

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк

**ДИСТАНЦІЙНИЙ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧНИЙ
КОНТРОЛЬ ПОЛІДИСПЕРСНИХ АЕРОЗОЛЬНИХ
СЕРЕДОВИЩ В ЕКОЛОГІЧНОМУ МОНІТОРИНГУ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2016

УДК 504.064.38
ББК 26.222
П86

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 2 від 26.09.2013 р.)

Рецензенти:

А. П. Іванов, доктор фізико-математичних наук, професор

В. Д. Погребенник, доктор технічних наук, професор

В. Ю. Кучерук, доктор технічних наук, професор

Петрук, В. Г.

П86 Дистанційний спектрополяриметричний контроль полідисперсних аерозольних середовищ в екологічному моніторингу / В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 187 с.

ISBN 978-966-641-659-2

Монографію присвячено підвищенню вірогідності контролю забруднення атмосфери промисловим пилом та аерозолем. Здійснено аналіз сучасного стану систем контролю і локації полідисперсних середовищ. Досліджено математичні моделі розповсюдження лазерного випромінювання в полідисперсних аерозольних середовищах. Розроблено автоматизовану контрольну-вимірювальну систему для локації і контролю полідисперсних аерозольних середовищ та її метрологічне забезпечення. Розроблено мультиспектральні методики локації і контролю забруднення.

УДК 504.064.38

ББК 26.222

ISBN 978-966-641-659-2

© В. Петрук, І. Васильківський, С. Кватернюк, 2016

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ І ЛОКАЦІЇ ПОЛІДИСПЕРСНИХ АЕРОЗОЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ.....	8
1.1 Принцип дії систем лідарного зондування і локації	8
1.2 Лазери та прийомні телескопи для лідарів.....	9
1.3 Системи реєстрації систем лідарного зондування і локації	11
1.4 Джерела шуму та методи покращення відношення сигнал/шум... ..	12
1.5 Вплив турбулентності неоднорідного атмосферного середовища на характеристики ехосигналу.....	14
2 АНАЛІЗ РІВНЯННЯ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДУВАННЯ ПОЛІДИСПЕРСНИХ АЕРОЗОЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ	
3 ДОПОМОГОЮ ЛІДАРА	17
2.1 Способи опису поляризаційних характеристик розсіяного випромінювання	17
2.2 Формування спектрополяризаційних характеристик у полідисперсних аерозольних середовищах	23
2.3 Рівняння переносу поляризованого випромінювання.....	25
2.4 Векторні рівняння наближеної моделі розсіювання	30
2.5 Лідарне рівняння для однократного розсіювання	33
2.6 Трансформація лазерного випромінювання в атмосфері	35
2.7 Лазерне зондування атмосферних аерозолів.....	37
3 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В ПОЛІДИСПЕРСНИХ АЕРОЗОЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩАХ	39
3.1 Математична модель поглинання лазерного випромінювання атмосферними газами.....	39
3.2 Математична модель розсіяння лазерного випромінювання в атмосфері	42
3.3 Математична модель розсіяння світла аерозольними частками....	44
3.4 Спектральна прозорість атмосферних аерозольних утворень	51
4 МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ЛІДАРА КОМБІНАЦІЙНОГО РОЗСІЮВАННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ	55
4.1 Дистанційна спектроскопія комбінаційного розсіяння світла.....	55
4.2 Характеристика КР-лідарів	57
4.3 Моделювання режиму роботи КР-лідара	61
5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МЕТОДИКА ЛАЗЕРНОГО ЗОНДУВАННЯ І ЛОКАЦІЇ.....	63
5.1 Виведення і аналіз рівняння лазерного зондування.....	63
5.2 Геометрична функція лідара.....	67
5.3 Методика логарифмічної похідної.....	74

5.4	Методика пошарового відновлення	74
5.5	Методика ітераційного алгоритму	75
5.6	Методика похилих трас	75
5.7	Методика квадратурного або інтегрального накопичення.....	76
6	РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ КОНТРОЛЬНО- ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ЛОКАЦІЇ І КОНТРОЛЮ ПОЛІДИСПЕРСНИХ АЕРОЗОЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ.....	85
6.1	Лідарні системи різного базування	85
6.2	Лазери та прийомні телескопи для лідарів.....	91
6.3	Системи реєстрації систем лідарного зондування.....	94
6.4	Джерела шуму та методи покращення відношення сигнал–шум..	95
7	МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНОГО (ЛІДАРНОГО) КОНТРОЛЮ ПОЛІДИСПЕРСНИХ АЕРОЗОЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ.....	99
7.1	Калібрування і юстування лідарних систем.....	99
7.2	Визначення геометричної функції	100
7.3	Визначення сталої калібрування	102
7.4	Визначення функції нелінійності прийомного тракту	104
8	МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНДИКАТРИС РОЗСІЮВАННЯ ПОЛІДИСПЕРСНИХ АЕРОЗОЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ	105
8.1	Аналіз рівняння лазерного зондування атмосфери з допомогою лідара.....	105
8.2	Лідарне рівняння для однократного розсіювання	105
8.3	Трансформація лазерного випромінювання в атмосфері	108
9	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНДИКАТРИС РОЗСІЮВАННЯ ПОЛІДИСПЕРСНИХ АЕРОЗОЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ	110
9.1	Характеристика приземного шару атмосфери.....	110
9.2	Фізичні параметри атмосфери	112
9.3	Характеристика систем лідарного контролю атмосфери	113
9.4	Застосування лідарних систем екологічного моніторингу атмосфери	115
9.5	Лідарні дослідження стандартних параметрів атмосфери	118
9.5.1	Вимірювання стандартних параметрів атмосфери	118
9.5.2	Характеристика точності визначення температури атмосфери	120
9.5.3	Характеристика точності вимірювання густини атмосфери	121
9.6	Визначення концентрації забруднення атмосфери	122
9.7	Лідарний екологічний моніторинг атмосферного аерозолю.....	123
9.7.1	Лазерне зондування атмосферних аерозолів	124

9.7.2 Прозорість атмосфери в чистих і забруднених районах	125
9.7.3 Аналіз структури атмосферного аерозолю	128
10 ОБРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ЛОКАЦІЇ З УРАХУВАННЯМ ЕФЕКТИВ РОЗСІЮВАННЯ	130
10.1 Залежність коефіцієнта послаблення від масової концентрації аерозолю	130
10.2 Експериментальні дослідження коефіцієнта μ	133
10.3 Визначення просторового розподілу аерозольних забруднень	137
10.4 Використання лідарів для оцінки викидів локальними джерелами	138
10.5 Застосування лідарів для зондування щільних аерозольних утворень	140
10.6 Використання двократного розсіювання для оцінки параметрів щільних аерозольних утворень	140
11 ВИВЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ОПТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОЛІДИСПЕРСНИХ АЕРОЗОЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ ВІД ВПЛИВНИХ ФАКТОРІВ	144
11.1 Оцінка мікрофізичних параметрів часток методом багатохвильового зондування	144
11.2 Вплив температурних інверсій на поширення аерозольних забруднень	148
11.3 Використання деполяризації ехосигналу для селекції типів аерозолів	150
12 РОЗРОБКА СПЕЦІАЛЬНИХ МЕТОДИК ДЛЯ ЛОКАЦІЇ І КОНТРОЛЮ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ АЕРОЗОЛЯМИ	152
12.1 Теоретична основа мультиспектрального і Раманівського розсіювання аерозолю	152
12.2 Обробка мультиспектрального і Раманівського лідарних вимірів	155
12.3 Методика мультиспектрального лідарного зондування	158
12.4 Алгоритми обчислення функції розподілу часток аерозолю по розмірах, рахункової й масової концентрації аерозолю	162
12.4.1 Процедура калібрування сигналів лідара	163
12.4.2 Математична обробка мультиспектральних лідарних сигналів	164
12.4.3 Відновлення функції розподілу часток аерозолю за розмірами	166
12.4.4 Представлення функції розподілу аерозолю	168
12.5 Застосування методу оптимальної параметризації	169
ВИСНОВКИ	175
ЛІТЕРАТУРА	178

ВСТУП

Багатокомпонентні газові суміші і потоки широко поширені в природі і відіграють важливу роль в багатьох сучасних технологіях. Складність існуючих методів дослідження і контролю газових багатокомпонентних сумішей вимагає ретельної оцінки їх можливостей і меж застосування, а головне – правильного вибору і експериментальної реалізації оптимального методу вимірювання параметрів газової суміші для кожного конкретного завдання, зокрема для таких галузей, як енергогенеруючої, машинобудівної, хімічної, а головне – для охорони навколишнього середовища.

Розв'язання рівняння переносу випромінювання для неоднорідних середовищ є важким математичним завданням, і розробка методів розв'язання складає спеціальний розділ математичної фізики. В останні роки досягнутий істотний прогрес у розвитку чисельних методів розв'язання рівняння переносу випромінювання, найбільш поширеним з яких є метод Монте-Карло та ін. Проте при розв'язанні великої кількості прикладних завдань перевага при розв'язанні рівняння перенесення віддається наближеним методам.

Розв'язання рівняння переносу випромінювання є досить складною математичною задачею, і розроблення методів розв'язання складає спеціальний розділ математичної фізики. Методи лазерного зондування атмосфери розглянуті в роботах таких іноземних авторів, як Е. Д. Хінклі, Р. Межериса, В. М. Захарова, С.С. Хмелевцова, В. Е. Зуєва, В. В. Зуєва, А. П. Іванова, А. П. Чайковського, Ю. М. Андрєєвої, В. Г. Воеводіна та інших, що зробили вагомий внесок у розвиток теоретичних та методологічних засад засобів локації та контролю неоднорідних середовищ.

Розповсюдження лазерного випромінювання в атмосфері супроводжується великим набором явищ лінійної і нелінійної взаємодії, жодне з яких не виявляється окремо. За якісними ознаками вказані явища можна розділити на такі основні групи: рефракція променів лазерного пучка; поглинання енергії лазерного пучка атмосферними газами; розсіяння енергії лазерного пучка частками аерозолів на флуктуаціях густини повітря; флуктуації параметрів лазерних пуч-

ків, обумовлені атмосферною турбулентністю тощо. В той же час кожна з цих груп має чіткі специфічні особливості, які повинні враховуватися при відповідних теоретичних і експериментальних дослідженнях.

Моніторинг забруднення великих об'ємів атмосферного середовища неможливо здійснити тільки традиційними, класичними методами, які подають інформацію тільки із обмежених в окремих реперних точках на невеликому числі станцій і, як правило, у приземному шарі.

Відомі засоби локації і контролю неоднорідних середовищ є громіздкими, переважно працюють у ручному режимі, мають низькі точність, достовірність та швидкодію.

Лідари (лазерні локатори) відкривають принципово нові можливості для дослідження складу атмосфери та вивчення процесів, які в ній відбуваються, задач кліматології, екології, трансграничного переносу забруднень тощо.

У багатьох практичних задачах лідар може виступати як індикатор: надзвичайної ситуації, пожежі, виявлення джерел викидів, поширення в просторі викидів підприємств. Крім цього, лазерна локація і зондування має низку переваг перед традиційними методами контролю забруднення повітря, а саме: великий просторовий об'єм контрольованого атмосферного середовища по вимірюваному компоненту, неконтактність, експресність, скритність (якщо мова йде, зокрема, про ІЧ-зондування) та безперервність здійснюваного контролю.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ І ЛОКАЦІЇ ПОЛІДИСПЕРСНИХ АЕРОЗОЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ

1.1 Принцип дії систем лідарного зондування і локації

Лідар в загальному випадку складається з таких основних частин: лазера, передавальної оптичної схеми, приймального телескопа, спектроаналізатора, фотоприймача і електронної вимірювальної системи. Імпульс лазерного випромінювання, сформований оптикою (телескопом або іншим об'єктивом для зменшення розсіювання променя), спрямовується на мішень. Частина лазерного випромінювання використовується для створення опорного сигналу і для контролю довжини хвилі в тих випадках, коли це необхідно. Опорний сигнал задає початок відліку часу, а його амплітуда – енергію лазерного імпульсу. Випромінювання, розсіяне мішенню назад, збирається приймальним телескопом і через спектроаналізатор потрапляє на фотоприймач. Вибір фотоприймача визначається спектральною областю вимірювань, яка залежить від використовуваного лазера і методу зондування. Електричний сигнал з фотоприймача обробляється вимірювальною системою за заданим алгоритмом. Спектроаналізатор призначений для виділення інтервалу довжин хвиль, в якому проводяться вимірювання, і відсічки фонового випромінювання на інших довжинах хвиль. Він може бути виконаний у вигляді монохроматора, поліхроматора або вузькосмугового інтерференційного світлофільтра. У основі методів лазерного зондування лежать такі процеси взаємодії лазерного випромінювання з речовиною:

- розсіяння Мі на аерозольних частинках;
- молекулярне релеївське розсіяння;
- комбінаційне розсіяння (КР);
- флуоресценція (люмінесценція), у тому числі і резонансна; резонансне поглинання;
- диференціальне поглинання і розсіяння (ДПР).

Існують дві основні оптичні схеми лідарів [1, 2]. У бістатичній схемі лазер і приймальний телескоп рознесені на деяку відстань для того, щоб досягти високої просторової роздільної здатності при зондуванні. На сьогодні така схема використовується рідко, оскільки лазери наносекундних імпульсів можуть забезпечити просторову роздільну здатність порядку декількох метрів при використанні моностатичної схеми, якій і віддається перевага. В останньому випадку лазер і приймальний телескоп встановлюються в одному місці. Моностатич-

ний лідар може мати як коаксіальне, так і біаксіальне розташування. У коаксіальній схемі вісь лазерного променя збігається з оптичною віссю приймального телескопа, тоді як в біаксіальній схемі ці осі паралельні, і лазерний промінь входить у поле зору приймального телескопа тільки на деякій заздалегідь встановленій відстані. Остання схема, хоч і дозволяє уникнути проблеми розсіяного випромінювання із ближньої зони і перенасичення фотоприймача, але, все ж таки, є менш ефективною у порівнянні з коаксіальною схемою. Проблема ближньої зони в коаксіальній схемі вирішується замиканням фотоприймача за допомогою модулятора або швидкого механічного затвору.

Отже, аналіз численних наукових джерел з лазерного зондування атмосферного середовища дозволяє зробити висновок про те, що найбільшого поширення сьогодні набули системи лідарного контролю з моностаціональною біаксіальною оптичною схемою.

1.2 Лазери та прийомні телескопи для лідарів

Для дистанційного зондування становлять інтерес лазери, які здатні генерувати спектрально обмежені імпульси випромінювання наносекундної тривалості високої потужності й невеликої кутової розбіжності. У тих випадках, коли сигнал є дуже слабким, необхідна також досить висока частота повторення імпульсів. Все різноманіття лазерів, які можуть бути застосовані для зондування атмосфери, наведено в [2–4]. Ще більш широкі можливості по застосуванню лазерів відкриваються при використанні генерації вищих гармонік, параметричної конверсії або комбінаційного зсуву лазерів, які створюються, на барвниках. Застосування модуляції добротності дає можливість одержувати пікову потужність 1–40 МВт при тривалості імпульсу 10–30 нс. Прийнятними для дослідження є тільки мінімальні кути розбіжності пучка, а частота повторення імпульсів близько 10 Гц. Подвоєння або потроєння частоти досягається за рахунок застосування відповідних нелінійних кристалів. Ефективність перетворення залежить від оптичної якості кристалу, довжини хвилі, інтенсивності і ступеня когерентності лазерного пучка. Верхня межа ККД перетворення може досягати 70 %.

Клас газових лазерів найбільш різноманітний: у нього входять самі коротко- і довгохвильові лазери, лазер з найвищим ККД і найбільш потужний безперервний лазер. CO₂-лазер низького тиску генерує імпульси з енергією 1–10 Дж і частотою повторення до 10 Гц і може досягати ККД 30 %. У перших КР-лідарах використовувався і азотний лазер. Для дистанційного зондування становлять інтерес ексимерні лазери на молекулах ХеCl і KrF, тому що довжини хвиль їхнього випромінювання

лежать в УФ-області спектра (менше 308 нм), тривалості імпульсів 10–20 нс з енергією до 0,5 Дж [1].

Широке застосування імпульсних газових лазерів на парах міді в спектроскопічних експериментах дозволяє зробити припущення про можливості їхнього використання в лазерних системах дистанційного зондування і контролю. Такий імпульсно-періодичний мідний лазер дозволив авторам [5–8] одержати такі характеристики: безперервна сумарна потужність на довжинах хвиль 510,6 й 578,2 нм – 43,5 Вт при частоті проходження імпульсів 20 кГц і імпульсна потужність – 200 кВт при тривалості імпульсу 10 нс. У роботі [2] наводиться значення пікової потужності 130 кВт на довжині хвилі 510,6 нм, а також потужність другої гармоніки в УФ-області спектра на довжині хвилі 289,1 нм 75 мВт при потужності першої гармоніки 1 Вт (ККД перетворення 7,5 %). Отже, можна одержати лазерні імпульси тривалістю 10 нс із частотою проходження до 20 кГц на довжинах хвиль 510,6, 255,3, 578,2, 289,1 нм і сумарної частоти 271,2 нм із відповідними піковими потужностями 130, 9, 150, 11 й 10 кВт.

Всі імпульсні лазери на барвниках можна розділити на два окремих класи: з накачуванням імпульсною лампою й імпульсним твердотільним лазером. Причому перебудова й звуження спектральної лінії випромінювання таких лазерів досягається шляхом застосування дифракційних решіток або інших дисперсійних елементів. Лазери із накачуванням імпульсною лампою можуть генерувати імпульси тривалістю 0,1–10 мкс з перебудовою в діапазоні 300–700 нм і піковою потужністю більше 1 МВт. У тих випадках, коли потрібні більше короткі (1–20 нс) лазерні імпульси, що перебудовуються, накачування барвника здійснюється за допомогою твердотільного лазера з модуляцією добротності або імпульсного газового лазера.

Застосування напівпровідникових лазерів в спектроскопічних експериментах дозволяє зробити припущення про можливості їхнього використання й у системах дистанційного зондування. Створення блакитного лазерного діода з такими характеристиками: квазібезперервна потужність на довжині хвилі 419 нм 135 МВт при частоті проходження імпульсів 20 кГц і імпульсній потужності 5 Вт при тривалості імпульсу 100 нс – відкриває нові перспективи в цьому напрямку. Отже, можна одержати лазерні імпульси тривалістю 100 нс із частотою проходження до 200 кГц на довжинах хвиль 419, 678, 780 й 820 нм і з піковими потужностями до 100 Вт.

До головних переваг напівпровідникових лазерів варто віднести невеликі розміри й експлуатаційну надійність конструкції, пряме елек-

тричне збудження із можливою швидкою перебудовою довжини хвилі за рахунок зміни густоти струму, високий ККД (більше 50 %, у інжекторних наближається до 80 %) і широкий спектральний діапазон (0,4–34 мкм). Однак їх відрізняє невелика пікова потужність (до 100 Вт) і велика розбіжність променя [3, 4]. Але висока частота проходження імпульсів дозволяє при реєстрації лідарного сигналу скоротити час нагромадження імпульсів при збереженні дистанції зондування.

Основними елементами прийомної оптики в цей час є телескопи типу Ньютона й Кассегрена. У біаксіальних схемах широко використовуються телескопи Ньютона. Сполучення компактності й великої фокусної відстані сприяє кращому поширенню телескопів Кассегрена. Використання в телескопах пластмасових френелівських лінз великого діаметра робить їх недорогими, легкими і компактними, що становить інтерес для розробки мобільних лідарів. Розмір апертури телескопа суттєво залежить від використовуваного методу і довжини траси зондування. Найбільші конструктивні вимоги пред'являються в лідарах КР, коли доводиться застосовувати телескопи із головним дзеркалом до 1 м.

1.3 Системи реєстрації систем лідарного зондування і локації

Сигнал фотоприймача може піддаватися аналоговій або цифровій обробці [1]. Раніше використовувався аналоговий підхід, при якому сигнал зворотного розсіювання відтворювався на широкосмуговому осцилографі як функція часу затримки, пропорційна відстані, яка потім фотографувалася. Далі фотографії оброблялися вручну або на ЕОМ. Після подання осцилограм у цифровому виді. Використання АЦП із високою швидкодією і різними вимірювальними системами на базі персональних комп'ютерів дозволило проводити обробку даних у реальному масштабі часу.

Зростання сигналу зворотного розсіювання на початковій ділянці траси зондування обумовлено звичайно некоаксіальністю оптичної схеми: із збільшенням відстані зростає перекивання конусу зору приймального телескопа лазерним променем. Подальше зменшення сигналу пов'язане, головним чином, із геометричним фактором. У випадку високої прозорості атмосфери сигнал спадає обернено-пропорційно квадрату відстані. Залежність R^{-2} приводить до того, що динамічний діапазон сигналу становить кілька порядків величини амплітуди. Для того, щоб стиснути цей динамічний діапазон, можна використовувати перемикання коефіцієнтів підсилення, логарифмічні підсилювачі й керування посиленням фотоприймачів за законом t^2 [2]. Крім цього можна за-

стосовувати й оптичні методи, наприклад, прийомну систему зі змінною фокусною відстанню [2–5]. Коли сигнал зворотного розсіювання є дуже слабким, як в експериментах по КР або при дослідженні верхніх шарів атмосфери, необхідно працювати в режимі нагромадження сигналу. Для цього випадку звичайно використовується режим підрахунку фотонів, коли реєструються й підраховуються імпульси струму при детектуванні окремих фотонів. Такий підхід природно сполучається із цифровою обробкою результатів вимірів.

Отже, із розглянутих систем реєстрації лідарного сигналу в діапазоні слабких сигналів перевагу варто віддати системам, які працюють у режимі підрахунку окремих фотонів і режимі нагромадження.

1.4 Джерела шуму та методи покращення відношення сигнал/шум

При дистанційному зондуванні і контролі вкрай важливим є питання відношення інформативного сигналу до шуму [1, 2]. Шум у цьому випадку може мати оптичну або теплову природу. Найбільш важливими є чотири типи шуму:

- шум сигналу (квантовий шум) за рахунок статистичних флуктуацій випромінювання лазера;
- шум фонового випромінювання за рахунок статистичних флуктуацій фонового випромінювання;
- шум темного струму фотоприймача за рахунок термічної генерації носіїв струму при відсутності оптичного сигналу;
- тепловий шум радіоелектронної апаратури.

При роботі в денний час сонячна радіація, розсіяна атмосферою або підстилаючою поверхнею землі, може перевищувати всі інші форми шуму. Необхідно також мати на увазі, що у випадку КР або флуоресценції до фонового випромінювання варто віднести й розсіяне лазерне випромінювання.

Енергію фонового випромінювання, що падає на фотоприймач через прийомну оптику за час детектування, можна оцінити, знаючи спектральну яскравість сонячної радіації. До довжини хвилі 300 нм цей фон різко падає через поглинання радіації озонним шаром Землі. Більш плавно падаюча крива сонячної спектральної яскравості в ІК-діапазоні порізана численними смугами поглинання молекул газів. Другий максимум із центром біля 10 мкм обумовлений тепловим фооновим випромінюванням.

У випадку бортових лідарів, що приймають випромінювання знизу, варто враховувати відбиту й розсіяну радіацію, що йде знизу від земної поверхні або поверхні океану. Для того, щоб зменшити потік фонової

радіації, смуга пропускання спектроаналізатора завжди вибирається настільки малою, щоб вона була близькою до спектральної ширини вимірюваного сигналу. Майже у всіх випадках розсіювання ця спектральна смуга пропускання є настільки вузькою, що зміною спектральної яскравості в інтервалі довжин хвиль, у якому проводиться вимірювання, можна знехтувати. Звичайно спектроаналізатор характеризується функцією пропускання, яку можна інтерпретувати як ефективну ширину смуги пропускання [1].

Шум, пов'язаний із фотоприймачем, обумовлений декількома факторами: його типом, характеристиками фотокатода, робочим коефіцієнтом підсилення, а також можливостями використання конкретного фотоприймача. Домінуючий механізм цього шуму визначається виходом із фотокатода окремих електронів під час відсутності падаючого світла. Цей темновий струм обумовлений тепловими й автоемісійними процесами й може досягати 10^{-13} А при кімнатній температурі. Охолодження фотодетектора – розповсюджений метод зниження цього шуму.

Широке застосування в лазерних системах зондування і контролю в якості фотоприймачів у видимій області спектра одержали фотоелектронні помножувачі (ФЕП). Незважаючи на те, що вирази для відношення сигнал/шум ФЕП не враховують низку ефектів: темновий струм динодів, вплив природної радіації – їх можна використати для аналізу можливостей підвищення відношення сигнал/шум. В першу чергу, це відношення можна підвищити за рахунок вибору самого ФЕП й режиму його роботи. Фотокатод ФЕП повинен мати максимальний квантовий вихід на заданій довжині хвилі. Шум підсилення й збірну здатність першого диноду можна оптимізувати шляхом додавання між фотокатодом і першим динодом відповідної напруги. При дуже низькій інтенсивності розсіяного світла, коли зростає роль темного струму, перехід до режиму підрахунку фотонів може істотно підвищити відношення сигналу до шуму, оскільки в цьому режимі внесок окремих електронів, які не пройшли весь ланцюжок підсилення, не реєструється. Подальшого підвищення цього відношення можна досягти фокусуванням падаючого випромінювання лише на невелику ділянку фотокатода ФЕП, домагаючись при цьому дефокусування магнітним полем всіх електронів із неосвітлених ділянок фотокатода. Для цього випадку допомагає й охолодження фотокатода, оскільки воно призводить до помітного зниження термоелектронної емісії. При використанні зазначених методів можна детектувати сигнали потужністю 10^{-17} Вт на довжині хвилі 650 нм (35 фотонів/с) із постійної часу 1 с [3–5].

У багатьох випадках вдається збільшити відношення сигнал/шум за рахунок придушення шуму. Так, для зменшення впливу тривалої флуоресценції, індукованої лазерним випромінюванням, раніше застосовували рознесення лазерного передавача і приймача на достатню відстань. На сьогодні більше розповсюджений метод розв'язання цієї проблеми за рахунок використання відсікача флуоресценції [1]. Для цієї мети застосовуються швидкодіючі механічні й електронно-оптичні затвори, ФЕП з електронними затворами. Швидкодіючі затвори також попереджають перевантаження ФЕП лазерним випромінюванням, що розсіюється у ближній зоні.

Важливим способом придушення шуму є спектральне придушення розсіюваного лазерного випромінювання в тих випадках, коли довжина хвилі сигналу відрізняється від довжини хвилі лазерного випромінювання.

Гранична дальність і здатність виявлення для лідарів КР обмежується люмінесценцією на тій же довжині хвилі, що й сигнал КР. Ця люмінесценція може мати природне походження, наприклад, за рахунок розсіювання сонячної радіації, або виникати в результаті індукованої лазерним випромінюванням флуоресценції. На практиці майже неможливо уникнути флуоресценції при збудженні КР. Значну частину цього широкосмугового випромінювання можна відсікти вузькосмуговими фільтрами.

Індуковану лазерним випромінюванням флуоресценцію можна ефективно зменшити за рахунок проведення локальних вимірів. Уникнути люмінесценції можна за рахунок поперемінного перемикавання двох довжин хвиль лазера при використанні сигналу КР лише однієї з них. Якщо дві лінії лазерного випромінювання досить близькі, то можна вважати, що сигнал люмінесценції майже не змінюється, і його можна відняти із сумарного сигналу й одержати «істинний» сигнал КР [2, 6, 7].

Проведений аналіз джерел шуму і їхніх проявів у лідарному сигналі дозволяє виділити як основний метод збільшення відношення сигнал/шум метод спектральної селекції розсіяного назад лазерного випромінювання.

1.5 Вплив турбулентності неоднорідного атмосферного середовища на характеристики ехосигналу

Флуктуації показника заломлення атмосферного повітря, обумовлені турбулентністю, призводять до флуктуацій амплітуди і фази хвилі в оптичному пучку, що розповсюджується в атмосфері. В результаті змінюється його структура: пучок розширюється, розщеплюється на

низку окремих тонших пучків, зміщується центр тяжіння пучка і т. д. Дослідження закономірностей розповсюдження просторово обмежених світлових пучків на прямих трасах в турбулентній атмосфері стало темою великої кількості робіт. Результати цих досліджень показують, що атмосферна турбулентність значною мірою погіршує параметри «хороших» пучків, тобто пучків, розбіжність яких близька до дифракційної межі [8–10]. В той же час при оцінках середньої інтенсивності пучків, що мають розбіжність $j > 3 \times 10^4$ рад, впливом турбулентності можна знехтувати.

При зондуванні атмосфери моностатичним лазерне випромінювання проходить шар турбулентної атмосфери двічі; у прямому напрямку – від джерела до розсіювального об'єму і в зворотному – від розсіювального об'єму до приймача. В результаті випромінювання передавача до трапляння на приймач двічі взаємодіє з одними і тими ж неоднорідностями середовища за період, значно менший їх «часу життя», що призводить до відмінності статистичних характеристик сигналу, що приймається, на локаційних трасах з прямих. Так, наприклад, внаслідок кореляції флуктуації фази падаючої і відбитої хвиль, зображення кутового відбивача у фокальній площині приймального телескопа практично не зміщується, що обумовлене компенсацією зсувів за рахунок повороту просторового розподілу поля падаючої хвилі. При відбиванні від дзеркального диску, навпаки, дисперсія зсувів його локаційного зображення в два рази більша дисперсії зсувів зображення джерела такого ж розміру, віддаленого від приймального телескопа на подвоєну відстань. Як відомо, розсіяння світла на сукупності великого числа статистично незалежних частинок відбувається некогерентно [9]. Тому сумарний ехосигнал, що приходить на приймач лідара з розсіювального об'єму, можна представити як суперпозицію некогерентних хвиль від сукупності точкових відбивачів, властивості яких визначаються видом розсіювальних центрів. Флуктуації амплітуди при відбиванні сферичної хвилі від точкового відбивача досліджені в роботах [9–12]. Тут показано, що збільшення приймальної апертури лідара більш ніж в 2-3 рази в порівнянні з радіусом першої зони Френеля $\sqrt{\lambda L}$ (λ – довжина хвилі, L – відстань до відбивача) практично не знижує рівня флуктуації амплітуди ехосигналу від точкового відбивача. В той же час збільшення розміру відбивача до масштабу $\sqrt{\lambda L}$ істотно зменшує рівень флуктуації. Таким чином, з метою зменшення флуктуації інтенсивності ехосигналу параметри приймальної і передавальної систем лідара слід вибирати так, щоб діаметр

вхідного отвору приймального телескопа і поперечний розмір розсіювального об'єму були більшими у декілька разів за радіус кореляції флуктуації інтенсивності, який в області слабких флуктуацій для плоскої хвилі має порядок радіусу першої зони Френеля $\sqrt{\lambda L}$.

Для підтвердження наведемо вираз для дисперсії флуктуації центру тяжіння зображення у фокальній площині лінзи при локації ламбертівської поверхні

$$\langle \Delta_\rho^2 \rangle = 0,35 f_t^2 C_\varepsilon^2 L r^{-1/3}, \quad (1.1)$$

де f_t – фокусна відстань; C_ε^2 – структурна характеристика флуктуації діелектричної проникності середовища; L – відстань до поверхні; r – ефективний розмір освітленої плями на відбиваючій поверхні. Відмітимо, що (1.1) отримане за умов: $r = r_n$ (r_n – ефективний розмір приймальної апертури); $r = \sqrt{\lambda L}$; відстань між джерелом і приймачем (база) набагато більша за середній розмір неоднорідностей середовища.

Вважаючи в (1.1) $f_t = 100$ см, $C_\varepsilon^2 = 2 \cdot 10^{-14}$ см^{-2/3} (найбільше значення, що реалізується в приземному шарі атмосфери), $L = 105$ см, $r = \theta_n L$ (θ_n – кут розбіжності випромінювання передавача), при $\theta_n = 10^{-3}$ рад матимемо $\Delta_\rho = 1,23 \cdot 10^{-3}$ см. Враховуючи низку спрощувальних припущень, за яких отриманий вираз (1.1), цю оцінку слід вважати досить грубою. Проте незначна величина Δ_ρ не суперечить якісним міркуванням, наведеним вище, тим більше, що в експериментах із звичайними лідарними системами не спостерігаються великі значення флуктуації амплітуди відбитого атмосферою сигналу.

2 АНАЛІЗ РІВНЯННЯ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДУВАННЯ ПОЛІДИСПЕРСНИХ АЕРОЗОЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ З ДОПОМОГОЮ ЛІДАРА

Перші спроби застосування оптичного випромінювання для дистанційного визначення деяких параметрів атмосфери датуються початком ХХ ст. [1, 2]. Проте у зв'язку з недоліком знань з оптики атмосферних процесів, обмеженістю математичного апарату розв'язання зворотних задач і відсутністю потужних джерел оптичного випромінювання практичне використання методів оптичного зондування атмосфери було незначним. Наступний етап їх розвитку починається в 60-х роках, після винаходу лазерів. Специфічні властивості лазерного випромінювання і перспектива їх практичного використання стимулювали величезний інтерес вчених до розв'язання фундаментальних проблем розповсюдження просторово-обмежених вузьконаправлених світлових пучків в атмосфері. В результаті за короткий час були вивчені основні закономірності взаємодії лазерного випромінювання з атмосферою [3, 4], що дозволило приступити до розв'язання складніших проблем, пов'язаних з розробкою методів лазерного зондування атмосфери [5–9].

2.1 Способи опису поляризаційних характеристик розсіяного випромінювання

Розповсюдження світла в розсіювальному середовищі супроводжується не тільки послабленням потужності зондуючого пучка, але і появою розсіяного світла. Особливістю розсіяного поля є його виникнення в результаті накладання світлових пучків, що з'являються при кожному акті розсіяння. Через випадковий розподіл в просторі розсіювальних центрів сумарне поле представлено сумішшю деяких пучків різної інтенсивності і поляризації [10, 11–15]. Тому для аналізу характеристик розсіяного в атмосфері випромінювання використовують параметри, адитивні для некогерентних світлових пучків, і такі, що вичерпно описують не тільки їх енергетику, але і стан поляризації розсіяного світла.

Стан поляризації довільного світлового пучка прийнято описувати чотирма параметрами, вперше запропонованими Стоксом. Кожен з них є лінійною комбінацією квадратичних характеристик поля і може бути безпосередньо вимірний експериментально. Всі параметри Стокса S_i можна розглядати як компоненти єдиного вектора S в чотири-

вимірному просторі, що істотно спрощує процедуру опису процесів взаємодії поляризованого випромінювання з середовищем.

Параметр S_1 характеризує повну інтенсивність пучка, S_2 , що дорівнює різниці інтенсивностей лінійно поляризованого світла з напрямками коливань електричного вектора щодо осі $ox - 0$ і 90° (площина xoz декартової системи координат збігається з площиною відгуку Q , напрям світлового пучка – з позитивним напрямом осі oz , рис. 2.1).

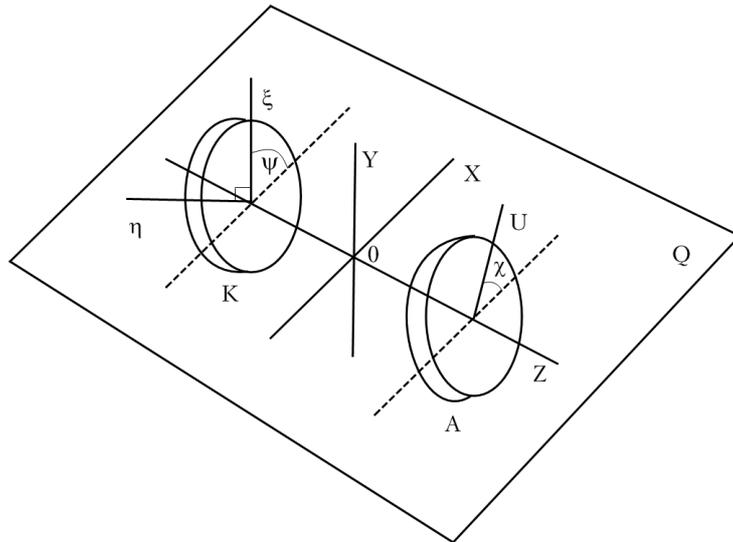


Рисунок 2.1 – До визначення параметрів Стокса (ξ і η – осі компенсатора K , V – вісь аналізатора A)

Такий же сенс має і S_3 , але для напрямів 45° і 135° щодо площини відгуку. Параметр S_4 рівний різниці інтенсивностей світла з правою і лівою круговими поляризаціями [10, 11].

Значення параметрів Стокса задовольняють умову

$$S_1^2 \geq S_2^2 + S_3^2 + S_4^2, \quad (2.1)$$

де знак рівності виконується для повністю поляризованого світла.

Якщо світловий пучок представлений сумішшю поляризованого і неполяризованого випромінювання, то вектор-параметр Стокса такого пучка можна представити у вигляді суми

$$S_n = \left\{ \sqrt{S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}, S_2, S_3, S_4 \right\};$$

$$S_n = \left\{ S_1 - \sqrt{S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}, 0, 0, 0 \right\}.$$

Вектор S_{II} відповідає поляризованій, а S_H – неполяризованій частині хвилі. При цьому ступінь поляризації

$$p = \frac{\sqrt{S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}}{S_1}. \quad (2.2)$$

Якщо площину відгуку Q повернути на кут ψ проти годинникової стрілки, то значення параметрів Стокса в новому базисі зміняться відповідно до перетворення

$$S'_i = \sum_{j=1}^4 K_{ij}(\psi) S_j, \quad (2.3)$$

де K_{ij} – елементи матриці

$$K = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\psi & \sin 2\psi & 0 \\ 0 & -\sin 2\psi & \cos 2\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.4)$$

Величини S_1 , p , S_4 інваріантні щодо повороту площини відгуку, отже, їх можна використовувати для опису стану поляризації незалежно від вибору площини Q [11–13]. Два інших параметра S_2 і S_3 залежать від переважного напрямку ψ_0 коливань електричного вектора в пучку щодо вибраної площини Q і тому при повороті площини відгуку на кут ψ визначаються як

$$\begin{aligned} S'_2 &= S_1 p \cos 2(\psi_0 + \psi); \\ S'_3 &= S_1 p \sin 2(\psi_0 + \psi). \end{aligned} \quad (2.5)$$

У оптичній локації, коли зонduючий пучок, як правило, лінійно поляризований, для характеристики стану поляризації ехосигналів зручніший ступінь деполаризації, пов'язаний з p співвідношенням

$$\delta_n = \frac{1-p}{1+p}. \quad (2.6)$$

Величина δ_n показує ступінь зменшення поляризації у відбитому середовищем пучку. Якщо площина відбивання збігається з напрямком переважної поляризації зонduючого пучка

$$\delta_n = I_{\perp} / I_{\parallel}, \quad (2.7)$$

ЛІТЕРАТУРА

1. Привалов В. Е. Параметры лидаров для дистанционного зондирования газовых молекул и аэрозоля в атмосфере : учебное пособие / В. Г. Шеманин, В. Е. Привалов – СПб : Балт. гос. техн. ун-т, 2001. – 56 с.
2. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование / Р. Межерис. – М. : Мир, 1987. – 550 с.
3. Зуев В. Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере / В. Е. Зуев. – М. : Радио и связь, 1981. – 288 с.
4. Григоруц В. І. Лазерна фізика: підруч. для студ. вищ. навч. закл. / В. І. Григоруц, П. А. Коротков, А. І. Хижняк. – 2-е вид. – К. : МП Леся, 1999. – 528 с.
5. Аксененко М. Д. Приемники оптического излучения / М. Д. Аксененко, М. Л. Бараночников. – М. : Радио и связь, 1987. – 296 с.
6. Antipina T. V. Proc. International Aerosol Symposium. Technology / T. V. Antipina, A. F. Kokkoz, I. G. Stratiev, G. I. Turkina, V. G. Shemanin. – Moscow, 1994. – P. 1220–1233.
7. Справочник по лазерам. – Т. 1 / Под ред. А. М. Прохорова. – М. : Советское радио, 1978. – 504 с.
8. Иванов А. П. Многофункциональные лидарные системы / А. П. Иванов, И. А. Малевич, А. П. Чайковский. – Минск : Университетское, 1986. – 286 с.
9. Лазерный контроль атмосферы / Под ред. Э. Д. Хинкли. – М. : Мир, 1979. – 416 с.
10. Захаров В. М. Лидары и исследование климата / В. М. Захаров, О. К. Костко, С. С. Хмелевцов. – Л. : Гидрометеиздат, 1990. – 320 с.
11. Наац И. Э. Теория многочастотного лазерного зондирования атмосферы / И. Э. Наац. – Новосибирск : Наука, 1980. – 155 с.
12. Зуев В. Е. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы / В. Е. Зуев, И. Э. Наац. – Новосибирск : Наука, 1982. – 240 с.
13. Зуев В. Е. В кн. : Дистанционное зондирование атмосферы / В. Е. Зуев, Г. М. Кренов, У. М. Крекова. – Новосибирск : Наука, 1980. – С. 3–40.
14. Иванов А. П. Тез. докл. УП Всесоюз. симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы / А. П. Иванов, А. П. Чайковский, В. Н. Щербаков. – Томск, 1982. – Ч. 1. – С. 53–57.

15. Чайковская Л. И. О формировании поляризационных характеристик в рассеивающих средах // Рассеяние и поглощение света в природных и искусственных дисперсных средах. – Мн. : ИФ АН Беларуси, 1991. – С. 110–140.
16. Чандрасекар С. Перенос лучистой энергии / С. Чандрасекар. – М. : ИЛ., 1953. – 431 с.
17. Соболев В. В. О поляризации рассеянного света / В. В. Соболев. – Уч., зап. ЛГУ. – 1949. – № 16.
18. Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде / К. С. Шифрин. – М.; Л. : ГИТТЛ, 1954. – 288 с.
19. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами / Г. Ван де Хюлст. – М. : ИЛ., 1961. – 536 с.
20. Зеге Э. П. Изв. АН СССР / Э. П. Зеге, Л. И. Чайковская // Сер. ФАО. – 1981. – Т. 17. – № 6. – С. 604–613.
21. Зеге Э. П. Перенос изображения в рассеивающей среде / Э. П. Зеге, А. П. Иванов, И. Л. Кацев. – Мн. : Наука и техника, 1985. – 327 с.
22. Чайковская Л. И. Оптика атмосферы / Л. И. Чайковская. – 1989. – Т. 2. – № 10. – С. 1025–1033.
23. Аксененко М. Д. Приемники оптического излучения / М. Д. Аксененко, М. Л. Бараночников. – М. : Радио и связь, 1987. – 296 с.
24. Петрук В. Г. Спектрофотометрія світлорозсіювальних середовищ (теорія і практика оптичного вимірювального контролю) : моногр. (ч. II) / В. Г. Петрук. – Вінниця : Універсум–Вінниця. – 2000. – 207 с.
25. Иванов А. П. Оптика рассеивающих сред / А. П. Иванов. – Мн. : Наука и техника. – 1969. – 592 с.
26. Зуев В. Е. Лазерные навигационные устройства / В. Е. Зуев, В. Я. Фадеев. – М. : Радио и связь. – 1987. – 160 с.
27. Розенберг Г. В. Возникновение и развитие атмосферного аэрозоля – кинетически обусловленные параметры / Г. В. Розенберг // Изв. АН СССР. ФАО. – 1983. – Т. 19, № 1. – С. 29–34.
28. Креков Г. М. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля / Г. М. Креков, Р. Ф. Рахимов. – Новосибирск : Наука. – 1982. – 197 с.
29. Иванов А. П. Оптика рассеивающих сред / А. П. Иванов. – Минск : Наука и техника. – 1969. – 592 с.

30. Ослабление лазерного излучения в гидрометеорах / [В. П. Бисярин, А. В. Соколов, Е. В. Сухонин и др.]. – М. : Наука, 1977. – 176 с.
31. Фейгельсон Е. А. Лучистый теплообмен и облака / Е. А. Фейгельсон. – Л. : Гидрометеиздат. – 1970. – 242 с.
32. Оптические параметры атмосферного аэрозоля / [Г. В. Розенберг, Г. И. Горчаков, Ю. С. Георгиевский, Ю. С. Любовцева] // Физика атмосферы и проблемы климата. – М. : Наука. – 1980. – 320 с.
33. Пхалагов Ю. А. Сопоставление эмпирических моделей атмосферной дымки и их применимости для расчета ослабления оптической радиации / Ю. А. Пхалагов // Распространение оптических волн в неоднородных средах. – Томск : ТГУ. – 1983. – С. 140–153.
34. Филипов В. Л. Статистические характеристики ослабления видимой и ИК радиации в приземном слое атмосферы / В. Л. Филипов, А. С. Макаров, В. П. Иванов // Изв. АН СССР. ФАО. – 1979. – Т. 15, № 3. – С. 257–265.
35. Іщенко В. А. Метод контролю токсичних газових сумішей / В. А. Іщенко, В. Г. Петрук, І. В. Васильківський // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Ч. 1. Міжрегіональні проблеми екологічної безпеки. – 2008. – Вип. № 29. – С. 107–112.
36. Пат. України № 34078 МПК₇ G01N 21/61 Інфрачервоний газоаналізатор / Петрук В. Г., Іщенко В. А.; заявл. 07.03.2008 ; опубл. 25.07.2008 ; Бюл. № 14. – 4 с.
37. Петрук В. Г. Дослідження антистоксового поглинання гуморальними середовищами за допомогою спектрополяриметричних методів / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, І. В. Васильківський // Збірник матеріалів IV Міжнародної конференції з оптоелектронних інформаційних технологій «Photonics–ODS 2008». – Вінниця, 30 вересня–2 жовтня 2008 р. – С. 56.
38. Петрук В.Г. Дослідження розсіяння світла аерозольними частками / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, І. В. Васильківський // Збірник матеріалів IV Міжнародної конференції з оптоелектронних інформаційних технологій «Photonics–ODS 2008». – Вінниця, 30 вересня–2 жовтня 2008 р. – С. 130.
39. Петрук В. Г. Визначення оптичних параметрів рідин за допомогою спектрофотополяриметрії / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, І. В. Васильківський // Збірник матеріалів IX Міжнародної конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС–2008)». – Вінниця, 21–24 вересня 2008 р. – Т. 2.1. – С. 18.

40. Инженерная экология : учебник / Под ред. проф. В. Т. Медведева. – М. : Гардарики, 2002. – 687 с.
41. Зуев В. Е. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы / В. Е. Зуев, В. В. Зуев. – СПб. : Гидрометеиздат, 1992.
42. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей / [В. Е. Зуев, Б. В. Кауль, И. В. Самохвалов и др.]. – Новосибирск : Наука, 1986.
43. Иванов В. И. Многофункциональные лидарные системы / В. И. Иванов, И. А. Малевич, А. П. Чайковский. – Мн. : Университетское, 1986. – 286 с.
44. Чайковский А. П. Исследование структуры атмосферного аэрозоля методом спектрально-поляризационного лазерного зондирования. Рассеяние и поглощение света в природных и искусственных средах / А. П. Чайковский. – Мн. : Институт физики АН БССР им. Б. И. Степанова, 1991. – 431 с.
45. Иванов А. П. Лазерный луч исследует атмосферу / А. П. Иванов, А. П. Чайковский. – Печатается по решению РИСО ИФ НАН Беларуси – Институт физики НАНБ. – 2002.
46. A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation. International Association for Meteorology and Atmospheric Physics. Radiation Commission. – Boulder–Colorado, USA. – 1984. – P. 53.
47. Лидарные системы и их оптико–электронные элементы / [Ю. М. Андреев, В. Г. Воеводин, П. П. Гейко и др.] / Под общей ред. чл. – кор. РАН М. В. Кабанова. – Томск : Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН. – 2004. – 526 с.
48. Привалов В. Е. Параметры лидаров для дистанционного зондирования газовых молекул и аэрозоля в атмосфере : учеб. пособ. / В. Е. Привалов, В. Г. Шеманин. – СПб. : Балт. гос. техн. ун-т. – 2001. – 56 с.
49. Аршинов Ю. Ф. КР–лидар для дистанционного контроля промышленных загрязнений атмосферы. Региональный мониторинг атмосферы. Ч.2. Новые приборы и методики измерений / Ю. Ф. Аршинов, С. М. Бобровников. – Томск : Изд-во СО РАН, 1997. – С. 112–130.
50. Петрук В. Г. Фізико-хімічний механізм антистоксового поглинання гуморальними середовищами з позицій координатної теорії кристалічного поля / В. Г. Петрук / Вісник Вінницького політехнічного інституту, 1995. – № 2. – С. 78–82.

51. Тучин В. В. Исследование биотканей методами светорассеивания / В. В. Тучин // Успехи физических наук. – 1997. – Т. 165. – Вып. 5. – С. 517–539.
52. Борен К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / К. Борен, Д. Хафмен. – М. : Мир. – 1986. – 664 с.
53. Лопатин В. Н. Введение в оптику взвесей клеток / В. Н. Лопатин, Ф. Я. Сидько. – Новосибирск : Наука. – 1988. – 240 с.
54. Соболев И. М. Метод Монте-Карло / И. М. Соболев. – М. : Наука. – 1968. – 64 с.
55. Аззам Р. Эллипсометрия и поляризованный свет / Р. Аззам, Н. Башара. – М. : Мир. – 1981. – 583 с.
56. Спектрополяриметричні методи та засоби дослідження параметрів неоднорідних середовищ / [В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, А. П. Іванов, В.В. Барун] // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2009. – № 1(17). – С. 128–131.
57. Контрольно-вимірювальна система для дослідження оптичних параметрів біотканин / [В. Г. Петрук, Г. О. Черноволик, С. М. Кватернюк і ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 5. – С. 18–21.
58. Пат. 58696 : МПК (2006) : G01N 21/21 Поляриметр зображення / О. М. Крунич, І. В. Бережний, О. Г. Влох, Р. О. Влох ; власник патенту Інститут фізичної оптики Міністерства освіти і науки України. – № 2002075690 ; заявл. 10.07.02 ; опубл. 15.08.03, Бюл. № 8. – 5 с.
59. Пат. 35499 : МПК (2006) : G01N 21/21 Поляриметр зображення / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, А. П. Іванов, В. В. Барун ; власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u200804100 ; заявл. 01.04.08 ; опубл. 25.09.08, Бюл. № 18 (кн. 2). – 2 с.
60. Снопко В. Н. Поляризационные характеристики оптического излучения и методы их измерения / В. Н. Снопко. – Мн. : Наука і техника, 1992. – 336 с.
61. Аксенов Е. Т. Модифицированный лазерный дифрактометр для исследования биологических микрообъектов / Е. Т. Аксенов, Д. В. Мокрова // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34. – Вып. 20. – С. 38–43.
62. George C. Giakos Multifusion Multispectral Lightwave Polarimetric Detection Principles and Systems / C. George // IEEE transactions on instrumentation and measurement. – Vol. 55, No. 6. – 2006. – P. 1904–1912.

63. Kent G. S. A review of laser radar measurements of atmospheric properties / G. S. Kent, R. W. H. Wright. – J. Atm. Terr. Phys. – 1970. – Vol. 32, No. 6. – P. 917–943.
64. Захаров В. М. Метеорологическая лазерная локация / В. М. Захаров, О. К. Костко. – Л. : Гидрометеоздат. – 1977. – 223 с.
65. Григорук В. І. Лазерна фізика : підруч. для студ. вищ. навч. закл. / В. І. Григорук, П. А. Коротков, А. І. Хижняк. – 2-е вид. – К. : МП Леся. – 1999. – 528 с.
66. Ослабление лазерного излучения в гидрометеорах / [В. П. Бисярин, А. В. Соколов, Е. В. Сухонин и др.]. – М. : Наука. – 1977. – 176 с.
67. Фейгельсон Е. А. Лучистый теплообмен и облака / Е. А. Фейгельсон. – Л. : Гидрометеоздат. – 1970. – 242 с.
68. Оптические параметры атмосферного аэрозоля / [Г. В. Розенберг, Г. И. Горчаков, Ю. С. Георгиевский, Ю. С. Любовцева] // Физика атмосферы и проблемы климата. – М. : Наука, 1980. – 320 с.
69. Іщенко В. А. Метод контролю токсичних газових сумішей / В. А. Іщенко, В. Г. Петрук, І. В. Васильківський // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Ч. 1. Міжрегіональні проблеми екологічної безпеки. – 2008. – Вип. № 29. – С. 107–112.
70. Петрук В. Г. Лідар комбінаційного розсіяння світла / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, І. В. Васильківський // Збірник матеріалів ІV Міжнародної конференції з оптоелектронних інформаційних технологій «Photonics–ODS 2008». – Вінниця, 30 вересня–2 жовтня 2008 р. – С. 132.
71. Методика неінвазійних спектрополяризаційних досліджень біотканин та неоднорідних середовищ / [В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, А. П. Іванов, В. В. Барун] // Збірник матеріалів ІХ Міжнародної конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС–2008)». – Вінниця, 21–24 вересня 2008 р. – Т. 2.1. – С. 19.
72. Петрук В. Г. Аналіз систем лідарного контролю атмосферного середовища / В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк // Збірник матеріалів ІХ Міжнародної конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС–2008)». – Вінниця, 21–24 вересня 2008 р. – Т. 2.3. – С. 19.
73. Петрук В. Г. Аналіз рівняння лазерного зондування атмосфери для однократного розсіяння / В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк // Збірник матеріалів ІХ Міжнародної конференції

«Контроль і управління в складних системах (КУСС–2008)». – Вінниця, 21–24 вересня 2008 р. – Т. 2.3. – С. 15.

74. Високочутливий засіб контролю малих концентрацій газів на основі методу інтегральної сфери. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук / В. А. Іщенко. – Вінниця : ВНТУ. – 2009. – 171 с.

75. Спектрополяриметричні методи та засоби дослідження параметрів гуморальних середовищ / [В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк і ін.] // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2009. – № 1(17). – С. 128–131.

76. Пат. Республіки Беларусь № 5299 от 30.06.2009 Спектральный поляриметр изображения для диагностики сред биомедицинского происхождения / В. Г. Петрук, А. П. Иванов, С. М. Кватернюк, В. В. Барун. – Заявка № u20080575 от 17.07.2008.

77. Барун В. В. Моделирование влияния эпидермиса на перенос света и тепла в каждом покрове. Проблемы оптической физики и биофотоники. Материалы 12-й Международной молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике / В. В. Барун, А. П. Иванов, В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, И. В. Васильковский. – Саратов : Изд-во «Новый ветер». – 2009. – 234 с. : ил. – С. 69–78.

78. Барун В. В. Спектральные особенности распространения света в морской воде с сильно поглощающими водорослями. Проблемы оптической физики и биофотоники. Материалы 12-й Международной молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике / В. В. Барун, А. П. Иванов, В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, И. В. Васильковский. – Саратов : Изд-во «Новый ветер». – 2009. – 234 с. : ил. – С. 78–85.

79. Васильківський І. В. Лідарна системи пожежної сигналізації для охорони лісових ресурсів / І. В. Васильківський // Збірник наукових статей «II-го Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю». – Вінниця, 2009. – С. 266–271.

80. Петрук В. Г. Лідарний контроль параметрів атмосфери Збірник наукових статей «II-го Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю» / В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк. – Вінниця, 2009. – С. 271–275.

81. Лідарний екологічний моніторинг атмосфери / [А. П. Иванов, А. П. Чайковський, В. Г. Петрук і ін.] // Збірник наукових статей «II-го

Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю». – Вінниця, 2009. – С. 275–280.

82. Развитие неинвазивных методов диагностики биотканей по рассеянному излучению / [А. П. Иванов, В. В. Барун, В. П. Дик и др.] // Збірник наукових статей «II-го Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю». – Вінниця, 2009. – С. 291–294.

83. Особенности спектрофотометрической диагностики суспензии эритроцитов / [А. П. Иванов, В. В. Барун, В. П. Дик и др.] // Збірник наукових статей «II-го Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю». – Вінниця, 2009. – С. 294–298.

84. Васильківський І. В. Метрологічне забезпечення систем ліда-рного контролю атмосфери / І. В. Васильківський // Збірник наукових статей «II-го Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю». – Вінниця, 2009. – С. 331–335.

85. Засоби автоматизованого контролю оптично м'яких частинок гуморальних середовищ на основі методу спектрополяризаційних зображень / [В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, І. В. Васильківський і ін.] // Збірник наукових статей «II-го Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю». – Вінниця, 2009. – С. 341–345.

86. Петрук В. Г. Характеристика лідарних досліджень стандартних параметрів атмосфери / В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк // Збірник наукових статей «II-го Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю». – Вінниця, 2009. – С. 346–350.

87. Іщенко В. А. Високочутливі засоби контролю малих концентрацій газів : моногр. / В. А. Іщенко, В. Г. Петрук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2010. – 152 с.

88. Кватернюк С. М. Спектрополяриметричний метод та автоматизований засіб контролю концентрацій частинок полідисперсних водних середовищ. Автореф. на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук : спец. 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин» / С. М. Кватернюк ; Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2010. – 20 с.

89. Контроль стану водних об'єктів як полідисперсних середовищ на основі методу спектрополяриметричних зображень / [В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, А. П. Иванов та ін.] // Екологія та промисловість. – 2010. – № 2. – С. 77–81.

90. Метод та прилад контролю стану полідисперсних водних середовищ за спектрополяриметричними зображеннями частинок /

[В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, В. М. Ночвай та ін.] // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. Серія : Технічні науки. – 2010. – № 1. – С. 119–124.

91. Математичне моделювання індикатрис розсіювання частинок полідисперсних водних середовищ / [В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, І. В. Васильківський та ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 2. – С. 9–13.

92. Контроль стану водних об'єктів методом Зелінки–Марвана з використанням спектрополяриметричних зображень частинок фітопланктону / [О. О. Цвенько, С. М. Кватернюк, Я. В. Мороз та ін.] // Географія, геоecологія, геологія : досвід наукових досліджень : VII міжнар. наук. конф., 11–14 травня 2010 р. : матеріали конф. – Дніпропетровськ, 2010. – С. 142–143.

93. Васильківський І. В. Математичне моделювання індикатрис розсіювання частинок полідисперсних водних середовищ / І. В. Васильківський, В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 1. – С. 30–38.

94. Лідарний екологічний моніторинг атмосферного аерозолі / [В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, І. В. Васильківський та ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 3. – С. 7–14.

95. Пат. України №52754 : МПК (2006), G01N 21/21 Пристрій для контролю стану полідисперсних біологічних рідин на основі спектрополяриметричних зображень їх частинок / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, А. П. Іванов, В. В. Барун ; власник Вінницький національний технічний університет. – № u2010019310; заявка 22.02.10; опубл. 10.09.10, Бюл. № 17. – 3 с.

96. Пат. Республіки Беларусь № 6732 : МПК (2006), G01N 21/21 Устрій для контролю полідисперсних біологічних жидкостей / В. В. Барун, А. П. Іванов, В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк ; Заявитель и патентообладатель Государственное научное учреждение Институт физики им. Степанова НАН Беларуси. – № 20100259; заявка 17.03.10, опубл. 30.10.2010, Бюл. № 10. – 4 с.

Наукове видання

**Петрук Василь Григорович
Васильківський Ігор Володимирович
Квaternюк Сергій Михайлович**

**ДИСТАНЦІЙНИЙ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧНИЙ
КОНТРОЛЬ ПОЛДИСПЕРСНИХ АЕРОЗОЛЬНИХ
СЕРЕДОВИЩ В ЕКОЛОГІЧНОМУ МОНІТОРИНГУ**

Монографія

Редактор Н. Мазур

Оригінал-макет підготовлено І. Васильківським

Підписано до виготовлення 21.03.2016 р.

Системні вимоги:

процесор Pentium; 512 Mb RAM;
Windows XP,7,8; Acrobat Reader 6.0.

Один електронний оптичний диск (CD-ROM); Обсяг даних 5,0 Мб.

Наклад 100 (1-й запуск 1–30) прим. Зам. № E2016-02

Видавець та виготовлювач – Вінницький національний технічний університет,
Комп'ютерний інформаційно-видавничий центр Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ,
ГНК, к. 114, м. Вінниця, 21021, тел.: (0432) 59-85-32, 59-81-59.

publish.vntu.edu.ua; *email*: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.