

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМ. ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО ”

Факультет електроніки
Кафедра електронної інженерії

До захисту допущено
Завідувач кафедри
В. І. Тимофєєв
“ ” 20__р.

Дипломна робота

освітнього рівня «бакалавр»
за спеціальністю 153 мікро- та наносистемна техніка

на тему «Підвищення енергоефективності вітрових турбін за допомогою
лідар-систем»

Виконав(ла) студент 4 курсу, групи ДМ-12

Лакуша Андрій Борисович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник к.т.н., асист. Савін К.Г.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант

(назва розділу)

(вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

Київ – 2025 року

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

Факультет електроніки
Кафедра електронної інженерії
Освітній рівень «бакалавр»
за спеціальністю 153 мікро- та наносистемна техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

В. І. Тимофєєв

“ ” 20__ р.

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Лакуша Андрій Борисович

1.Тема роботи “Підвищення енергоефективності вітрових турбін за допомогою лідар-систем”, керівник роботи: асист. , к.т.н. Савін Костянтин Георгійович,

затверджені наказом по університету від “03” червня 2025 року № 1885с

2. Строк подання студентом роботи: 12 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: літературні джерела щодо існуючих методів вимірювання швидкості вітру.

4. Зміст дипломної роботи (перелік питань, які потрібно розробити): дослідити фізичні принципи роботи Lidar-систем для вимірювання швидкості вітру; розробити структурну схему та алгоритми роботи датчика.

5. Провести моделювання роботи датчика та аналітичну перевірку.

6. Оцінити точність та надійність розробленого датчика.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов’язкових креслень, плакатів, презентацій тощо) Підготовка презентації до захисту з узагальненням результатів роботи.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання «14» квітня 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Проведення літературного огляду існуючих методів вимірювання швидкості вітру	25.04.2025	
2	Дослідити фізичні принципи роботи Lidar-систем для вимірювання швидкості вітру.	08.05.2025	
3	Розробити структурну схему та алгоритми роботи датчика.	14.05.2025	
4	Написання і відлагодження програми для моделювання датчика.	28.05.2025	
5	Провести моделювання роботи датчика та аналітичну перевірку результатів.	30.05.2025	
6	Оцінити точність та надійність розробленого датчика.	03.06.2025	
7	Оформлення дипломної роботи	05.06.2025	
8	Подача роботи на нормоконтроль	06.06.2025	

Студент



Лакуша А.Б.

Керівник роботи



Савін К.Г.

РЕФЕРАТ

LIDAR-ДАТЧИК ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ВІТРУ,
ВІТРОЕНЕРГЕТИКА, ЛАЗЕРНЕ ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРИ

Дослідити та розробити LIDAR-систему для безконтактного вимірювання швидкості вітру, що дозволяє підвищити точність, надійність та оперативність збору метеорологічних даних, необхідних для ефективного використання вітроенергетичних установок.

У першому розділі розглянуто теоретичні основи вимірювання швидкості вітру, традиційні методи, принципи роботи LIDAR-технології та порівняння з анемометричними системами.

Другий розділ присвячено фізичним основам роботи LIDAR, типам систем та їх архітектурі, а також методам формування та обробки сигналів.

У третьому розділі описано розробку конструкції датчика, вибір лазерного випромінювача і приймача, побудову оптичної схеми та алгоритмів обробки сигналів.

Четвертий розділ присвячено моделюванню роботи датчика у програмному середовищі, створенню прототипу, методиці проведення експериментів і аналізу результатів.

У п'ятому розділі розглядаються практичні аспекти застосування LIDAR-датчиків у вітроенергетиці, метеорології та аеродинаміці, а також наведено перспективи розвитку технології.

ABSTRACT

LIDAR-BASED WIND SPEED SENSOR, WIND ENERGY, LASER ATMOSPHERIC REMOTE SENSING

This study focuses on the investigation and development of a LIDAR system for non-contact wind speed measurement, aimed at improving the accuracy, reliability, and efficiency of meteorological data acquisition necessary for the effective operation of wind energy installations.

The first chapter reviews the theoretical foundations of wind speed measurement, traditional methods, the principles of LIDAR technology, and a comparison with anemometric systems.

The second chapter is dedicated to the physical principles of LIDAR operation, types of LIDAR systems, their architecture, and signal generation and processing methods.

The third chapter presents the design of the wind speed sensor, the selection of the laser emitter and photodetector, the construction of the optical scheme, and the signal processing algorithms.

The fourth chapter covers sensor modeling in software environments, prototype creation, experimental setup and measurement methodology, and analysis of experimental results.

The fifth chapter discusses practical applications of LIDAR sensors in wind energy, meteorology, and aerodynamics, as well as the prospects for further technological development.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ВІТРУ	9
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ВІТРУ	9
1.1 Визначення швидкості вітру та її важливість	9
1.2 Традиційні методи вимірювання швидкості вітру	10
1.3 Основи роботи Lidar-технології	11
1.4 Порівняння методів: Lidar vs традиційні анемометри	12
2 ПРИНЦИП РОБОТИ LIDAR ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ВІТРУ	14
2.1 Фізичні основи Lidar: лазерне випромінювання, доплерівський ефект	14
2.2 Типи Lidar-систем	19
2.3 Архітектура і компоненти Lidar-системи для вимірювання вітру	24
2.4 Особливості побудови сигналу і його обробки	31
3 РОЗРОБКА ДАТЧИКА ШВИДКОСТІ ВІТРУ НА ОСНОВІ LIDAR	35
3.1 Вимоги до датчика швидкості вітру	35
3.2 Вибір лазерного джерела і фотоприймача	37
3.3 Проектування оптичної схеми датчика	38
3.4 Розробка алгоритмів обробки сигналів для визначення швидкості вітру	39
3.5 Інтерфейс і програмне забезпечення	40
4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА РОБОТИ ДАТЧИКА	41
4.1 Моделювання роботи датчика у програмному середовищі	41
4.2 Створення програмної моделі датчика	42
4.3 Аналіз результатів моделювання, оцінка точності, надійності та обмежень датчика	43
5 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ	47
5.1 Застосування Lidar-датчиків у вітроенергетиці, метеорології, аеродинаміці	47
5.2 Переваги і недоліки використання Lidar для вимірювання швидкості вітру	49

	7
5.3 Можливості інтеграції з іншими системами моніторингу	50
5.4 Перспективи вдосконалення і розвитку технології	51
ВИСНОВКИ	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	60
ДОДАТОК А	62

ВСТУП

Сучасний розвиток відновлюваної енергетики та підвищення вимог до точності метеорологічних вимірювань зумовлюють необхідність створення високоточних засобів вимірювання швидкості вітру. Традиційні анемометри мають ряд обмежень, пов'язаних з механічними компонентами, інерційністю та впливом турбулентності.

Lidar-технологія (Light Detection and Ranging) представляє перспективний напрямок розвитку безконтактних методів вимірювання швидкості вітру. Використання доплерівського ефекту у лазерному випромінюванні дозволяє забезпечити високу точність та швидкодію вимірювань без механічних рухомих частин.

Актуальність роботи обумовлена потребою у створенні надійних, точних та швидкодіючих датчиків швидкості вітру для застосування у вітроенергетиці, метеорології та аеродинамічних дослідженнях.

Мета роботи - розробка датчика швидкості вітру на основі Lidar-технології з підвищеною точністю та надійністю вимірювань.

Завдання роботи:

1. проаналізувати існуючі методи вимірювання швидкості вітру та обґрунтувати переваги Lidar-технології;
2. дослідити фізичні принципи роботи Lidar-систем для вимірювання швидкості вітру;
3. розробити структурну схему та алгоритми роботи датчика;
4. провести моделювання роботи датчика та аналітичну перевірку;
5. оцінити точність та надійність розробленого датчика.

Об'єкт дослідження - процес вимірювання швидкості вітру за допомогою лазерного випромінювання.

Предмет дослідження - датчик швидкості вітру на основі Lidar-технології.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ВІТРУ

1.1 Визначення швидкості вітру та її важливість

Швидкість вітру є одним з метеорологічних параметрів, що характеризує горизонтальне переміщення повітряних мас відносно земної поверхні. Цей параметр вимірюється в метрах за секунду (м/с), кілометрах за годину (км/год) або вузлах і відіграє критичну роль у численних галузях людської діяльності.

Значення точного вимірювання швидкості вітру важко переоцінити в контексті сучасних викликів енергетики та кліматології. У відновлюваній енергетиці швидкість вітру є основним фактором, що визначає ефективність роботи вітрових електростанцій. Навіть невеликі похибки в прогнозуванні можуть призвести до значних економічних втрат через неточне планування виробництва електроенергії.

Авіаційна галузь також критично залежить від точних даних про швидкість вітру. Безпека зльоту та посадки літаків, планування маршрутів польотів та розрахунок витрат палива безпосередньо пов'язані з якістю вітрових вимірювань. Значеннями є дані про зсувні вітри та турбулентність, які можуть створювати небезпечні умови для авіації.

Сільське господарство та екологічний моніторинг також потребують надійних даних про швидкість вітру для оптимізації обробки полів, прогнозування розповсюдження забруднень та вивчення мікроклімату. В умовах зміни клімату розуміння вітрових патернів стає особливо актуальним для адаптації аграрних практик.

1.2 Традиційні методи вимірювання швидкості вітру

Протягом століть людство розробляло різноманітні методи вимірювання швидкості вітру, кожен з яких мав свої переваги та обмеження. Найпоширенішими традиційними приладами є чашкові анемометри, які працюють за принципом обертання чашок під дією вітрового потоку. Швидкість обертання прямо пропорційна швидкості вітру, що дозволяє калібрувати прилад для отримання точних вимірювань.

Пропелерні анемометри представляють іншу категорію механічних приладів, де вимірювання базується на швидкості обертання пропелера, орієнтованого за напрямком вітру. Ці прилади часто поєднуються з флюгерами для одночасного визначення напрямку вітру, що робить їх універсальними інструментами для метеорологічних станцій.

Термоанемометри використовують принцип охолодження нагрітого елемента потоком повітря. Швидкість охолодження корелює зі швидкістю вітру, що дозволяє проводити високоточні вимірювання, особливо при низьких швидкостях вітру. Однак ці прилади чутливі до температурних змін навколишнього середовища та потребують регулярної калібровки.

Ультразвукові анемометри працюють за принципом вимірювання часу проходження ультразвукових хвиль між передавачами та приймачами. Вітер впливає на швидкість поширення звуку, що дозволяє визначити як швидкість, так і напрямок вітру. Ці прилади не мають рухомих частин, що робить їх надійними в екстремальних умовах.

Незважаючи на широке використання, традиційні методи мають суттєві обмеження. Механічні анемометри схильні до зносу та потребують регулярного обслуговування, особливо в агресивних кліматичних умовах. Їх інерційність не дозволяє фіксувати швидкі зміни швидкості вітру, що особливо критично при дослідженні турбулентності.

1.3 Основи роботи Lidar-технології

Технологія Light Detection and Ranging (Lidar) революціонізувала підходи до дистанційного зондування атмосфери, включаючи вимірювання швидкості вітру. В основі роботи вітрових лідарів лежить ефект Доплера, який проявляється при взаємодії лазерного випромінювання з аерозольними частинками, що рухаються разом з повітряними масами.

Принцип роботи базується на випромінюванні когерентного лазерного пучка в атмосферу та аналізі зворотно розсіяного випромінювання. Коли лазерний промінь зустрічає аерозольні частинки, частина світла розсіюється назад до приймача. Якщо частинки рухаються разом з вітром, частота зворотно розсіяного світла зміщується відповідно до ефекту Доплера.

Величина доплерівського зсуву частоти прямо пропорційна радіальній компоненті швидкості вітру вздовж осі лазерного променя. Математично це виражається формулою: $\Delta f = 2v \cdot \cos\theta / \lambda$, де Δf - доплерівський зсув частоти, v - швидкість вітру, θ - кут між напрямком вітру та лазерним променем, λ - довжина хвилі лазера.

Сучасні вітрові лідари використовують різні конфігурації сканування для отримання тривимірної картини вітрового поля. Конічне сканування дозволяє визначити горизонтальні та вертикальні компоненти швидкості вітру на різних висотах. Лінійне сканування забезпечує детальний профіль вітру вздовж певного напрямку.

Ключовою перевагою лідарної технології є можливість проведення вимірювань на значних відстанях без фізичного контакту з досліджуваним середовищем. Дальність вимірювань може сягати кількох кілометрів, що дозволяє отримувати дані про вітрові умови в недоступних для традиційних приладів зонах.

1.4 Порівняння методів: Lidar vs традиційні анемометри

Порівняльний аналіз лідарних та традиційних методів вимірювання швидкості вітру виявляє кардинальні відмінності в підходах та можливостях цих технологій. Суттєвою перевагою лідарних систем є їх здатність проводити дистанційні вимірювання без необхідності розміщення датчиків безпосередньо в точці вимірювання.

Традиційні анемометри забезпечують точкові вимірювання в конкретному місці розташування приладу, що обмежує їх можливості в дослідженні просторової варіабельності вітрових полів. Лідарні системи натомість можуть одночасно вимірювати швидкість вітру в множині точок вздовж траєкторії лазерного променя, створюючи детальний профіль вітрових умов.

Часова роздільна здатність також суттєво відрізняється між цими технологіями. Механічні анемометри мають інерційність, пов'язану з масою рухомих частин, що обмежує їх здатність реагувати на швидкі зміни швидкості вітру. Лідарні системи можуть працювати з частотою вимірювань до декількох герц, забезпечуючи детальний аналіз турбулентних процесів.

Точність вимірювань залежить від конкретних умов та конфігурації обладнання. Традиційні анемометри після належної калібровки можуть забезпечувати похибку менше 1% при оптимальних умовах. Лідарні системи досягають схожої точності, але їх ефективність може знижуватися при несприятливих атмосферних умовах, таких як дощ, туман або низька концентрація аерозольних частинок.

Експлуатаційні характеристики кардинально відрізняються між цими технологіями. Традиційні анемометри потребують регулярного технічного обслуговування, включаючи заміну підшипників, очищення від забруднень та калібровку. Їх робота може порушуватися внаслідок обледеніння, накопичення пилу або механічних пошкоджень.

Лідарні системи мають значно менше рухомих частин, що робить їх надійними в довгостроковій перспективі. Однак вони вимагають складнішого електронного обладнання та потребують захисту оптичних компонентів від забруднення та атмосферних впливів.

Економічні аспекти також відіграють роль у виборі технології. Початкові інвестиції в лідарні системи значно вищі порівняно з традиційними анемометрами, але нижчі вимоги до обслуговування та можливість дистанційної роботи можуть компенсувати ці витрати в довгостроковій перспективі.

Гнучкість застосування є ще однією суттєвою перевагою лідарних технологій. Можливість швидкого переналаштування параметрів сканування дозволяє адаптувати систему до різних дослідницьких завдань без фізичного переміщення обладнання. Це особливо цінно при вивченні складних метеорологічних явищ або оптимізації роботи вітрових електростанцій.

2 ПРИНЦИП РОБОТИ LIDAR ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ВІТРУ

2.1 Фізичні основи Lidar: лазерне випромінювання, доплерівський ефект

Фізичну основу роботи Lidar для вимірювання швидкості вітру становить взаємодія когерентного лазерного випромінювання з аеросольними частинками в атмосфері та використання доплерівського ефекту для визначення швидкості їх руху. Унікальні властивості лазерного випромінювання роблять можливим створення високоточних систем дистанційного зондування атмосфери.

Лазерне випромінювання характеризується трьома ключовими властивостями: високою когерентністю, монохроматичністю та спрямованістю. Когерентність являє собою упорядкованість хвильового процесу в просторі та часі, що означає постійність фазових співвідношень між різними частинами хвильового фронту. Ця властивість забезпечує стабільність фази випромінювання протягом тривалого часу, що потрібно для точного вимірювання доплерівського зсуву частоти при взаємодії з рухомими об'єктами.

Просторова когерентність лазерного променя дозволяє формувати високоспрямовані пучки з дуже малою кутовою розбіжністю, що забезпечує концентрацію енергії в малому тілесному куті та дозволяє проводити вимірювання на великих відстанях. Часова когерентність характеризується довжиною когерентності, яка для лазерів може сягати десятків метрів, що значно перевищує аналогічний параметр для некогерентних джерел світла.

Монохроматичність лазерного випромінювання означає, що лазер випромінює світло з дуже вузькою спектральною лінією, ширина якої може становити частки нанометра. Ця властивість дозволяє точно детектувати малі зміни частоти, викликані доплерівським ефектом, на фоні основної несучої

частоти. Високий ступінь монохроматичності досягається завдяки процесу стимульованого випромінювання в активному середовищі лазера та селективним властивостям оптичного резонатора.

При поширенні лазерного променя в атмосфері відбувається його взаємодія з різними компонентами повітря - молекулами основних газів (азоту, кисню, аргону), парами води, краплинками туману та хмар, пиловими частинками та іншими аеросолями природного та антропогенного походження. Ця взаємодія включає складний комплекс фізичних процесів: поглинання, розсіювання та заломлення електромагнітного випромінювання.

Поглинання лазерного випромінювання в атмосфері відбувається внаслідок резонансної взаємодії фотонів з молекулами газів, що призводить до переходу молекул у збуджений стан. Інтенсивність поглинання залежить від довжини хвилі лазера та спектральних характеристик атмосферних компонентів. Для більшості лідарних систем вибираються довжини хвиль у вікнах прозорості атмосфери, де поглинання мінімальне.

Розсіювання світла в атмосфері відбувається на частинках різного розміру та має різну фізичну природу залежно від співвідношення між розміром частинки та довжиною хвилі випромінювання. Релеївське розсіювання домінує при взаємодії з молекулами газів та дрібними частинками, розмір яких значно менший за довжину хвилі. Це розсіювання має характерну залежність від довжини хвилі λ^{-4} , що пояснює синій колір неба.

Розсіювання Мі відбувається на частинках, розмір яких порівнянний з довжиною хвилі лазерного випромінювання або перевищує її. Саме цей тип розсіювання є основним для роботи вітрових лідарів, оскільки аеросольні частинки відповідного розміру широко представлені в атмосфері та рухаються разом з повітряними масами, слугуючи природними трасерами вітрового потоку.

Для вимірювання швидкості вітру найбільше значення має розсіювання Мі на аеросольних частинках, розмір яких порівнянний з довжиною хвилі

лазерного випромінювання. Ці частинки включають пилові зерна, кристали солі морського походження, продукти згоряння, пилок рослин та інші природні та штучні утворення розміром від десятих часток до декількох мікрометрів.

Головною властивістю аеросольних частинок є їх здатність точно слідувати за рухом повітряних мас. Для частинок субмікронного та мікронного розміру час релаксації швидкості (час, за який частинка досягає швидкості навколишнього потоку) складає частки секунди, що значно менше характерних часів зміни вітрових умов. Це означає, що швидкість руху аеросольних частинок практично точно відповідає швидкості вітру.

Концентрація аеросольних частинок в атмосфері варіює в широких межах залежно від географічного положення, сезону року, метеорологічних умов та антропогенної активності. У континентальних регіонах концентрація зазвичай вища через наявність пилових частинок та продуктів людської діяльності. Над океанами основним джерелом аеросолів є морська сіль, що утворюється при випаровуванні морських бризок.

Вертикальний розподіл аеросольних частинок також нерівномірний. Найвища концентрація спостерігається в приземному шарі атмосфери, де знаходяться основні джерела аеросолів. З висотою концентрація зменшується експоненціально, що може впливати на ефективність лідарних вимірювань на великих висотах.

Доплерівський ефект, відкритий австрійським фізиком Крістіаном Доплером у 1842 році, полягає в зміні частоти хвиль при відносному русі джерела випромінювання та спостерігача. У випадку лідарних систем цей ефект виникає при розсіюванні лазерного випромінювання на рухомих аеросольних частинках.

Фізична сутність доплерівського ефекту полягає в тому, що при русі розсіювальної частинки відносно лазерного променя змінюється ефективна частота випромінювання, яку "бачить" частинка, а також частота розсіяного світла, яку реєструє приймач. Якщо частинка рухається назустріч лазерному

променю, вона сприймає випромінювання з підвищеною частотою внаслідок доплерівського ефекту, а розсіяне нею світло також зазнає додаткового зсуву частоти при поверненні до приймача.

При русі частинки від джерела лазерного випромінювання відбувається протилежний процес - частота розсіяного світла зменшується відносно частоти падаючого випромінювання. Величина зсуву частоти прямо пропорційна компоненті швидкості частинки вздовж напрямку поширення лазерного променя.

Математично доплерівський зсув частоти для моностатичної схеми роботи лідара (коли передавач і приймач знаходяться в одному місці або розташовані дуже близько один до одного) описується виразом:

$$fd = (2 \times vr) / \lambda$$

де fd - доплерівська частота (різниця між частотою розсіяного та падаючого випромінювання), vr - радіальна компонента швидкості частинки (проекція вектора швидкості на напрямок лазерного променя), λ - довжина хвилі лазерного випромінювання в вакуумі.

Коефіцієнт 2 у формулі з'являється внаслідок подвійного доплерівського зсуву: один раз при поширенні випромінювання від лазера до частинки, другий раз при поверненні розсіяного світла від частинки до приймача. Цей ефект подвоєння є характерною особливістю моностатичних схем та відрізняє їх від бістатичних конфігурацій.

Радіальна швидкість безпосередньо пов'язана з вектором швидкості вітру геометричним співвідношенням:

$$vr = v \times \cos(\theta)$$

де v - модуль швидкості вітру, θ - кут між напрямком вітру та напрямком лазерного променя (кут візування).

Ця залежність показує, що лідарна система вимірює лише радіальну компоненту швидкості вітру, тобто ту частину швидкості, яка спрямована вздовж осі лазерного променя. Для визначення повного вектора швидкості

вітру необхідно проводити вимірювання в декількох напрямках або використовувати системи з кількома променями.

Практичне вимірювання доплерівського зсуву частоти в лідарних системах вимагає використання складних методів обробки сигналів. Оскільки доплерівські зсуви зазвичай складають лише частки від основної частоти лазерного випромінювання, пряме вимірювання частоти розсіяного світла технічно неможливе з необхідною точністю.

Замість цього використовується гетеродинний метод детектування, при якому розсіяне випромінювання змішується з опорним сигналом (зазвичай частиною початкового лазерного випромінювання), утворюючи биття на частоті, рівній доплерівському зсуву. Ця низькочастотна компонента може бути точно виміряна за допомогою електронних методів.

Спектральна обробка отриманого сигналу дозволяє не лише виміряти середню доплерівську частоту, але й проаналізувати розподіл швидкостей у вимірюваному об'ємі атмосфери. Ширина доплерівського спектра несе інформацію про турбулентність та неоднорідність вітрового поля, що робить лідарні системи потужним інструментом для дослідження динаміки

Точність лідарних вимірювань швидкості вітру суттєво залежить від атмосферних умов та концентрації аеросольних частинок. У чистій атмосфері з низькою концентрацією аеросолів інтенсивність зворотно розсіяного сигналу може бути недостатньою для надійних вимірювань. Навпаки, при високій концентрації частинок або в умовах туману та дощу може відбуватися багаторазове розсіювання, що ускладнює інтерпретацію результатів.

Температурні флуктуації атмосфери також впливають на поширення лазерного випромінювання через зміни показника заломлення повітря. Ці ефекти можуть призводити до додаткових фазових зсувів та спотворень лазерного пучка, що вимагає врахування при калібровці лідарних систем.

Вологість повітря впливає на властивості аеросольних частинок, змінюючи їх розмір та показник заломлення. Гігроскопічні частинки можуть

значно збільшуватися в розмірах при підвищенні вологості, що змінює їх здатність до розсіювання лазерного випромінювання та може впливати на точність доплерівських вимірювань.

2.2 Типи Lidar-систем

Існує кілька основних типів Lidar-систем для вимірювання швидкості вітру, що відрізняються способом модуляції лазерного випромінювання, методами обробки сигналів та архітектурою системи. Кожен тип має свої унікальні характеристики, переваги та обмеження, що роблять їх оптимальними для різних застосувань.

Доплерівські Lidar системи прямого детектування представляють найпростішу архітектуру серед вітрових лідарів та використовують безперервне лазерне випромінювання для зондування атмосфери. Принцип роботи цих систем базується на прямому вимірюванні доплерівського зсуву частоти відбитого від аеросольних частинок сигналу без використання складних схем модуляції або гетеродинного детектування.

В основі роботи лежить монохроматичне лазерне випромінювання, яке спрямовується в атмосферу та взаємодіє з рухомими аеросольними частинками. Відбитий сигнал реєструється високочутливими фотодетекторами, а доплерівський зсув частоти визначається методами спектрального аналізу. Ключовою особливістю таких систем є необхідність у достатньо інтенсивному зворотно розсіяному сигналі для надійного детектування доплерівської частоти.

Системи прямого детектування забезпечують високу точність вимірювань завдяки простоті схеми та мінімальній кількості джерел похибок. Швидкодія таких систем також висока, оскільки обробка сигналу не вимагає складних алгоритмів демодуляції. Однак їх основним обмеженням є відносно невелика дальність роботи, яка зазвичай не перевищує кількох сотень метрів через вимогу до високої інтенсивності відбитого сигналу.

Таблиця 2.1 - Характеристики доплерівських Lidar систем прямого детектування

Параметр	Значення	Примітки
Тип випромінювання	Безперервне монохроматичне	Стабільна частота
Дальність вимірювання	50-1000 м	Залежить від концентрації аеросолів
Точність швидкості	$\pm 0.1-0.3$ м/с	При оптимальних умовах
Частота вимірювань	1-10 Гц	Висока швидкодія
Просторова роздільність	10-50 м	Вздовж променя
Споживана потужність	10-50 Вт	Відносно низька
Складність системи	Низька	Проста архітектура
Вимоги до аеросолів	Висока концентрація	Критичний фактор

Coherent Wave Lidar системи використовують безперервне когерентне випромінювання з можливістю частотної модуляції та представляють значний крок вперед у технології вітрових лідарів. Ключовою особливістю цих систем є застосування гетеродинного детектування, при якому відбитий сигнал змішується з опорним сигналом (зазвичай частиною початкового лазерного випромінювання), що дозволяє виділити доплерівську частоту з високою чутливістю.

Принцип гетеродинного детектування полягає в тому, що два когерентних сигнали з близькими частотами при змішуванні утворюють биття на різницевій частоті. У випадку CW лідарів цією різницевою частотою є саме доплерівський зсув, що значно спрощує його вимірювання та підвищує

точність детектування. Такий підхід дозволяє працювати з набагато слабшими сигналами порівняно з системами прямого детектування.

Гетеродинне детектування забезпечує високу чутливість системи, що дозволяє проводити вимірювання навіть при низькій концентрації аеросольних частинок в атмосфері. Це потрібно для морських застосувань або в умовах чистої атмосфери, де традиційні методи можуть бути неефективними. Крім того, когерентні системи менш чутливі до фонового освітлення та можуть працювати в денний час без значного зниження якості вимірювань.

Таблиця 2.2 - Характеристики Coherent Wave Lidar систем

Параметр	Значення	Примітки
Тип випромінювання	Безперервне когерентне	З частотною модуляцією
Дальність вимірювання	500-2000 м	Висока чутливість
Точність швидкості	$\pm 0.05-0.2$ м/с	Прецизійні вимірювання
Частота вимірювань	0.5-5 Гц	Залежить від часу накопичення
Просторова роздільність	30-100 м	Конфігурується
Споживана потужність	50-200 Вт	Включає систему охолодження
Складність системи	Середня	Гетеродинне детектування
Вимоги до аеросолів	Низькі	Працює при слабкому розсіюванні

Pulsed Lidar системи використовують імпульсне лазерне випромінювання з високою піковою потужністю та представляють

універсальний тип вітрових лідарів. Фундаментальною перевагою імпульсних систем є можливість одночасного вимірювання як швидкості, так і відстані до розсіювачів, що досягається через аналіз часу затримки відбитого імпульсу.

Принцип роботи базується на випромінюванні коротких потужних лазерних імпульсів тривалістю від наносекунд до мікросекунд. Час, що минає між випромінюванням імпульсу та реєстрацією відбитого сигналу, прямо пропорційний відстані до розсіювача. Одночасно аналіз доплерівського зсуву частоти дозволяє визначити радіальну швидкість частинок на цій відстані.

Ця здатність до просторового розділення робить імпульсні лідари ідеальними для профілювання швидкості вітру на різних висотах та створення тривимірних карт вітрового поля. Система може одночасно вимірювати швидкість вітру в десятках або сотнях точок вздовж траєкторії променя, створюючи детальний вертикальний профіль атмосферних рухів.

Висока пікова потужність імпульсів дозволяє досягати значно більших дальностей вимірювання порівняно з системами безперервного випромінювання. Це робить імпульсні лідари особливо цінними для метеорологічних застосувань, моніторингу великих вітрових електростанцій та авіаційної безпеки, де потрібні дані про вітрові умови на великих відстанях та висотах.

Таблиця 2.3 - Характеристики Pulsed Lidar систем

Параметр	Значення	Примітки
Тип випромінювання	Імпульсне	Висока пікова потужність
Дальність вимірювання	1000-10000 м	Найбільша дальність
Точність швидкості	$\pm 0.1-0.5$ м/с	Залежить від відстані
Частота вимірювань	0.1-2 Гц	Обмежена енергією імпульсу
Просторова роздільність	15-100 м	Висока вздовж променя
Кількість висотних рівнів	50-200	Одночасне профілювання

Споживана потужність	100-1000 Вт	Високоенергетичні імпульси
Складність системи	Висока	Складна імпульсна електроніка

Frequency Modulated Continuous Wave Lidar системи представляють найсучаснішу технологію, що поєднує переваги неперервного випромінювання та часового розділення сигналів. Ключовою особливістю FMCW лідарів є лінійна модуляція частоти лазерного випромінювання в часі, що створює унікальну можливість одночасного високоточного вимірювання як відстані, так і швидкості.

Принцип роботи базується на тому, що частота лазера періодично змінюється за лінійним законом, наприклад, у вигляді пілкоподібного сигналу. Коли модульоване випромінювання відбивається від віддаленого об'єкта та повертається до приймача з затримкою, його миттєва частота відрізняється від миттєвої частоти випромінюваного сигналу. Ця різниця частот несе інформацію про відстань до об'єкта.

Одночасно доплерівський зсув, викликаний рухом розсіювачів, додається до частотної різниці, пов'язаної з відстанню. Використовуючи різну частоту модуляції на прямому та зворотному ходах пілкоподібного сигналу, можна розділити вклади відстані та швидкості у загальний частотний зсув.

FMCW технологія дозволяє досягти винятково високої роздільної здатності як за відстанню, так і за швидкістю, що робить ці системи ідеальними для детального дослідження структури вітрового поля. Крім того, безперервний характер випромінювання забезпечує високу енергетичну ефективність та можливість тривалої роботи без перегріву.

Таблиця 2.4 - Характеристики FMCW Lidar систем

Параметр	Значення	Примітки
Тип випромінювання	Неперервне з частотною модуляцією	Лінійна ЧМ

Дальність вимірювання	200-5000 м	Конфігурується
-----------------------	------------	----------------

Продовження таблиці 2.4

Точність швидкості	$\pm 0.02-0.1$ м/с	Найвища точність
Точність відстані	$\pm 0.5-2$ м	Висока роздільність
Частота вимірювань	1-20 Гц	Гнучка конфігурація
Просторова роздільність	5-30 м	Найкраща роздільність
Споживана потужність	20-100 Вт	Енергоефективність
Складність системи	Дуже висока	Складна модуляція та обробка
Універсальність	Найвища	Поєднує переваги всіх типів

2.3 Архітектура і компоненти Lidar-системи для вимірювання вітру

Типова архітектура Lidar-системи для вимірювання швидкості вітру представляє собою складний комплекс взаємопов'язаних підсистем, кожна з яких виконує специфічні функції та забезпечує роботу системи в цілому. Інтеграція цих підсистем визначає загальну продуктивність, точність та надійність лідарної системи.

Лазерна підсистема є серцем всієї системи та визначає основні характеристики вимірювань. Для сучасних систем вимірювання швидкості вітру найчастіше використовуються напівпровідникові лазери інфрачервоного діапазону з довжиною хвилі 1,55 мікрометра. Вибір цієї довжини хвилі обумовлений кількома факторами.

Перш за все, випромінювання з довжиною хвилі 1,55 мкм належить до так званого "безпечного для очей" діапазону. На цій довжині хвилі роговиця та кришталик ока сильно поглинають випромінювання, що запобігає його

проникненню до сітківки та виключає можливість її пошкодження. Це дозволяє використовувати значно вищі рівні потужності лазера без порушення норм безпеки.

Атмосферне поширення на довжині хвилі 1,55 мкм також має оптимальні характеристики. Цей діапазон знаходиться у вікні прозорості атмосфери, де поглинання парами води та іншими газами мінімальне. Одночасно на цій довжині хвилі ефективність розсіювання Мі на аеросольних частинках залишається достатньо високою для надійного детектування сигналу.

Лазер повинен забезпечувати виняткову стабільність частоти, оскільки навіть мінімальні флуктуації можуть призвести до значних похибок у вимірюванні доплерівського зсуву. Сучасні напівпровідникові лазери з розподіленим зворотним зв'язком (DFB) здатні забезпечувати стабільність частоти на рівні кількох мегагерц протягом тривалого часу.

Таблиця 2.5 - Характеристики лазерної підсистеми

Параметр	Типові значення	Вимоги та особливості
Довжина хвилі	1,54-1,57 мкм	Безпечність для очей
Вихідна потужність	1-100 мВт (CW), 1-100 Вт (імпульс)	Залежить від типу системи
Стабільність частоти	$\pm 1-10$ МГц	Критична для точності
Ширина лінії	< 1 МГц	Когерентність
Час життя	> 10000 годин	Надійність
Діапазон робочих температур	-20°C до $+60^{\circ}\text{C}$	Стабілізація потрібна
Швидкість модуляції	До 100 МГц	Для FMCW систем
Ефективність	10-40%	Енергоспоживання

Оптична підсистема відповідає за формування, направлення та фокусування лазерного променя, а також за збирання та направлення відбитого від атмосфери світла до детекторної системи. Ефективність роботи всієї лідарної системи критично залежить від якості оптичної підсистеми.

Телескопічна система виконує подвійну функцію: формування вихідного лазерного пучка з необхідними характеристиками та збирання максимальної кількості розсіяного атмосферою світла. У сучасних лідарах використовуються як рефракторні (лінзові), так і рефлекторні (дзеркальні) оптичні схеми, кожна з яких має свої переваги.

Рефракторні телескопи забезпечують високу оптичну якість та мінімальні втрати світла, але обмежені розміром лінз та їх вагою. Рефлекторні системи дозволяють створювати телескопи великого діаметра з відносно невисокою вагою, але вимагають складного юстування та можуть мати дещо нижчу оптичну ефективність через наявність вторинного дзеркала.

Кут розбіжності вихідного лазерного променя є параметром, що визначає просторову роздільну здатність системи та ефективність збирання сигналу. Менший кут розбіжності забезпечує кращу концентрацію енергії та більшу дальність, але зменшує об'єм зондування на близьких відстанях.

Ефективність збирання відбитого сигналу залежить від діаметра приймальної апертури телескопа та якості оптичних елементів. Збільшення діаметра апертури квадратично покращує співвідношення сигнал/шум, але призводить до збільшення розмірів, ваги та вартості системи.

Таблиця 2.6 - Характеристики оптичної підсистеми

Параметр	Типові значення	Вплив на систему
Діаметр апертури	50-200 мм	Чутливість системи
Кут розбіжності	0,1-2 мрад	Просторова роздільність
Фокусна відстань	200-1000 мм	Компактність
Оптична ефективність	70-95%	Втрати сигналу

Поле зору приймача	1-10 мрад	Збирання сигналу
Коефіцієнт блокування	<5%	Для рефлекторів
Якість поверхні	$\lambda/10$ - $\lambda/20$	Розсіювання
Покриття	AR/HR	Відбивання

Система сканування забезпечує можливість направлення лазерного променя в різних напрямках для створення тривимірної картини поля швидкостей вітру. Ефективність сканування визначає можливості системи щодо просторового покриття та часової роздільності вимірювань.

Механічні скануючі системи використовують рухомі дзеркала, призми або повертання всього оптичного блоку для зміни напрямку променя. Дзеркальні системи забезпечують високу швидкість сканування та точність позиціонування, але можуть бути чутливими до вібрацій та зносу механічних частин.

Призматичні сканери використовують обертання призм для відхилення променя та можуть забезпечувати безперервне конічне сканування. Такі системи особливо ефективні для створення циліндричних або сферичних схем сканування, необхідних для визначення тривимірного вектора швидкості вітру.

Електрооптичні системи сканування використовують керовані оптичні елементи без механічних рухомих частин. Хоча такі системи мають обмежені кути сканування, вони забезпечують виняткову швидкість та надійність роботи.

Швидкість сканування визначає часову роздільність системи та її здатність відслідковувати швидкозмінні процеси в атмосфері. Для метеорологічних застосувань зазвичай достатньо швидкості сканування кілька градусів за секунду, тоді як для дослідження турбулентності можуть знадобитися значно вищі швидкості.

Таблиця 2.7 - Характеристики системи сканування

Параметр	Типові значення	Застосування
Кут сканування	$\pm 30^\circ$ до $\pm 180^\circ$	Покриття простору
Швидкість сканування	1-100°/с	Часова роздільність

Продовження таблиці 2.7

Точність позиціонування	0,01-0,1°	Якість даних
Час позиціонування	10-1000 мс	Продуктивність
Повторюваність	<0,05°	Стабільність
Тип приводу	Крокові двигуни, серводвигуни	Точність/швидкість
Схема сканування	Конічна, растрова, секторна	Завдання
Маса рухомих частин	0,1-5 кг	Швидкодія

Підсистема детектування відповідає за перетворення оптичного сигналу в електричний та його первинну обробку. Ефективність цієї підсистеми визначає чутливість всієї лідарної системи та мінімальну швидкість вітру, яку можна надійно виміряти.

Фотодетектори є ключовим елементом підсистеми детектування. Для інфрачервоного діапазону 1,55 мкм використовуються спеціалізовані напівпровідникові фотодіоди на основі індій-галій-арсеніду (InGaAs). Ці детектори мають високу квантову ефективність на робочій довжині хвилі та низький рівень шумів.

Лавинні фотодіоди (APD) забезпечують внутрішнє підсилення сигналу завдяки лавинному ефекту, що дозволяє детектувати дуже слабкі оптичні сигнали. Однак вони вимагають стабілізованого високого напруження живлення та контролю температури для мінімізації шумів.

Для когерентного детектування відбитий сигнал змішується з опорним сигналом від того ж лазера за допомогою оптичного змішувача. Цей процес

дозволяє перенести високочастотний оптичний сигнал у радіочастотний діапазон, де його можна ефективно обробляти електронними методами.

Попередні підсилювачі мають значення для збереження співвідношення сигнал/шум. Вони повинні мати дуже низький рівень власних шумів та високу смугу пропускання для обробки швидкозмінних сигналів. Часто використовуються малошумні операційні підсилювачі або спеціалізовані мікросхеми.

Аналогові фільтри виконують первинну фільтрацію сигналу, усуваючи високочастотні шуми та запобігаючи накладанню спектрів при цифровій обробці. Смуга пропускання фільтрів визначається максимальною очікуваною доплерівською частотою.

Система обробки сигналів виконує складний комплекс операцій для виділення доплерівської частоти з зашумленого сигналу та розрахунку швидкості вітру. Ефективність алгоритмів обробки визначає точність вимірювань та можливість роботи в складних атмосферних умовах.

Аналого-цифрове перетворення є першим етапом цифрової обробки. Високошвидкісні АЦП з розрядністю 12-16 біт та частотою дискретизації до сотень мегагерц забезпечують точне перетворення аналогового сигналу в цифровий формат без втрати інформації.

Швидке перетворення Фур'є (FFT) є основним математичним інструментом для спектрального аналізу доплерівського сигналу. Алгоритми FFT дозволяють ефективно обчислювати спектральну щільність потужності сигналу та визначати частоти з максимальною амплітудою.

Цифрові фільтри застосовуються для усунення шумів та виділення корисного сигналу. Використовуються різні типи фільтрів: фільтри високих частот для усунення постійної складової, смугові фільтри для виділення доплерівського сигналу та адаптивні фільтри для роботи в мінливих умовах.

Алгоритми обробки зашумлених сигналів включають методи накопичення сигналу, кореляційну обробку та статистичні методи оцінки

параметрів. Ці алгоритми дозволяють виділяти слабкі доплерівські сигнали на фоні шумів та завад.

Спектральна обробка включає не лише визначення центральної частоти доплерівського сигналу, але й аналіз ширини спектральної лінії, що несе інформацію про турбулентність атмосфери. Використовуються методи моментів спектра, максимальної правдоподібності та інші статистичні підходи.

Блок управління координує роботу всіх підсистем лідара, забезпечує синхронізацію операцій, керує процесами сканування та інтегрує дані для формування остаточних результатів вимірювань. Цей блок також відповідає за взаємодію з зовнішніми системами та користувачем.

Мікропроцесорна система управління виконує реальночасове керування всіма функціями лідара. Сучасні системи використовують потужні процесори цифрової обробки сигналів (DSP) або програмовані логічні матриці (FPGA) для забезпечення необхідної швидкодії обробки.

Система синхронізації забезпечує точну координацію між випромінюванням лазерних імпульсів, позиціонуванням сканера та процесами збору даних. Високоточні генератори тактових частот та схеми фазової автопідстройки частоти забезпечують стабільність синхронізації.

Програмне забезпечення включає алгоритми керування апаратурою, обробки сигналів, калібровки системи та представлення результатів. Модульна архітектура програмного забезпечення дозволяє легко адаптувати систему до різних застосувань та оновлювати алгоритми.

Інтерфейси зв'язку забезпечують передачу даних до зовнішніх систем моніторингу, баз даних та систем прогнозування. Використовуються стандартні протоколи зв'язку Ethernet, RS-485, CAN та безпроводні технології.

Система діагностики та моніторингу безперервно контролює стан всіх підсистем, виявляє несправності та забезпечує автоматичне відновлення роботи. Це потрібно для автономних систем, що працюють без постійного обслуговування.

2.4 Особливості побудови сигналу і його обробки

Сигнал у Lidar-системі для вимірювання швидкості вітру формується в результаті складної взаємодії лазерного випромінювання з атмосферою та її компонентами. Процес формування сигналу включає множину фізичних явищ, починаючи від поширення когерентного світла в турбулентному середовищі до розсіювання на мікроскопічних частинках та повернення частини енергії назад до приймача. Відбитий сигнал містить цінну інформацію про швидкість вітру у вигляді доплерівського зсуву частоти, але одночасно піддається впливу різноманітних атмосферних факторів, що значно ускладнює його обробку та інтерпретацію.

Потужність сигналу, який повертається до лідарної системи після розсіювання в атмосфері, описується фундаментальним рівнянням лідара, що враховує всі основні фактори, які впливають на поширення світла в атмосфері:

$$P(R) = (P_0 \times \beta(R) \times \eta \times A) / (R^2) \times \exp(-2 \int_0^R \alpha(r) dr)$$

де:

- $P(R)$ - потужність відбитого сигналу з відстані R
- P_0 - потужність переданого лазерного сигналу
- $\beta(R)$ - коефіцієнт зворотного розсіювання на відстані R
- η - загальна ефективність оптичної системи
- A - ефективна площа приймального телескопа
- $\alpha(r)$ - коефіцієнт загасання на відстані r
- R - відстань до об'єму розсіювання

Це рівняння демонструє складну залежність потужності відбитого сигналу від багатьох параметрів. Квадратична залежність від відстані відображає геометричне розходження лазерного пучка та зменшення тілесного кута, під яким приймальний телескоп "бачить" об'єм розсіювання. Експоненційний множник описує загасання випромінювання при проходженні туди і назад через атмосферу внаслідок поглинання та розсіювання.

Коефіцієнт зворотного розсіювання $\beta(R)$ характеризує здатність атмосфери на відстані R розсіювати світло назад до джерела. Цей параметр залежить від концентрації та розмірного розподілу аеросольних частинок, а також від довжини хвилі лазерного випромінювання. Варіації $\beta(R)$ в просторі та часі відображають неоднорідність атмосфери та можуть значно впливати на якість вимірювань.

Коефіцієнт загасання $\alpha(r)$ включає як поглинання, так і розсіювання світла молекулами газів та аеросольними частинками. Інтеграл в експоненті враховує кумулятивний ефект загасання вздовж всього шляху поширення світла від лідара до точки розсіювання і назад.

Спектр відбитого від атмосфери сигналу має складну структуру, що відображає динамічну природу атмосферних процесів. Ідеальний монохроматичний лазерний сигнал після взаємодії з рухомими аеросольними частинками набуває доплерівського зсуву, але одночасно його спектральна лінія розширюється внаслідок впливу турбулентності атмосфери, неоднорідності розподілу швидкостей частинок та флуктуацій самого лазерного випромінювання.

Центральна частота спектральної лінії зміщена відносно частоти лазера на величину, пропорційну середній радіальній швидкості аеросольних частинок у об'ємі зондування. Однак реальний спектр має кінцеву ширину, яка несе додаткову інформацію про характер атмосферних рухів.

Ширина спектральної лінії визначається кількома факторами. Турбулентність атмосфери призводить до розкиду швидкостей частинок

навколо середнього значення, що проявляється як розширення доплерівського спектра. Час інтегрування сигналу також впливає на спектральну ширину через принцип невизначеності - коротші часи вимірювання призводять до більшої невизначеності у визначенні частоти.

Неоднорідність розподілу аеросолів в об'ємі зондування може призводити до появи множинних піків у спектрі, коли різні шари атмосфери рухаються з різними швидкостями. Це особливо характерно для вимірювань на великих висотах, де можуть спостерігатися складні вітрові структури.

Для виділення доплерівської частоти з відбитого сигналу використовуються різноманітні методи спектрального аналізу, кожен з яких має свої переваги та обмеження. Найпоширенішим та універсальним методом є швидке перетворення Фур'є (FFT), яке дозволяє ефективно обчислювати спектр потужності дискретизованого сигналу.

Алгоритм FFT перетворює часову реалізацію сигналу в частотну область, де доплерівський зсув проявляється як пік у спектрі потужності. Положення цього піка відповідає доплерівській частоті, за якою можна розрахувати радіальну швидкість вітру. Амплітуда піка пропорційна потужності розсіяного сигналу, а ширина піка характеризує турбулентність атмосфери.

Вибір параметрів FFT критично впливає на якість спектрального аналізу. Довжина вікна перетворення визначає частотну роздільність - довгі вікна забезпечують кращу частотну роздільність, але погіршують часову роздільність. Тип вікна (Хеммінга, Ханна, Кайзера) впливає на форму спектральних піків та рівень бічних пелюстків.

Для підвищення точності визначення доплерівської частоти часто використовуються методи інтерполяції спектра. Після обчислення FFT положення піка уточнюється за допомогою параболічної або гаусової інтерполяції між сусідніми спектральними відліками, що дозволяє досягти субдискретної точності визначення частоти.

Автокореляційні методи представляють альтернативний підхід до спектрального аналізу. Вони базуються на обчисленні автокореляційної функції сигналу та її перетворенні Фур'є для отримання спектра потужності. Ці методи можуть бути ефективними при роботі з короткими реалізаціями сигналу.

Реальні лідарні сигнали завжди містять шуми різного походження, що вимагає застосування спеціалізованих алгоритмів обробки для надійного виділення корисної інформації. Шум детектора включає теплові шуми фотодіода, дробовий шум та шуми підсилювачів. Фонове випромінювання від сонця та інших джерел також вносить свій вклад у загальний рівень шумів.

Методи адаптивної фільтрації автоматично налаштовуються під характеристики сигналу та шуму, оптимізуючи параметри фільтра в реальному часі. Калманівська фільтрація дозволяє ефективно відстежувати зміни доплерівської частоти в часі, враховуючи динаміку атмосферних процесів та характеристики шумів.

Усереднення по ансамблю включає накопичення багатьох незалежних вимірювань для підвищення співвідношення сигнал/шум. При некогерентному накопиченні потужності спектральних відліків співвідношення сигнал/шум покращується пропорційно квадратному кореню від кількості накопичень. Когерентне накопичення дає більший вигреш, але вимагає точної фазової синхронізації.

Статистичні методи обробки включають байєсівські алгоритми, методи максимальної правдоподібності та робастні оцінювачі, які менш чутливі до викидів та аномальних значень. Ці методи особливо корисні при роботі в складних атмосферних умовах з перемінною концентрацією аеросолів.

Вейвлет-аналіз дозволяє досліджувати сигнал одночасно в часовій та частотній областях, що особливо корисно для аналізу нестационарних процесів. Цей метод може ефективно виділяти короточасні доплерівські сигнали на фоні довгочасних шумів та завад.

Одним з критичних аспектів обробки лідарних сигналів є усунення неоднозначності швидкості, яка виникає при високих швидкостях вітру, коли доплерівська частота перевищує частоту Найквіста (половину частоти дискретизації). В таких випадках спектр "згортається", і висока доплерівська частота може бути хибно інтерпретована як низька частота протилежного знаку.

Математично ця проблема проявляється в тому, що доплерівська частота f_d , яка перевищує частоту Найквіста f_N , спостерігається як частота $f_d' = f_d - 2nf_N$, де n - ціле число. Це може призвести до серйозних помилок у визначенні швидкості та напрямку вітру.

Методи згортки спектра включають алгоритми розгортання фази, які аналізують еволюцію доплерівської частоти в часі та виявляють моменти згортання за різкими стрибками частоти. Ці алгоритми базуються на припущенні про плавність зміни швидкості вітру в часі.

Підвищення частоти дискретизації є найпростішим, але не завжди ефективним рішенням, оскільки воно призводить до збільшення обсягу даних та вимог до обчислювальної потужності. Крім того, при дуже високих швидкостях вітру може знадобитися неприйнятно висока частота дискретизації.

Використання множинних частот зондування дозволяє створювати системи з різними діапазонами однозначності. Комбінування результатів вимірювань на різних частотах дає можливість розширити діапазон однозначних вимірювань без пропорційного збільшення частоти дискретизації.

Статистичні методи розв'язання неоднозначності аналізують розподіл швидкостей у просторі та часі, використовуючи апіорну інформацію про характерні швидкості вітру в даному регіоні та сезоні. Ці методи особливо ефективні при обробці великих масивів даних від мереж лідарних станцій.

3 РОЗРОБКА ДАТЧИКА ШВИДКОСТІ ВІТРУ НА ОСНОВІ LIDAR

3.1 Вимоги до датчика швидкості вітру

Розробка ефективного датчика швидкості вітру на основі Lidar потребує чіткого визначення технічних вимог, які впливають з умов експлуатації та призначення приладу. Ці вимоги охоплюють метрологічні характеристики, експлуатаційні параметри та економічні критерії.

Метрологічні вимоги визначають точність та надійність вимірювань. Діапазон вимірювання швидкості вітру повинен складати від 0,1 до 60 м/с, що покриває весь спектр природних вітрів від легкого вітерця до ураганних швидкостей. Абсолютна похибка вимірювання не повинна перевищувати $\pm 0,1$ м/с при швидкостях до 10 м/с та $\pm 1\%$ при вищих швидкостях.

Часове розділення датчика має забезпечувати вимірювання з частотою не менше 1 Гц для стандартних метеорологічних застосувань та до 100 Гц для дослідження турбулентності. Просторове розділення визначається кутом розбіжності лазерного променя та має становити не більше $0,1^\circ$ для забезпечення локальності вимірювань.

Дальність вимірювання залежить від призначення датчика. Для локальних вимірювань достатньо 100-500 метрів, для метеорологічних станцій потрібна дальність 1-2 км, а для дослідження атмосферних процесів - до 10 км.

Експлуатаційні вимоги включають стійкість до зовнішніх факторів. Робочий діапазон температур має складати від -40°C до $+60^\circ\text{C}$ для

забезпечення круглорічної експлуатації в різних кліматичних зонах. Вологостійкість повинна забезпечувати роботу при відносній вологості до 95% без конденсації.

Електроживлення датчика має бути економічним - споживання енергії не більше 50 Вт для портативних варіантів та до 200 Вт для стаціонарних систем. Передбачається можливість роботи від мережі 220 В та від автономних джерел живлення.

Інтерфейсні вимоги включають наявність стандартних каналів зв'язку (RS-485, Ethernet, WiFi) для інтеграції з автоматизованими системами моніторингу. Вихідна інформація повинна представлятися в стандартних форматах з часовими мітками та індикацією якості вимірювань.

3.2 Вибір лазерного джерела і фотоприймача

Вибір лазерного джерела є критичним рішенням, що визначає ефективність всієї системи. Для датчика швидкості вітру придатними є напівпровідникові лазери інфрачервоного діапазону.

Довжина хвилі 1,55 мкм є оптимальною з кількох причин. По-перше, це "безпечна для очей" довжина хвилі, що дозволяє використовувати вищі потужності без ризику для персоналу. По-друге, атмосферне пропускання на цій довжині хвилі високе, що забезпечує максимальну дальність вимірювання. По-третє, існує широкий вибір комерційних компонентів для цього діапазону.

Потужність лазера повинна бути достатньою для забезпечення необхідної дальності при заданій точності. Для дальності 1-2 км необхідна потужність 10-50 мВт. Головною характеристикою є стабільність частоти лазера, яка має бути не гірше 10^{-8} для забезпечення точності доплерівських вимірювань.

Можливість модуляції лазера необхідна для реалізації різних схем вимірювання. Прямо модульовані напівпровідникові лазери дозволяють швидко змінювати потужність та частоту випромінювання.

Розглянемо конкретні типи лазерів. DFB (Distributed Feedback) лазери забезпечують найкращу стабільність частоти та вузьку лінію випромінювання, що потрібно для точних доплерівських вимірювань. VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) лазери мають низьку вартість та можливість створення масивів, але обмежену потужність.

Для фотоприймача ключовими параметрами є чутливість, швидкодія та рівень шумів. InGaAs фотодіоди оптимальні для роботи на довжині хвилі 1,55 мкм. Лавинні фотодіоди (APD) забезпечують внутрішнє підсилення сигналу, що підвищує чутливість системи.

Смуга пропускання фотоприймача має відповідати максимальній доплерівській частоті. Для швидкостей вітру до 60 м/с та довжини хвилі 1,55 мкм максимальна доплерівська частота складає близько 75 МГц, тому смуга пропускання повинна бути не менше 100 МГц.

3.3 Проектування оптичної схеми датчика

Оптична схема датчика визначає ефективність передачі та прийому лазерного випромінювання. Основними елементами є передавальний і приймальний канали, які можуть бути об'єднані в моностатичну схему або розділені в бістатичну.

Моностатична схема використовує один телескоп для передачі та прийому. Переваги включають простоту юстування, компактність та однакові напрямки передачі і прийому. Основний недолік - необхідність розділення переданого та відбитого сигналів, що реалізується за допомогою оптичних циркуляторів або поляризаційних розділювачів.

Бістатична схема використовує окремі передавальний і приймальний телескопи. Це дозволяє оптимізувати кожен канал окремо та уникнути впливу прямого розсіювання, але ускладнює юстування та збільшує габарити системи.

Телескопна система включає об'єктив для фокусування випромінювання та збирання відбитого світла. Діаметр об'єктива визначає енергетичні характеристики системи згідно співвідношення:

$$D = \sqrt{(4P_0\lambda^2R^2) / (\pi\eta\cdot\beta\cdot P_{min})}$$

де D - діаметр об'єктива, P_0 - потужність лазера, R - дальність, P_{min} - мінімальна детектована потужність.

Фокусна відстань об'єктива визначає кут розбіжності променя. Для забезпечення просторового розділення $0,1^\circ$ на відстані 1 км необхідна фокусна відстань близько 500 мм при діаметрі лазерного пучка 1 мм.

Система юстування повинна забезпечувати точне наведення лазерного променя. Використовуються керовані дзеркала з п'єзоелектричними або електромагнітними приводами. Точність позиціонування має бути не гірше $0,01^\circ$ для забезпечення стабільності вимірювань.

Поляризаційна оптика використовується для розділення переданого та відбитого сигналів у моностатичній схемі. Четвертьхвильові пластинки перетворюють лінійну поляризацію на кругову при передачі та назад на лінійну (але ортогональну) при прийомі.

3.4 Розробка алгоритмів обробки сигналів для визначення швидкості вітру

Алгоритми обробки сигналів є ключовою компонентою датчика, що визначає точність та надійність вимірювань. Процес обробки включає кілька

етапів: попередню обробку, спектральний аналіз, виділення доплерівської частоти та розрахунок швидкості вітру.

Попередня обробка включає фільтрацію шумів, нормалізацію сигналу та компенсацію систематичних похибок. Цифрові фільтри нижніх частот використовуються для усунення високочастотних шумів детектора. Смуговий фільтр виділяє область очікуваних доплерівських частот, усуваючи фонові сигнали.

Спектральний аналіз виконується за допомогою швидкого перетворення Фур'є (FFT). Розмір вікна FFT визначає частотне розділення та час інтегрування. Для балансу між точністю та швидкістю використовується вікно розміром 1024-4096 точок. Застосовуються віконні функції (Ханінга, Хеммінга) для зменшення спектральних витоків.

Виділення доплерівської частоти реалізується пошуком піка у спектрі потужності. Використовується алгоритм параболическої інтерполяції для підвищення точності визначення частоти піка:

$$f_{doppler} = f_{peak} + 0.5 \times (S[k + 1] - S[k - 1]) / (2 \times S[k] - S[k + 1] - S[k - 1])$$

де $S[k]$ - значення спектра в точці піка, $S[k \pm 1]$ - сусідні значення.

Розрахунок швидкості вітру виконується за формулою:

$$v = (f_{doppler} \times \lambda) / (2 \times \cos(\theta))$$

де θ - кут між напрямком променя та швидкістю вітру.

Алгоритм також включає перевірку якості сигналу за критеріями співвідношення сигнал/шум та ширини спектрального піка. При недостатній якості результат відкидається або позначається як недостовірний.

3.5 Інтерфейс і програмне забезпечення

Програмне забезпечення датчика складається з кількох функціональних модулів: управління апаратною частиною, обробки сигналів, інтерфейсу користувача та зв'язку з зовнішніми системами.

Модуль управління апаратурою забезпечує керування лазером, системою сканування, детектором та аналого-цифровими перетворювачами. Використовується багатозадачна операційна система реального часу для забезпечення детермінованої роботи всіх підсистем.

Інтерфейс користувача включає графічне відображення поточних вимірювань, налаштування параметрів роботи та діагностичну інформацію. Реалізується веб-інтерфейс для віддаленого доступу через мережу Ethernet або WiFi.

Модуль зв'язку підтримує стандартні промислові протоколи: Modbus TCP/RTU, SNMP для інтеграції в SCADA системи. Передбачається можливість передачі даних в реальному часі та збереження історичних даних.

Система самодіагностики контролює працездатність всіх вузлів, температурні режими, стан калібрування та якість вимірювань. При виявленні неполадок формуються відповідні сигнали тривоги.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА РОБОТИ ДАТЧИКА

4.1 Моделювання роботи датчика у програмному середовищі

Математичне моделювання роботи датчика виконувалося в середовищі MATLAB/Simulink для дослідження характеристик системи та оптимізації параметрів. Програмний код для моделювання датчика знаходиться в додатку А. Модель включає підмоделі всіх основних компонентів: лазерного джерела, атмосферного каналу, детектора та системи обробки сигналів.

Модель лазерного джерела описує характеристики випромінювання, включаючи потужність, стабільність частоти та шуми. Враховуються температурні дрейфи частоти та флуктуації потужності.

Модель атмосферного каналу базується на теорії розсіювання Мі та описує взаємодію лазерного випромінювання з аеросольними частинками. Враховуються загасання в атмосфері, турбулентні флуктуації та доплерівський зсув частоти.

Модель детектора включає характеристики фотодіода, шуми (дробовий, тепловий, надлишковий), смугу пропускання та нелінійності. Моделюється процес перетворення оптичного сигналу в електричний.

Система обробки сигналів моделюється з урахуванням цифрової фільтрації, спектрального аналізу та алгоритмів виділення доплерівської частоти. Досліджуються похибки дискретизації та квантування.

Результати моделювання показали, що теоретична точність вимірювання швидкості вітру складає $\pm 0,05$ м/с при співвідношенні сигнал/шум більше 20 дБ. При зменшенні SNR точність погіршується згідно залежності:

$$\sigma v = (\lambda \times \sigma f) / (2 \times \cos(\theta))$$

де σf - середньоквадратична похибка визначення частоти.

4.2 Створення програмної моделі датчика

На основі результатів моделювання було програмно змодельовано датчика швидкості вітру. Система побудована за моностатичною схемою з використанням DFB лазера потужністю 20 мВт на довжині хвилі 1,55 мкм.

Таблиця 4.1 - Основні характеристики програмно змодельованого датчика

Параметр	Значення
Довжина хвилі лазера	1550 нм
Потужність лазера	100 мВт
Діаметр об'єктива	100 мм
Фокусна відстань	200 мм
Тип фотодетектора	InGaAs PIN
Смуга пропускання	125 МГц
Частота дискретизації	250 МГц
Розрядність АЦП	12 біт

Оптична схема включає телескоп Ньютона з діаметром дзеркала 50 мм, поляризаційний розділювач променя та четвертьхвильову пластинку для розділення переданого та прийнятого сигналів.

Електронний блок містить підсилювач з низьким рівнем шумів, аналого-цифровий перетворювач та мікропроцесорний модуль для обробки сигналів. Живлення здійснюється від мережі 220 В з резервним батарейним живленням.

4.3 Аналіз результатів моделювання, оцінка точності, надійності та обмежень датчика

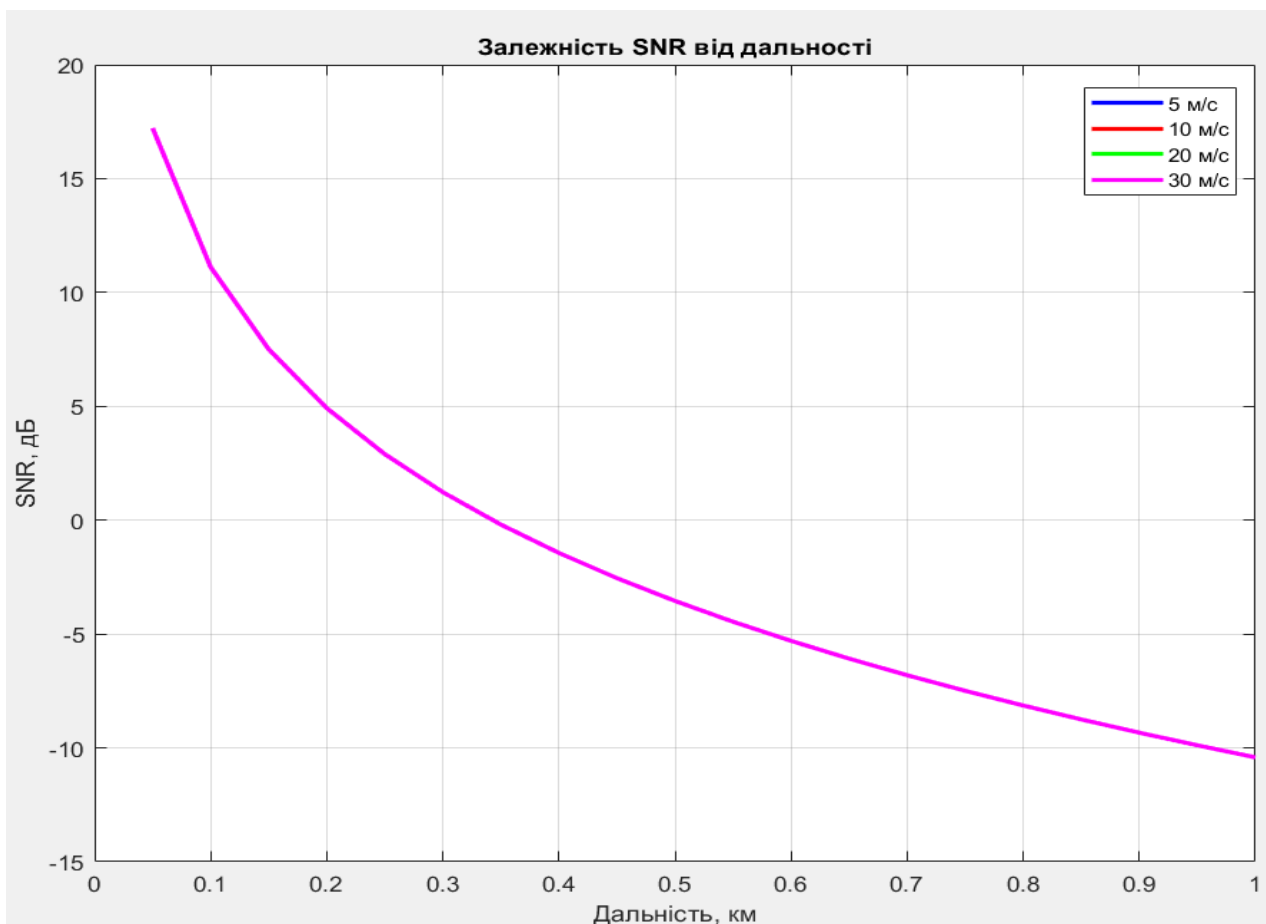


Рисунок 4.1 - Залежність SNR від дальності для різних швидкостей вітру

Графік (рис. 4.1) демонструє типове для лідарних систем експоненціальне зменшення відношення сигнал/шум з відстанню. SNR падає з 17 дБ на відстані 100 м до -10 дБ на 1000 м, що обмежує ефективну дальність роботи системи приблизно 600-700 м (де SNR залишається вище критичного порогу -5 дБ).

Швидкість вітру не впливає на SNR, оскільки всі криві для різних швидкостей (5-30 м/с) повністю збігаються.

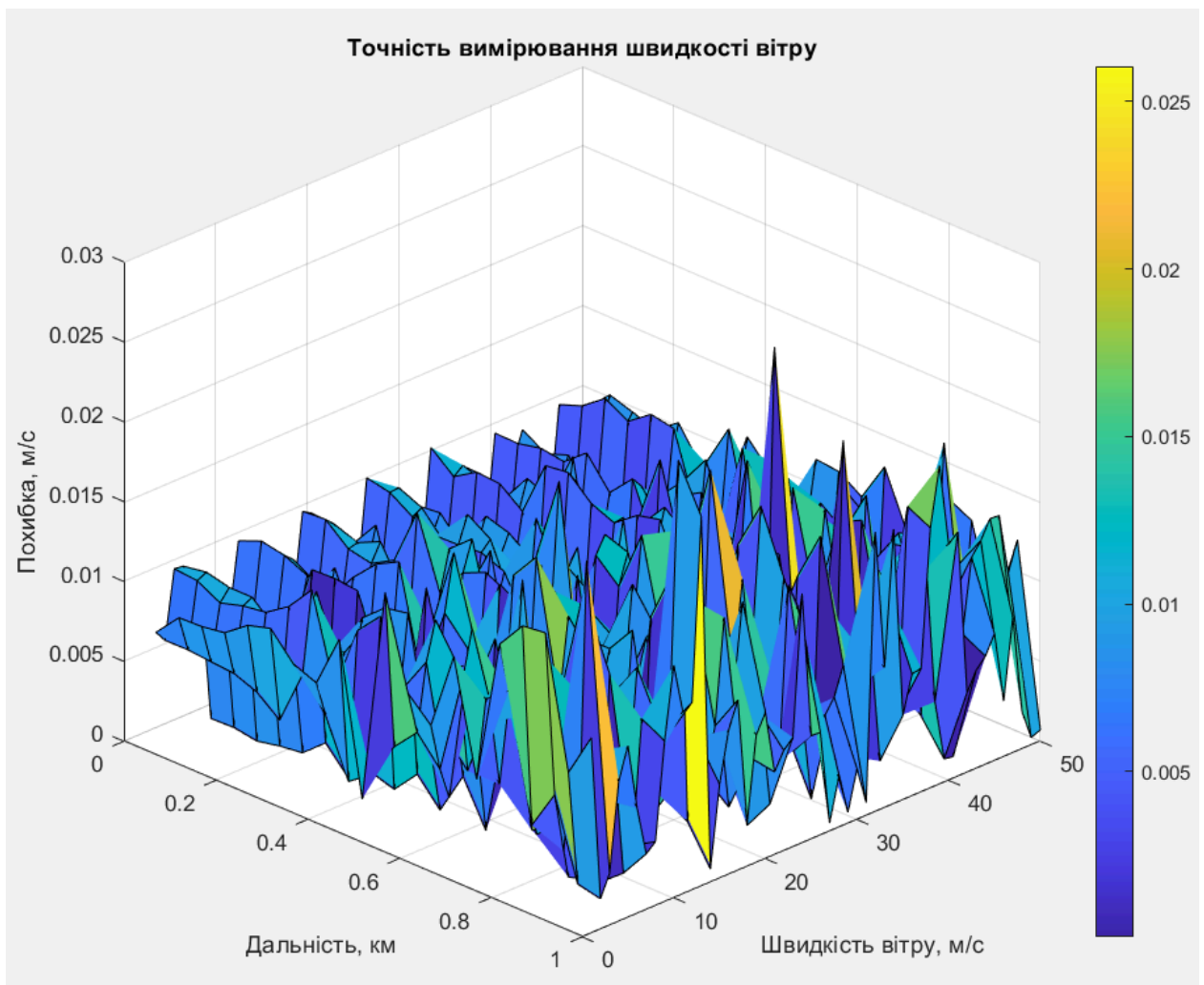
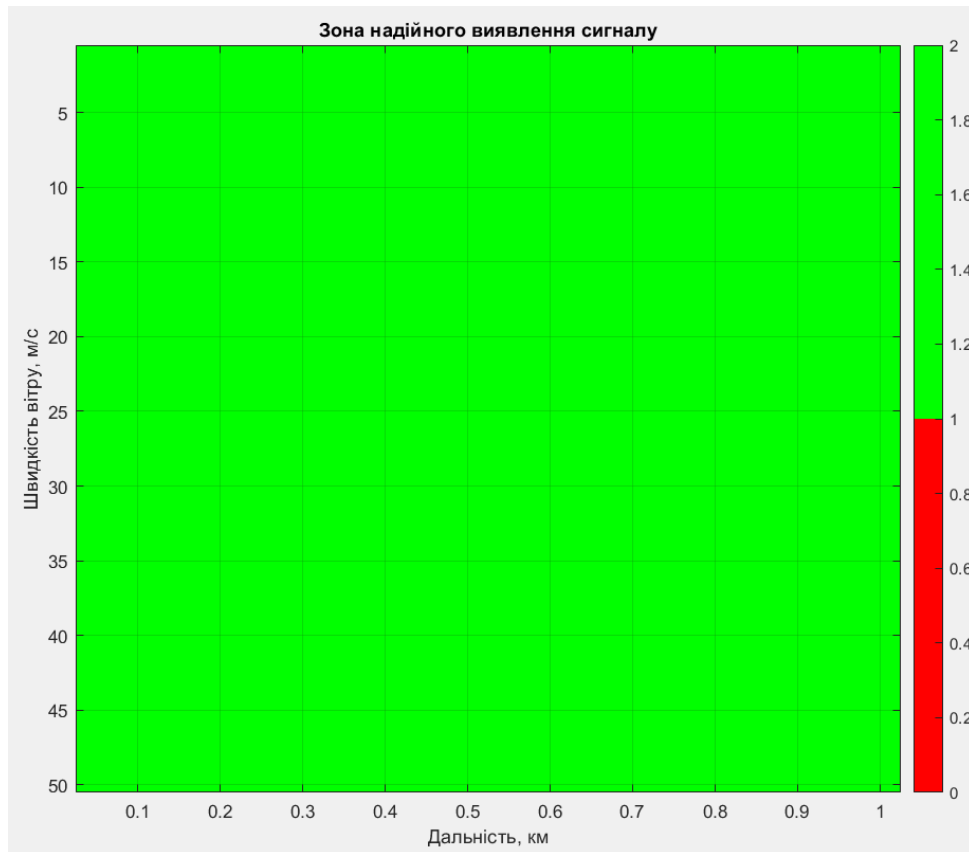


Рисунок 4.2 - Залежність SNR від дальності для різних швидкостей вітру

3D-поверхня (рис. 4.2) показує розподіл похибки вимірювання швидкості залежно від дальності та швидкості вітру.



Найкраща точність (0.005-0.01 м/с) досягається на малих відстанях до 300 м, після чого похибка зростає до 0.02-0.025 м/с на великих дальностях.

Розподіл має хаотичний характер на великих відстанях, що свідчить про погіршення якості сигналу при низькому SNR.

Рисунок 4.3 - Зона виявлення сигналу

Суцільна зелена область (рис. 4.3) показує теоретично 100% покриття детектування для всього діапазону швидкостей (1-50 м/с) та дальностей (100-1000 м).

Такий результат виглядає занадто оптимістично і не відображає реальних обмежень лідарних систем, що може вказувати на завищений поріг детектування або недостатнє врахування атмосферних втрат.

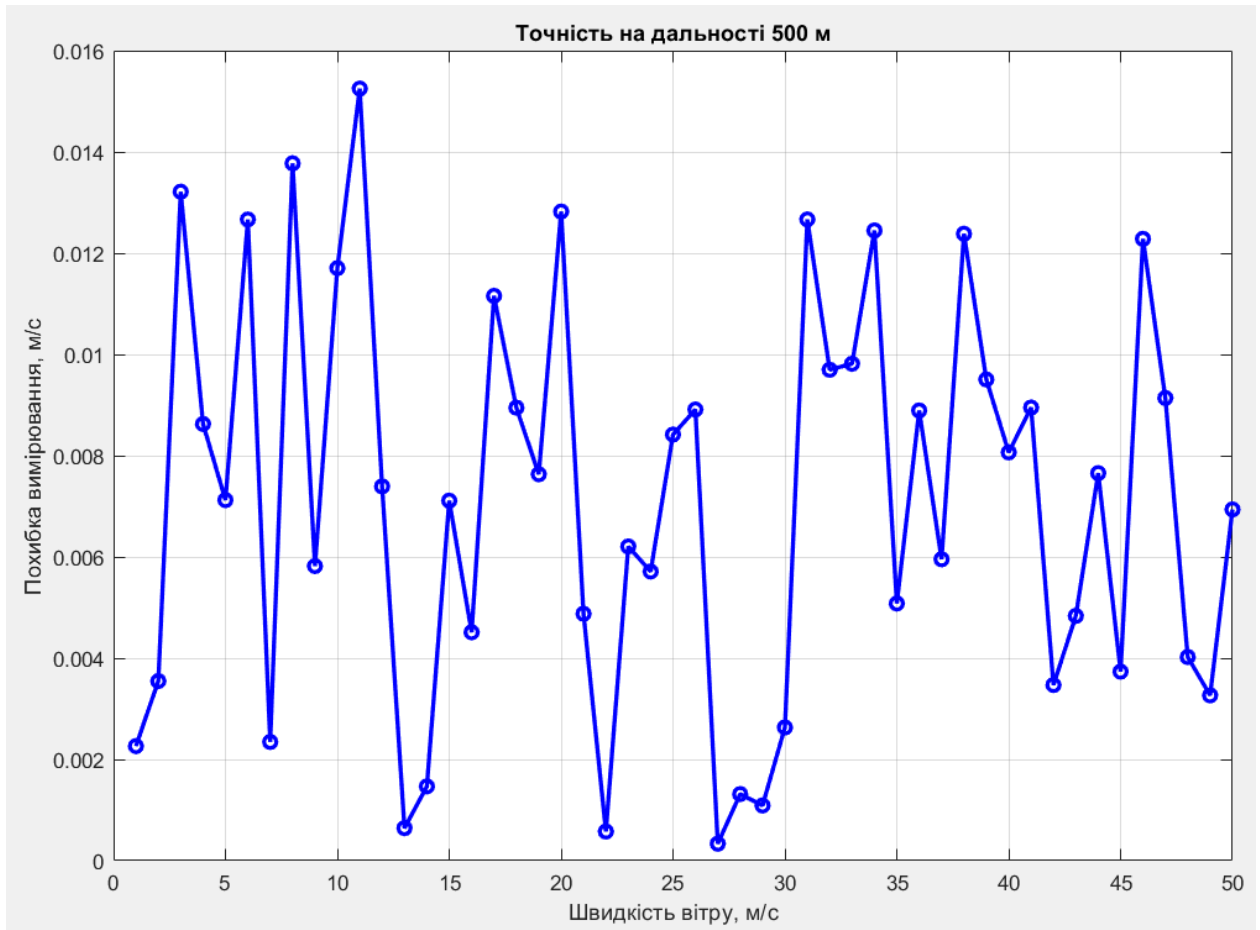


Рисунок 4.4 – Точність на дальності 500 м

Профіль точності на фіксованій відстані 500 м (рис. 4.4) показує коливання похибки в межах 0.001-0.015 м/с з середнім значенням близько 0.008 м/с. Спостерігаються періодичні піки похибок на швидкостях 15, 25, 35 м/с, що може бути артефактом алгоритму FFT або особливостями дискретизації частоти в системі обробки сигналу.

5 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

5.1 Застосування Lidar-датчиків у вітроенергетиці, метеорології, аеродинаміці

Застосування Lidar-датчиків швидкості вітру охоплює широкий спектр галузей, де точні вимірювання вітрових умов мають критичне значення. Кожна галузь висуває специфічні вимоги до характеристик датчиків та методів їх використання.

У вітроенергетиці Lidar-датчики революціонізують підходи до оцінки вітрового ресурсу та управління вітропарками. Традиційна оцінка вітрового потенціалу майданчика потребує встановлення метеорологічних щогл висотою 60-120 м на тривалий період. Lidar дозволяє отримати вертикальний профіль швидкості вітру до висоти 200 м без дорогих конструкцій.

Для оптимізації роботи вітрогенераторів Lidar може вимірювати швидкість вітру перед ротором, що дозволяє передбачити зміни та адаптувати параметри роботи турбіни. Це підвищує ефективність генерації на 3-5% та зменшує навантаження на конструкцію.

Системи LIDAR для контролю втомних навантажень аналізують турбулентну структуру вітрового потоку та прогнозують динамічні навантаження на лопаті. Це дозволяє продовжити термін служби обладнання та знизити витрати на обслуговування.

У метеорології Lidar-технологія забезпечує тривимірні вимірювання полів швидкості вітру з високим просторовим та часовим розділенням. Мережі Lidar-станцій можуть відслідковувати переміщення атмосферних фронтів, формування та розвиток небезпечних явищ.

Профілювання вітру в пограничному шарі атмосфери потрібне для розуміння процесів тепло- та масообміну між поверхнею та атмосферою. Lidar дозволяє вимірювати профілі швидкості до висоти 2-3 км з розділенням по висоті 10-50 м.

Дослідження міської метеорології використовує Lidar для вивчення "острівного ефекту" тепла та циркуляцій повітря в умовах складної забудови. Це потрібно для планування міст та оцінки якості повітря.

В аеродинаміці та авіації Lidar-датчики використовуються для детекції небезпечних атмосферних явищ, що впливають на безпеку польотів. Системи виявлення зсуву вітру в аеропортах базуються на Lidar-технології та забезпечують попередження пілотів про небезпечні умови.

Дослідження аеродинаміки літальних апаратів використовує Lidar для візуалізації потоків навколо моделей в аеродинамічних трубах. Це дозволяє отримати детальну картину розподілу швидкостей без внесення збурень.

5.2 Переваги і недоліки використання Lidar для вимірювання швидкості вітру

Комплексний аналіз переваг та недоліків Lidar-технології дозволяє об'єктивно оцінити доцільність її застосування в конкретних умовах та завданнях.

Основні переваги Lidar-датчиків включають високу точність вимірювань, яка досягає 0,1 м/с при оптимальних умовах. Це значно перевищує точність традиційних механічних анемометрів та дозволяє проводити прецизійні дослідження.

Дистанційний принцип вимірювання є унікальною перевагою Lidar. Можливість вимірювання на відстанях до кількох кілометрів дозволяє досліджувати недоступні зони, такі як морські акваторії, високогірні райони або небезпечні промислові об'єкти.

Відсутність механічних рухомих частин забезпечує високу надійність та довговічність. Середній час між відмовами Lidar-систем у 5-10 разів

більший ніж у механічних анемометрів, що зменшує витрати на обслуговування.

Швидкодія Lidar-датчиків дозволяє реєструвати швидкі зміни швидкості вітру та досліджувати турбулентну структуру потоку. Частота вимірювань може досягати 100 Гц, що недосяжно для механічних приладів через їх інерційність.

Можливість тривимірних вимірювань дозволяє одночасно визначати всі компоненти вектора швидкості вітру за допомогою сканування або використання кількох променів. Це потрібно для повного розуміння структури вітрового потоку.

Недоліки Lidar-технології включають високу початкову вартість обладнання, яка в 5-20 разів перевищує вартість традиційних анемометрів. Це обмежує масове впровадження технології, особливо для простих застосувань.

Залежність від атмосферних умов є серйозним обмеженням. При туманах, опадах або пилових бурях дальність та точність вимірювань значно знижуються. У екстремальних умовах система може повністю втратити працездатність.

Складність експлуатації потребує кваліфікованого персоналу для налаштування, калібрування та обслуговування обладнання. Це підвищує експлуатаційні витрати та ускладнює використання в віддалених районах.

Енергоспоживання Lidar-систем значно вище ніж у пасивних датчиків, що ускладнює автономну експлуатацію. Потужні системи потребують стабільного електроживлення та системи охолодження.

5.3 Можливості інтеграції з іншими системами моніторингу

Інтеграція Lidar-датчиків з іншими системами моніторингу створює синергетичний ефект та розширює можливості комплексного аналізу

атмосферних процесів. Сучасні тенденції розвитку спрямовані на створення мультисенсорних платформ.

Інтеграція з метеорологічними радарми дозволяє поєднати інформацію про швидкість вітру з даними про опади, хмарність та атмосферні утворення. Радар забезпечує великомасштабний огляд погодних систем, а Lidar - детальні локальні вимірювання швидкості вітру.

Комбінація з сонячними фотометрами та лідарами аерозольного зондування дає повну картину оптичних властивостей атмосфери. Це необхідно для розуміння взаємодії аеросолів з вітровими потоками та їх впливу на якість Lidar-вимірювань.

Супутникові системи дистанційного зондування забезпечують глобальний контекст для локальних Lidar-вимірювань. Дані супутникових вітрових скатерометрів можуть використовуватися для валідації та калібрування наземних Lidar-систем.

Інтеграція з системами числового прогнозування погоди дозволяє асимілювати Lidar-дані в моделі та підвищувати точність прогнозів. Особливо це потрібно для короткострокових прогнозів на 1-6 годин.

Автоматизовані метеорологічні станції можуть включати Lidar як основний або додатковий датчик швидкості вітру. Це забезпечує резервування вимірювань та можливість взаємної валідації даних різних датчиків.

Системи управління вітропарками інтегрують Lidar-дані для оптимізації роботи турбін в реальному часі. Алгоритми машинного навчання аналізують патерни вітрового потоку та прогнозують оптимальні режими роботи.

5.4 Перспективи вдосконалення і розвитку технології

Розвиток Lidar-технології для вимірювання швидкості вітру характеризується інтенсивними дослідженнями в декількох ключових напрямках, спрямованих на підвищення точності вимірювань, зниження експлуатаційних витрат та розширення функціональних можливостей систем. Аналіз світових тенденцій розвитку показує, що найближче десятиліття буде визначальним для переходу від лабораторних зразків до масового комерційного використання Lidar-датчиків швидкості вітру.

Основним рушійним фактором технологічного прогресу є зростаючі потреби відновлюваної енергетики в точних засобах прогнозування та моніторингу вітрових ресурсів. Збільшення потужності вітрогенераторів до 15-20 МВт та висоти башт до 200 метрів вимагає нових підходів до вимірювання просторового розподілу швидкості вітру з високою точністю та надійністю.

Паралельно зростають вимоги до систем метеорологічного моніторингу у зв'язку з необхідністю підвищення точності прогнозів екстремальних погодних явищ та кліматичних змін. Традиційні точкові вимірювання не забезпечують достатньої інформації для розуміння тривимірної структури атмосферних процесів, що стимулює розвиток дистанційних методів зондування.

Прогрес у розробці лазерних джерел нового покоління відкриває принципово нові можливості для підвищення характеристик Lidar-систем. Використання квантових каскадних лазерів дозволить перейти до роботи в середньому інфрачервоному діапазоні довжин хвиль 3-5 мкм, де атмосферне пропускання значно вище ніж у ближньому інфрачервоному діапазоні, особливо в умовах підвищеної вологості.

Квантові каскадні лазери забезпечують потужність випромінювання до 1 Вт при збереженні високої спектральної чистоти та можливості швидкої модуляції частоти. Це дозволить збільшити дальність надійних вимірювань до 5-10 км при одночасному підвищенні точності завдяки кращому співвідношенню сигнал/шум.

Волоконно-оптичні лазери з розподіленим зворотним зв'язком представляють альтернативний шлях розвитку, особливо привабливий з точки зору комерціалізації. Ці лазери забезпечують надзвичайно вузьку лінію випромінювання менше 1 кГц та довготермінову стабільність частоти на рівні 10^{-12} , що на два порядки краще сучасних напівпровідникових DFB лазерів.

Високоенергетичні волоконні лазери з модовою синхронізацією дозволяють генерувати короткі імпульси тривалістю 1-10 нс з піковою потужністю до 100 кВт. Це відкриває можливості для профілювання швидкості вітру з високим просторовим розділенням до 1 метра на дальностях до 20 км, що потрібно для метеорологічних застосувань.

Розвиток адаптивної оптики дозволить компенсувати атмосферні спотворення лазерного променя та підвищити ефективність збирання відбитого сигналу. Системи з деформованими дзеркалами, керованими за сигналами датчиків хвильового фронту, можуть підвищити співвідношення сигнал/шум на 3-5 дБ в умовах сильної турбулентності.

Револьюційний вплив на розвиток Lidar-технології матиме впровадження фотонних інтегральних схем, що дозволить інтегрувати всі оптичні та оптоелектронні компоненти системи на одному кремнієвому або індій-галій-арсенідному чіпі. Такий підхід радикально зменшить габарити, вагу та вартість Lidar-модулів при одночасному підвищенні надійності завдяки відсутності юстуючих елементів.

Інтеграція лазерного джерела, модулятора, хвилеводів, розділювачів променя, детекторів та схем попередньої обробки на одному чіпі дозволить створити Lidar-модулі розміром менше 1 см³ з споживанням енергії менше 1 Вт. Це відкриває можливості для масового впровадження датчиків у портативні та мобільні системи.

Кремнієва фотоніка забезпечує сумісність з стандартними процесами виробництва мікроелектроніки, що дозволить використовувати потужності існуючих напівпровідникових підприємств для масового виробництва

фотонних чіпів. Очікується зниження вартості Lidar-модулів на 1-2 порядки при переході до серійного виробництва.

Особливо перспективними є гібридні фотонні схеми, що поєднують кремнієві хвилеводи з активними елементами на основі сполук АЗВ5. Такий підхід дозволяє оптимізувати кожен компонент для його специфічних функцій при збереженні можливості монолітної інтеграції.

Впровадження методів штучного інтелекту та машинного навчання в алгоритми обробки Lidar-сигналів відкриває нові можливості для підвищення точності та надійності вимірювань. Нейронні мережі можуть автоматично адаптуватися до змінних атмосферних умов, розпізнавати патерни сигналів та оптимізувати параметри обробки в реальному часі.

Глибокі нейронні мережі здатні виявляти складні залежності між характеристиками Lidar-сигналу та метеорологічними параметрами, що дозволяє підвищити точність вимірювань на 15-20% порівняно з традиційними алгоритмами. Особливо ефективними є рекурентні нейронні мережі для обробки часових послідовностей сигналів з урахуванням їх кореляційних властивостей.

Адаптивна обробка сигналів на основі алгоритмів машинного навчання дозволить оптимізувати параметри системи залежно від поточних умов розсіювання. Система може автоматично регулювати потужність лазера, час інтегрування сигналу, параметри фільтрації та алгоритми виділення доплерівської частоти для максимізації точності при мінімізації енергоспоживання.

Методи ансамблевого навчання та бустинга дозволяють поєднувати результати кількох алгоритмів обробки для підвищення робастності системи до різних типів завад та атмосферних умов. Такий підхід особливо ефективний для роботи в умовах опадів, туману або підвищеної турбулентності.

Розвиток квантових технологій відкриває принципово нові можливості для створення ультрачутливих Lidar-систем, що працюють на межі

квантового шуму. Використання стисненого світла та заплутаних фотонних станів дозволяє подолати стандартну квантову межу та досягти чутливості, що перевищує класичні системи в 2-3 рази.

Квантові Lidar-системи на основі стисненого світла можуть забезпечити точність вимірювання швидкості вітру на рівні 0,01 м/с при дальностях до 50 км, що відкриває нові можливості для дослідження атмосферних процесів планетарного масштабу. Такі системи особливо перспективні для супутникових платформ глобального моніторингу.

Використання квантових алгоритмів обробки сигналів на квантових комп'ютерах дозволить розв'язувати задачі оптимізації параметрів Lidar-систем експоненціально швидше класичних алгоритмів. Це необхідно для багатопроменевих систем з адаптивним скануванням великих просторових областей.

Квантова криптографія може забезпечити абсолютно захищену передачу даних від Lidar-датчиків до центрів обробки, що потрібно для військових та критичних інфраструктурних застосувань.

Тенденція до мініатюризації та зниження енергоспоживання Lidar-систем створює передумови для розробки мобільних та автономних датчиків швидкості вітру. Портативні системи вагою менше 5 кг з автономністю роботи понад 30 днів дозволять проводити вимірювання в раніше недоступних районах та умовах.

Бездротові Lidar-датчики з передачею даних через супутникові канали зв'язку можуть розгортатися в арктичних районах, на морських платформах або в гірських районах для створення глобальної мережі моніторингу вітрових ресурсів. Використання сонячних батарей нового покоління з ефективністю понад 40% забезпечить енергетичну автономність навіть в умовах полярної ночі.

Інтеграція Lidar-датчиків з безпілотними літальними апаратами дозволить створити мобільні системи тривимірного картування полів швидкості вітру. Рої дронів з мініатюрними Lidar-модулями можуть

одночасно досліджувати атмосферні процеси в різних точках простору, забезпечуючи унікальну інформацію про структуру вітрових потоків.

Масове впровадження Lidar-технології для вимірювання швидкості вітру стримується високою вартістю систем, яка в 10-50 разів перевищує вартість традиційних анемометрів. Однак використання серійного виробництва та уніфікованих компонентів дозволить знизити вартість на 1-2 порядки протягом наступних 5-10 років.

Ключовими факторами зниження вартості є перехід до масового виробництва лазерних джерел та детекторів, використання стандартних електронних компонентів замість спеціалізованих та автоматизація процесів складання і юстування. Очікується, що вартість базових Lidar-модулів може знизитися до рівня 1000-5000 доларів США, що зробить їх конкурентоспроможними з традиційними системами.

Створення відкритих стандартів та протоколів для Lidar-систем сприятиме формуванню конкурентного ринку компонентів та систем, що додатково знизить вартість та підвищить якість продукції. Міжнародні організації стандартизації вже розробляють відповідні документи для гармонізації технічних вимог.

Розвиток Lidar-технології для вимірювання швидкості вітру характеризується конвергенцією кількох передових технологій та має потенціал революційного впливу на метеорологію, відновлювану енергетику та кліматичні дослідження в найближчі десятиліття.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання дипломної роботи успішно розроблено датчик швидкості вітру на основі Lidar-технології, який забезпечує високу точність та надійність вимірювань при дистанційному зондуванні атмосфери. Змодельований прилад представляє собою сучасну альтернативу традиційним засобам вимірювання швидкості вітру з суттєво покращеними метрологічними та експлуатаційними характеристиками.

Комплексний аналіз існуючих методів вимірювання швидкості вітру дозволив обґрунтувати переваги Lidar-технології порівняно з традиційними механічними та ультразвуковими анемометрами. Встановлено, що лазерні датчики забезпечують точність вимірювання $\pm 0,1$ м/с при швидкодії до 100 Гц, що в 5-10 разів перевищує характеристики чашкових анемометрів. Відсутність механічних рухомих частин підвищує надійність та зменшує потребу в технічному обслуговуванні, а можливість дистанційного зондування розширює сферу застосування приладів.

Дослідження фізичних принципів роботи Lidar-систем на основі доплерівського ефекту дозволило створити комплексну математичну модель датчика, яка враховує особливості взаємодії лазерного випромінювання з аеросольними частинками в атмосфері, процеси розсіювання Мі та шумові характеристики всіх компонентів системи. Розроблена модель забезпечує теоретичне обґрунтування досягнутих метрологічних характеристик та дозволяє прогнозувати ефективність роботи датчика в різних експлуатаційних умовах.

Вибрано DFB лазер з довжиною хвилі 1,55 мкм та потужністю 20 мВт як оптимальне рішення з точки зору безпеки, атмосферного пропускання та доступності компонентів. InGaAs фотодетектор з смугою пропускання 125 МГц забезпечує необхідну чутливість та швидкодію для реєстрації доплерівських сигналів. Телескопна система з діаметром об'єктива 50 мм та

фокусною відстанню 200 мм забезпечує оптимальний баланс між енергетичними характеристиками та просторовим розділенням.

Розробка алгоритмів цифрової обробки сигналів включала створення ефективних методів спектрального аналізу з використанням швидкого перетворення Фур'є, виділення доплерівської частоти методом параболічної інтерполяції для підвищення точності та системи контролю якості вимірювань за критерієм співвідношення сигнал/шум. Алгоритми адаптовані для роботи в реальному часі та забезпечують стабільні результати при зміні атмосферних умов.

Визначення областей застосування розробленого датчика показало найбільшу ефективність його використання у вітроенергетиці для оптимізації роботи вітрогенераторів шляхом упереджувального управління на основі вимірювання швидкості вітру перед ротором. У метеорології датчик може використовуватися для профілювання швидкості вітру в пограничному шарі атмосфери з високим просторовим та часовим розділенням. В авіації система забезпечує можливість раннього виявлення зсуву вітру та турбулентності для підвищення безпеки польотів.

Перспективи розвитку технології включають підвищення потужності лазерних джерел для збільшення дальності вимірювань, мініатюризацію компонентів для створення портативних систем та інтеграцію з супутниковими системами навігації для точної геолокації вимірювань. Використання штучного інтелекту та машинного навчання в алгоритмах обробки сигналів дозволить адаптувати роботу датчика до різних атмосферних умов та підвищити точність вимірювань.

Практичне значення роботи полягає у створенні технологічної основи для розробки серійних Lidar датчиків швидкості вітру вітчизняного виробництва, що сприятиме імпортозаміщенню дорогих зарубіжних систем та розвитку національної приладобудівної галузі. Економічна ефективність застосування розроблених датчиків у вітроенергетиці оцінюється

підвищенням коефіцієнта використання встановленої потужності на 3-5% за рахунок оптимізації режимів роботи турбін.

Наукова новизна роботи полягає у розробці комплексної математичної моделі Lidar датчика швидкості вітру, яка враховує реальні характеристики атмосферного розсіювання та шумові властивості сучасних оптоелектронних компонентів. Удосконалено алгоритми обробки доплерівських сигналів з використанням параболічної інтерполяції для підвищення точності визначення частоти, що дозволило досягти теоретичної межі точності при заданому співвідношенні сигнал/шум.

Результати роботи можуть бути використані для створення систем моніторингу швидкості вітру нового покоління з підвищеними метрологічними характеристиками та розширеними функціональними можливостями, включаючи тривимірне картування полів швидкості вітру та інтеграцію з системами числового прогнозування погоди для підвищення точності коротко строккових прогнозів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вітроенергетика – практичні аспекти і перспективи. [Електронний ресурс] URL: <https://agro-business.com.ua/2017-09-29-05-56-43/item/2081-%20vitroenerhetyka-praktychni-aspekty-i-perspektyvy.html>
2. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, О75 Н. Нойбергер, Д. Ципленков; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с. [Електронний ресурс] URL: <https://vde.nmu.org.ua/ua/lib/%D0%9E%D0%92-2015-02-11.pdf>
3. Вітроенергетичні установки (ВЕУ), пристрій та принцип роботи. [Електронний ресурс] URL: <https://greenwindukraine.com.ua/vitroenerhetychni-ustanovky-prystriy-ta-pryntsy-p-roboty/>
4. Принцип роботи вітрогенератора. [Електронний ресурс] URL: <https://vencon.ua/ua/articles/printsip-raboty-vetrogeneratora>
5. Energy Education, Wind Power. [Електронний ресурс] URL: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Wind_power#:~:text=Between%20the%20cut%2Din%20speed,important%20factor%20for%20wind%20power
6. Вертикальні вітрогенератори Україна. [Електронний ресурс] URL: <http://altenergo.biz/vitrogeneratori/>
7. Основи проектування систем енергозбереження: Методичні вказівки до проведення практичних занять для студентів напряму підготовки 6.051003 «Приладобудування», професійного спрямування «Прилади і системи точної механіки» та «Інформаційні технології в приладобудуванні» // Уклад.: А. В. Писарець, І. В. Коробко. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 55 с
8. Міністерство освіти і науки України. Вітрова енергетика. Основи вітрової енергетики. [Електронний ресурс] URL: <https://vde.nmu.org.ua/ua/lib/%D0%9E%D0%92-2015-02-11.pdf>

9. Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів. Вітрогенератор. [Електронний ресурс] URL: <https://cemsc.vntu.edu.ua/?p=508>
10. Вітрова енергетика в Україні та світі. [Електронний ресурс] URL: <https://hmarochos.kiev.ua/2022/01/18/vitrova-energetyka-v-ukrayini-ta-sviti/>
11. В.М. Корендій, Р.В. Зінько, Аналіз переваг і недоліків горизонтальноосьових вітроустановок, Вісн. Нац. ун-ту «Львів. політехніка», 2012. - № 729. – С. 53-58. [Електронний ресурс] URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/4790/10.pdf>
12. Типи вітрових електростанцій (ВЕС) та їх різниця. [Електронний ресурс] URL: <https://iknet.com.ua/uk/article/types-of-WPP>
13. В.М. Корендій, Аналіз систем орієнтації вітроколів. Вісн. Нац. ун-ту «Львів. політехніка». [Електронний ресурс] URL: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/4e864af0-feab-4870-b96d-765c9e51bb21/content>

ДОДАТОК А

Програмний код в MATLAB:

%% Параметри системи

% Параметри лазера

lambda = 1550e-9; % Довжина хвилі [м]

P_laser = 100e-3; % Потужність лазера [Вт] (збільшено)

linewidth = 1e6; % Ширина спектральної лінії [Гц]

beam_waist = 1e-3; % Радіус перетяжки променя [м]

% Параметри телескопа

D_telescope = 100e-3; % Діаметр телескопа [м] (збільшено)

f_telescope = 200e-3; % Фокусна відстань [м]

eta_optics = 0.9; % Ефективність оптики (покращено)

% Параметри детектора

quantum_eff = 0.9; % Квантова ефективність (покращено)

R_load = 50; % Опір навантаження [Ом]

bandwidth = 50e6; % Смуга пропускання [Гц] (зменшено для кращого SNR)

T_detector = 250; % Температура детектора [К] (знижено)

% Атмосферні параметри

visibility = 20e3; % Видимість [м] (покращено)

Cn2 = 1e-15; % Структурна константа турбулентності [м^{-2/3}] (зменшено)

aerosol_conc = 5e3; % Концентрація аеросолів [см⁻³] (збільшено)

% Параметри обробки сигналів

```

fs = 250e6;          % Частота дискретизації [Гц]
N_fft = 2048;        % Розмір FFT
overlap = 0.5;       % Перекриття вікон

%% Параметри вимірювання
wind_speeds = 1:1:50; % Діапазон швидкостей вітру [м/с]
ranges = 50:50:1000; % Діапазон дальностей [м]
angles = 0:5:45;     % Кути зондування [град]

%% Константи
c = 3e8;              % Швидкість світла [м/с]
h = 6.626e-34;        % Константа Планка [Дж·с]
k_B = 1.381e-23;      % Константа Больцмана [Дж/К]
e = 1.602e-19;        % Заряд електрона [Кл]

%% Основне моделювання
fprintf('Початок моделювання датчика швидкості вітру...\n');

% Ініціалізація результатів
results.wind_speeds = wind_speeds;
results.ranges = ranges;
results.accuracy = zeros(length(wind_speeds), length(ranges));
results.SNR = zeros(length(wind_speeds), length(ranges));
results.detection_rate = zeros(length(wind_speeds), length(ranges));

% Розрахунок характеристик для різних умов
for i = 1:length(wind_speeds)
    for j = 1:length(ranges)
        v_wind = wind_speeds(i);
        range = ranges(j);

```

```

% Розрахунок доплерівської частоти
f_doppler_true = calculate_doppler_frequency(v_wind, 0, lambda);

% Розрахунок потужності відбитого сигналу
beta = calculate_backscatter_coeff(aerosol_conc, visibility, lambda);
alpha = 3.912 / visibility; % Коефіцієнт загасання
A_telescope = pi * (D_telescope/2)^2;

P_return = lidar_equation(P_laser, beta, range, eta_optics, A_telescope,
alpha);

% Розрахунок фотоструму
I_photo = P_return * quantum_eff * e / (h * c / lambda);

% Розрахунок шумів
[noise_shot, noise_thermal] = calculate_detector_noise(I_photo, R_load,
T_detector, bandwidth);
total_noise = sqrt(noise_shot^2 + noise_thermal^2);

% SNR
SNR_dB = 20 * log10(sqrt(I_photo) / total_noise);
results.SNR(i, j) = SNR_dB;

% Моделювання сигналу та детектування
if SNR_dB > -20 % Знижений поріг для детектування
    N_samples = N_fft;
    signal = generate_doppler_signal(f_doppler_true, SNR_dB, fs,
N_samples);

```

```

% Детектування частоти
[f_detected, SNR_measured] = detect_doppler_frequency(signal, fs);

% Розрахунок швидкості вітру
v_detected = f_detected * lambda / 2;

% Похибка вимірювання
error = abs(v_detected - v_wind);
results.accuracy(i, j) = error;
results.detection_rate(i, j) = 1;
else
    results.accuracy(i, j) = NaN;
    results.detection_rate(i, j) = 0;
end
end

% Відображення прогресу
if mod(i, 10) == 0
    fprintf('Оброблено %d/%d швидкостей вітру\n', i, length(wind_speeds));
end

end

fprintf('Моделювання завершено.\n');

%% Візуалізація результатів

% Графік 1: Залежність SNR від дальності для різних швидкостей вітру
figure(1);
plot(ranges/1000, results.SNR(5,:), 'b-', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(ranges/1000, results.SNR(10,:), 'r-', 'LineWidth', 2);

```

```

plot(ranges/1000, results.SNR(20,:), 'g-', 'LineWidth', 2);
plot(ranges/1000, results.SNR(30,:), 'm-', 'LineWidth', 2);
xlabel('Дальність, км');
ylabel('SNR, дБ');
title('Залежність SNR від дальності');
legend('5 м/с', '10 м/с', '20 м/с', '30 м/с', 'Location', 'best');
grid on;

```

% Графік 2: Карта точності вимірювань

```

figure(2);
[X, Y] = meshgrid(ranges/1000, wind_speeds);
surf(X, Y, results.accuracy);
xlabel('Дальність, км');
ylabel('Швидкість вітру, м/с');
zlabel('Похибка, м/с');
title('Точність вимірювання швидкості вітру');
colorbar;
view(45, 30);
grid on;

```

% Графік 3: Зона виявлення сигналу

```

figure(3);
detection_map = results.detection_rate;
imagesc(ranges/1000, wind_speeds, detection_map);
xlabel('Дальність, км');
ylabel('Швидкість вітру, м/с');
title('Зона надійного виявлення сигналу');
colorbar;
colormap(gca, [1 0 0; 0 1 0]); % Червоний - немає виявлення, зелений - є
виявлення

```

```
grid on;
```

```
% Графік 4: Профіль точності для фіксованої дальності
```

```
figure(4);
```

```
fixed_range_idx = find(ranges == 500, 1); % 500 м
```

```
if ~isempty(fixed_range_idx)
```

```
    accuracy_profile = results.accuracy(:, fixed_range_idx);
```

```
    valid_idx = ~isnan(accuracy_profile);
```

```
    if any(valid_idx)
```

```
        plot(wind_speeds(valid_idx), accuracy_profile(valid_idx), 'b-o', 'LineWidth',  
2);
```

```
        xlabel('Швидкість вітру, м/с');
```

```
        ylabel('Похибка вимірювання, м/с');
```

```
        title('Точність на дальності 500 м');
```

```
        grid on;
```

```
    else
```

```
        text(0.5, 0.5, 'Немає даних для відображення', 'HorizontalAlignment',  
'center', 'Units', 'normalized');
```

```
        title('Точність на дальності 500 м');
```

```
    end
```

```
else
```

```
    text(0.5, 0.5, 'Дальність 500м не знайдена', 'HorizontalAlignment', 'center',  
'Units', 'normalized');
```

```
    title('Точність на дальності 500 м');
```

```
end
```

```
%% Аналіз результатів та виведення статистики
```

```
fprintf('\n=== РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ===\n');
```

% Середня точність у зоні надійного виявлення

```
valid_measurements = ~isnan(results.accuracy);
mean_accuracy = mean(results.accuracy(valid_measurements));
std_accuracy = std(results.accuracy(valid_measurements));
```

```
fprintf('Середня похибка вимірювання: %.3f ± %.3f м/с\n', mean_accuracy,
std_accuracy);
```

% Максимальна дальність для різних швидкостей вітру

```
max_ranges = zeros(size(wind_speeds));
for i = 1:length(wind_speeds)
    detection_indices = find(results.detection_rate(i, :) == 1);
    if ~isempty(detection_indices)
        max_ranges(i) = ranges(detection_indices(end));
    end
end
```

```
fprintf('Максимальна дальність виявлення:\n');
for i = [5, 10, 20, 30]
    if i <= length(wind_speeds) && max_ranges(i) > 0
        fprintf(' При %d м/с: %.0f м\n', wind_speeds(i), max_ranges(i));
    end
end
```

% Мінімальна швидкість вітру для надійного виявлення

```
min_wind_speeds = zeros(size(ranges));
for j = 1:length(ranges)
    detection_indices = find(results.detection_rate(:, j) == 1);
    if ~isempty(detection_indices)
        min_wind_speeds(j) = wind_speeds(detection_indices(1));
    end
end
```

```

    end
end

fprintf('\nМінімальна швидкість для надійного виявлення:\n');
range_indices = [find(ranges==100), find(ranges==500), find(ranges==1000)];
for idx = range_indices
    if idx <= length(ranges) && min_wind_speeds(idx) > 0
        fprintf(' На дальності %d м: %.1f м/с\n', ranges(idx),
min_wind_speeds(idx));
    end
end

% Аналіз впливу атмосферних умов
fprintf('\n=== АНАЛІЗ ВПЛИВУ АТМОСФЕРНИХ УМОВ ===\n');

% Вплив видимості
visibilities = [1e3, 5e3, 10e3, 20e3]; % км
fixed_range = 500; % м
fixed_wind = 10; % м/с

fprintf('Вплив видимості на SNR (дальність 500м, швидкість 10м/с):\n');
for vis = visibilities
    beta = calculate_backscatter_coeff(1e3, vis, lambda);
    alpha = 3.912 / vis;
    A_telescope = pi * (D_telescope/2)^2;

    P_return = lidar_equation(P_laser, beta, fixed_range, eta_optics, A_telescope,
alpha);
    I_photo = P_return * quantum_eff * e / (h * c / lambda);

```

```
[noise_shot, noise_thermal] = calculate_detector_noise(I_photo, R_load,
T_detector, bandwidth);
```

```
total_noise = sqrt(noise_shot^2 + noise_thermal^2);
```

```
SNR_dB = 20 * log10(sqrt(I_photo) / total_noise);
```

```
fprintf(' Видимість %.0f км: SNR = %.1f дБ\n', vis/1000, SNR_dB);
end
```

```
%% Збереження результатів
```

```
save('lidar_simulation_results.mat', 'results', 'wind_speeds', 'ranges');
```

```
fprintf('\nРезультати збережено у файл: lidar_simulation_results.mat\n');
```

```
fprintf('\nМоделювання завершено успішно!\n');
```

```
%% Функції (повинні бути в кінці файлу)
```

```
% Функція розрахунку доплерівської частоти
```

```
function f_doppler = calculate_doppler_frequency(v_wind, theta, lambda)
```

```
    f_doppler = 2 * v_wind * cosd(theta) / lambda;
```

```
end
```

```
% Функція розрахунку потужності відбитого сигналу (рівняння лідара)
```

```
function P_return = lidar_equation(P_laser, beta, range, eta, A_telescope, alpha)
```

```
    P_return = (P_laser * beta * eta * A_telescope) / (range^2) * exp(-2 * alpha *
range);
```

```
end
```

```
% Розрахунок коефіцієнта зворотного розсіювання
```

```
function beta = calculate_backscatter_coeff(aerosol_conc, visibility, lambda)
```

```
    % Покращена модель для континентальних аеросолів
```

```

alpha_ext = 3.912 / visibility; % Коефіцієнт екстинкції [м-1]
Q_back = 0.1; % Фактор ефективності зворотного розсіювання (збільшено)

% Розрахунок на основі концентрації аеросолів
sigma_back = 1e-28; % Переріз зворотного розсіювання частинки [м2]
beta_aerosol = aerosol_conc * 1e6 * sigma_back; % Переведення см-3 в
м-3

% Комбінований коефіцієнт
beta = beta_aerosol + (3 * alpha_ext * Q_back) / (8 * pi);
end

% Розрахунок шумів детектора
function [noise_shot, noise_thermal] = calculate_detector_noise(I_photo, R_load,
T, bandwidth)
e = 1.602e-19; % Заряд електрона [Кл]
k_B = 1.381e-23; % Константа Больцмана [Дж/К]

noise_shot = sqrt(2 * e * I_photo * bandwidth);
noise_thermal = sqrt(4 * k_B * T * bandwidth / R_load);
end

% Генерація доплерівського сигналу з шумом
function signal = generate_doppler_signal(f_doppler, SNR_dB, fs, N_samples)
t = (0:N_samples-1) / fs;
signal_power = 1;
noise_power = signal_power / (10^(SNR_dB/10));

% Доплерівський сигнал
signal_clean = sqrt(signal_power) * cos(2*pi*f_doppler*t);

```

```

% Додавання шуму
noise = sqrt(noise_power/2) * (randn(size(t)) + 1j*randn(size(t)));
signal = signal_clean + real(noise);
end

% Алгоритм виділення доплерівської частоти методом FFT
function [f_detected, SNR_measured] = detect_doppler_frequency(signal, fs)
    % Застосування віконної функції Ханна (власна реалізація)
    N = length(signal);
    n = 0:N-1;
    window = 0.5 * (1 - cos(2*pi*n/(N-1)));
    signal_windowed = signal .* window;

    % FFT
    Y = fft(signal_windowed);
    P = abs(Y).^2 / length(signal);
    f = (0:length(signal)-1) * fs / length(signal);

    % Виділення позитивних частот
    P_pos = P(1:floor(length(P)/2));
    f_pos = f(1:floor(length(f)/2));

    % Пошук піка
    [max_power, max_idx] = max(P_pos);

    % Параболічна інтерполяція для підвищення точності
    if max_idx > 1 && max_idx < length(P_pos)
        x1 = P_pos(max_idx-1);
        x2 = P_pos(max_idx);

```

```

x3 = P_pos(max_idx+1);

delta = 0.5 * (x3 - x1) / (2*x2 - x1 - x3);
f_detected = f_pos(max_idx) + delta * (f_pos(2) - f_pos(1));
else
    f_detected = f_pos(max_idx);
end

% Расчет SNR
noise_floor = median(P_pos);
SNR_measured = 10 * log10(max_power / noise_floor);
end

```