

Метод радіоакустичного зондування атмосфери найбільш перспективний для вимірювань температурних висотних профілів в нижніх шарах атмосфери, а також профілів вологості повітря і динамічних характеристик вітрових потоків.

Практичне використання методу та систем РАЗ при вирішенні актуальних задач стримується відсутністю методик метрологічної атестації засобів радіоакустичного дистанційного вимірювання метеорологічних параметрів атмосфери.

Відповідно до цього необхідно розробити відповідні методики, що дозволяють обґрунтовано використовувати існуючі та перспективні засоби РАЗ при вирішенні актуальних задач відповідно до існуючих вимог, що пред'являються до засобів вимірювань.

Існує необхідність в розробці нових ефективних методів вимірювання швидкості вертикального та горизонтального вітру систем РАЗ та оцінки показників якості отриманих з їх допомогою характеристик.

Найбільш потужним обмежувачем існуючих систем РАЗ по дальності є винос плями розсіяних коливань з апертури приймальної антени.

Час отримання температурних профілів системами РАЗ на даний час складає десятки хвилин, а іноді і декілька годин. При виконанні зондування протягом такої кількості часу в результатах вимірювань присутня похибка, яка обумовлена нестаціонарністю атмосферних процесів, що протікають. Отже, актуальною є задача по розробці методів зондування та обробки отриманих результатів вимірювань, які дозволять скоротити загальний час отримання профілів і, отже, зменшити похибку вимірювань.

Задачі дослідження:

1. Розробити підходи та методи метрологічної атестації систем радіоакустичного зондування атмосфери, що дозволяють обґрунтовано використовувати їх на практиці.

2. Розробити метод вимірювання вертикальної швидкості вітру з використанням кореляційної обробки розсіяних сигналів та оцінити його методичні похибки.

3. Виконати аналіз показників якості систем РАЗ щодо вимірювання профілів температури і вологості повітря з використанням кореляційної обробки сигналів.

4. Розробити метод прийому розсіяних сигналів, що заснований на пасивній локації плями прийнятих коливань.

5. Розробити методи фільтрації миттєвих профілів температури, що одержуються системою РАЗ, з метою зменшення часу, що витрачається на отримання температурних профілів з необхідною достовірністю.

РОЗДІЛ 2

МЕТРОЛОГІЧНА АТЕСТАЦІЯ ЗАСОБІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРИ

З використанням методу РАЗ створені способи і технічні засоби виміру основних метеорологічних величин – температури і вологості повітря, швидкості і напрямку вітру [2,53]. Однак широкого впровадження в практику метеорологічних спостережень і досліджень з фізики атмосфери ці засоби поки не знайшли.

У розділу розглянуто підходи до проведення метрологічної атестації засобів дистанційного зондування атмосфери, що використовують електромагнітні та (або) акустичні хвилі. На прикладі систем радіоакустичного зондування атмосфери показано, що досить об'єктивною характеристикою точності таких засобів можуть стати метрологічні характеристики складових їх пристроїв, які вносять найбільші похибки в результати вимірювання метеорологічних величин.

Матеріал розділу опубліковано в роботі [4,23].

2.1 Постановка задачі

Початок ХХІ століття характеризується широким впровадженням у практику метеоспостережень електронних та радіоелектронних засобів. Звичайним стало застосування радіолокаторів для вимірювання швидкості вітру у високих шарах атмосфери, реєстрації конвективних рухів в її нижніх шарах, виявлення грозових осередків, оцінки інтенсивності випадання опадів, стеження за торнадо та інші.

Розвиток радіоелектронних засобів дистанційного зондування атмосфери отримало значний імпульс у зв'язку з виконаними в 30–60-их роках минулого століття дослідженнями з поширенням звукових хвиль в атмосфері.

На базі цих досліджень виникли нові методи дистанційного моніторингу атмосфери – акустичне зондування (АЗ) та радіоакустичне зондування. З використанням методів АЗ та РАЗ були створені способи і технічні засоби кількісного виміру основних метеорологічних величин – температури і вологості повітря, швидкості і напрямку вітру [3,75]. Однак широкого впровадження до практики метеорологічних спостережень і досліджень з фізики атмосфери ці методи і засоби поки не знайшли.

Здебільшого ці засоби є нестандартизованими засобами вимірювання і для оцінки достовірності одержуваної з їх допомогою метеорологічної інформації (наприклад, на предмет придатності її для використання в синоптичних розрахунках), необхідно мати методики метрологічної атестації для кожного виду вимірювальних пристроїв. Відсутність на сьогоднішній день подібних методик метрологічної атестації не дозволяє коректно порівнювати між собою результати вимірювань, виконаних різними експериментаторами, ставить під сумнів трактування і пояснення ними процесів, що відбуваються в атмосфері, не дає можливості єдиного підходу до проектування засобів дистанційного зондування того чи іншого класу.

2.2 Підходи щодо створення методик метрологічної атестації засобів дистанційного зондування атмосфери

Дистанційні методи отримання метеорологічної інформації базуються на реєстрації тим чи іншим способом особливостей поширення електромагнітних та (або) акустичних хвиль в атмосфері. Ефективність того чи іншого дистанційного методу зондування атмосфери залежить від того, наскільки точно реєструється ефект взаємодії хвилі з атмосферою.

Дистанційне зондування атмосфери може вирішувати дві задачі: індикацію якісного стану атмосфери (томографію) та проведення кількісних вимірювань у ній. У першому випадку характеристики точності дистанційного засобу зондування істотної ролі не відіграють, в той час як для проведення

кількісних вимірювань метрологічна атестація вимірювального засобу стає найважливішою задачею.

Вимоги, що пред'являються споживачами метеорологічної інформації, отриманої за допомогою вимірювальних систем взагалі, показують, що нормованою метрологічною характеристикою таких систем повинна бути похибка вимірювання метеорологічної величини. Досвід тривалої експлуатації експериментальних систем РАЗ і акустичних локаторів, створених для дистанційної реєстрації основних метеорологічних величин – температури і вологості повітря, швидкості і напрямку, та використання добутої інформації в натурних експериментах [3,75] вказують на справедливість цієї тези.

Похибка визначення висоти, на якій проводяться вимірювання, залежить від точності відтворення тимчасового інтервалу, протягом якого зондуєчий пакет поширюється по трасі, і швидкості пакета на ній. Швидкість пакета априорі невідома (її значення по трасі часто приймається рівним приземному значенню), тому ця характеристика не може бути нормованою. Що стосується часу вимірювання метеорологічних величин засобами дистанційного зондування, то цей час має вкладатися в традиційні для метеорології інтервали – 1хв, 10 хв, 1 годину і т.і. (принаймні, на перших етапах впровадження таких засобів в практику метеоспостережень). Відзначимо, що ця технічна характеристика та її похибка для радіоелектронних засобів дистанційного зондування атмосфери зовсім не є проблемними.

Метрологічну атестацію дистанційних засобів зондування атмосфери, як і інших засобів вимірювань, можна проводити декількома шляхами: розрахунковим шляхом, шляхом екстраполяції структурної функції за даними практичних вимірювань та шляхом порівняння (звірення) з еталоном.

У першому випадку за основу береться робоча формула розрахунку значення метеорологічної величини за прийнятим значенням параметра відбитого сигналу. При цьому по робочій формулі визначаються приватні похідні по всіх пристроях, знаходяться коефіцієнти впливу, оцінюються

похибки визначення (вимірювання) елементів та розраховується середньоквадратична похибка вимірювання.

У разі метрологічної атестації шляхом звірення вибирається вимірювальний еталон, далі проводяться порівняльні вимірювання метеорологічної величини з еталоном і дистанційним засобом вимірювання, після чого розраховуються середньоквадратичні відхилення результатів порівняльних вимірювань. При проведенні порівняльних вимірювань необхідно мати на увазі, що похибка еталона повинна бути як мінімум в три рази нижче очікуваної похибки дистанційного засобу зондування. Тільки в цьому випадку, як відомо, середньоквадратичне відхилення результатів вимірювань метеорологічної величини порівнюваними засобами може бути прийнято в якості похибки засобу дистанційного вимірювання.

На сьогоднішній день відомо ряд систем радіоакустичного зондування, що дозволяють досліджувати вертикальний розподіл температури повітря і вимірювати швидкість і напрям вітру аж до верхньої межі стратосфери, проводити вимірювання вологості повітря при слабкій турбулентності атмосфери. Під час отримання метеорологічної інформації з даних зондування в системах РАЗ використовуються наступні параметри відбитого сигналу: амплітуда, доплерівський зсув частоти або його фаза. Природно припустити, що метрологічні характеристики систем РАЗ повинні бути пов'язані з цими параметрами сигналу, і чим кращі метрологічні характеристики системи, тим точніше вимірюються параметри сигналу, і тим точніше проводяться вимірювання. Для сертифікації апаратури РАЗ, що була створена з метою вимірювання тієї чи іншої метеорологічної величини, необхідно коректно вибрати і обґрунтувати нормовану метрологічну характеристику. При організації метрологічної атестації необхідно вирішити питання про те, як проводити атестацію: системи РАЗ в цілому або її основних пристроїв – радіопередавача, радіоприймача, генератора потужних імпульсів, вимірювача інформаційного параметра прийнятого радіосигналу, реєстратора.

2.3 Метрологічна атестація акустичних локаторів

Сьогодні відомі способи акустичного зондування, що дозволяють досліджувати термічну структуру прикордонного шару, вимірювати швидкість і напрям вітру в ньому, проводити реєстрацію відносних змін вертикального розподілу температури повітря, вимірювати вологість повітря. З використанням вимірювальних метеорологічних комплексів ряду висотних пристроїв і акустичних локаторів також були проведені синхронні порівняльні вимірювання деяких атмосферних характеристик [77]. Параметрами відбитого сигналу, що несуть метеорологічну інформацію, в цих локаторах, як і в системах РАЗ, також можуть бути: амплітуда, доплерівський зсув частоти або його фаза. Тому до розробки методики метрологічної атестації акустичного локатора слід підходити аналогічно розробці такої методики для систем РАЗ. Наприклад, як перший крок до метрологічної атестації, для роботи акустичного локатора в режимі реєстрації термічної структури атмосфери розроблена методика його калібрування шляхом вимірювання звукового тиску на осі антени в режимі випромінювання і розрахунку коефіцієнта перетворення приймача [78]. Зокрема, для такого режиму роботи локатора метрологічної атестації повинні піддаватися аналізу і пристрої, що визначають висоту і товщину шару зондування (просторове розрізнення), а також часова роздільна здатність.

2.4 Метрологічна атестація систем радіоакустичного зондування атмосфери

Дослідження атмосфери з використанням методу РАЗ фахівці ХНУРЕ завжди вели в супроводі вчених–метеорологів, проводячи на різних етапах досліджень порівняльні вимірювання метеорологічних величин штатними датчиками і експериментальною апаратурою радіоакустичного зондування [79].

Перші порівняльні вимірювання були виконані авторами роботи [34], однак визнати їх результати коректними не представляється можливим, тому що порівнювані засоби розміщувалися на відстані 30 км один від одного. Двома серіями (з листопада 1974 року по березень 1975 року і з листопада 1977 року по березень 1978 року) вперше в світовій практиці була проведена цілком коректна порівняльна реєстрація вертикальних профілів температури повітря, швидкості і напрямку вітру 10-см системою РАЗ і штатними датчиками висотної 300-метрової метеорологічної щогли (ВМЩ) Інституту експериментальної метеорології (м. Обнінськ) на короткій базі (порівнювані засоби вимірів знаходилися один від одного на відстані близько 150 м) [35]. Максимальна висота реєстрації вертикального профілю температури – 180–300 м, параметрів вітру – 200 м. У цих експериментах середньоквадратичні відхилення результатів порівняльних вимірювань такі: по температурі повітря – (0,1 – 0,5) К; за швидкістю вітру – (0,2 – 0,6) м/с; у напрямку – $(1,5– 5)^0$. Слід зауважити, що отримані значення середньоквадратичних відхилень включають в себе методичні похибки, викликані: впливом вологості і наявністю вертикальних повітряних потоків (при вертикальному зондуванні), усереднення результату вимірювання по конусу зондування (при похилому багаторазовому температурно-вітровому РАЗ в декількох напрямках), існуванням турбулентності, флуктуаційним характером прийнятих радіосигналів, конструктивним розносом антен радіоканалу. Природно вважати, що отримані значення середньоквадратичних відхилень не можуть служити в якості метеорологічних характеристик використаної в експериментах системи РАЗ температурно-вітрового зондування, тому що ці відхилення формувалися під впливом апаратури і обраної методики зондування, сезонних умов і клімату конкретного географічного району в цілому. Більшою мірою вони характеризують похибку методу РАЗ. Крім того, критерій малої похибки штатних метеорологічних датчиків ВМЩ, використаних в якості еталонів, не виконувався.

Застосування в якості еталону контактного метеорологічного датчика в таких вимірах призводить до деякої неоднозначності порівняння, викликаній методикою зондування. Перш за все, результати вимірювання метеорологічної величини дистанційним засобом зондування усереднюються по деякому обсягу, визначеному шириною діаграми спрямованості антени і просторової протяжністю зондуючого імпульсу, в той час як метеорологічний датчик здійснює точкові вимірювання. Крім того, має місце неоднозначність визначення висоти вимірювання, на якій здійснюється вимірювання метеорологічної величини дистанційним засобом. Більшість розробників дистанційних засобів зондування за висоту реєстрації при конкретному вимірі приймають висоту середини зондуючого акустичного імпульсу, хоча це при проведенні РАЗ атмосфери і не завжди правильно.

Важливе значення для забезпечення точності вимірювання метеорологічних величин методом і апаратурою РАЗ мають методика зондування і структура алгоритму обробки даних. Наприклад, при температурному РАЗ атмосфери має місце випадок нелінійного зв'язку вимірюваного параметра радіосигналу локатора (доплеровське зрушення частоти прийнятого радіосигналу) з вимірюваною метеорологічною величиною (температура). Тому для коректної обробки даних зондування розрахунок значення температури повітря необхідно проводити для кожного одиничного значення зсуву частоти Доплера і далі усереднювати значення температури повітря з вибраного інтервалу часу зондування (кількості зондувань) для кожної точки профілю [41]. Збільшення кількості зондувань до 16...25 дозволяє підвищити точність дистанційної реєстрації профілів температури, а похибка вимірювання температури стає прийнятною для практичного застосування (0,25...0,3 К), наприклад, в синоптичних розрахунках. Такі методика зондування і структура алгоритму обробки даних температурного і температурно-вітрового профілювання відпрацьовані в ході тривалих експериментів в різних метеоумовах і різних географічних районах і

дають можливість наблизити результати експериментальних вимірювань до метрологічно забезпечених характеристик.

З огляду на викладене, на сьогоднішній день важко собі уявити пристрій, який міг би бути застосований як еталон для звірення при метрологічній атестації систем РАЗ температурного або температурно-вітрового зондування атмосфери, оскільки неможливо встановити значення похибки, обумовленої дією реальної атмосфери на процес РАЗ.

Метрологічна атестація системи РАЗ, організована на базі метрологічної атестації окремих пристроїв системи, видається більш перспективною.

Для кількісної оцінки впливу стабільності частоти радіопередавача на похибку вимірювання швидкості звуку необхідне знання його спектральної щільності миттєвих частотних флуктуацій. Вимірювання цієї характеристики генераторів є складною технічною задачею.

Для передавача та приймача доплерівської РЛС, які використовують звичайні фільтри, отримано від спектральної щільності флуктуацій частоти, що дозволив розрахувати похибку вимірювання швидкості звуку, яка для даної станції дорівнює $\sigma^2 C \approx 0,2 (\text{м/с})^2$, а середньоквадратичне відхилення – $\sigma C \approx 0,4 \text{ м/с}$. У подальших оцінках значень похибки приймемо її за більше з двох отриманих значень, обумовлених нестабільністю частоти передавача.

Похибки вимірювань швидкості звуку за приводу не ідеальності інших вузлів апаратури радіоакустичного зондування (радіоприймального пристрою зі стежачим фільтром, блоку вимірювання і реєстрації частоти доплерівського зсуву та ін.), а також з урахуванням флуктуаційного характеру відзеркалених сигналів складають $\sigma C_{np} \approx 0,38 \text{ м/с}$.

Прийнятна сумарна похибка вимірювання швидкості звуку доплерівським радіолокатором, побудованим по «звичайній» структурній схемі, склала $\Delta C_{\Sigma} \approx 0,71 \text{ м/с}$. Ця похибка вимірювання швидкості звуку призводить до наступної похибки визначення температури $\sigma T \approx 1,2 \text{ К}$ [62]. Важливе значення для забезпечення точності вимірювання метеорологічних

величин з використанням апаратури РАЗ мають методика зондування та структура алгоритму обробки даних.

Оскільки похибка вимірювання швидкості звуку доплерівським радіолокатором, що обумовлена нестабільністю частоти радіопередавача, є найбільш суттєвою з усіх розглянутих, то в основу метрологічної атестації системи РАЗ як температурного зондування, так і температурно-вітрового зондування може бути покладено значення відносної короткочасної нестабільності частоти опорного генератора доплерівського радіолокатора. Тоді розрахована з використанням значення нестабільності похибка вимірювання доплерівського зсуву частоти відбитого сигналу, що визначає похибку вимірюваної метеорологічної величини, стає метрологічною характеристикою систем РАЗ температурного і температурно-вітрового зондування [81]. Вимірювання відносної короткочасної нестабільності частоти опорного генератора радіолокатора можна проводити відповідно до ДСТУ 8.129–99, створеного для метрологічної атестації стандартів частоти і часу [82].

Новим кроком у радіоакустичному зондуванні, без перебільшення, стало використання нетрадиційної для даного методу кореляційної обробки відбитих сигналів [83]. При кореляційній обробці сигналів системи РАЗ для отримання даних про метеорологічні величини з даних зондування інформаційним параметром є параметр розстроювання умови Брегга q .

В роботі [84] була визначена інструментальна середньоквадратична похибка вимірювання температури повітря в стандартній атмосфері з використанням кореляційної обробки прийнятих сигналів дорівнює $\sigma T \approx 0,01K$, вона нижче, ніж при доплерівській обробці, проте пристрій кореляційної обробки потребує ускладнення (зокрема, збільшення числа каналів).

Відповідно до прийнятої вище концепції для систем РАЗ з кореляційною обробкою в якості метрологічної величини повинна стати відносна середньоквадратична похибка вимірювання цього інформаційного параметра

розсіяних сигналів. Перехід до кореляційної обробки вимагає зміни складу зондуючої апаратури, а саме, включення в її склад блоку формування сітки опорних сигналів, корелятора, віднімаючого пристрою і компаратора [85].

Визначення похибки вимірювань температури повітря за результатами екстраполяції структурної функції за даними практичних вимірювань призводить приблизно до таких же значень похибки [80].

У ряді розроблених способів вимірювання вологості повітря радіоакустичного зондування інформаційним параметром відбитого сигналу служить його потужність при одночастотному зондуванні атмосфери [86] або ставлення потужностей при двохчастотному зондуванні [87]. Таке ставлення, наприклад, має вимірюватися з похибкою, меншою 0,4дБ [75], для того, щоб похибка вимірювання вологості за допомогою апаратури РАЗ не перевищувала 7% – максимально допустимої похибки штатних датчиків вологості, що застосовуються в мережі метеоспостережень.

При проведенні порівняльних вимірювань відносної вологості двохчастотною апаратурою РАЗ, датчиками автоматизованого метеорологічного комплексу, встановленого на 50–метровій щоглі, змонтованої на території Одеського гідрометеорологічного інституту, і радіозонда “МАРЗ–21” отримано розбіжність результатів вимірювань в межах 9–12% в нічних умовах [75,87]. Тому, як і при проведенні температурно–вітрового РАЗ атмосфери, отримані значення середньоквадратичних відхилень не можуть служити в якості метрологічних характеристик, які застосовувалися в експериментах системи РАЗ. Критерій малої похибки штатних метеорологічних датчиків комплексу і радіозонда, використаних в якості еталонів, також не виконувався. Якщо врахувати, що амплітудні радіотехнічні вимірювання є найменш точними, то проблема метрологічної атестації подібних дистанційних засобів вимірювання вологості стає вельми актуальною, а їх експлуатація повинна включати систематичне калібрування трактів радіопередавача, радіоприймача і генератора потужних акустичних імпульсів [4].

Відомий також спосіб радіоакустичного визначення вологості повітря, який засновано на вимірюванні різниці фаз двох акустичних коливань різної частоти, що виникають за рахунок дисперсії швидкості звуку у вологому атмосферному повітрі [75]. Джерелами похибки вимірювання фазового зсуву в системі РАЗ, залученої для дистанційної реєстрації профілів вологості повітря, є двоканальні радіопередавач і радіоприймач, звуковий генератор і акустичні випромінювачі. Саме ці пристрої і повинні бути піддані метрологічній атестації.

2.5 Висновки до другого розділу

1. Метрологічну атестацію дистанційних засобів зондування атмосфери, як і інших засобів вимірювань, можна проводити декількома шляхами: розрахунковим шляхом, шляхом екстраполяції структурної функції за даними практичних вимірювань і шляхом порівняння (звірення) з еталоном.

2. У даний час відсутні технічні засоби вимірювань, які могли б бути використаними в якості еталонів для метрологічної атестації дистанційних систем зондування атмосфери, що використовують електромагнітні та (або) акустичні хвилі.

3. Розглянуто підходи до проведення метрологічної атестації засобів дистанційного зондування атмосфери, що використовують електромагнітні та (або) акустичні хвилі. На прикладі систем радіоакустичного зондування атмосфери показано, що досить об'єктивною характеристикою точності таких засобів можуть стати метрологічні характеристики складових їх пристроїв, які вносять найбільші похибки в результати вимірювання метеорологічних величин.

4. Метрологічну атестацію дистанційних засобів доцільно проводити шляхом метрологічної атестації основних пристроїв системи, що визначають похибку вимірювання інформаційного параметра відбитого сигналу системи, з

урахуванням того, що сумарна похибка вимірювань метеорологічної величини, яка визначається похибками окремих пристроїв, в цілому не повинна перевищувати заданої для даного засобу.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ СИСТЕМ РАДІОАКУСТИЧНОГО ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРИ

На сьогоднішній день запропоновано, а в ряді випадків, і експериментально апробований, цілий ряд технологій радіоакустичного отримання інформації про основні метеорологічні величини: складових швидкості вітру, температуру і вологість повітря. Така інформація про атмосферу та про її прикордонний шар надзвичайно важлива для ефективного здійснення багатьох видів людської діяльності. Однак в цілому ряді випадків використання методу і апаратури РАЗ не дозволяє отримувати достатні і достовірні дані про метеорологічний стан атмосфери, наприклад, [88]. Протягом тривалого часу була використана доплерівська обробка даних зондування систем РАЗ [75]. Авторами [70] запропоновано застосовувати для обробки даних зондування кореляційну обробку сигналів систем РАЗ. Комбінування цих видів обробки сигналів може дозволити розширити можливості систем РАЗ по вилученню нової інформації з даних радіоакустичного зондування атмосфери.

У розділу проведена оцінка можливості реєстрації за допомогою метода РАЗ швидкості вертикальних потоків, інформація про яку необхідна для підвищення точності дистанційної реєстрації ряду метеорологічних величин, зокрема, температури повітря в прикордонному шарі атмосфери. Виконано аналіз методичних похибок, що виникають за рахунок апіорної невизначеності висотного розподілу метеорологічних величин при реєстрації вертикальних профілів температури і вологості повітря з використанням кореляційної обробки прийнятих сигналів систем радіоакустичного зондування.

Матеріали розділу опубліковані в роботах [5-8,13,14,17]

3.1 Вимірювання вертикальної швидкості вітру

3.1.1 Метод вимірювання вертикальної швидкості вітру

В теорії поширення акустичних хвиль у різних середовищах існують два визначення швидкості цих хвиль: фазова і групова швидкість хвилі [89]. Фазова швидкість поширення акустичних хвиль в реальній атмосфері обумовлюється конкретними значеннями атмосферного тиску, температури і вологості повітря, теплоємності сухого повітря і водяної пари [60]. Ця залежність в загальному вигляді може бути записана у вигляді [90]

$$C_{\phi} = f_n \cdot \lambda_n, \quad (3.1)$$

де C_{ϕ} – фазова швидкість, f_n – частота звукових коливань, що було випромінено в атмосферу, λ_n – довжина акустичної хвилі.

А вираз для групової швидкості пакета акустичних хвиль, який зазвичай використовується при радіоакустичному (в нашому випадку, вертикальному) зондуванні атмосфери, можна записати у вигляді [3]

$$C = C_{\phi} + W_z, \quad (3.2)$$

де W_z – вертикальна складова швидкості вітру, яка переносить цей пакет як єдине ціле.

Для задач дистанційного зондування атмосфери істотним стає розбіжність фазової і групової швидкості поширення звукових хвиль [91]. Зокрема, при реєстрації вертикальних профілів температури повітря методом РАЗ атмосфери похибка вимірювання повітря істотно залежить від існування в зондованому шарі атмосфери вертикальних потоків, що формуються, здебільшого, інтенсивним прогріванням підстиляючої поверхні. В роботі [92]

показано, що при цьому кожен метр в секунду швидкості вертикального потоку вносить похибку в вимір температури повітря приблизно 1,68 К.

При вимірюванні швидкості поширення пакета акустичних хвиль за допомогою доплерівського радіолокатора здійснюється вимір групової швидкості, що можна записати за допомогою відомого виразу [3]

$$C = \frac{f_d \lambda_e}{2}, \quad (3.3)$$

де f_d – частота доплерівського зсуву електромагнітних сигналів, що опромінюють акустичний пакет; λ_e – довжина хвилі електромагнітного випромінювання.

При використанні кореляційної обробки сигналів системи РАЗ для отримання інформації про метеорологічні величини інформаційним параметром є параметр розстроювання умови Брегга

$$q = \lambda_e - 2\lambda_n.$$

У процесі радіоакустичного зондування та вертикального поширення акустичного пакету інтенсивність сигналів, розсіяних акустичним пакетом, залежить від технічних параметрів апаратури, що було використано, заданої висоти зондування і значень ряду метеорологічних величин, що створюють конкретну метеорологічну ситуацію [3,93]. Фазова швидкість (3.1) акустичних хвиль в атмосфері залежить від їх довжини, а їх довжина може бути визначена радіоакустичним зондуванням з використанням кореляційної обробки прийнятих сигналів, що дозволяє знайти параметр розстроювання Брегга q , який залежить тільки від λ_n (оскільки $\lambda = \text{const}$). В роботі [70] представлено вираз, який придатний для розрахунку значень фазової швидкості поширення

акустичної хвилі в атмосфері по відомим технічним параметрам зондуючої системи і знайденим значенням параметра q

$$C_{\phi} = \frac{2\pi f_n}{\frac{4\pi f_e}{c} - q}, \quad (3.4)$$

де f_e – частота електромагнітного випромінювання; c – швидкість поширення електромагнітного випромінювання.

Як показано в роботі [94], найбільший вплив на амплітуду прийнятих радіосигналів у процесі проведення РАЗ атмосфери надає горизонтальний вітер, який виносить зондуючий атмосферу пакет акустичних хвиль з діаграм спрямованості антен радіоканалу, внаслідок чого амплітуда цих сигналів падає. Даний природний фактор створює залежність параметра q , що є інформаційним параметром, при використанні кореляційної обробки прийнятих радіосигналів, від їх амплітуди. Для виключення впливу горизонтального вітру на визначення значень q доцільно забезпечити синхронне випромінювання ряду акустичних пакетів за допомогою розподіленого акустичного випромінювача. Такий випромінювач складається з декількох модулів, живлення яких здійснюється одним потужним джерелом. При цьому модулі розміщуються на деякій відстані один від одного на прямій (або кривій) лінії [94]. Кількість таких модулів визначається заданою кількістю точок вимірювання вертикальної швидкості вітру на трасі зондування. При використанні такого розподіленого акустичного випромінювача зондувальні пакети горизонтальним вітром послідовно вносяться в діаграми спрямованості радіоантен, а прийнятий радіосигнал на виході приймача являє собою групу імпульсів напруги, кількість яких відповідає кількості модулів, що було використано (при достатньому енергетичному потенціалі системи РАЗ).

Розрахунок значень вертикальної швидкості вітру при використанні запропонованої методики можна зробити для тих точок (рівнів) траси

зондування, яким відповідає тимчасове положення максимуму чергового імпульсу амплітуди, починаючи з першого [5]. Часове положення цих імпульсів визначається одним з відомих способів: перебором числових значень масиву амплітуд прийнятого імпульсу на комп'ютері, застосуванням цифрового пікового амплітудного детектора та ін. В разі застосування аналогового пікового детектора, в момент досягнення імпульсом свого максимуму генерує імпульс запуску доплерівської і кореляційної обробки прийнятих сигналів.

Відповідно до викладеної методики зондування для обраної точки на трасі за допомогою доплерівської обробки прийнятого сигналу знаходять значення доплерівського зсуву частоти f_d , яке використовують для розрахунку групової швидкості акустичного пакета на розглянутій висоті відповідно до виразу (3.3). Одночасно за допомогою кореляційної обробки того ж сигналу отримують значення параметра розстроювання q і розраховують значення фазової швидкості акустичного пакета на обраній висоті за виразом (3.4). Отримані дані дозволяють обчислити значення вертикальної швидкості вітру для обраної точки по розрахунковій формулі

$$W_z = C - C_\phi = \frac{f_d \lambda_e}{2} - \frac{2\pi f_n}{\frac{4\pi f_e}{c} - q}. \quad (3.5)$$

Отримане в результаті зондування атмосфери значення вертикальної швидкості вітру цікаво не тільки саме по собі. Інформація, отримана з використанням запропонованого алгоритму (3.5), дає реальну можливість синхронної реєстрації вертикальних профілів температури повітря з потенційною для методу РАЗ точністю. З метою підвищення точності реєстрації вертикальних профілів температури повітря за допомогою апробованої в експериментах доплерівської обробки прийнятих сигналів необхідно провести коригування значення групової швидкості звуку, вводячи

виміряне значення вертикальної швидкості вітру в вираз (3.2). Іншим способом підвищення точності реєстрації вертикальних профілів температури повітря може бути розрахунок температури повітря за отриманим значенням фазової швидкості звуку, яке при запропонованій методиці зондування не залежить від складових швидкості вітру. Спільна інформація про вертикальні профілі температури повітря і вертикальної складової швидкості вітру дає можливість для визначення ще однієї фізичної характеристики прикордонного шару атмосфери – потоку тепла. Крім того, при застосуванні розподіленого акустичного випромінювача в антенному пристрої системи РАЗ можливо провести вимір горизонтальної швидкості вітру, використовуючи дані про часовий інтервал між появою суміжних максимумів амплітуди прийнятих сигналів і даних про просторове рознесення сусідніх модулів R відповідно до виразу

$$W_x = \frac{R}{\Delta t},$$

де Δt – часовий інтервал між появою сусідніх максимумів амплітуди.

3.1.2. Оцінка похибок вимірювання вертикальної швидкості вітру

Відносна середньоквадратична похибка обчислення вертикальної швидкості вітру за виразом (3.5) може бути записана у вигляді рівняння повної похибки (при умові некорельованості джерел похибки) відповідно до [95]

$$\frac{\sigma W_z}{W_z} = \sqrt{\left(\frac{\partial W_z}{\partial f_n} \frac{\sigma f_n}{f_n}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial f_e} \frac{\sigma f_e}{f_e}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial c} \frac{\sigma c}{c}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial f_d} \frac{\sigma f_d}{f_d}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial \lambda_e} \frac{\sigma \lambda_e}{\lambda_e}\right)^2 + \sqrt{\left(\frac{\partial W_z}{\partial q} \frac{\sigma q}{q}\right)^2}. \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial W_z}{\partial f_n} = \frac{2\pi c}{4\pi f_e - cq}; \quad \frac{\partial W_z}{\partial f_e} = -\frac{8\pi^2 f_n c}{(cq - 4\pi f_e)^2}, \quad \frac{\partial W_z}{\partial c} = \frac{8\pi^2 f_n f_e}{(cq - 4\pi f_e)^2}, \quad \frac{\partial W_z}{\partial f_d} = \frac{\lambda_e}{2},$$

$$\frac{\partial W_z}{\partial \lambda_e} = \frac{f_d}{2} \frac{\partial W_z}{\partial q} = \frac{2\pi f_n c^2}{(cq - 4\pi f_e)^2}. \quad (3.7)$$

Для оцінки значення відносної середньоквадратичної похибки вимірювання вертикальної швидкості вітру необхідно мати значення параметрів, що входять в розрахунковий вираз (3.5). Наприклад, 10-сантиметрова система РАЗ, використана в серіях порівняльних експериментів [88], мала наступні параметри: $F = 6800$ Гц та $f = 3 \cdot 10^9$ Гц, а при $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, $T \approx 18$ °С, $C = 342$ м/с, $q = 0$, $f_d = 6800$ Гц (припущено, що в експерименті виконується умова Брегга). Значення коефіцієнтів впливу в (3.7) в цьому випадку такі

$$\frac{\partial W_z}{\partial f_n} = 5 \cdot 10^{-2}; \quad \frac{\partial W_z}{\partial f_e} = 1,14 \cdot 10^{-7}; \quad \frac{\partial W_z}{\partial c} = 1,14 \cdot 10^{-6};$$

$$\frac{\partial W_z}{\partial f_d} = 5 \cdot 10^{-2}; \quad \frac{\partial W_z}{\partial \lambda} = 3400; \quad \frac{\partial W_z}{\partial q} = 2,7. \quad (3.8)$$

Аналіз результатів (3.8) показує, що найбільший вплив на середньоквадратичну похибку обчислення горизонтальної швидкості вітру в (3.8) мають похибки вимірювання (відтворення) довжини хвилі радіопередавача і визначення параметра Брегга, в меншій мірі – похибки вимірювання частоти зондуючого звуку і частоти доплерівського зсуву.

Значення більшості відносних середньоквадратичних похибок вимірювання параметрів, що входять у вираз (3.8), можуть бути взяті з робіт [96,97]

$$\frac{\sigma f_n}{f_n} = 15 \cdot 10^{-12}; \frac{\sigma f_e}{f_e} = 0,3 \cdot 10^{-16}; \frac{\sigma \lambda}{\lambda} = 10^{-6};$$

$$\frac{\sigma q}{q} \approx 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ та } \frac{\sigma c}{c} = 0,5 \cdot 10^{-6}. \quad (3.9)$$

Підставляючи дані з (3.8), (3.9) та дані оцінок похибки вимірювання швидкості звуку з роботи [98] у рівняння похибки (3.6), а також використовуючи критерій неістотної похибки, отримуємо значення відносної середньоквадратичної похибки вирахування вертикальної швидкості вітру

$$\frac{\sigma W_z}{W_z} = 3,8 \cdot 10^{-2} \approx 4 \cdot 10^{-2},$$

що при швидкості вітру у атмосфері $W_z = 1 \text{ м/с}$, середньої швидкості для прикордонного шару [99], надасть середньоквадратичну похибку вимірювання вертикальної швидкості вітру $\sigma W_z = 0,04 \text{ м/с}$.

Отримане значення інструментальної похибки вимірювання вертикальної складової швидкості вітру знаходиться на рівні такої ж похибки содара ScientecMFAS [100], однак розглянута технологія в поєднанні з іншими сучасними РАЗ-технологіями [96,101] може виявитися більш перспективною при організації метеорологічних спостережень атмосфери при її екологічному моніторингу.

3.2 Вимірювання профілів температури при кореляційній обробці сигналів систем радіоакустичного зондування

В даному підрозділі виконано оцінку методичних похибок, що виникають за рахунок апріорної невизначеності висотного розподілу метеорологічних величин, при реєстрації вертикальних профілів тієї чи іншої

метеорологічної величини з використанням кореляційної обробки прийнятих сигналів систем радіоакустичного зондування.

3.2.1 Методика зондування і обробка сигналів

Методичні похибки вимірювань основних метеорологічних величин методом і апаратурою РАЗ із застосуванням кореляційної обробки прийнятих радіосигналів можуть бути викликані як прийнятою методикою зондування атмосфери, так і відсутністю апріорної інформації про реальні значення метеорологічних величин, що впливають на інформаційний параметр прийнятого радіосигналу. При кореляційній обробці прийнятих радіосигналів таким параметром є їх амплітуда. Тому для забезпечення необхідної точності вимірювань метеовеличин необхідно ретельно дослідити вплив різних чинників (метеорологічних величин і їх просторово-часових змін, методики зондування, технічних параметрів апаратури, використовуваної для зондування і інші) на потужність прийнятих радіосигналів. Зокрема, амплітуда прийнятих радіосигналів визначається і формою головної пелюстки функції $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$, що описує істотне бреггівське розсіювання, в залежності від кількості довжин хвиль N в зондуючому акустичному пакеті [75]. Вид цієї функції закладається в генератор опорних сигналів, необхідних для кореляційної обробки прийнятих сигналів. Значення методичної похибки реєстрації температури повітря в залежності від числа опорних сигналів і необхідного дозволу сигналів по параметру розстроювання умови Брегга оцінено в роботі [98].

У порівняльних експериментах щодо зондування атмосфери короткими та довгими акустичними пакетами нами виявлено [75], що при використанні довгих пакетів помітно збільшуються флуктуації сигналів, що не пов'язані з пульсаціями параметра Брегга q . Такий характер прийнятих сигналів ускладнить кореляційну обробку сигналів і призведе до збільшення похибки визначення цього параметра.

Численні натурні експерименти, які виконані в ході оцінки можливостей методу та апаратури РАЗ для організації моніторингу атмосфери різного призначення [75], вказали на безумовну необхідність використання інформації про вертикальний розподіл основних метеорологічних величин. У цих експериментах помічено сильний вплив основних метеорологічних величин і атмосферних процесів на результати зондування (похибку вимірювань, висоту реєстрації, час вимірювань і ін.). Перш за все, це продиктовано задачею досягнення інструментальної точності вимірювання величини, що реєструється.

Просторово-часова неоднорідність метеорологічних величин, що визначають умови поширення звуку в реальній атмосфері, призводить до наступних ефектів:

1. Загальний поступальний рух повітряних мас (мезомасштабні рухи) обумовлює горизонтальний перенос звукової енергії;

2. Коливання швидкості повітряного потоку двояко впливають на звук, що поширюється:

– великомасштабні неоднорідності потоку ($L \gg \lambda$) викликають рефракцію звукових променів;

– дрібномасштабні неоднорідності ($L \ll \lambda$) – розсіювання звуку, причому інтенсивність такого розсіювання залежить від ступеня турбулізації потоку (де L – розмір неоднорідності, а λ – довжина хвилі звуку).

3. Температурні неоднорідності, як і вітрові, викликають рефракцію або (та) розсіювання звукових хвиль (теж в залежності від масштабу цих неоднорідностей).

Основні метеорологічні чинники, що викликають появу методичних похибок вимірювання основних метеорологічних величин методом і апаратурою РАЗ, досить повно перераховані в роботі [102].

3.2.2 Оцінка впливу атмосфери на точність вимірювання метеовеличин.
Реєстрація вертикальних профілів температури повітря

Вираз для розрахунку температури повітря при використанні кореляційного оброблення даних вертикального зондування має вигляд [98]

$$T, K = \left[\frac{2\pi f_n}{a \left(\frac{4\pi f_e}{c} - q \right)} \right]^2, \quad (3.10)$$

де f_n – частота синусоїдального заповнення акустичного пакету; f_e – робоча частота радіолокатора; c – швидкість поширення радіохвиль; a – коефіцієнт, який залежить від складу повітря (для сухого повітря $a = 20,0789 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}^{-1/2}$).

У роботі [102] виконана коректна оцінка методичної (за рахунок переносу акустичного пакету горизонтальним вітром) похибки реєстрації вертикальних профілів температури повітря для такого виду оброблення прийнятих радіосигналів системи РАЗ. Втім на потужність радіосигналів, яка у даному випадку є інформаційним параметром, справляють суттєвий вплив і інші метеорологічні величини та процеси. Зокрема, вельми важливою метеорологічною величиною у цьому контексті є водяна пара та її кількісні характеристики. Існування турбулентності, наявність вертикальних градієнтів температури повітря та швидкості вітру, а також пульсації метеорологічних величин призводять до зниження потужності радіосигналів, що приймаються.

При поширенні звукових хвиль у реальній атмосфері спостерігається явище дисперсії швидкості звуку – залежність фазової швидкості звукових хвиль від частоти. Дисперсія швидкості звуку може бути обумовлена як фізичними властивостями середовища, так і наявністю в ньому сторонніх включень. Для атмосферного повітря таким включенням є водяна пара. Дисперсія швидкості звуку супроводжується підвищеним поглинанням звуку порівняно з поглинанням, яке викликається класичним поглинанням (зсувною в'язкістю та теплопровідністю) [90]. Добре відомо, що при радіоакустичному зондуванні залежність потужності радіосигналу P , яка приймається, від

поглинання енергії звукових хвиль атмосферними газами описується експонентою вигляду [3]

$$P \approx P_0 \cdot \exp(-2\alpha R), \quad (3.11)$$

де P_0 – потужність, яка приймається при відсутності поглинання, α – коефіцієнт поглинання, R – висота, з якої приймається радіосигнал.

Коефіцієнт поглинання звуку у повітрі α звичайно подають у вигляді суми двох функцій: від частоти та від вологості. Розрахункові формули наведені у роботах [3,103].

Проведемо оцінку методичної похибки реєстрації вертикального профілю температури повітря за відсутності апріорної інформації про вертикальний розподіл вологості повітря у шарі атмосфери, який досліджується, згідно методики, викладеної у роботі [102]. Для 10-сантиметрової системи РАЗ [75] частота зонduючого звуку дорівнює $f_n = 7,15$ кГц. У метеорологічній ситуації, коли температура повітря становить $T = 0^\circ\text{C}$ та відносна вологість повітря $h = 50\%$, коефіцієнт поглинання звуку дорівнює $2\alpha \cdot 10^2 \text{ м}^{-1} = 3,19$ [3]. Якщо для сухого повітря потужність сигналу, який отриманий з висоти 50 м, дорівнює 0,1 мкВт, та $q = 1,517$, то при існуванні у повітрі вологості $h = 50\%$ значення прийнятого сигналу буде знижено у $\exp(-2\alpha R)$ разів, а параметр Брега буде дорівнювати вже $q = 1,502$. Використовуючи формулу (3.10) для двох значень q знайдемо, що методична похибка реєстрації температури повітря на заданій висоті у даних метеоумовах складе близько 0,08 К.

При оцінці впливу дрібномасштабної турбулентності на інтенсивність розсіювання електромагнітних хвиль на звукових хвилях звично зв'язують інтенсивність розсіювання радіохвиль при РАЗ атмосфери з параметром C_n^2 , який характеризує інтенсивність флуктуацій швидкості звуку в турбулентній атмосфері. Наприклад, відомо, що головним фактором, який впливає на

середню потужність, що приймається приймачем системи РАЗ у дециметровому діапазоні довжин радіохвиль, є порушення поперекової когерентності фазового фронту акустичної хвилі. Це порушення характеризується радіусом поперекової когерентності ρ_c , який у наближенні геометричної оптики ($l_0 \ll \lambda$, де l_0 – внутрішній масштаб турбулентності) визначається виразом [38]

$$\rho_c = \left(2,91 \cdot C_n^2 \cdot k_n^2 \cdot R \right)^{-3/5}, \quad (3.12)$$

де C_n^2 – структурна характеристика флуктуацій акустичного показника заломлювання, $\text{м}^{-2/3}$; $k_n = 2\pi / \lambda_n$ – хвильове число акустичних коливань, м^{-1} ; R – висота зондування, м.

Послаблення турбулентністю потужності, що приймається, характеризується відношенням R_0 / ρ_c [104]

$$\frac{\langle P_R \rangle}{P_R} = \left(1 + \frac{R_0^2}{\rho_c^2} \right)^{-1}, \quad (3.13)$$

де $\langle P_R \rangle$ – середня потужність сигналу, що приймається; P_R – потужність сигналу у нетурбулентній атмосфері; R_0 – ефективний поперечник взаємодії акустичного і радіопучка.

У зоні дифракції Фраунгофера [38]

$$R_0^2 = \frac{2R^2}{k_e k_n (2a_n^2 + a_e^2)}, \quad (3.14)$$

де $k_e = 2\pi / \lambda_e$, $2a_n$ та a_e – діаметр апертур акустичної і радіоантени.

Під час розрахунку значень структурної сталої C_n^2 враховують її залежність від структурних сталих флуктуацій температури повітря C_T^2 та швидкості вітру C_W^2 [38]

$$C_n^2 = \frac{C_T^2}{4T^2} + \frac{C_W^2}{C^2}, \quad (3.15)$$

де C – швидкість звуку.

Для оцінки послаблення потужності, яка приймається, використовуємо емпіричні висотні залежності для структурних сталих

а) для сильної турбулентності –

$$C_T^2 = 2,9 \cdot R^{-4/3} \text{ и } C_W^2 = 0,04 + 0,33 \cdot R^{-2/3} [38]; \quad (3.16)$$

б) для слабкої (термічної) –

$$C_T^2 = 2,9 \cdot R^{-4/3} [105]. \quad (3.17)$$

У результаті розрахунків за виразами (3.13-3.17) отримуємо, що на частоті $f_n=1\text{кГц}$ і на висотах 50-500 м та для антен розмірів $2a_s = 2a_e = 1.8$ м послаблення потужності, яка приймається, складе при сильній турбулентності

$$\langle P_R \rangle / P_R \cong 0,85 \div 3 \cdot 10^{-3},$$

при слабкій

$$\langle P_R \rangle / P_R \cong 1 \div 0,77.$$

Застосовуючи методику розрахунку методичних похибок роботи [70], знайдемо, що, наприклад, в разі існування в прикордонному шарі тільки динамічної турбулентності методична похибка реєстрації температури повітря 10-см системою РАЗ з кореляційної обробкою прийнятих сигналів при частоті зондуючого звуку $f_n = 6,8$ кГц, частоті електромагнітних хвиль $f_e = 3$ ГГц на висоті 300 м складе близько 0,08 К.

Отримані результати показують, що при кореляційному обробленні радіосигналів вплив турбулентності атмосфери на методичну похибку вимірювань температури повітря менше, ніж при доплерівському обробленні.

Оцінку внеску вертикальних градієнтів температури повітря і швидкості вітру в методичну похибку реєстрації вертикального профілю температури проведемо, спираючись на результати роботи [106]. Добре відомо, що у реальній атмосфері завжди існують вертикальні градієнти усіх метеорологічних величин, як додатних так і від'ємних [107]. Зокрема, при вертикальному зондуванні атмосфери та від'ємному градієнті температури виникає звуження діаграми спрямованості акустичного випромінювача, що особливо відчутно для сантиметрових систем зондування. А у випадку зондування в умовах температурної інверсії ($\gamma_T > 0$) діаграма спрямованості випромінювача, навпаки, розширюється. Вертикальний градієнт швидкості вітру звично додатний ($\gamma_W > 0$), що призводить до того, що з'являється кут поміж нормаллю до звукової хвилі джерела звуку та нормаллю у точці відбиття $\Delta\gamma$ і, як наслідок, до порушення дзеркальності відбиття. Вплив перелічених ефектів призводить до зміни рівня потужності, що приймається, порівняно з тим, який закладений для кореляційної обробки сигнал, що призводить до появи методичної похибки реєстрації профілю температури.

Для кількісної оцінки методичних похибок цього виду використаємо експериментальні дані щодо значення вертикальних градієнтів температури повітря та швидкості вітру в нижній 300-метровій частині прикордонного шару [108]. Для 7 години ранку $\gamma_T = 1,7$ °C/100 м, для 15 годин – $\gamma_T = -0,54$

$^{\circ}\text{C}/100$ м і зміна ширини діаграми спрямованості акустичного випромінювача 10-сантиметрової системи РАЗ ($\Theta = 5^{\circ}$) [75] складе $\Delta\Theta \approx 0,5^{\circ}$. Така зміна діаграми спрямованості викличе зміну інтенсивності звуку у промені до 10%. У свою чергу, зміна інтенсивності звуку в промені призведе до зміни потужності радіосигналу і, як наслідок, до появи методичної похибки вимірювання температури повітря, приблизно рівної 0,23 К.

Дія вітру в нижній частині прикордонного шару з вертикальним градієнтом швидкості, рівним $\gamma_w = 5$ м/с⁻¹/100 м [109], вже на висоті 100 м обумовить появу кута $\Delta\gamma = 5'$, через що фокус сферичного акустичного відбивача зсунеться від центру параболічної антени на відстань $d \approx 0,5$ м. Як впливає з оптики, наприклад, [110], розподіл інтенсивності у геометричній фокальній площині плями описується формулою Ейрі

$$I(0,V) = I_0 \cdot \left[\frac{2 \cdot J_1(V)}{V} \right]^2, \quad (3.18)$$

де I_0 – інтенсивність у геометричному фокусі ($U = V = 0$); U і V – координати точок спостереження; J_1 – функція Бесселя першого роду.

Також у публікації [110] наведено графік функції $y = \left[\frac{2 \cdot J_1(V)}{V} \right]^2$, який дозволяє визначити зниження інтенсивності у геометричній фокальній площині при зміщенні фокуса акустичного відбивача відносно центра параболічної антени. Координата V розраховується у відповідності з виразом

$$V = \frac{2\pi}{\lambda_e} \left(\frac{b}{f} \right) \cdot \sqrt{x^2 + y^2}. \text{ На висоті } R = f = 100 \text{ м діаметр акустичного відбивача,}$$

який вносить основний внесок у відбиття радіохвиль, $b \approx \frac{R}{\sqrt{G_e + G_n}}$ [3], при

коефіцієнтах підсилення радіо $G_e = 40$ та акустичної $G_n = 50$ антен складає 9,5 м, ($y = 0$ для геометричного фокуса); тоді $V \approx 0,3$. Тому послаблення

інтенсивності у геометричному фокусі буде дорівнювати $I(0;0,5)/I_0 = 0,98$. Використовуючи вище наведену методику розрахунку, отримаємо, що значення методичної похибки вимірювання температури повітря, що виникає за рахунок вітрової рефракції, для 10-сантиметрової системи РАЗ складе приблизно 0,11К.

Слід відзначити, що розворот фронту акустичної хвилі веде також до зміни форми плями розсіяних сигналів на підстилаючій поверхні (від кругової до еліптичної), що викликає збільшення її площі. Подібні зміни геометричних параметрів плями додатково знижують рівень потужності радіосигналів, що приймаються. Однак горизонтальний перенос акустичного пакету середнім вітром та його розворот внаслідок існування вертикального градієнту швидкості вітру призводять до протилежних переміщень фокуса сферичного акустичного відбивача, які у деяких метеорологічних умовах можуть бути взаємно скомпенсовані.

3.3 Вимірювання профілів вологості атмосфери

У даному підрозділі розглянуті питання оцінки методичних похибок вимірювання вологості повітря, що виникають за рахунок апіорної невизначеності висотного розподілу інших метеорологічних величин, аналізу їх впливу при реєстрації вертикальних профілів вимірюваної метеорологічної величини з використанням кореляційної обробки прийнятих сигналів систем радіоакустичного зондування.

3.3.1 Аналіз розрахункової формули

Раніше відома формула для визначення вологості повітря методом двохчастотного РАЗ з кореляційною обробкою даних зондування має вигляд [101]

$$e = P \cdot \exp \left\{ 0,385 \cdot \ln \left[\frac{(C_{\infty}^2 - C_0^2)(f_2^2 - f_1^2)}{2C \cdot \Delta C} \right] - 7,947 \right\}, \quad (3.19)$$

де e – парціальний тиск водяної пари, ГПа; P – повний тиск повітря, ГПа; C_0 – швидкість звуку при дуже малих частотах, м/с; C_{∞} – швидкість звуку при дуже великих частотах, м/с; f_1 та f_2 – частоти зонduючого звуку, с^{-1} ; ΔC – різниця швидкостей звуку цих частот C_1 та C_2 відповідно, м/с; а $C = \frac{C_1 + C_2}{2}$, оскільки $C_1 \approx C_2$ [90].

Внаслідок відсутності експериментальних даних з вимірювання швидкостей C_1 і C_2 для визначення вологості повітря двохчастотним РАЗ з використанням кореляційної обробки даних зондування перевірки репрезентативності формули (3.19) ще не проводилось. Для оцінки практичного застосування вказаної формули виконано числовий експеримент, заснований на використанні табличних даних для коефіцієнта молекулярного поглинання звуку у вологому повітрі, наведених у роботі [3].

Авторами роботи [70] запропоновано вираз, що дозволяє розрахувати швидкість звуку C за відомими параметрами системи РАЗ, яка використовується для зондування, та знайденому в експерименті значенню параметра Брегга, у вигляді

$$C = \frac{2\pi f_n}{\frac{4\pi f_e}{c} - q}, \quad (3.20)$$

де f_n – частота синусоїдального заповнення акустичного пакета; f_e – робоча частота радіолокатора; c – швидкість поширення радіохвиль.

Для числових розрахунків були використані значення частот звуку 80 Гц і 7150 Гц, які близькі до значень частот, що використовуються у відомих

системах РАЗ: низькочастотній (19 Гц) [111] і високочастотній (6800 Гц) [75]. Для обраних частот відомі табличні значення коефіцієнтів молекулярного поглинання звуку у вологому атмосферному повітрі [3]. В обчислювальному експерименті передбачалась рівність енергетичних потенціалів кожного з радіоканалів. Для заданих метеорологічних умов розраховувалось послаблення потужності, що приймалась у кожному каналі за рахунок молекулярного послаблення [3,6], надалі визначались q_1 і q_2 , після чого – значення C_1 та C_2 .

Найбільш невизначеним у рівнянні (3.19) є теоретичний множник $(C_\infty^2 - C_0^2)$, який описує ефекти дисперсії швидкості звуку у вологому повітрі. Для визначення числового значення цього множника використаємо деякі приблизні формули, наведені у ряді робіт. Зокрема, з роботи [112] виходить, що

$$C_\infty^2 / C_0^2 \approx 1 + \varepsilon \text{ при } \varepsilon = 0,2 \cdot 0,0032, \quad (3.21)$$

де ε – релаксаційна сила.

Це означає, що зміна швидкості звуку у вологому повітрі внаслідок коливальної релаксації не може бути вище ніж 0,032 %. У той же час у роботі [103] вказано, що при температурі 20 °С різниця швидкостей у повітрі дорівнює

$$C_\infty - C_0 = 0,12 \text{ м/с}. \quad (3.22)$$

Для кількісної оцінки множника $(C_\infty^2 - C_0^2)$ було вирішено систему двох рівнянь (3.21) та (3.22) з двома невідомими – C_∞ та C_0 . У результаті виявилось, що $C_0 = 375 \text{ м/с}$, а $C_\infty = 375,12 \text{ м/с}$ [97]. При таких значеннях цих швидкостей множник $(C_\infty^2 - C_0^2) = 90,0144 \text{ (м/с)}^2$.

Для метеоумов з атмосферним тиском, рівним 1013,25 гПа, температурою в 20 °С та відносною вологістю $H=40\%$ з використанням формули (3.19) був розрахований парціальний тиск водяної пари, який дорівнює 24.9 гПа. Однак це значення не відповідає табличним даним метеорологічних величин. Для узгодження даних розрахунку і табличних даних у формулу (3.19) необхідно ввести коректуючий коефіцієнт $k = 0,375$, який враховує наближення, що введені у роботах [103,112]. Тоді для заданих вище метеорологічних умов парціальний тиск водяної пари дорівнює $e=9,35$ гПа, який достатньо точно відповідає даним метеорологічних таблиць.

Тому робоча формула, придатна для розрахунків вологості по даним двохчастотного радіоакустичного зондування з кореляційним обробленням даних амплітудних вимірювань, має наступний вигляд

$$e = P \cdot \left\{ k \exp \left[0,385 \cdot \ln \frac{(C_{\infty}^2 - C_0^2)(f_2^2 - f_1^2)}{2C \cdot \Delta C} - 7,947 \right] \right\}, \quad (3.23)$$

де $k = 0,375$ – коефіцієнт для коригування.

Протягом аналізу отриманих результатів числового експерименту, беручи до уваги наближений та нелінійний характер залежностей, що описують молекулярне поглинання звуку в повітрі, що наведені у роботах [3,103,112] і використаних при виводі формули (3.19), можна прийняти, що доопрацьована формула (3.23) репрезентативна.

3.3.2 Вплив атмосферної турбулентності

Оцінюючи можливості метода РАЗ по вимірюванню вологості атмосферного повітря, різні дослідники у питанні про вплив турбулентності на похибку таких вимірювань дотримувались різних концепцій. Зокрема, автори роботи [75] припускали, що одночасне вимірювання (або через періодне з наступним поєднанням) амплітуди прийнятих сигналів при двохчастотному

РАЗ атмосфери, загалом, виключає вплив турбулентності на похибку вимірювання вологості, зокрема, на близьких частотах звуку 3400 Гц та 6800 Гц [75]. Результати експериментальних досліджень показали, що в умовах нерухомої атмосфери дві послідовно зареєстровані, а саме тому поєднані в часі, обвідні амплітуд дійсно були подібними по формі, але з різними показниками експоненти. Однак при виникненні та розвитку турбулентності ступінь кореляції поміж обвідними помітно знижувалась, а результати розрахунку вологості ставали некоректними. Теоретичними дослідженнями було встановлено, що невраховані частотна залежність коефіцієнта турбулентного розсіювання звуку та поперекового масштабу когерентності фазового фронту звукової хвилі у доплерівському двохчастотному способу амплітудних вимірювань вологості цим методом могли призводити до значення методичної похибки вимірювань у 20-40% відносної вологості [113,114].

Оцінку впливу дрібномасштабної турбулентності на методичну похибку вимірювання вологості повітря системою РАЗ з використанням кореляційної обробки проведемо за методикою робіт [6,8] з урахуванням особливості способу: для отримання інформації про кількість водяної пари у повітрі необхідно застосовувати пару звукових частот. Зробимо це для двохчастотної системи РАЗ [75], за допомогою якої були отримані експериментальні результати вимірювання вологості амплітудним (доплерівським) способом. Такий підхід дозволить порівняти значення методичних похибок вимірювання вологості при доплерівському і кореляційному обробленні прийнятих радіосигналів.

Добре відомо, що головними факторами, які впливають на середню потужність, що приймається радіоприймачем системи РАЗ у дециметровому діапазоні довжин хвиль, є частотний характер залежності коефіцієнта турбулентного розсіювання звуку і порушення поперекової когерентності фазового фронту акустичної хвилі [3,113,114]. Однак переважним фактором з двох вказаних є деформація фазового фронту акустичної хвилі [115]. Тому

проведемо оцінку впливу тільки ефекту порушення поперекової когерентності фазового фронту акустичної хвилі.

З цією метою використаємо вирази 3.12-3.17, для двох робочих частот звукового випромінювача вказаної вище системи РАЗ (3400 Гц та 6800 Гц) для наступних метеорологічних умов: повний атмосферний тиск складає 1022,25 гПа, температура повітря дорівнює 293.15 К, відносна вологість повітря 40%. З результатів розрахунків виявилось, що при проведенні вимірювань вологості повітря на висотах 50 м і 100 м за допомогою відомої двохчастотної системи РАЗ [75] та застосуванні кореляційної обробки амплітуди прийнятих радіосигналів методична похибка вимірювань може досягати 100% відносно вологості навіть при термічній турбулентності. Такий результат може видатися природним для використаних у розрахунках значень технічних параметрів цієї двохчастотної системи РАЗ з довільно вибраними робочими частотами і конструкцією антенних пристроїв радіо- і звукового каналів.

Насамперед, це малий рознос зондувальних частот (ефекти дисперсії швидкості у вологому повітрі при невеликому розносі звукових частот виявляються слабо, а атмосферна турбулентність маскує ці ефекти). В роботі [90] наочно показано, що в залежності від кількості водяної пари в атмосфері положення релаксаційної частоти, а з нею і дисперсійного виступу, змінюється на частотній осі. Тому для мінімізації методичної похибки вимірювань вологості у заданих метеорологічних умовах необхідно так вибирати звукові частоти для зондування, щоб вони розташовувались на верхній та нижній межах дисперсійного виступу.

Окрім того, конструкція антенних пристроїв даної системи не відповідає вимогам формування необхідної області взаємодії радіо- та звукового пучків [3]. Тому при розробці двохчастотних систем РАЗ для експериментальних досліджень з дистанційної реєстрації вертикальних профілів характеристик вологості з наперед заданою методичною похибкою і з використанням кореляційного оброблення прийнятих радіосигналі необхідно враховувати ці особливості способу, який розглядається. Пошук пари оптимальних частот для

зондування з метою мінімізації методичної похибки вимірювання вологості в умовах турбулентної атмосфери є предметом подальших досліджень

3.3.3 Вплив горизонтального вітру на похибку вимірювань

Одним з метеорологічних факторів, які впливають на похибку вимірювання вологості повітря, є горизонтальний вітер. Внаслідок впливу цього фактора відбувається винос акустичних пакетів двох частот з діаграм спрямованості антен радіоканалів і спостерігається "зісковзування" обох плям розсіяних сигналів з апертури приймальних радіоантен.

При вимірюванні вологості повітря на заданій висоті і відсутності апріорної інформації про вертикальний розподіл горизонтального вітру до значення різниці швидкостей поширення звукових частот C_1 і C_2 , яка визначається кількістю водяної пари у атмосфері, додається значення різниці швидкостей ΔC_q , яке викликане зміною параметра Брегга за рахунок невизначеності впливу швидкості вітру на висоті реєстрації на кожному з двох зондуючих пакетів. Це явище може стати причиною виникнення методичної похибки вимірювання вологості при довільному виборі технічних параметрів (зокрема, параметрів антенних пристроїв) двохчастотної зондуючої системи і використанні кореляційної обробки даних зондування. Умови, при яких вплив даного чинника при вимірюванні вологості повітря двохчастотних РАЗ і використанні в якості інформаційного параметра прийнятих радіосигналів їх амплітуди виключається, а методична похибка мінімізується, детально розглянуті в роботі [75]. Найважливішим з них є насувна умова

$$\frac{\Theta_1}{\Theta_2} = \frac{\lambda_{e_1}}{\lambda_{e_2}}, \quad (3.24)$$

де Θ_1, Θ_2 – ширина діаграм спрямованості антен обох радіоканалів, $\lambda_{e_1}, \lambda_{e_2}$ – робочі довжини хвиль цих каналів.

Іншою необхідною умовою вибору оптимального режиму роботи двохчастотної системи РАЗ є використання однакової кількості довжин хвиль у акустичних пакетах обох каналів

$$N_1 = N_2 \quad (3.25).$$

При виконанні цієї умови забезпечується рівність ширин головних пелюстків залежності потужності розсіювання Брегга на обох частотах

$$p_1^2 = f_1 \left(\frac{\lambda_{e1}}{\lambda_{n1}} \right) \quad \text{та} \quad p_2^2 = f_2 \left(\frac{\lambda_{e2}}{\lambda_{n2}} \right). \quad (3.26)$$

3.3.4 Вплив вертикальних градієнтів температури повітря і швидкості вітру

Проведемо оцінку можливого внеску вертикальних градієнтів температури повітря і швидкості вітру в методичну похибку реєстрації вертикального профілю вологості повітря. Як показав аналіз, існування вертикальних градієнтів температури повітря і швидкості вітру призводить до зміни рівня потужності радіосигналу, порівняно з тим, який закладено для кореляційної обробки сигналу, що і призводить до появи методичної похибки [7]. Однак, якщо при створенні двохчастотної системи РАЗ для дистанційної реєстрації вертикальних профілів вологості повітря з використанням кореляційної обробки прийнятих радіосигналів виконані умови (3.24) і (3.26) та кількість хвиль у звукових посилках обох частот однакова (умова 3.25), то звуження (або розширення) діаграм спрямованості обох акустичних випромінювачів під дією вертикального градієнту температури повітря відбувається синхронно і однаково, а розворот їх фазових фронтів під дією вертикального градієнта швидкості вітру виявиться рівним. У такому випадку додаткової різниці втрат потужності прийнятих радіосигналів в обох каналах

не спостерігається, і поява методичної похибки вимірювання вологості повітря за рахунок існування вертикальних градієнтів метеорологічних величин не відбувається.

3.4 Висновки до третього розділу

1. Застосування комбінованої обробки сигналів систем РАЗ: доплерівської і кореляційної, забезпечує реальну можливість дистанційної реєстрації висотних профілів вертикальної складової швидкості вітру.

Достатню для практики метеоспостережень похибку вимірювання вертикальної складової швидкості вітру радіоакустичним зондуванням можна забезпечити, використовуючи в системі РАЗ розподілений акустичний випромінювач.

2. Отримані знання про значення вертикальної складової швидкості вітру по трасі зондування дозволяють синхронно отримувати інформацію про вертикальний профіль температури повітря з потенційною для методу РАЗ точністю.

Введення в антенний пристрій системи РАЗ розподіленого акустичного випромінювача розширює можливості даного методу, а саме, дозволяє одночасно вимірювати і горизонтальну складову швидкості вітру.

3. Проведено оцінку методичних похибок, що виникають за рахунок апріорної невизначеності висотного розподілу метеорологічних величин, при реєстрації вертикальних профілів температури і вологості повітря з використанням кореляційної обробки прийнятих сигналів систем радіоакустичного зондування.

Отримані результати показують, що вплив турбулентності атмосфери на похибку вимірювань температури і вологості менше, ніж при доплерівській обробці.

При зондуванні прикордонного шару атмосфери рефракційні ефекти викликають додаткове зростання похибки вимірювань температури і вологості повітря.

4. У двохчастотних системах РАЗ, призначених для вимірювання вологості повітря, необхідно забезпечувати різницю частот зондувальних звукових коливань (необхідно так вибирати звукові частоти для зондування, щоб вони розташовувались на верхній та нижній межах дисперсійного виступу).

Для зниження значень похибок вимірювань, що виникають за рахунок горизонтального вітру і рефракції звукових хвиль в реальній атмосфері, необхідно застосовувати коректні конструктивні рішення при розробці антенних пристроїв і вибір між режимами роботи систем зондування, близькі до оптимальних.

РОЗДІЛ 4

МЕТОД ПРИЙОМУ РОЗСІЯНИХ СИГНАЛІВ

Класична схема антенного пристрою системи радіоакустичного зондування атмосфери містить передавальну і приймальну антени радіолокатора і акустичний випромінювач будь-якого типу, розміщений між антенами радіоканалу. Теоретично та експериментально встановлено, що основний вплив на зниження ефективності роботи систем РАЗ з такою схемою антенного пристрою (висота зондування, точність вимірювання метеорологічних величин та ін.) надає горизонтальний вітер і його поворот з висотою, виносячи пакет акустичних хвиль з діаграм спрямованості антен радіоканалу. При РАЗ звичайні для радіолокації методи автосупроводу практично непридатні через специфіку радіолокаційного супроводу такого пакета в реальній атмосфері – дзеркальності розсіювання електромагнітних хвиль.

Для компенсації виносу пакета запропоновано ряд технічних рішень, які в тій чи іншій мірі послаблюють вплив вітру [116]. Ці способи засновані або на спостереженні за плямою розсіяних радіосигналів шляхом переміщення приймальної антени, або акустичного випромінювача, або на побудові матриці приймальних антен і випромінюванні радіо- і звукових хвиль з навітряного боку. Основними недоліками відомих способів є низька оперативність отримання метеорологічної інформації при вертикальному температурному зондуванні, неможливість реалізації при багаторазовому похилому температурно-вітровому зондуванні, висока вартість інформації при використанні матриці приймальних антен.

В даному розділі розглянуто метод прийому розсіяних сигналів в системах РАЗ, що заснований на пасивній локації плями розсіяних коливань.

Матеріали розділу опубліковані в роботах [9,15,18,20,22].

4.1 Фізичні передумови методу прийому розсіяних сигналів в системах РАЗ. Локація плями розсіяних коливань

Одним із способів побудови антенних пристроїв систем РАЗ, що дозволяє усунути більшість перерахованих недоліків, може стати спосіб, заснований на пасивній радіолокації плями розсіяних електромагнітних сигналів [117]. Дослідження, які присвячено методу РАЗ, показали [3], що (на відміну від радіолокації точкових цілей, при якій в просторі створюється поле розсіяних сигналів) при радіоакустичному зондуванні атмосфери сферичні хвильові фронти акустичного пакета фокусують електромагнітні хвилі в об'єм деяких розмірів, який визначається характеристиками антен і турбулентністю атмосфери. Якщо такий "згусток" електромагнітної енергії падає на плоску межу, що розділяє два середовища з різною діелектричною проникністю, то така межа стає джерелом електромагнітного випромінювання. У разі, коли межа двох середовищ нерухома, розсіяне нею електромагнітне випромінювання зберігає доплерівський зсув частоти, обумовлений рухом акустичного пакету, хвильові фронти якого сформували цей "згусток" в своєму фокусі. Беручи електромагнітні хвилі, відбиті від межі розділу двох середовищ, наприклад, повітря – підстилаюча поверхня, можна використовувати характеристики прийнятих радіосигналів для отримання метеорологічної інформації за методиками робіт [75,117,118].

Проведемо приблизну оцінку енергетичного потенціалу апаратури РАЗ, необхідного для реалізації пасивної радіолокації плями сфокусованих радіосигналів. При розробці та випробуванні ряду експериментальних систем РАЗ було встановлено [75], що необхідне значення енергетичного потенціалу системи, що дозволяє надійно приймати розсіяні радіосигнали, лежить у межах 120-140 дБ. Енергетичний потенціал доплерівських вимірювачів швидкості та кута зносу літаків типу ДИСС-3П, радіоприймачі яких приймають розсіяне поверхнею, яка підстеляє, електромагнітне випромінювання, складає 90 – 110дБ [119]. Виходячи з цього, можна вважати,

що необхідний для реалізації пропонованого способу РАЗ енергетичний потенціал апаратури має забезпечити реєстрацію електромагнітного випромінювання, яке пройшло дворазове розсіювання: від акустичного пакету хвиль, який фокусує розсіяні ним електромагнітні хвилі у пляму деяких розмірів, та від підстилаючої поверхні, на яку вони фокусуються. Це означає, що енергетичний потенціал системи РАЗ, яка використовує пасивну радіолокацію плями розсіяних радіосигналів, має складати 210-250 дБ, що знаходиться на рівні можливостей радіолокаторів, які широко застосовуються у практиці спостережень різного призначення [120].

4.2 Конфігурація антенного пристрою

Можлива схема реалізації антенного пристрою системи РАЗ з пасивною радіолокацією плями розсіяних сигналів наведена на рис.4.1 [22,120] (де Π – передавальна антена, A – акустичний випромінювач, Φ – фазовий хвильовий фронт, A^1O^1 – головна оптична вісь віртуального акустичного випромінювача A^1 , Pr – приймальна радіоантена, M – віртуальна лінія, яка вказує на зону дії антени радіопередавача).

Ця схема реалізує не попадання фокальної плями на апертуру приймальної антени, а навпаки – пошук положення цієї плями на поверхні за допомогою приймальної антени шляхом суміщення максимуму її діаграми спрямованості з положенням центру фокальної плями (або з центром ваги фігури проекції плями) f_l на підстилаючій поверхні P . Таке суміщення забезпечить максимальну амплітуду вихідних сигналів радіоприймача при застосуванні гостроспрямованої радіоантени.

Під впливом горизонтальної швидкості вітру акустичний хвильовий пакет переноситься вітром по горизонталі над земною поверхнею, внаслідок чого проекція фокальної плями на поверхню мігрує по ній від вихідного положення у залежності від швидкості і напрямку вітру. Ця схема може бути основою для розроблення нових способів вимірювання основних

даного пристрою дозволить значно знизити вартість отримання метеорологічної інформації при зондуванні у всьому шарі тропосфери.

4.3 Вимірювання горизонтальної швидкості вітру

Тривала експлуатація цілого ряду експериментальних систем РАЗ у різних погодних умовах та географічних районах, а також відомі дані про поширення акустичних хвиль в реальній атмосфері дозволили вказати на основні метеорологічні фактори, що впливають на ефективність застосування таких систем для організації метеоспостережень [121]. Зокрема, це існування горизонтальної та вертикальної швидкостей вітру, його поворот з висотою, наявність вертикальних градієнтів температури і швидкості вітру, мінливість водяної пари, турбулентність та ін.

Ранні роботи з дослідження можливостей методу РАЗ показали, що і висота зондування, і точність вимірювання метеорологічних величин залежать істотно від горизонтальної швидкості вітру в зондуєчому шарі атмосфери [121].

Розглянемо можливу схему реалізації системи радіоакустичного зондування, представлену на рис. 4.2, з антенним пристроєм, який передбачає розбіжність фокальної плями розсіяних сигналів з апертурою приймальної радіоантени, а пошук місця розташування цієї плями за допомогою приймальної радіоантени шляхом поєднання максимуму її діаграми спрямованості з центром фокальної плями (точніше, з центром тяжіння фігури проекції плями на підстилаючу поверхню) [9,18]. Таке поєднання забезпечить максимальну амплітуду вихідних сигналів приймача при застосуванні гостроспрямованої радіоантени. А далі на рис. 4.3 представлені геометричні співвідношення, що пояснюють методику вимірювання параметрів вітру системою РАЗ при пасивній радіолокації фокальної плями.

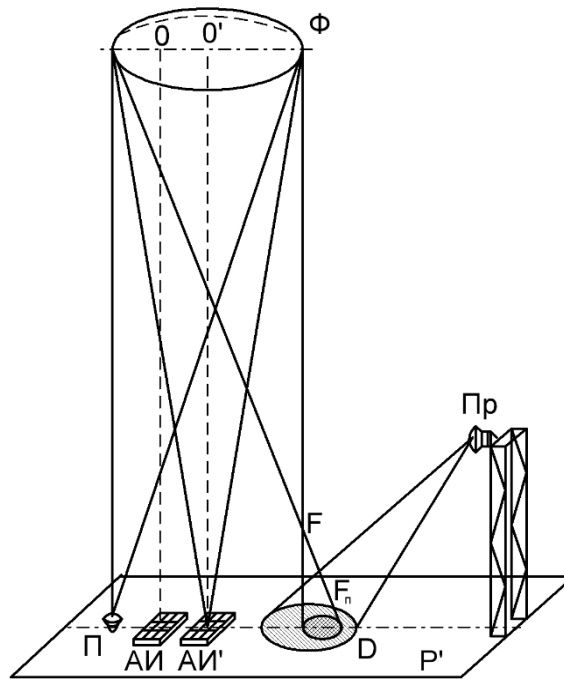


Рисунок 4.2 – Схема реалізації антенного пристрою системи радіоакустичного зондування

Під впливом горизонтальної швидкості вітру акустичний хвильовий пакет переноситься вітром по горизонталі над підстилаючою поверхнею, внаслідок чого проекція фокальної плями F на площину P' мігрує по цій площині від початкового положення в залежності від швидкості і напрямку вітру. Така схема може служити основою для розробки нових способів вимірювання основних метеорологічних величин: швидкості і напрямку вітру, температури і вологості повітря. Для вирішення задачі вимірювання параметрів вітру, наприклад, досить відслідковувати стан плями на підстилаючій поверхні (площині P) за допомогою гостроспрямованої антени, реєструючи таким чином годограф вітру; для визначення температури та вологості повітря, як і зазвичай, необхідно виміряти параметри прийнятих радіосигналів: доплерівський зсув частоти, амплітуду або фазу [75,118].

сторони квадрату в точках 1,2,3 і 4 так, щоб при відсутності вітру фокальна пляма знаходилася в точці F_0 (при знаходженні зондуючого акустичного пакета на висоті найнижчої точки вимірювання параметрів вітру). Центр підстилаючої поверхні, який використовується для перевідзеркалення, розташовується в точці O_1 з координатами $(X_0/2; Y_0/2)$. Припустимо, що напрямок вітру такий, як позначено на рис. 4.3 стрілкою \vec{W} . В цьому випадку зміщення плями F_1 по осі X складе $d_x = X_0 - X_1$, а по осі Y – $d_y = Y_0/2 - Y_1$. Представимо координати точок F_0 і F_1 через азимути цих точок φ_0 і φ_1 та через кути візування β_0 і β_1 . Тоді матимемо

$$X_0 = Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta_0 \cdot \cos \varphi_0;$$

$$X_1 = Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta_1 \cdot \cos \varphi_1; \quad (4.1)$$

$$Y_0/2 = Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta_0 \cdot \sin \varphi_0;$$

$$Y_1 = Z_0 \cdot \operatorname{tg} \beta_1 \cdot \sin \varphi_1.$$

Підставивши (4.1) до виразу для зміщення по осях X і Y , отримаємо вирази для d_x і для d_y

$$d_x = Z_0 (\operatorname{tg} \beta_0 \cdot \cos \varphi_0 - \operatorname{tg} \beta_1 \cdot \cos \varphi_1)$$

$$d_y = Z_0 (\operatorname{tg} \beta_0 \cdot \sin \varphi_0 - \operatorname{tg} \beta_1 \cdot \sin \varphi_1).$$

При вертикальному поширенні зондуючого акустичного пакета швидкість звуку значно більше швидкості вітру. Тому зміщення фокальної плями по поверхні можна наближено записати у вигляді

$$d \cong \vec{W} \cdot \Delta t,$$

де Δt – час проходження центру фокальної плями з точки F_0 в точку F_1 .

У цьому разі вирази для складових вітру запишуться у вигляді

$$W_x = \frac{Z_0}{\Delta t} (tg\beta_0 \cdot \cos \varphi_0 - tg\beta_1 \cdot \cos \varphi_1), \quad (4.2)$$

$$W_y = \frac{Z_0}{\Delta t} (tg\beta_0 \cdot \sin \varphi_0 - tg\beta_1 \cdot \sin \varphi_1).$$

Вирази (4.2) дозволяють визначити модуль горизонтальної швидкості вітру і його напрямок, а саме

$$W = \frac{Z_0}{\Delta t} \sqrt{(tg\beta_0 \cos \varphi_0 - tg\beta_1 \cos \varphi_1)^2 + (tg\beta_0 \sin \varphi_0 - tg\beta_1 \sin \varphi_1)^2}; \quad (4.3)$$

$$\varphi_w = \arctg \frac{tg\beta_0 \sin \varphi_0 - tg\beta_1 \sin \varphi_1}{tg\beta_0 \cos \varphi_0 - tg\beta_1 \cos \varphi_1}. \quad (4.4)$$

При апаратурній реалізації такого способу реєстрації вертикальних профілів швидкості та напрямку вітру можуть бути запропоновані й інші варіанти взаємного розміщення щогли, антенних пристроїв та підстилаючої поверхні. Наприклад, можлива побудова системи РАЗ з вихідним положенням фокальної плями в центрі координатної сітки робочого поля підстилаючої поверхні. Тоді розрахункові вирази (4.3,4.4) матимуть інший вигляд.

Відзначимо, що роздільна здатність вимірювання параметрів вітру по шарам у даному способі, як і в класичній радіолокації, визначається роздільною здатністю по азимуту і куту візування. На відміну від технології 3-х вимірів амплітуди відбитих сигналів [123], де роздільна здатність залежить

від швидкості вітру, що вимірюється, оскільки форма обвідної амплітуд відбитих сигналів залежить від часу проходження плями по апертурі приймальної антени, роздільна здатність вимірювань даним способом залишається постійною.

4.4 Похибка вимірювання швидкості вітру

Відносна середньоквадратична похибка обчислення модуля горизонтальної швидкості вітру за виразом (4.3) може бути записана у вигляді рівняння повної похибки (за умови некореляційності джерел похибки) аналогічно з [98]

$$\frac{\sigma W}{W} = \sqrt{\left(\frac{\partial W}{\partial Z_0} \frac{\sigma Z_0}{Z_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta t} \frac{\sigma \Delta t}{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \beta_0} \frac{\sigma \beta_0}{\beta_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \varphi_0} \frac{\sigma \varphi_0}{\varphi_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \beta_1} \frac{\sigma \beta_1}{\beta_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \varphi_1} \frac{\sigma \varphi_1}{\varphi_1}\right)^2} \quad (4.5)$$

Для оцінки значення відносної середньоквадратичної похибки вимірювання горизонтальної швидкості вітру необхідно задатися значеннями параметрів, що входять в розрахунковий вираз (4.3). Наприклад, якщо технічні параметри антенного пристрою системи РАЗ з пасивної радіолокації мають такі значення: $Z_0 = 100\text{м}$ і $\Delta t = 1\text{с}$, $\beta_0 = 48^\circ$ $\varphi_0 = 26^\circ$, то значення коефіцієнтів впливу в (4.5) в цьому випадку такі:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial Z_0} &= 0,41; \quad \frac{\partial W}{\partial \Delta t} = -41,47; \\ \frac{\partial W}{\partial \beta_0} &= 415,85; \quad \frac{\partial W}{\partial \varphi_0} = 70,28; \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \beta_1} = -268,4; \frac{\partial W}{\partial \varphi_1} = -68,88$$

Аналізуючи результати (4.6), слід зазначити, що найбільший вплив на відносну середньоквадратичну похибку вимірювання горизонтальної швидкості вітру в (4.5) здійснюють невизначеності по вихідному куту установки приймальної антени в кутовій площині і по куту відхилення в цій же площині. Вихідний кут установки β_0 не залежить від параметрів вимірюваного вітру, кут же β_1 є шуканим, а тому похибки його визначення слід приділити особливу увагу.

Значення більшості відносних середньоквадратичних похибок вимірювання параметрів, що входять у вираз (4.5), можуть бути оцінені за відомими методиками. Якщо при вимірюванні параметрів вітру отримані значення кутів $\beta_1 = 16^\circ$ та $\varphi_1 = 36^\circ$ [9], то при

$$\sigma Z_0 = 10^{-4} \text{ м та } \sigma \varphi_0 = \sigma \beta_0 = 5 \cdot 10^{-4}^\circ \text{ [124],}$$

$$\sigma \Delta t = 10^{-5} \text{ с [125],}$$

$$\sigma \varphi_1 = \sigma \beta_1 = 0,015^\circ \text{ [120,126],}$$

відносні середньоквадратичні похибки вимірювання відповідних параметрів дорівнюватимуть

$$\frac{\sigma Z_0}{Z_0} = 10^{-6}, \frac{\sigma \Delta t}{\Delta t} = 10^{-5};$$

$$\frac{\sigma \beta_0}{\beta_0} = 1,04 \cdot 10^{-5}; \frac{\sigma \varphi_0}{\varphi_0} = 1,9 \cdot 10^{-5}; \quad (4.7)$$

$$\frac{\sigma \beta_1}{\beta_1} = 0,42 \cdot 10^{-4}; \frac{\sigma \varphi_1}{\varphi_1} = 0,92 \cdot 10^{-4}.$$

З урахуванням (4.6) і (4.7) відносна середньоквадратична похибка вимірювання горизонтальної швидкості вітру (4.5) за допомогою антенного пристрою системи РАЗ, що дозволяє реалізувати пасивну радіолокацію плями розсіяних сигналів, складе

$$\frac{\sigma W}{W} \approx 0,06,$$

а середньоквадратична похибка вимірювання горизонтальної швидкості вітру в реальній атмосфері при середній швидкості вітру 10 м/с – $\sigma W \approx 0,6\text{ м/с}$.

Розраховане значення середньоквадратичної похибки вимірювання горизонтальної швидкості вітру системою РАЗ з пасивної радіолокації плями розсіяних сигналів (в поєднанні з уже відомою похибкою вимірювання температури повітря методом РАЗ [75,118]) показує, що такі системи перспективні при організації та проведенні екологічного моніторингу всього прикордонного шару атмосфери. Застосування подібних систем на практиці метеоспостережень обумовлюється їх можливістю отримання вхідних параметрів – вертикальних градієнтів температури і швидкості вітру – для моделей турбулентної дифузії забруднюючих атмосферу викидів природного та антропогенного характеру, а також і далекого їх перенесення [127,128].

Слід зазначити, що температурно-вітрова рефракція звукових хвиль, викликана наявністю вертикальних градієнтів температури повітря і швидкості вітру і неврахована при викладеному вище розгляді, може викликати збільшення похибки вимірювання параметрів вітру запропонованим способом. Обумовлено це тим, що температурно-вітрова рефракція акустичних хвиль викличе додаткове зміщення плями розсіяних радіосигналів, а також зміну форми і площі проекції плями на підстилаючу поверхню. Однак дослідження впливу даного метеорологічного фактору на ефективність систем РАЗ є предметом подальших досліджень.

4.5 Висновки до четвертого розділу

1. Запропоновано новий метод прийому і обробки сигналів у системах радіоакустичного зондування атмосфери, заснований на пасивній радіолокації плями розсіяних електромагнітних коливань, сфокусованих сферичними хвильовими фронтами акустичного пакета. На основі запропонованого методу прийому сигналів розроблений метод вимірювання швидкості горизонтального вітру і його напрямку.

2. Теоретично оцінена відносна середньоквадратична похибка вимірювання модуля горизонтальної швидкості вітру з використанням запропонованого методу, яке при середній швидкості вітру 10 м/с становить. $\sigma W \approx 0,6 \text{ м/с}$.

3. Вартість створення апаратури РАЗ з потенціалом 210-240 дБ для реалізації пасивної радіолокації плями розсіяних сигналів з однієї приймальної антени значно нижче вартості побудови цілого антенного поля приймальних антен для традиційного радіоакустичного зондування.

4 Метод вимірювання горизонтальної швидкості вітру системою РАЗ з пасивною радіолокацією плями розсіяних сигналів перспективний при організації та проведенні екологічного моніторингу прикордонного шару атмосфери. Застосування подібних систем в практиці метеоспостережень забезпечує отримання вхідних даних – вертикальних градієнтів температури і швидкості вітру – для моделей турбулентної дифузії викидів природного та антропогенного характеру, що забруднюють атмосферу, а також прогнозування дальності їх перенесення

Найбільш доцільним є використання таких систем РАЗ для – метеорологічного забезпечення екологічного моніторингу атмосфери в районах розміщення ТЕЦ, АЕС, великих майданчиків сховищ енергоносіїв (нафти, газу та ін.), над якими заборонені будь-які польоти.

РОЗДІЛ 5

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОЦІНЮВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ ПРОФІЛІВ МЕТЕОПАРАМЕТРІВ

У розділу виконано аналіз потенційної точності оцінки параметрів атмосфери при використанні кореляційного методу в системах РАЗ. Розглянуто вплив видів зондуючих акустичних і електромагнітних сигналів на потенційну точність оцінки параметрів атмосфери. Розглядається можливість застосування методів оптимальної лінійної фільтрації в системах РАЗ для згладжування «миттєвих» температурних профілів з урахуванням особливостей оцінюваного процесу. Застосування фільтрації дозволяє згладжувати миттєві значення температури і отримувати оцінки вертикального профілю температури при меншій кількості вертикальних зондувань.

Матеріали розділу опубліковані в роботах [10,11,12,16,19,21,24]

5.1 Аналіз точності оцінки інформаційного енергетичного параметра сигналу

5.1.1 Співвідношення для розрахунку потенційної точності вимірювання параметрів сигналу

У системах РАЗ потенційна точність вимірювання параметрів атмосфери кореляційним способом визначається значенням дисперсії D_E оцінки значень параметра розстроювання умови Брегга q_0 , при якому формується відбитий радіосигнал. Для визначення дисперсії оцінки величини q в системах РАЗ можна скористатись формулою для знаходження дисперсії оцінки енергетичного параметра сигналу [129]

$$D(q_m|q_0) = D_E(q_0) = \left[\frac{\partial^2 \hat{S}(q_1, q_2)}{\partial q_1 \partial q_2} \right]_{q_0}^{-1}, \quad (5.1)$$

де q – параметр розстроювання умови Брегга, який є енергетичним параметром, оскільки його значення впливає на енергію сигналу і визначає енергію опорних сигналів $F(t, q)$ в системі кореляційного оцінювання [130-132]; $\hat{S}(q_1, q_2)$ – радіоакустична ненормована сигнальна функція. $\hat{S}(q_1, q_2)$ – функція взаємної кореляції вхідного корисного сигналу $F(t, q_1)$ і опорного сигналу $F(t, q_2)$ систем кореляційної обробки систем РАЗ. Зазначені сигнали мають різні значення параметрів q_1 і q_2 .

Запишемо вираз для радіоакустичної ненормованої сигнальної функції. Оскільки при радіоакустичному зондуванні вхідний корисний сигнал являє собою відбитий від акустичної посилки радіосигнал, то опорний сигнал зручно описувати функцією розсіювання [72]. Тоді сигнальна функція матиме наступний вигляд

$$\hat{S}(q_1, q_2) = \int_0^T F(t, q_1) F(t, q_2) dt, \quad (5.2)$$

де $F(t, q_1)$ – відбитий радіосигнал з деяким значенням інформаційного параметра q_1 , $F(t, q_2)$ – опорний сигнал з деяким значенням інформаційного параметра q_2 .

5.1.2 Залежність потенційної точності вимірювання параметрів сигналу від виду зондуючих сигналів

Одержимо криву залежності $D_E(q_0)$ дисперсії оцінки інформаційного параметра від значення самого параметра за умови використання простих зондувальних сигналів: електромагнітного $E(t)$ і акустичного $S_1(t)$ з різними обвідними.

Для отримання залежності $D_E(q_0)$ визначимо вид радіоакустичної ненормованої сигнальної функції $\hat{S}(q_1, q_2)$ (5.2) і чисельно визначимо значення змішаної похідної $\hat{S}(q_0, q_0)$ (5.1) в точках $q_0 \in [-1, 1]$. Сигнальна функція $\hat{S}(q_1, q_2)$ має вигляд [12], показаний на рисунку 5.1.

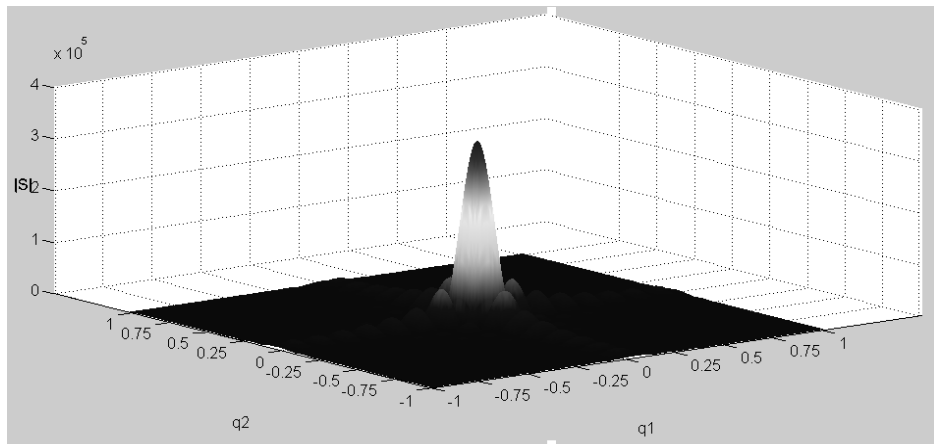


Рисунок 5.1 – Сигнальна функція $\hat{S}(q_0, q_0)$ при використанні простих радіосигналу $E(t)$ і акустичного сигналу $S_1(t)$ з прямокутними обвідними

На рис. 5.2 – 5.8 показані графіки залежностей при використанні різних комбінацій зондуючих акустичних і електромагнітних сигналів [24], в тому числі сигналів з прямокутними і куполоподібними обвідними

$$E_2(t) = E e^{\frac{-t^2}{2a^2}}, \quad S_4(t) = S e^{\frac{-t^2}{2a_1^2}}, \quad (5.3)$$

де параметри a та a_1 визначають тривалості (просторові протяжності) електромагнітного $\Delta E(t)$ і акустичного $\Delta S(t)$ зондуючих сигналів.

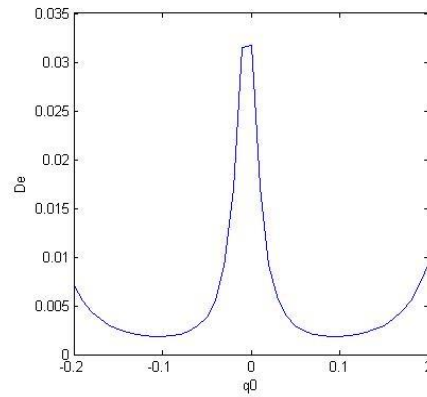


Рисунок 5.2 – Дисперсія $D_E(q_0)$ оцінки енергетичного параметра при використанні зондуючих сигналів $E(t)$ з прямокутною і $S_1(t)$ з куполоподібними обвідними

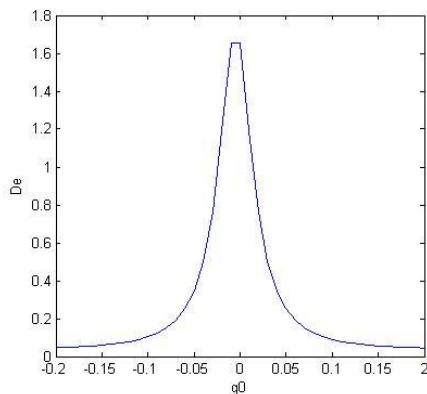


Рисунок 5.3. – Залежність $D_E(q_0)$ при використанні сигналів $E(t)$ з прямокутною і $S_2(t)$ з куполоподібною обвідними ($\Delta S_2(t) < \Delta S_1(t)$)

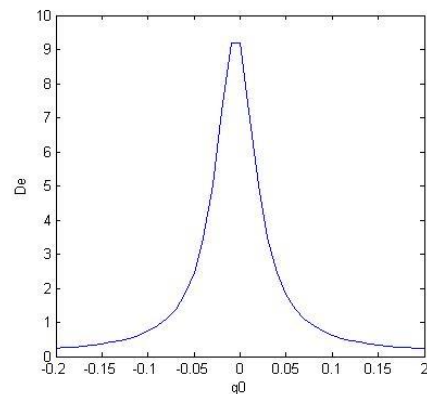


Рисунок 5.4 – Залежність $D_E(q_0)$ при використанні сигналів $E(t)$ з прямокутною і $S_3(t)$ з куполоподібною обвідними ($\Delta S_3(t) < \Delta S_2(t)$)

Залежності $D_E(q_0)$ на рис. 5.2–5.4, отримані для розглянутих зондуючих сигналів $E(t)$ з прямокутною і $S(t)$ з куполоподібною обвідними, являють собою криві з єдиним піком в точці $q_0 = 0$. При збільшенні параметра розстроювання умови Брегга q_0 дисперсія D_E поступово зменшується.

На рис. 5.2, де тривалість акустичного зонduючого сигналу є найбільшою з усіх представлених, на краях розглянутого в дослідженні діапазону значень параметра q_0 функція зростає.

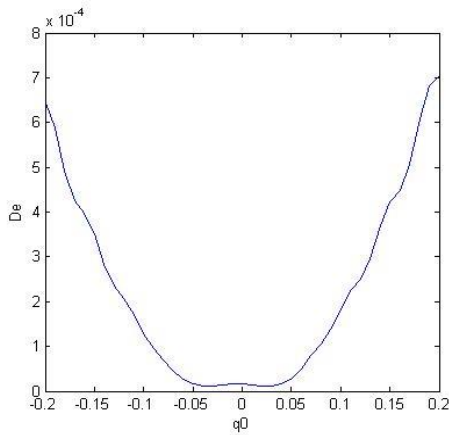


Рисунок 5.5 – Залежність $D_E(q_0)$ при використанні

сигналів $E_2(t)$ з куполоподібною і $S_4(t)$ прямокутною обвідними

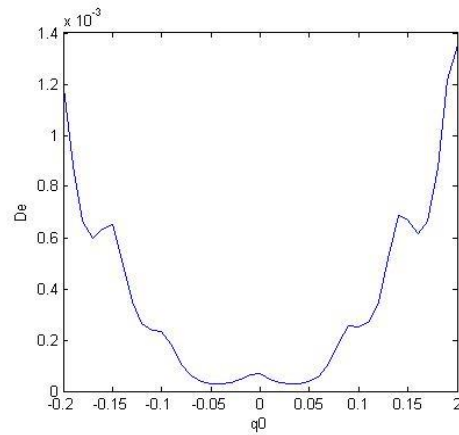


Рисунок 5.6 – Залежність $D_E(q_0)$ при використанні

сигналів $E_2(t)$ з куполоподібною і $S_5(t)$ прямокутною обвідними

$$(\Delta S_5(t) < \Delta S_4(t))$$

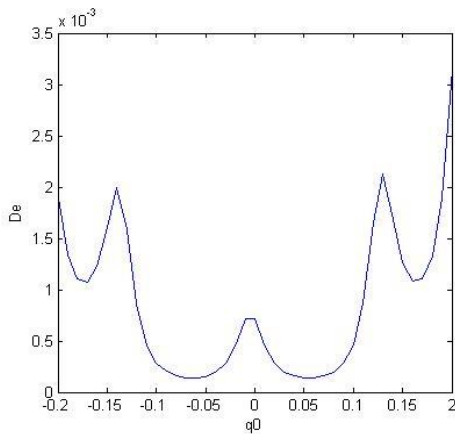


Рисунок 5.7 – Залежність $D_E(q_0)$ при використанні

сигналів $E_2(t)$ з куполоподібною і $S_6(t)$ прямокутною обвідними

$$(\Delta S_6(t) < \Delta S_5(t))$$

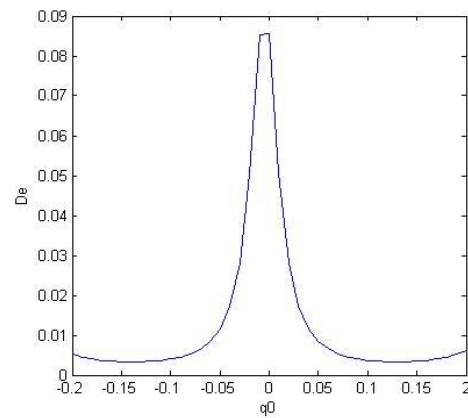


Рисунок 5.8 – Залежність $D_E(q_0)$ при використанні

сигналів $E_2(t)$ з куполоподібною і $S_7(t)$ прямокутною обвідними

$$(\Delta S_7(t) < \Delta S_6(t))$$

Залежності $D_E(q_0)$ на рис. 5.5-5.8, отримані для розглянутих зондуючих сигналів $E(t)$ з куполоподібною і $S(t)$ з прямокутною обвідними, являють собою криві з багатьма піками або з єдиним піком в точці $q_0 = 0$. При збільшенні параметра розстроювання умови Брега q_0 дисперсія D_E поступово зменшується, а потім має тенденцію до зростання.

В районі значень $q_0 = 0$ велике значення дисперсії D_E пояснюється тим, що зі збільшенням параметра розстроювання умови Брега в атмосфері спостерігається ускладнення структури відбитого сигналу та має місце кутова модуляція сигналу.

З аналізу рис. 5.5–5.7, видно, що збільшення дисперсії починається після деяких значень параметра q_0 (на рис. 5.6 значення становить $q_0 \approx 0,03$). Це пояснюється тим, що параметр розстроювання умови Брега є енергетичним параметром і енергія опорного і відбитого сигналів стають досить малими, внаслідок чого флуктуаційна помилка при використанні кореляційних інтегралів відбитого сигналу і опорних сигналів стає значною.

Варто відмітити з рис. 5.2–5.8, що має місце залежність D_E від тривалості акустичного сигналу. Зі зменшенням тривалості акустичного сигналу при інших рівних умовах значення D_E зростає, що означає погіршення потенційної точності. Така поведінка пояснюється впливом двох факторів. По-перше, енергія відбитого сигналу зі зменшенням тривалості акустичного сигналу зменшується повільніше при великих значеннях параметра розстроювання умови Брега q_0 . По-друге, зі зменшенням тривалості акустичного зондуючого сигналу має місце тенденція спрощення структури відбитих від нього радіосигналів, причому спрощення структури пояснюється зменшенням кількості ущільнень повітря, що створюються акустичною посилюючою, від яких відповідно відбувається відзеркалення.

На рис. 5.9 показана залежність дисперсії оцінки D_E від тривалості акустичного зондуючого сигналу t_s при заданих значеннях параметра

розстроювання умови Брегга q_0 в разі використання зондувальних сигналів з прямокутними обвідними.

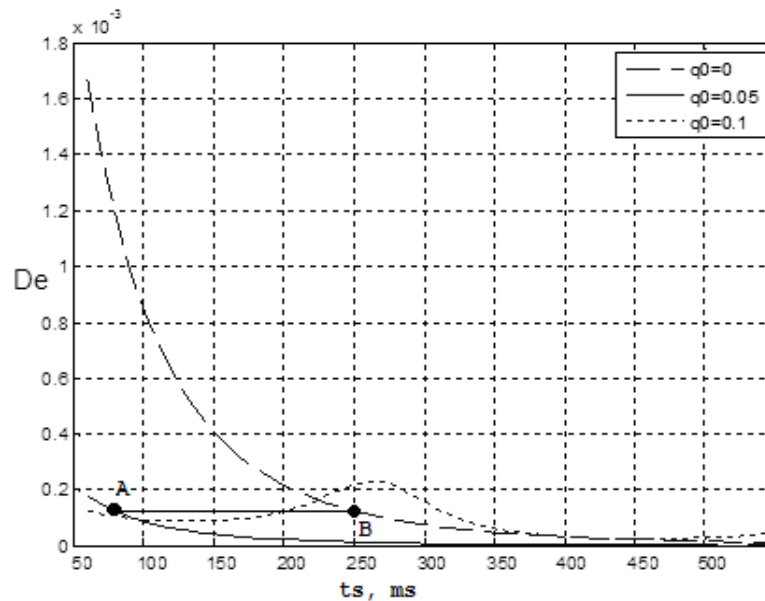


Рисунок 5.9 – Залежність $D_E(t_s, q_0)$ при використанні зондуючих сигналів з прямокутними обвідними

З рисунка 5.9 видно, що, в цілому, зі збільшенням тривалості акустичного зондуючого сигналу точність оцінки значень параметрів атмосфери підвищується. Однак, як видно з рисунка, для кривої, побудованої при $q_0 = 0.1$, можлива також ситуація, коли потенційна точність оцінки значень параметрів атмосфери може бути гірше для більш тривалих зондуючих акустичних сигналів.

Згідно з рис. 5.9 зі збільшенням значення параметра розстроювання умови Брегга q_0 , при якому формується відбитий радіосигнал, залежність дисперсії D_E від тривалості акустичного зондуючого сигналу менш виражена. Це говорить про те, що при значеннях q_0 , відмінних від нуля, можливо використовувати акустичні сигнали меншою тривалості, не втрачаючи при цьому в точності оцінок параметрів атмосфери. У свою чергу, зменшення тривалості зондуючого акустичного сигналу дозволяє підвищити роздільну здатність системи РАЗ за дальністю.

З рис. 5.9 також видно, що при збільшенні значень параметра графік залежності $D_E(t_s, q_0)$ розташовується нижче. Припустимо, що радіосигнал відбивався від акустичної посилки тривалістю $t_s = 250$ мс при $q_0 = 0$. Тоді, згідно з рисунком 5.9, дисперсія оцінки становить $D_E \approx 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-2}$ (точка В). Якби радіосигнал відбивався від акустичної посилки при $q_0 = 0,05$, то для забезпечення значення дисперсії $D_E \approx 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-2}$ було б досить тривалості акустичної посилки $t_s \approx 70$ мс (рис. 5.8, точка А). Це дозволяє стверджувати, що зі збільшенням значення q_0 є можливим зменшення тривалості зондуючого акустичного сигналу без втрати точності оцінок параметрів атмосфери.

5.1.3 Вплив енергетичного характеру інформаційного параметра на потенційну точність оцінки

Вплив енергетичного характеру параметра розстроювання умови Бреґга на потенційну точність оцінки параметрів атмосфери розглянемо для випадку використання зондувальних сигналів, які мають прямокутні обвідні.

Отримаємо залежність $D_E(q_0)$, використовуючи радіоакустичну невнормовану сигнальну функцію $\hat{S}(q_1, q_2)$, описувану виразом (5.2), де $F(t, q_1)$ і $F(t, q_2)$ – сигнали однакової потужності при різних значеннях параметрів q_1, q_2 . Щоб отримати сигнали $F(r, q)$ рівної потужності необхідно використовувати множення на коефіцієнт k , де $k = \max(E(q_0))/E(q_0)$.

Залежність $D_E(q_0)$ зондувальних сигналів, які мають прямокутні обвідні, за умови корекції енергії вхідних і опорних сигналів представлена на рис. 5.10.

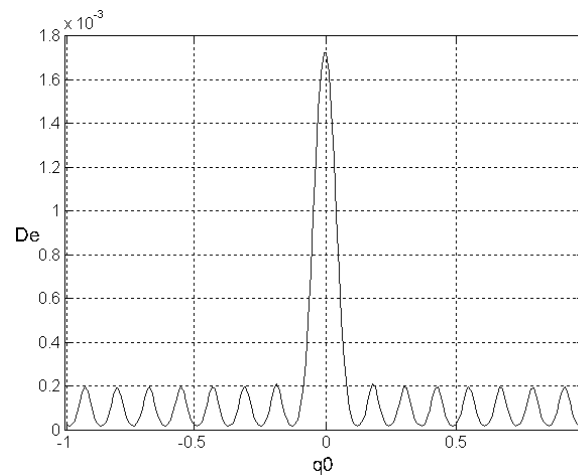


Рисунок 5.10 – Залежність $D_E(q_0)$ зондувальних сигналів, які мають прямокутні обвідні, за умови, де вхідні та опорні сигнали $F(t, q)$ мають рівну потужність

Як видно, залежність $D_E(q_0)$ має максимум в точці $q_0 = 0$. При збільшенні значень параметра q_0 спостерігаються рівновеликі бічні пелюстки, які не перевищують основну пелюстку. Звідси випливає висновок, що поведінка залежності, коли зі збільшенням параметра розстроювання умови Брегга q_0 дисперсія D_E спочатку зменшується, а потім починає зростати, пов'язане з тим, що параметр розстроювання умови Брегга q є енергетичним інформаційним параметром, оцінюваним в системах радіоакустичного зондування атмосфери.

5.2 Фільтрація миттєвих профілів метеопараметрів

5.2.1 Постановка задачі

Одна з найважливіших задач вимірювальних радіосистем – задача фільтрації, яка полягає в тому, щоб найкращим чином вилучити інформацію про процес, який досліджується з послідовності вимірювань деяких його характеристик, проведених з певними похибками.

Більшість систем радіоакустичного зондування атмосфери призначені для вимірювання температури повітря, яка функціонально пов'язана зі

швидкістю звуку \hat{c}_{sy} в середовищі [3]. Досліджуваним процесом в таких системах є, як правило, профіль швидкості звуку – процес зміни швидкості звуку в атмосфері в залежності від висоти. Особливість цього процесу – значна різноманітність в залежності від стану атмосфери. Інформація про швидкість звуку в системах РАЗ вилучається з радіосигналу, відбитого від акустичної посилки, за допомогою первинної обробки в багатоканальному кореляційному пристрої з подальшим коригуванням вихідних значень. В якості опорних сигналів кореляторів використовуються сигнали, сформовані з використанням функції розсіювання [130]. Отримана таким чином оцінка значення швидкості звуку характеризується деякою похибкою.

У підрозділу розглядається можливість застосування методів оптимальної лінійної фільтрації в системах РАЗ для згладжування «миттєвих» температурних профілів з урахуванням особливостей оцінюваного процесу. Застосування фільтрації дозволяє згладжувати миттєві значення температури і отримувати оцінки вертикального профілю температури при меншій кількості вертикальних зондувань.

5.2.2 Моделі профілів метеопараметрів

Для реалізації алгоритму лінійної оптимальної фільтрації необхідно вибрати модель інформаційного процесу, яка буде відповідати реальним змінам спостережуваного параметра в часі. Маючи адекватну модель процесу, можна прогнозувати з певною точністю поведінку реального процесу, що дозволить якісніше згладжування флуктуацій швидкості звуку.

Моделі зміни інформаційних параметрів поділяються на детерміновані і випадкові, або стохастичні. Детермінованими вважаються такі моделі, система рівнянь яких не має випадкових складових, і тому кожні майбутні значення процесу визначаються однозначно при вирішенні системи. Так, наприклад, модель, яка описується системою лінійних рівнянь (5.4), є детермінованою моделлю [16,19] зміни деякого векторного параметра $\vec{\alpha} = \|\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3\|$, де α_1 –

скалярний оцінюваний параметр, α_2 – перша похідна оцінюваного параметра, α_3 – друга похідна оцінюваного параметра. Модель, що описується системою рівнянь (5.4) [133], дозволяє сформувати траєкторії лінійної ($\alpha_3=0$) і рівноприскореної ($\alpha_3\neq 0$) зміни параметра, тому така модель адекватно характеризує, наприклад, процес зміни дальності до об'єкта, що рухається лінійно або рівноприскорено

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{1(k+1)} &= \alpha_{1(k)} + \alpha_{2(k)}T + \alpha_{3(k)}T^2/2 \\ \alpha_{2(k+1)} &= \alpha_{2(k)} + \alpha_{3(k)}T \\ \alpha_{3(k+1)} &= \alpha_{3(k)} \end{aligned} \right\}, \quad (5.4)$$

де T – час, щоб передбачити наступне значення параметра.

Стохастичні моделі – це моделі, що описуються рівняннями, в які входять випадкові величини, і тому майбутні значення процесу визначаються з певною ймовірністю. Наприклад, модель зміни деякого параметра, що описується лінійним рівнянням,

$$\alpha_{k+1} = c\alpha_k + \mu_k, \quad (5.5)$$

є стохастичною, тому що в рівняння входить випадкова величина μ_k , імовірнісний розподіл якої визначають ймовірності появи значень описуваного параметра α .

Модель (5.5) називається моделлю з незалежними першими приростами, де незалежними першими приростами є значення $\mu_{(k)}$, які характеризують швидкість зміни параметра, середню за час між відліками [134]. Для моделі (2) можливі реалізації зміни деякого параметра α , показані на рис. 5.11.

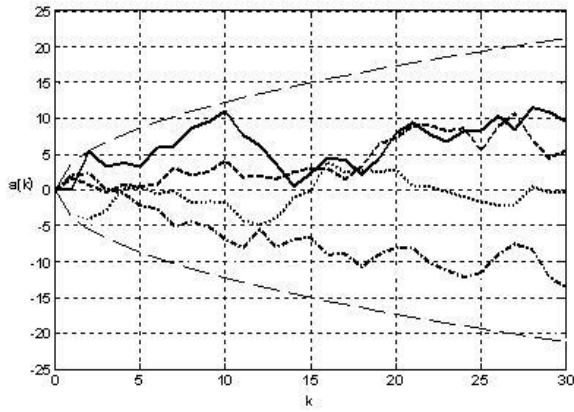


Рисунок 5.11 – Можливі реалізації процесу, отриманого з використанням моделі (5.5)

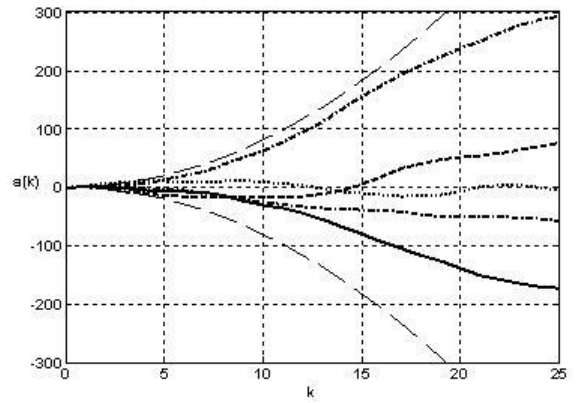


Рисунок 5.12 – Можливі реалізації процесу, отриманого з використанням моделі (5.6)

Штриховою лінією на рис. 5.11 відзначені кордони області, яка охоплює можливі значення параметра α_k з ймовірністю 0,8. З рис.5.11 видно, що представлені реалізації мають різноманітний, переважно стрибкоподібний характер. Отже, якщо необхідно передбачати поведінку об'єкта, що сильно маневрує, то користуватися для цього доцільно моделлю (5.5).

Ще один приклад випадкової моделі зміни параметра – модель, яка описується системою рівнянь (5.6)

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{1(k+1)} &= c\alpha_{1(k)} + \alpha_{2(k)} \\ \alpha_{2(k+1)} &= \alpha_{2(k)} + \mu_k \end{aligned} \right\},$$

або в матричному вигляді

$$\alpha_{k+1} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_{1k} \\ \alpha_{2k} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \mu_{1k} \end{pmatrix} = B \alpha_k + \vec{\mu}_k, \tag{5.6}$$

де $\vec{\alpha}_k = \|\alpha_{1k} \alpha_{2k}\|^T$ – векторний параметр, що складається з деякого скалярного параметра α_{1k} і швидкості зміни цього параметра α_{2k} ; $\vec{\mu}_k$ – вектор випадкового маневру.

Модель (5.6) називається моделлю з незалежними другими приростами. Незалежними другими приростами тут є значення μ_k , які характеризують прискорення зміни параметра. Для моделі (5.6) можливі реалізації послідовності α_1 , показані на рис. 5.12. На рис. 5.12 штриховою лінією відзначені межі області, яка охоплює можливі значення параметра α_{1k} з ймовірністю 0,8. З рисунка видно, що представлені реалізації процесу, на відміну від моделі (5.5), мають більш монотонний характер.

При зміні дисперсії величини μ_k буде змінюватися порізаністю реалізацій, отриманих за допомогою моделей (5.5) і (5.6). Підбираючи дисперсію випадкової величини μ_k , можна добиватися більшої схожості характеристик процесу, отриманого моделюванням, і реального.

Маючи деякий набір стохастичних моделей, що описують зміни параметра, і вибираючи з них найбільш підходящу модель для кожного конкретного типу реального випадкового процесу, можна із заданою точністю здійснювати передбачення поведінки спостережуваного процесу.

У системах РАЗ атмосфери інформаційний процес, який необхідно оцінити, – це процес зміни швидкості звуку в залежності від висоти. Процеси зміни швидкості звуку, що було спостережено, в силу турбулентних процесів, що відбуваються в атмосфері, є випадковими процесами. Отже, для лінійної обробки інформації, отриманої за допомогою радіоакустичної системи, доцільно користуватися стохастичними моделями. Залежно від стану атмосфери слід вибирати, наприклад, модель (5.5) або (5.6), або використовувати якусь іншу стохастичну модель.

5.2.3 Рівняння лінійної фільтрації оцінок швидкості звуку в системах РАЗ

Ідея оптимальної лінійної фільтрації результатів вимірювань в системах РАЗ полягає в послідовному згладжуванні оцінок вектора стану \hat{c}_{sy} на поточному кроці вимірювання з використанням прогнозованої на поточний крок оцінки \hat{c}_{s0} , де правило прогнозування визначається обраною моделлю зміни оцінюваного параметра.

Загальні рівняння, відповідно до яких проводиться лінійна фільтрація в системах РАЗ, мають вигляд

$$\begin{aligned}\hat{c}_{s(k+1)} &= B_k \hat{c}_{s(k)} + C_{k+1}^{-1} H_{k+1}^T C_{\theta(k+1)} (\hat{\theta}_{sy(k+1)} - \hat{\theta}_{s0(k+1)}), \\ C_{k+1} &= C_{0(k+1)} + H_{k+1}^T C_{\theta(k+1)} H_{k+1} = (B_k C_k^{-1} B_k^T + Q_k)^{-1} + C'_{y(k+1)},\end{aligned}\quad (5.7)$$

де $\hat{c}_{s(k+1)}$ – результуюча оцінка вектора стану; B_k – матриця переходу, що характеризує закон, відповідно до якого визначається прогнозована оцінка; Q_k – кореляційна матриця маневру мети; $\hat{\theta}_{s0(k+1)} = H_{k+1} B_k \hat{c}_{s(k)}$ – прогнозоване значення вектора спостережуваних параметрів; $\hat{\theta}_{sy(k+1)}$ – оцінка вектора спостережуваних параметрів на $k+1$ -м кроці спостереження; $C_{\theta(k+1)}$ – матриця точності поточного вимірювання; $C'_{y(k+1)}$ – матриця точності поточного вимірювання; H – матриця перерахунку, яка визначається виходячи з виразу $H^{-1} \theta_s = c_s$, де θ_s – вектор спостережуваних параметрів, c_s – вектор стану.

Особливістю використання рівнянь фільтрації (5.7) в системах РАЗ є необхідність вибору моделей зміни параметра в залежності від стану атмосфери. Вибір моделі повинен визначатися переддослідними даними про стан атмосфери або в результаті виконання пробних кроків зондування.

5.2.4 Вибір моделі зміни швидкості звуку

Алгоритм лінійної фільтрації, що описано рівняннями (5.7), має на увазі знання моделі зміни параметра, яка адекватно характеризує реальний процес, який підлягає фільтрації. Без моделі зміни параметра лінійна фільтрація неможлива, тому що не можна передбачати поведінку реального фільтруючого процесу. Саме модель зміни оцінюваного параметра задає вид матриці B_{κ} , що входить в рівняння (5.7) і впливає на матрицю точності $C_{\kappa+1}$. Тому вибір моделі зміни параметра для здійснення лінійної фільтрації в системах РАЗ є важливим етапом. Вибір невідповідної, неадекватної моделі призведе до погіршення згладжування флуктуацій швидкості звуку.

При різних моделях зміни параметра вид рівнянь (5.7) буде різним. Розглянемо алгоритм лінійної фільтрації радіоакустичної інформації при використанні моделі (5.4) за умови, що $\alpha_3 = 0$. У цьому випадку модель (5.4) має вигляд

$$\left. \begin{aligned} c_{s1(\kappa+1)} &= c_{s1(\kappa)} + c_{s2(\kappa)} \\ c_{s2(\kappa+1)} &= c_{s2(\kappa)} \end{aligned} \right\},$$

або в матричному вигляді

$$c_{s(\kappa+1)} = Bc_{s(\kappa)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{1s(\kappa)} \\ c_{2s(\kappa)} \end{bmatrix}, \quad (5.8)$$

де c_s – вектор стану моделі; $c_{1s(\kappa)}$ – швидкість звуку; $c_{2s(\kappa)}$ – перша похідна від швидкості звуку.

Для здійснення лінійної фільтрації при використанні моделі (5.4) в системах РАЗ необхідно проводити первинну обробку сигналу, відбитого від акустичної посилки, в результаті якої буде отримана поточна оцінка вектора

$$\hat{c}_{sy(\kappa)} = \begin{bmatrix} \hat{c}_{1sy(\kappa)} \\ \hat{c}_{2sy(\kappa)} \end{bmatrix}^T.$$

Вважаємо, що оцінка вектора стану здійснюється побічно на основі поточного вимірювання швидкості звуку $\hat{c}_{1sy(\kappa)}$ з постійною дисперсією помилки $\sigma_{\theta}^2 = C_{\theta}^{-1}$, тобто вектор спостереження являє собою скаляр $\hat{\theta}_{sy(\kappa)} = \hat{c}_{1sy(\kappa)}$. При використанні моделі зміни параметра (5.8) та за умови непрямих вимірювань матриці, що входить в рівняння (5.7), матимуть наступний вигляд [133]: $B = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $Q = 0$, $H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$.

Підставляючи зазначені матриці в рівняння (5.7), і виконуючи відповідні перетворення [133], отримаємо рівняння фільтрації у вигляді

$$\hat{c}_{s(\kappa+1)} = \begin{bmatrix} \hat{c}_{1s(\kappa)} + \hat{c}_{2s(\kappa)} \\ \hat{c}_{2s(\kappa)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2(2\kappa + 1)/(\kappa + 1)(\kappa + 2) \\ 6/(\kappa + 1)(\kappa + 2) \end{bmatrix} \times (\hat{\theta}_{sy(\kappa+1)} - \hat{c}_{1s(\kappa)} - \hat{c}_{2s(\kappa)}). \quad (5.9)$$

Зробимо відповідно до отриманого рівнянням фільтрацію сукупності оцінок швидкості звуку $\hat{c}_{1s(\kappa)}$, що мають дисперсії $\sigma_{\theta}^2 = C_{\theta}^{-1} = 1,5 \text{ м/с}^2$ [10,11]. На рис. 5.13 показано порівняння профілю оцінок швидкості звуку, отриманих на різних висотах, з профілем, отриманим після фільтрації, виконаної відповідно до рівняння (5.9).

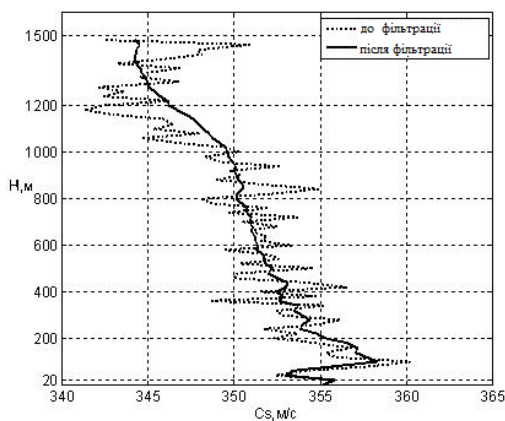


Рисунок 5.13 – Профілі швидкості звуку до і після фільтрації, виконаної відповідно до рівняння (5.9)

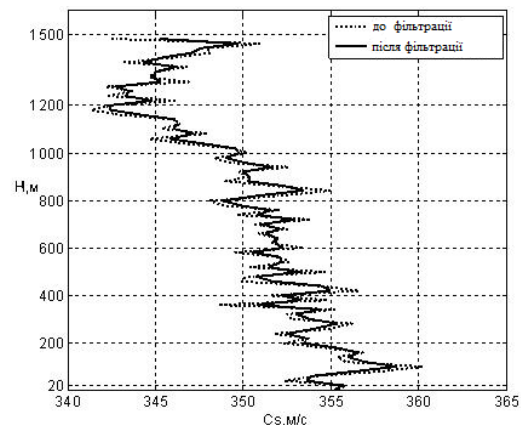


Рисунок 5.14 – Профілі швидкості звуку до і після фільтрації, виконаної відповідно до рівняння (5.10)

З рис. 5.13 видно, що приблизно після 20-го відліку (висота 400 м) фільтр практично не реагує на зміни профілю. Явище, що спостерігається, називається явищем «розбіжності» фільтра. Звідси випливає висновок, що детермінована модель (5.8) для лінійної фільтрації процесу зміни швидкості звуку не підходить, тому що виникає явище «розбіжності» фільтра. Крім того, стан атмосфери рідко буває таким, щоб процес зміни швидкості звуку можна було описати лінійною моделлю, тому детерміновані моделі зміни параметра не можна вважати адекватними реальному процесу зміни швидкості звуку з висотою в атмосфері.

Розглянемо фільтрацію вихідного профілю при використанні випадкової моделі зміни параметра (5.5). При використанні моделі зміни параметра (5.5) і прямому вимірі матричні величини, що входять в рівняння (5.7), перетворюються в скалярні: $C^{-1} = D$, $C_y^{-1} = D_y$, $B = 1$, $Q = D_\mu$, $H = 1$. В результаті рівняння (5.7) перетворюються у вигляді

$$\begin{aligned}\hat{c}_{s(\kappa+1)} &= \hat{c}_{se(\kappa+1)} + (D_{\kappa+1} / D_{y(\kappa+1)}) (\hat{c}_{sy(\kappa+1)} - \hat{c}_{se(\kappa+1)}), \\ 1/D_{\kappa+1} &= 1/(D_{e(\kappa+1)} + D_{\mu(\kappa+1)}) + 1/D_{y(\kappa+1)}.\end{aligned}\quad (5.10)$$

де $\hat{c}_{s(\kappa+1)}$ – результуюча оцінка швидкості звуку; $\hat{c}_{se(\kappa+1)}$ – прогнозована швидкість звуку; $\hat{c}_{sy(\kappa+1)}$ – швидкість звуку на поточному кроці вимірювання; $D_{\kappa+1}$, $D_{e(\kappa+1)}$, $D_{y(\kappa+1)}$, $D_{\mu(\kappa+1)}$ – відповідно дисперсії результуючої оцінки швидкості звуку, прогнозованої та поточної оцінки швидкості звуку і маневру μ_κ .

Зробимо відповідно до отриманих рівнянь (5.10) фільтрацію реальних оцінок швидкості звуку $\hat{c}_{1s(\kappa)}$, показаних на рис. 5.13 (крива «до фільтрації»). Дисперсія фільтрованих оцінок $\sigma_y^2 = D_y = 1,5 \text{ м/с}^2$. Дисперсія маневру повинна вибиратися виходячи з додослідних даних про стан атмосфери. Чим більше нестабільний стан атмосфери, тим більшу дисперсію матиме реальний

профіль, і тим більше значення дисперсії маневру необхідно використовувати при фільтрації.

На рис.5.14 показано порівняння вихідного профілю оцінок швидкості звуку з профілем, отриманим після фільтрації, виконаної відповідно до рівняння (5.10), в припущенні, що дисперсія маневру швидкості звуку $D_\mu = 1,5 \text{ м/с}^2$.

У цьому випадку не спостерігається явище «розбіжність» фільтра. Профілі, отримані після фільтрації (рис. 5.14), характеризуються меншою дисперсією, що говорить про згладжування флуктуацій швидкості звуку, які визнані турбулентними процесами в атмосфері. Це дозволить зменшити загальний час вимірювань, який витрачається на отримання функцій і профілів метеопараметрів, і зменшити помилки, які викликані нестационарністю процесів в атмосфері.

Значить, стохастична модель (5.5) адекватно характеризує процес зміни швидкості звуку, і її доцільно використовувати для лінійної фільтрації оцінок швидкості звуку в атмосфері.

Розглянемо фільтрацію профілю при використанні випадкової моделі зміни параметра (5.6). Для забезпечення лінійної фільтрації процесу зміни швидкості звуку в цьому випадку необхідно мати на кожному кроці вимірювання оцінку вектора стану $\hat{c}_{sy(k)} = \left\| \hat{c}_{1sy(k)} \hat{c}_{2sy(k)} \right\|^T$, отриману прямим або непрямим способом.

Вважаємо, що оцінка вектора стану здійснюється побічно на основі поточного вимірювання швидкості звуку $\hat{c}_{1sy(k)}$ з постійною дисперсією помилки $\sigma_\theta^2 = C_\theta^{-1}$. При використанні моделі зміни параметра (5.6) матриці B, Q, H , що входять в рівняння (5.8), будуть мати наступний вигляд

$$B = \begin{Bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{Bmatrix}, Q = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & D_\mu \end{Bmatrix}, H = \begin{Bmatrix} 1 & 0 \end{Bmatrix},$$

де D_μ – дисперсія маневру.

У результаті перетворень і наближених обчислень рівняння лінійної фільтрації (5.7), при використанні моделі зміни параметра (5.6), матимуть вигляд [134]

$$\hat{c}_{s(\kappa+1)} = \begin{Bmatrix} \hat{c}_{1s(\kappa)} + \hat{c}_{2s(\kappa)} \\ \hat{c}_{2s(\kappa)} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} A \\ B \end{Bmatrix} (\hat{\theta}_{sy(\kappa+1)} - \hat{c}_{1s(\kappa)} - \hat{c}_{2s(\kappa)}), \quad (5.11)$$

де A та B – усталені значення вагових коефіцієнтів;

$$A \approx \frac{D_{C_{1s}}}{\sigma_\theta^2}, \quad B \approx \frac{R}{\sigma_\theta^2}, \quad D_{C_{1s}} \approx \sqrt[4]{4D_\mu \cdot \sigma_\theta^5}, \quad R \approx \sqrt{D_\mu \cdot \sigma_\theta^2}, \quad (5.12)$$

де $D_{C_{1s}}$ – сталі значення дисперсії оцінок швидкості звуку; R – кореляційний момент оцінок швидкості звуку і першої похідної швидкості звуку.

Відповідно до отриманих рівняннями (5.12) зробимо фільтрацію набору реальних оцінок значень швидкості звуку $\hat{c}_{1s(\kappa)}$, показаного на рис.5.13 (крива до фільтрації). На рис. 5.15 показано результат фільтрації в припущенні, що дисперсія маневру швидкості звуку становить $D_\mu = 1,5$ м/с.

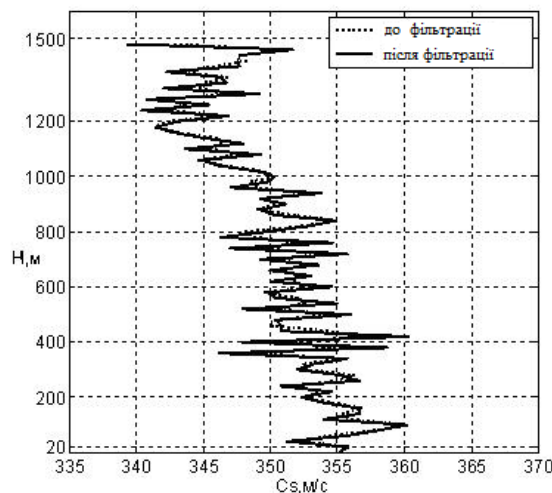


Рисунок 5.15 – Профілі швидкості звуку до і після фільтрації, виконаної відповідно до рівняння (5.10)

З рис. 5.15 видно, що профіль, отриманий після фільтрації, є більш порізаним. У зв'язку з цим можна стверджувати, що модель (5.6), яка використовується в процесі фільтрації, в даному випадку неадекватно характеризує спостережуваний реальний процес зміни швидкості звуку і не підходить для фільтрації в цих умовах.

Модель (5.6) адекватно описує процес зміни швидкості звуку тоді, коли стан атмосфери характеризується плавним профілем температури. Підвищення якості оптимальної фільтрації, при використанні моделі (5.6), досягається шляхом підбору значення дисперсії маневру μ_k . Однак позитивні результати ця фільтрація дає лише в тому випадку, коли дисперсія оцінки реального процесу зміни швидкості звуку багато більше обраної дисперсії маневру μ_k .

5.3 Висновки до п'ятого розділу

1. У розділі проведено аналіз потенційної точності оцінки інформаційного параметра вихідних сигналів систем РАЗ – параметра розстроювання умови Брегга, який є енергетичним параметром сигналу. Розглянуто вплив видів зондуючих сигналів на потенційну точність оцінки параметрів атмосфери при кореляційному методі прийому розсіяних сигналів.

2. Показано, що дисперсія оцінки значень параметрів атмосфери залежить від значення параметра розстроювання умови Брегга q_0 , при якому формується приймальний радіосигнал.

Залежність D_E дисперсії від значення параметра розстроювання умови Брегга при розглянутих зондуючих сигналів являє собою криву з рядом піків або криву з єдиним піком в точці $q_0 = 0$. Зі збільшенням параметра розстроювання умови Брегга q_0 дисперсія D_E спочатку зменшується, а потім має тенденцію до зростання.

Має місце залежність D_E від тривалості акустичного сигналу. Зі зменшенням тривалості акустичного сигналу значення D_E зростає, що

відповідає погіршенню потенційної точності. У той же час, не виключено, коли потенційна точність оцінки значень параметрів атмосфери може бути гірше при більш тривалих зондуючих акустичних сигналах.

При збільшенні значення параметра розстроювання умови Брегга q_0 , при якому формується відбитий від акустичної посилки радіосигнал, можливо підвищення роздільної здатності системи РАЗ по дальності без втрати в точності оцінок значень параметрів атмосфери.

Крива залежності $D_E(q_0)$ для зондуючих сигналів $E(t)$ з прямокутною і $S(t)$ з куполоподібною обвідними за умови корекції енергії вхідних і опорних сигналів (що обумовлено енергетичним характером оцінюваного параметра) має максимум, коли вхідний сигнал має значення параметра розстроювання умови Брегга $q_0 = 0$, а при збільшенні значення q_0 дисперсія D_E зменшується.

Крива залежності $D_E(q_0)$ для зондуючих сигналів $E(t)$ з куполоподібною і $S(t)$ з прямокутною обвідними являють собою криві з багатьма піками або з єдиним піком в точці $q_0 = 0$. При збільшенні параметра розстроювання умови Брегга q_0 дисперсія D_E поступово зменшується, а потім має тенденцію до зростання.

3. Оптимальний лінійний фільтр, який використовується в системі для послідовної обробки одержуваних оцінок швидкості звуку, дозволяє здійснювати фільтрацію не тільки шумових помилок, але і випадкових варіацій самого випадкового процесу. Внаслідок цього застосування в системах РАЗ оптимального лінійного фільтра дозволить згладжувати миттєві значення температури і отримувати оцінки вертикального профілю температури при меншій кількості вертикальних зондувань, тобто використання такого алгоритму дозволить значно скоротити загальний час, що витрачається на отримання профілю.

4. У роботі розглядалися різні види моделей корисного сигналу (що описують зміну швидкості звуку з висотою), що використовуються при фільтрації: детерміновані і стохастичні. Результати моделювання показують,

що в даній задачі доцільно використовувати стохастичну модель з незалежними першими приростами.

При виборі моделі зміни інформаційного параметра в системах РАЗ і її параметрів необхідно враховувати стан атмосфери.

Вибір математичної моделі для фільтрації спостережуваного процесу зміни швидкості звуку в кожному конкретному випадку повинен визначатися додослідними даними про стан атмосфери або в результаті виконання пробних кроків зондування.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-прикладна задача вдосконалення моделей і методів радіоакустичного зондування атмосфери, які дозволять розширити перелік вимірюваних характеристик атмосфери, підвищити точність їх вимірювання, визначати якісні показники вимірювання, що дозволить більш обґрунтовано використовувати системи РАЗ на практиці.

1. Проведено аналіз існуючих систем дистанційного зондування. Виявлено тенденцію розвитку систем радіоакустичного зондування, сформульовані основні наукові задачі, які впливають з якісного стану техніки та теорії радіоакустичного зондування. Показано необхідність створення для розвитку теорії і практики підходів та методів дослідження з урахуванням характерних особливостей систем РАЗ, обумовлених унікальністю розсіювальних об'єктів.

2. Розроблено підходи до проведення метрологічної атестації засобів дистанційного зондування атмосфери, що використовують електромагнітні та акустичні хвилі. Показано, що метрологічну атестацію дистанційних засобів зондування атмосфери, як і інших засобів вимірювань, можна проводити декількома шляхами: розрахунковим шляхом, шляхом екстраполяції структурної функції за даними практичних вимірювань і шляхом порівняння (звірення) з еталоном.

У даний час відсутні технічні засоби вимірювань, які могли б бути використаними в якості еталонів для метрологічної атестації дистанційних систем зондування атмосфери, що використовують електромагнітні та (або) акустичні хвилі.

Показано, що досить об'єктивною характеристикою точності таких засобів можуть стати метрологічні характеристики складових їх пристроїв, які вносять найбільші похибки в результати вимірювання метеорологічних величин.

Таким чином, метрологічну атестацію дистанційних засобів доцільно проводити шляхом метрологічної атестації основних пристроїв системи, що визначають похибку вимірювання інформаційного параметра відбитого сигналу системи, з урахуванням того, що сумарна похибка вимірювань метеорологічної величини, яка визначається похибками окремих пристроїв, в цілому не повинна перевищувати заданої для даного засобу.

3. Розроблено новий метод вимірювання вертикальної швидкості вітру і проведена оцінка його методичної похибки. Показано, що застосування комбінованої обробки сигналів систем РАЗ: доплерівської та кореляційної, забезпечує можливість дистанційної реєстрації висотних профілів вертикальної складової швидкості вітру. Введення в антенний пристрій системи РАЗ розподіленого акустичного випромінювача розширює можливості даного методу і дозволяє одночасно вимірювати і горизонтальну складову швидкості вітру.

Отримані результати показують, що при кореляційній обробці вплив турбулентності атмосфери на похибку вимірювань температури і вологості менше, ніж при доплерівській обробці.

У двохчастотних системах РАЗ, призначених для вимірювання вологості повітря, необхідно так вибирати звукові частоти зондувальних коливань, щоби вони розташовувались на верхній та нижній межах дисперсійного виступу).

4. Найбільш потужним обмеженням існуючих систем РАЗ по дальності є винос плями розсіяних коливань з апертури приймальної антени.

Запропоновано новий метод прийому і обробки сигналів в системах радіоакустичного зондування атмосфери, що заснований на пасивній радіолокації плями розсіяних електромагнітних коливань, сфокусованих сферичними хвильовими фронтами акустичного пакета. На основі запропонованого методу прийому сигналів розроблено метод вимірювання швидкості горизонтального вітру і його напрямку.

5. Проведена оцінка впливу видів зондуючих електромагнітного і акустичного сигналів на потенційну точність оцінки параметрів атмосфери.

Залежність D_E дисперсії інформаційного параметра q від значення параметра розстроювання умови Брегга при розглянутих зондуючих сигналів являє собою криву з рядом піків або криву з єдиним піком в точці $q_0 = 0$. Зі збільшенням параметра розстроювання умови Брегга q_0 дисперсія D_E спочатку зменшується, а потім має тенденцію до зростання.

Має місце залежність D_E від тривалості акустичного сигналу. Зі зменшенням тривалості акустичного сигналу значення D_E зростає, що відповідає погіршенню потенційної точності. У той же час, не виключено, коли потенційна точність оцінки значень параметрів атмосфери може бути гірше при більш тривалих зондуючих акустичних сигналах.

При збільшенні значення параметра розстроювання умови Брегга q_0 , при якому формується відбитий від акустичної посилки радіосигнал, можливо підвищення роздільної здатності системи РАЗ по дальності без втрати в точності оцінок значень параметрів атмосфери.

6. Розроблено метод фільтрації миттєвих профілів температури, одержуваних системою РАЗ, що дозволяє зменшити час, який витрачається на отримання температурних профілів атмосфери з необхідною достовірністю.

Застосування в системах РАЗ оптимального лінійного фільтра дозволить згладжувати миттєві значення температури і отримувати оцінки вертикального профілю температури при меншій кількості вертикальних зондувань, тобто використання такого алгоритму дозволить значно скоротити загальний час, що витрачається на отримання профілю.

Виконано аналіз моделей інформаційного параметра (що описують зміну швидкості звуку з висотою), які використовуються при фільтрації. Результати моделювання показують, що в даній задачі доцільно використовувати стохастичну модель з незалежними першими приростами.

Застосування на практиці запропонованого методу фільтрації миттєвих профілів параметрів атмосфери дозволить значно скоротити час, що витрачається на отримання шуканих профілів, і дозволить виключити з результатів вимірювань похибки, які обумовлені нестационарним характером протікання атмосферних процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Современное состояние, проблемы и перспективы систем радиоакустического зондирования / Е.Г. Прошкин, В.М. Карташов, С.И. Бабкин, А.В. Волох // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. Харьков, 2007. №125. С. 5-16.
2. Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли / Под общ. ред. Б. Л. Кащеева, Е. Г. Прошкина, М. Ф. Лагутина. Харьков: Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники; Бизнес Информ, 2002. 426 с.
3. Калистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука, 1985. 200 с.
4. Карташов В.М., Бабкин С.И., Толстых Е.Г. Проблемы метрологической аттестации средств дистанционного зондирования атмосферы // Системы обработки информации: сб. науч. трудов. Х.: Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, 2015. вып. 6 (131). С.88-91.
5. Карташов В.М., Бабкин С.И., Толстых Е.Г. Расширение возможностей систем радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. техн. сб. Х.: ХНУРЭ, 2014. №179. С. 5-9.
6. Методические погрешности измерения метеовеличин при корреляционной обработке сигналов систем радиоакустического зондирования. Сообщение 1 / В.М. Карташов, С.И. Бабкин, Е.Г. Толстых, Н.Г. Лепеха // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. техн. сб. Харьков, 2015. №183. С. 18-23.
7. Карташов В.М., Бабкин С.И., Толстых Е.Г. Методические погрешности измерения метеовеличин при корреляционной обработке сигналов систем радиоакустического зондирования. Сообщение 2 //

Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. техн. сб. Харьков, 2017. №189. С. 136-140.

8. Systematic errors in measurement of meteorological variables in correlation processing of signal of radio acoustic sounding systems / V.M. Kartashov, S.I. Babkin, Y.G. Tolstykh, N.G. Lepeha // Telecommunications and Radio Engineering. New York, 2016. Vol. 75(9). P. 835-843.

9. Карташов В.М., Бабкин С.И., Толстых Е.Г. Пассивная локация пятна рассеянных сигналов при радиоакустическом зондировании атмосферы // Прикладная радиоэлектроника. Науч. техн. журнал. Х.: ХНУРЭ, 2015. Т. 14, №1. С. 59-63.

10. Выбор модели измерения скорости звука для оптимального линейного фильтра систем радиоакустического зондирования атмосферы В.М. Карташов, Д.Н. Куля, М.В. Кушнир, Е.Г. Толстых // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. техн. сб. Харьков, 2013. №173. С. 63-68.

11. Selection of the Model for Varying Speed of Sound for the Optimal Linear Filter of Atmosphere Radio Acoustic Sounding Systems / V.M. Kartashov, D.M. Kulia, M.V. Kushnir, E.G. Tolstykh // Telecommunications and Radio Engineering. New York, 2014. Vol. 73(9). P. 803-812.

12. Карташов В.М., Куля Д.Н., Толстых Е.Г. Потенциальная точность оценки информационного энергетического параметра сигнала в системах радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. техн. сб. Харьков, 2015. №182. С. 13-18.

13. Патент на винахід № 110446 «Спосіб дистанційного вимірювання вертикальної швидкості вітру радіоакустичним зондуванням атмосфери» Зареєстровано 25.12.2015. МПК G01S 13/95 (2006.1). Винахідники: Бабкін С.І., Карташов В.М., Толстих Є.Г.

14. Патент на винахід № 110858 «Пристрій для дистанційної реєстрації вертикального профілю температури атмосферного повітря». Зареєстровано 25.02.2016. МПК G01S 13/95 (2006.1). Винахідники: Бабкін С.І., Карташов В.М., Кушнір М.В., Толстих Є.Г.

15. Патент на винахід № 115725 «Спосіб визначення вологості повітря радіоакустичним зондуванням атмосфери» Зареєстровано 11.12.2017. МПК G01S 13/95 (2006.1). Винахідники: Бабкін С.І., Карташов В.М., Толстих Є.Г.

16. Толстых Е.Г. Моделирование алгоритмов оптимальной линейной фильтрации при различных моделях полезного сигнала // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: материалы XVIII междунар. молодежного форума, 14-16 апреля 2014 г. Х.: ХНУРЭ, 2014. Т. 3. С. 173-174.

17. Толстых Е.Г. Расширение возможностей систем радиоакустического зондирования атмосферы // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: материалы XIX междунар. молодежного форума, 20-22 апреля 2015 г. Х.: ХНУРЭ, 2015. Т. 3. С. 44-45.

18. Толстых Е.Г. Измерение горизонтального ветра при радиоакустическом зондировании атмосферы // Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті: матеріали XX міжнар. молодіжний форум, 19-21 квітня 2016 р. Х.: ХНУРЕ, 2016. Т. 3. С. 64-65.

19. Толстых Е.Г. Обоснование выбора модели полезного сигнала при использовании алгоритмов оптимальной линейной фильтрации // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций (РТ-2014): материалы 10-й междунар. молодёжной науч.-техн. конф., 12-17 мая 2014 г. Севастополь: СевНТУ, 2014. С. 51.

20. Tolstykh Y. G., Babkin S. I. Antenna device for radio acoustic sensing with passive radiolocation // Proceedings of 2015 X Anniversary International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), April 21-24, 2015. Kharkiv, 2015. P. 249-250.

21. Карташов В.М., Шпоняк Р.С., Толстых Е.Г. Моделирование случайных процессов с использованием модели авторегрессии // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: матеріали 14 міжн. наук.-техн.конф., 5-10 червня 2015 р. Одеса, Хмельницький: ХНУ, 2015. С. 45-46.

22. Карташов В.М., Бабкин С.И., Толстых Е.Г. Измерение метеопараметров с использованием пассивной радиолокации пятна в системах РАЗ // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Матеріали 16 міжнар. наук.-техн. конференції 10-15 червня 2016 р. Одес. нац. акад. зв'язку ім. О.С. Попова. Одеса, Хмельницький: ХНУ, 2016. С. 57-58.

23. Карташов В.М., Тихонов В.А., Воронин В.В., Толстых Е.Г. Комплексирование систем дистанционного зондирования атмосферы // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: тези доповідей VIII Міжнародної науково-практичної конференції, 21-23 вересня 2016 р. Запоріжжя: ЗНТУ, 2016. С. 47-48.

24. Толстых Е.Г., Карташов В.М. Исследование качественных характеристик измерения параметров сигнала в системах РАЗ // 6-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», МРФ-2017. Конференция «Радиолокация. Спутниковая навигация. Радиомониторинг». Сборник научных трудов. Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, Издательство «Точка», 2017. С. 174-177.

25. Individual scans fusion in virtual knowledge base for navigation of mobile robotic group with 3D TVS / Mykhailo Ivanov, Oleg Sergiyenko, Vladimir Kartashov, Yelizaveta Tolstykh et al. // 6-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», МРФ-2017. Конференция «Радиолокация. Спутниковая навигация. Радиомониторинг». Сборник научных трудов. Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, Издательство «Точка», 2017. С. 55-60.

26. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1986. 167 с.

27. Wilczak J.M., Gossard E.E., Neff W.D. Ground-based remote sensing of the atmospheric boundary layer: 25 years of progress // Bound.-Layer Meteorol. 1996. Vol. 78, №3-4. P. 321-349.

28. Steinhagen H. Ground-based remote sensing techniques for use in European observing systems // Extended abstracts of COST-76 Profiler Workshop. Engelberg (Switzerland), 1997. P.157-163.
29. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские локаторы и метеорологические наблюдения / Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 503 с.
30. Литл К.Г. Акустические методы дистанционного зондирования атмосферы // ТИИЭР. 1969. Т.57, №4. С. 222-230.
31. Рыжков А.В. Характеристики метеорологических РЛС // Зарубежная радиоэлектроника. 1993. №4. С.29-34.
32. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 244 с.
33. Оптическое зондирование атмосферы / Б.Т. Тошенов, Т.П. Торопова, В.А. Ляджин и др. Алма-Ата: Наука, 1985. 108 с.
34. Обухов А.М. О рассеянии звука в турбулентном потоке // Доклады АН СССР, 1941. Т.30, №7. С.611-614.
35. Обухов А.М. Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 413 с.
36. Татарский В.И. К теории распространения звуковых волн в турбулентном потоке. // ЖЭТФ. 1953. Т.25. С. 74.
37. Татарский В.И. Теория флуктуационных явлений при распространении волн в турбулентной атмосфере. М.: Изд. АН СССР, 1959. 331 с.
38. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
39. Gilman G.N. et al. Reflection of sound signals at the troposphere // J. Acoust. Soc. Amer. 18. 1946. P. 274-283.
40. Kraichnan R.H. The scattering of sound in turbulent medium // J. Acoust. Soc. America. 1953. V.25. №11. P 1096-1104.
41. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя.// СО РАН. Томск, 2001. С. 280.

42. Crescenti, G.H. A study to Characterize Performance Statistics of Various Ground-Bases Remote Sensors// Air Resources Laboratory Silver. Springs (Maryland), 1999. 297p.
43. Inter-comparison of commercially available SODARs for wind energy application / Antoniou I., Jurgensen H.E., Hunerbein S., et al. // In: Proc. of 12-th Intern. Symp. on Acoustic Remote Sensing. Cambridge, UK, 2004. P.136-139.
44. Обзор методов и средств ветрового зондирования атмосферы / В.В. Стерлядкин, А.Г. Горелик, Г.Г. Щукин. URL: www.mivlgu.ru/conf/armand2013/lection-2013/pdf/lec_2.pdf.12 (дата звернения: 20.02.2018).
45. SODAR PCS.2000-64 // МЕТЕК Meteorologische Messtechnik GmbH. URL: http://metek.de/wp-content/uploads/2014/05/20180222_Datenblatt_SODAR-64.pdf (дата звернения: 20.02.2018).
46. Глазов Г.Н. Статистические вопросы лидарного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 311 с.
47. Зуев В.Е., Ельников А.В., Бурлаков В.Д. Лазерное зондирование средней атмосферы. Томск: «ООО изд. «Раско», 2002. 352 с.
48. Weitkamp C. Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere // Springer series in optical sciences. 2005. V.102. 456 p.
49. Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere / Chanin M.L., Garnier A., Hauchecorne A., Porteneuve J. A // Geophys. Re. Lett. 1989. V.16. P. 1273-1276.
50. The Doppler wind and temperature system of Alomar lidar / Rees D., Nelke G., Fricke K.-H., et al.. // J. Atmos. Terr. Phys. 1996. V.58. P. 1827-1842.
51. Протопопов В.В., Устинов Н.Д. Лазерноегетеродинамирование. М.: Наука, 1985. 288с.
52. Лазерные системы //Ветровые лидары. URL: <http://www.lsystems.ru/products/9/42/> (дата звернения: 20.02.2018).
53. Douglas W. van de Kamp. Wind profiler training manual number one. Principles of wind profiler operation. NOAA/ERL. Boulder, Colorado, 1988. 54p.

54. Lehmann V. Use of radar wind profilers in operational networks, 2011. URL: https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-104_TECO-2010/2_Keynote_2_Lehmann.pdf (дата звернення: 20.02.2018).

55. Макет мобильной атмосферной РЛС вертикального зондирования S-диапазона. URL: <http://nure.ua/university/structure/science/innovacionnye-proekty-i-razrabotki/4-3-maket-mobilnoj-atmosfernoj-rls-vertikalnogo-zondirovaniya-s-diapazona/> (дата звернення: 20.02.2018).

56. Атмосферный профайлер AP1000 // ЭКОЭНЕРГОТЕХ URL: <http://ecoenergotech.com/products/windradar/ap1000> (дата звернення: 20.02.2018).

57. Radar Wind Profilers LAP-3000// Scintec. URL: <http://www.scintec.com/english/web/Scintec/Details/A050000.aspx> (дата звернення: 20.02.2018).

58. Smith P.L. Remote measurements of wind velocity by the electromagnetic-acoustic probe. 1. System analysis // Proc. of the 5 military electr.conf. Wash. 1961. № 419. P. 43-53.

59. Fetter R.W. Remote measurements of wind velocity by the electromagnetic-acoustic probe. Experimental system // Proc. of the 5 military electr.conf. Wash. 1961. № 420. P.54-59.

60. Головин Н.Я. Акустические артиллерийские приборы. Ч. I. Физические основы устройства акустических приборов. М.: Воениздат, 1940. 410 с.

61. Оценка погрешностей двух методик радиоакустического температурного зондирования атмосферы. Сообщение 1. Разработка эксперимента / Бабкин С.И., Куценко В.И., Максимова Н.Г. и др. // Радиотехника : Респ. межвед. науч.-техн. сб. Харьков : Вища шк.,1987. Вып. 82. С. 78-83.

62. Оценка погрешностей двух методик радиоакустического температурного зондирования атмосферы. Сообщение 2. / Бабкин С.И., Куценко В.И., Максимова Н.Г. и др.// Радиотехника : Респ. межвед. науч.-техн. сб. Харьков : Вицашк., 1988. Вып. 84. С. 98-105.

63. Оперативные измерения профиля температуры методом радиоакустического зондирования с автоматической подстройкой под условие Брегга / Горелик, А.Г., Жежерин, В.Р., Каллистратова, М.А. и др. // XIV Всесоюз. конф. по распространению радиоволн : тез. докл., Ленинград, октябрь 1984. М. :Наука, 1984. Ч. 2. С.276-278.

64. Определение температуры, скорости и направления ветра в приземном слое атмосферы / Бабкин С.И., Милосердова Г.Н., Орлов М.Ю. и др. // Метеорология и гидрологи. 1980. № 8. С. 36-45.

65. Бабкин С.И. Прошкин Е.Г., Ульянов Ю.Н. Экспериментальные результаты температурно-ветрового зондирования атмосферы радиоакустическим методом // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1984. Т. 20, № 6. С. 495-500.

66. Зелинский В.А., Прошкин Е.Г., Пилипенко Ю.Л. О применении метода многократного гетеролинирования в доплеровских системах прецезионного измерения скорости // Материалы юбилейной научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава ХИРЭ. Харьков: ХИРЭ, 1968. С.31-37.

67. А.С. № 832509 (СССР) Радиоакустическая система температурного зондирования / С.И.Бабкин, В.И.Куценко, Ю.А.Пахомов, Е.Г.Прошкин, Ю.Н.Ульянов. Опубл. в Б.И. 1981. № 19.

68. Ульянов Ю.Н. Двухчастотная радиоакустическая система // Всесоюзн. сипм. по лазерн. и акустич. зондир. атмосферы. Тез. докл., ч.2. Томск: ИОА СО АН СССР. 1984. С. 196-199.

69. Бабкин С.И., Делов И.А., Прошкин Е.Г. Комплекс аппаратуры для совмещенного зондирования пограничного слоя атмосферы электромагнитными и акустическими волнами // Радиотехника. 1998. Вып. 106-107. С.23-28.

70. Карташов В.М., Волох А.В., Радионова В.В. Тела неопределенности зондирующих сигналов систем радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника :Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. Харків : ХНУРЕ, 2007. Вып. 150. С. 94-99.

71. Патент України. № 89344. Спосіб радіоакустичного зондування атмосфери для дистанційної реєстрації вертикального профіля температури повітря / Карташов В.М., Бабкін С.І., Волох А.В., Семеняка А.В., Пащенко С.В., Яценко П.О. Опубл. бюл.№1 від 11.01.2010 р. 11.

72. Карташов В.М. Функции рассеяния сигналов систем зондирования атмосферы // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. Харьков, 2001. №118. С. 61-65.

73. Карюкин Г.А. Влияние ветра на работу систем радиоакустической зондирования атмосферы // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1982. Т.18, №1. С. 38-45.

74. Система дистанционного измерения высотных профилей ветра и температуры // Всесоюзн. центр переводов. Л-51132. Пер. статьи Исии Е., Ямасаки Я., Кодзима Ю., Окумура С., Фукусима М. из журн. "Нихонмусэнгихо". 1984. №22. С. 37-41.

75. Радиоакустическое зондирование атмосферы. Прошкин Е.Г., Бабкин С.И., Груша Г.В. и др. Разд.2 // Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли / Под ред. Кащеева Б.Л., Прошкина Е.Г., Лагутина М.Ф. Харьков: Коллегиум, 2002. С. 44-98.

76. Орлов М.Ю. Радиоакустическое зондирование атмосферы. Обнинск: ВНИ-ИГМИ-МЦД, 1982. 52с.

77. Лободин В.М., Мазурин Н.Ф. Высотная метеорологическая мачта как средство поверки систем акустического и радиоакустического зондирования // Труды ИЭМ Госкомгидромета. 1987. №10/131. С. 20-28.

78. Федько С.И., Фурсов М.Г. Калибратор акустического локатора. // Труды VIII Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч.2. Томск, 1984. С. 206-208.

79. Определение температуры, скорости и направления ветра в приземном слое атмосферы / Бабкин С.И., Милосердова Г.Н., Орлов М.Ю. и др. // Метеорология и гидрология. 1980. 20, № 6. С. 495-500.

80. Бабкин С.И. О точности измерения скорости звука в атмосфере доплеровским радиолокатором. // Радиотехника. Респ. Межвед. научно-техн. сб. Харьков: Вища школа, 1979. Вып. № 50. С. 67-72.

81. Бабкин С.И. К вопросу о метрологической аттестации систем радиоакустического зондирования // Тезисы докладов 7-го Всесоюзного совещания по радиометеорологии. Суздаль, 1986. С. 82.

82. ДСТУ 8.129-99. Государственная поверочная схема для средств измерения времени и частоты. Киев: Держстандарт, 2003. 4 с.

83. Карташов В.М. Двумерная взаимокорреляционная функция акустического и электромагнитного сигналов радиотехнических систем // Радиоэлектроника и информатика. Харьков, 2001. №1. С. 6-8.

84. Бабкин С. И. Анализ погрешностей регистрации профилей температуры воздуха доплеровским и корреляционным способами // Радиотехника. Всеукр. науч.- техн. сб. Вып.169. 2012, с. 72-78.

85. Карташов В.М., Бабкін С.І., Пащенко С.В., Куля Д.М. Спосіб радіоакустичного зондування атмосфери для реєстрації вертикального профілю температури. Патент України № 97612. Опубл. 27.02.2012, бюл.№4.

86. Орлов М.Ю., Юрчак Б.С. О возможности определения влажности в приземном слое атмосферы радиоакустическим способом // Труды ИЭМ Госкомгидромета. 1985. №38/121. С. 14-20.

87. Измерения влажности воздуха радиоакустическим зондированием атмосферы / Бабкин С.И., Максимова Н.Г., Панченко А.Ю., Прошкин Е.Г., Ульянов Ю.Н. // Труды IX Всесоюзного симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч.2. Исследование метеопараметров атмосферы. Томск, 1987. С. 145-148.

88. Бочарова И.Е., Иванов В.Н., Орлов М.Ю. Влияние вертикальной составляющей ветра на результаты температурного радиоакустического зондирования // Труды ИЭМ. 1988. вып. 46 (136). С. 14-19.

89. Горелик Г.С. Колебания и волны. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. 572 с.

90. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Гл. ред. И.П. Голямина. М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.
91. Осташев В.Е. Распространение звука в движущихся средах. М.: Наука, 1992. 206 с.
92. Frankel M.S., Peterson A.M. Remote temperature profiling in the lower Troposphere. *Radio Science*, 1976. v.11, №3. P. 157-166.
93. Vogt S. Advances in RASS since 1990 and practical application of RASS to air pollution and the ABL studies // Proc. 8th Int. Symp. in Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere and Oceans (ISARS). Moscow, 1996. P. 37-50.
94. Современное состояние, проблемы и перспективы систем радиоакустического зондирования / Прошкин Е.Г., Карташов В.М., Бабкин С.И., Волох А.В // Радиотехника. Всеукр. научн.-техн. сб. Х.: ХНУРЭ, 2010. Вып. 150. С. 5-16.
95. Кукуш В.Д. Определение погрешностей результатов и средств измерений. Харьков: ХПИ, 1979. 113 с.
96. Карташов В.М., Бабкин С.И., Кушнир М.В. Совершенствование технологий радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника. Всеукр. научн.-техн. сб. Х.: ХНУРЭ, 2014. Вып. 178. С. 5-13.
97. Бабкин С.И. О точности измерения скорости звука в атмосфере доплеровским радиолокатором // Радиотехника. Респ. Межвед. научно-техн. сб. Харьков: Вища школа, 1979. Вып. 50. С. 67-72.
98. Бабкин С.И. Анализ погрешностей регистрации профилей температуры воздуха доплеровским и корреляционным способами // Радиотехника. Всеукр. науч.-техн. сб. Х.: ХНУРЭ, 2012. Вып. 169. С. 72-78.
99. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 263 с.
100. Акустический ветровой профилиер Scientec MFAS. URL: <http://www.coenergytech.com/products-sodar/mfas> (дата обращения: 20.02.2018).
101. Карташов В.М., Бабкин С.И., Куля Д.Н. К вопросу о возможности регистрации влажности воздуха при корреляционной обработке сигналов

системы радиоакустического зондирования // Радиотехника. Всеукр. науч.-техн. сб. Х.: ХНУРЭ, 2013. Вып.172. С. 67-71.

102. Бабкин С.И., Кушнир М.В. Оценка влияния горизонтального ветра на амплитудную структуру сигналов системы радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника. Всеукр. науч.-техн. сб. Х.: ХНУРЭ, 2013. Вып.175. С. 114-119.

103. Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона. Свойства газов, жидкостей и растворов. Т.II, часть А. / Пер. с англ., под ред. И.Г.Михайлова. М.: Мир, 1968. 487 с.

104. Кон А.И. Мощность сигнала при радиоакустическом зондировании турбулентной атмосферы // Изв. АН СССР. ФАО. 1984. Т.20, № 2. С. 178-185.

105. Надеждина Б.Д., Шкляревич О.Б. Модельные оценки характеристик турбулентности в пограничном слое атмосферы. // Труды ГГО им. А.И.Воейкова. Вып. 530. Физика пограничного слоя атмосферы. 1991. С. 88-99.

106. Блохинцев Д.И. Акустика движущейся неоднородной среды. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. 208 с.

107. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 647 с.

108. Лайтхман Д.Л. Физика пограничного слоя. Изд. второе, перераб. и дополн. Л.: Гидрометиздат, 1970. 341 с.

109. Бызова Н.Л. Пограничный слой атмосферы // Труды ИЭМ. М.: Московское отделение Гидрометеиздат, 1975. вып. 10 (53). 165 с.

110. Борн М., Вольф Э. Основы оптики / Пер. с англ., под ред. Г.П. Мотулевич. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1970. 656 с.

111. Стратосферно-тропосферное радиоакустическое зондирование/ В.А. Зиничев, В.О. Рапопорт, В.Ю. Трахтенгерц и др. // В кн. Труды X Всесоюзного симп. по лазерн. и акустич. зондир. атмосферы. Ч.2. Томск, 1989. С. 74-78.

112. Harris C. M. Effect of Humidity on the Velocity of Sound // JASA, v. 49, №3. 1971. P 890-893.

113. Бабкин С.И., Груша Г.В. Влияние атмосферной турбулентности на точность определения влажности воздуха амплитудным радиоакустическим методом // Оптика атмосферы, 3, №10. 1990. С. 1064-1069.

114. Бабкин С.И. К вопросу измерения влажности воздуха радиоакустическим зондированием // Сб. науч. трудов по материалам 4-й Международн. конф. “Теория и техника передачи, приема и обработки информации “Новые информационные технологии”. 28-30 сентября 1998 г. Харьков-Туапсе. С. 96-97.

115. Налбандян О.Г. // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1976. Т. 12, №8. С. 877-880.

116. Бабкин С.И. Особенности антенных устройств систем радиоакустического зондирования атмосферы. // 9-й Всесоюзный симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск: ТФ СО АН СССР, 1987. С. 167-171.

117. Бабкин С.И. Радиоакустический способ зондирования атмосферы. Авторское свидетельство № 1658105, СССР. Опубл. 23.06.1991, бюл. № 23.

118. Обработка сигналов в радиоэлектронных системах дистанционного мониторинга атмосферы / В.М. Карташов, С.И. Бабкин, Д.Н. Куля и др. // Монография. Харьков, 2014. С. 9-67.

119. Колчинский В.Е., Константиновский М.И., Мандуровский И.А. Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов/ Под ред. Колчинского В.Е. М.: Советскоерадио, 1975. 430 с.

120. Радиолокационные устройства / Васин В.В., Власов О.В., Григорин-Рябов В.В. и др. // Под ред. Григорина-Рябова В.В. М.: Сов. радио., 1970. 680 с.

121. Компенсация сдвигового действия ветра при радиоакустическом зондировании атмосферы / С.И. Бабкин, В.И. Куценко, Ю.А. Пахомов и др. //

Тезисы докладов VII Всесоюзн. симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы (часть 2). Томск: ИОА АН СССР, 1982. С. 138-140.

122. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 639 с.

123. Панченко А.Ю. Измерение характеристик ветровых потоков вертикальным радиоакустическим зондированием // Труды 10 Всесоюзн. симп. по лазерн. и акустич. зондир. атмосферы. Ч.2. Томск: ИОА СО АН СССР, 1989. С. 127-131.

124. Гидростатические нивелиры. URL: http://www.demetra5.kiev.ua/ru/gidrostaticheskie_niveliry (дата звернення: 20.02.2018).

125. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. Киев- Выща школа, 1976. 431 с.

126. Современная радиолокация / Пер. с англ., под ред. Ю.Б.Кобзарева. М.: Сов. Радио, 1969. С. 608-613.

127. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 448 с.

128. Прошкин Е.Г. Радиоакустическое зондирование в системе контроля загрязнения атмосферного воздуха / Деп. В УкрНИИГМИ, 05.05.87. №1382-Ук87. Харьков, 1987. 115 с.

129. Куликов Е.И., Трифонов А.П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. М.: Сов. радио, 1978. 296 с.

130. Карташов В.М., Куля Д.Н., Пащенко С.В. Алгоритм автосопровождения изменений информационного параметра сигнала радиоакустических систем // Восточно-Европейский ЖУРНАЛ передовых технологий. Харьков, 2012. № 4/9(58). С. 57-61.

131. Карташов В.М., Куля Д.Н. Синтез и анализ дискриминатора следящего устройства систем радиоакустического зондирования // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. Харьков, 2012. №171. С. 234-239.

132. Карташов В.М., Куля Д.Н., Кушнир М.В. Анализ и синтез алгоритмов обработки сигналов в системах радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. г. Муром, Россия, 2013. №4(12). С.63-68.

133. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. 416 с.

134. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации: учеб. Пособие для вузов. М.: Сов. радио, 1970. 560 с.

ДОДАТОК А
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

Затверджую

Проректор ХНУРЕ з НМР

д.т.н., проф. Рубан І.В.

«06» 03 2018 р.

Акт впровадження

Комісія у складі: голова – професор кафедри МІРЕС, к.т.н., проф. Олейніков В.М. і члени – доцент кафедри МІРЕС, к.т.н. Шейко С.О., доцент кафедри МІРЕС, к.т.н. Зубков О.В., розглянувши матеріали дисертаційного дослідження ас. кафедри МІРЕС Толстих Є.Г. «Удосконалення моделей та методів радіоакустичного зондування атмосфери», прийшла до висновку, що матеріали дисертаційної роботи, а саме:

– спосіб радіоакустичного зондування, який заснований на пасивній радіолокації плями розсіяних електромагнітних сигналів;

– методи вимірювання швидкості вертикального та горизонтального вітру системами радіоакустичного зондування, при застосуванні комбінованої обробки розсіяних сигналів: доплерівської і кореляційної,

впроваджені в НДР №287, рег.номер 0114U002697, «Створення технологій побудови багатофункціонального радіотехнічного комплексу для екологічного моніторингу».

Голова комісії

проф. Олейніков В.М.

Члени комісії

доц. Шейко С.О.

доц. Зубков О.В.

Затверджую

Проректор ХНУРЕ з НМР

д.т.н., проф. Рубан І.В.

«06» 03 2018 р.


Акт впровадження

Комісія у складі: голова – професор кафедри МІРЕС, к.т.н., проф. Олейніков В.М. і члени – доцент кафедри МІРЕС, к.т.н. Шейко С.О., доцент кафедри МІРЕС, к.т.н. Зубков О.В., розглянувши матеріали дисертаційного дослідження ас. кафедри МІРЕС Толстих Є.Г. «Удосконалення моделей та методів радіоакустичного зондування атмосфери», прийшла до висновку, що матеріали дисертаційної роботи, а саме:

–аналіз методичних похибок, що виникають за рахунок апріорної невизначеності висотного розподілу метеорологічних величин при реєстрації вертикальних профілів температури і вологості повітря з використанням кореляційної обробки прийнятих сигналів,

впроваджено в НДР №312, рег.номер 011U002541, «Розробка нових інформаційно-вимірювальних систем і технологій координатно-часового і метеорологічного забезпечення та зв'язку».

Голова комісії

 проф. Олейніков В.М.

Члени комісії

 доц. Шейко С.О.

 доц. Зубков О.В.

Затверджую

Проректор ХНУРЕ з НМР

д.т.н., проф. Рубан І.В.

«06» 03 2018 р.

Акт впровадження

Комісія у складі: голова – професор кафедри МІРЕС, к.т.н., проф. Олейніков В.М. і члени – доцент кафедри МІРЕС, к.т.н. Колендовська М.М., доцент кафедри МІРЕС, к.т.н. Шейко С.О., розглянувши матеріали дисертаційного дослідження ас. кафедри МІРЕС Толстих Є.Г. «Удосконалення моделей та методів радіоакустичного зондування атмосфери», прийшла до висновку, що матеріали дисертаційної роботи, а саме:

– метод фільтрації «миттєвих» профілей температури, одержуваних системою РАЗ;

– метод прийому та обробки сигналів у системах РАЗ атмосфери, що заснований на пасивній радіолокації плями розсіяних електромагнітних коливань,

впроваджені в навчальний процес і будуть використовуватися в лекційних курсах та лабораторних роботах у рамках дисципліни «Акустичне зондування неоднорідних середовищ».

Голова комісії

проф. Олейніков В.М.

Члени комісії

доц. Колендовська М.М.

доц. Шейко С.О.

ДОДАТОК Б
СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Выбор модели измерения скорости звука для оптимального линейного фильтра систем радиоакустического зондирования атмосферы В.М. Карташов, Д.Н. Куля, М.В. Кушнир, Е.Г. Толстых // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. техн. сб. Харьков, 2013. №173. С. 63-68.

2. Карташов В.М., Бабкин С.И., Толстых Е.Г. Расширение возможностей систем радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. техн. сб. Х.: ХНУРЭ, 2014. №179. С. 5-9.

3. Selection of the Model for Varying Speed of Sound for the Optimal Linear Filter of Atmosphere Radio Acoustic Sounding Systems / V.M. Kartashov, D.M. Kulia, M.V. Kushnir, E.G. Tolstyh // Telecommunications and Radio Engineering. New York, 2014. Vol. 73(9). P. 803-812.

4. Карташов В.М., Бабкин С.И., Толстых Е.Г. Пассивная локация пятна рассеянных сигналов при радиоакустическом зондировании атмосферы // Прикладная радиоэлектроника. Науч. техн. журнал. Х.: ХНУРЭ, 2015. Т. 14, №1. С. 59-63.

5. Карташов В.М., Бабкин С.И., Толстых Е.Г. Проблемы метрологической аттестации средств дистанционного зондирования атмосферы // Системы обработки информации: сб. науч. трудов. Х.: Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, 2015. вып. 6 (131). С.88-91.

6. Карташов В.М., Куля Д.Н., Толстых Е.Г. Потенциальная точность оценки информационного энергетического параметра сигнала в системах радиоакустического зондирования атмосферы // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. техн. сб. Харьков, 2015. №182. С. 13-18.

7. Методические погрешности измерения метеовеличин при корреляционной обработке сигналов систем радиоакустического зондирования. Сообщение 1 / В.М. Карташов, С.И. Бабкин, Е.Г. Толстых, Н.Г. Лепеха // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. техн. сб. Харьков, 2015. №183. С. 18-23.

8. Systematic errors in measurement of meteorological variables in correlation processing of signal of radio acoustic sounding systems / V.M. Kartashov, S.I. Babkin, Y.G. Tolstykh, N.G. Lepcha // Telecommunications and Radio Engineering. New York, 2016. Vol. 75(9). P. 835-843.

9. Карташов В.М., Бабкин С.И., Толстых Е.Г. Методические погрешности измерения метеовеличин при корреляционной обработке сигналов систем радиоакустического зондирования. Сообщение 2 // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч. техн. сб. Харьков, 2017. №189. С. 136-140.

10. Патент на винахід № 110446 «Спосіб дистанційного вимірювання вертикальної швидкості вітру радіоакустичним зондуванням атмосфери» Зареєстровано 25.12.2015. МПК G01S 13/95 (2006.1). Винахідники: Бабкін С.І., Карташов В.М., Толстих Є.Г.

11. Патент на винахід № 110858 «Пристрій для дистанційної реєстрації вертикального профілю температури атмосферного повітря». Зареєстровано 25.02.2016. МПК G01S 13/95 (2006.1). Винахідники: Бабкін С.І., Карташов В.М., Кушнір М.В., Толстих Є.Г.

12. Патент на винахід № 115725 «Спосіб визначення вологості повітря радіоакустичним зондуванням атмосфери» Зареєстровано 11.12.2017. МПК G01S 13/95 (2006.1). Винахідники: Бабкін С.І., Карташов В.М., Толстих Є.Г.

13. Толстых Е.Г. Моделирование алгоритмов оптимальной линейной фильтрации при различных моделях полезного сигнала // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: материалы XVIII междунар. молодежного форума, 14-16 апреля 2014 г. Х.: ХНУРЭ, 2014. Т. 3. С. 173-174.

14. Толстых Е.Г. Обоснование выбора модели полезного сигнала при использовании алгоритмов оптимальной линейной фильтрации // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций (РТ-2014): материалы 10-й междунар. молодёжной науч.-техн. конф., 12-17 мая 2014 г. Севастополь: СевНТУ, 2014. С. 51.

15. Толстых Е.Г. Расширение возможностей систем радиоакустического зондирования атмосферы // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: материалы XIX междунар. молодежного форума, 20-22 апреля 2015 г. Х.: ХНУРЭ, 2015. Т. 3. С. 44-45.

16. Tolstykh Y. G., Babkin S. I. Antenna device for radio acoustic sensing with passive radiolocation // Proceedings of 2015 X Anniversary International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), April 21-24, 2015. Kharkiv, 2015. P. 249-250.

17. Карташов В.М., Шпоняк Р.С., Толстых Е.Г. Моделирование случайных процессов с использованием модели авторегрессии // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: матеріали 14 міжн. наук.-техн.конф., 5-10 червня 2015 р. Одеса, Хмельницький: ХНУ, 2015. С. 45-46.

18. Толстых Е.Г. Измерение горизонтального ветра при радиоакустическом зондировании атмосферы // Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті: матеріали XX міжнар. молодіжний форум, 19-21 квітня 2016 р. Х.: ХНУРЕ, 2016. Т. 3. С. 64-65.

19. Карташов В.М., Бабкин С.И., Толстых Е.Г. Измерение метеопараметров с использованием пассивной радиолокации пятна в системах РАЗ // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Матеріали 16 міжнар. наук.-техн. конференції 10-15 червня 2016 р. Одес. нац. акад. зв'язку ім. О.С. Попова. Одеса, Хмельницький: ХНУ, 2016. С. 57-58.

20. Карташов В.М., Тихонов В.А., Воронин В.В., Толстых Е.Г. Комплексирование систем дистанционного зондирования атмосферы // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та

інформаційних технологій: тези доповідей VIII Міжнародної науково-практичної конференції, 21-23 вересня 2016 р. Запоріжжя: ЗНТУ, 2016. С. 47-48.

21. Толстых Е.Г., Карташов В.М. Исследование качественных характеристик измерения параметров сигнала в системах РАЗ // 6-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», МРФ-2017. Конференция «Радиолокация. Спутниковая навигация. Радиомониторинг». Сборник научных трудов. Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, Издательство «Точка», 2017. С. 174-177.

22. Individual scans fusion in virtual knowledge base for navigation of mobile robotic group with 3D TVS / Mykhailo Ivanov, Oleg Sergiyenko, Vladimir Kartashov, Yelizaveta Tolstykh et al. // 6-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», МРФ-2017. Конференция «Радиолокация. Спутниковая навигация. Радиомониторинг». Сборник научных трудов. Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, Издательство «Точка», 2017. С. 55-60.