УДК 681.785.5:504.3

І. В. Васильківський, канд. техн. наук;
В. Г. Петрук, д-р техн. наук, проф.;
С. М. Кватернюк

АНАЛІЗ СИСТЕМ ЛІДАРНОГО ЗОНДУВАННЯ АТМОСФЕРНОГО СЕРЕДОВИЩА

Проведено аналіз систем лідарного зондування атмосферного середовища. Дана оцінка лазерам, прийомним телескопам та системам реєстрації систем лідарного зондування. Проаналізовані джерела шуму та методи покращення відношення сигнал-шум при використанні лідарних систем.

Вступ

Багатокомпонентні газові суміші і потоки широко поширені в природі і відіграють важливу роль в багатьох сучасних технологіях. Складність відомих 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 енергогенерувальної, машинобудівної, хімічної, а головне, — для охорони навколишнього середовища.

Тому *метою цієї роботи* є демонстрація теоретичного аналізу сучасних систем лідарного зондування і контролю для вибору оптимального режиму зондування багатокомпонентної газової суміші атмосферного середовища, зокрема, для потреб екологічного моніторингу.

1. Лідарні системи різного розташування

В основі методів лазерного зондування лежать такі процеси взаємодії лазерного випромінювання з речовиною: аерозольне розсіяння (АР); молекулярне розсіяння (МР); комбінаційне розсіяння (КР); флуоресценція (люмінесценція), у тому числі і резонансна; резонансне розсіяння (РР) і резонансне поглинання (РП); диференціальне поглинання і розсіяння (ДПР). Класифікація систем лідарного зондування атмосфери приведена на рис. 1. Стаціонарні системі, встановлюються в приміщеннях або на спеціально обладнаних майданчиках, володіють високим енергетичним потенціалом — мають приймальні об'єктиви великих розмірів і лазери зі значною енергією випромінювання. Вони забезпечують великий інтервал дальності зондування, але при цьому вони є громіздкими, дорогими системами і мають обмежену локальну просторову область вимірювань, прив'язану до точки їх розміщення. Основною їх перевагою, є можливість одночасного моніторингу декількох атмосферних параметрів з високою чутливістю. Мобільні лідари розміщені на рухомих засобах мають розширені можливості для моніторингу атмосфери на значній території, особливо в разі їх установки на аерокосмічних носіях.

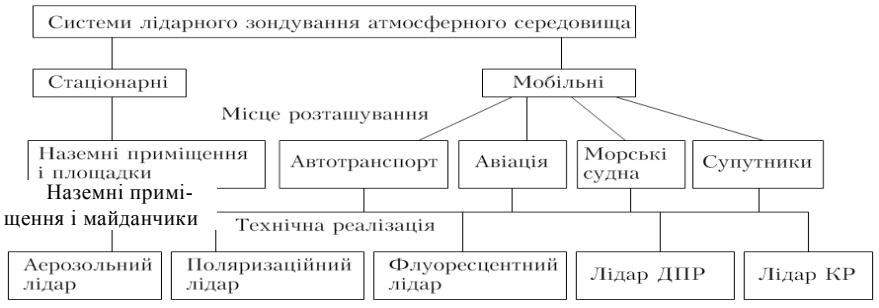

Рис. 1 Класифікація систем лідарного зондування атмосфери

© І. В. Васильківський, В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, 2010

Аерозольні лідари, що використовують ефект пружного розсіювання застосовуються для визначення таких атмосферних характеристик: профілів прозорості і масової концентрації аерозольних забруднень; границь хмар та інших великомасштабних неоднорідностей атмосферного середовища; фазового складу хмар, а також динаміки зміни цих характеристик у заданому інтервалі часу. Крім того, за допомогою сканування атмосферного простору лазерним променем можна проводити картування забруднювальних речовин в атмосфері.

Поляризаційні лідари, які є різновидом аерозольних лідарів, використовуючи для зондування поляризоване випромінювання і виділяючи у прийнятому потоці випромінювання компоненти з різними станами поляризації, дозволяють отримати додаткову інформацію про форму аерольних часток, при однократному розсіюванні і показник багаторазового розсіювання оптично щільних аерозольних утворень.

В основі лідарів ДП (диференціального поглинання) лежить взаємодія оптичного випромінювання з молекулами атмосферних газів — резонансне поглинання, що й визначає основні переваги цих технічних засобів, а саме — високу чутливість і оперативність визначення вмісту газових складових атмосфери, у тому числі і з великою дальністю зондування. Для визначення концентрації будь-якого компонента атмосфери використовуються лазерні джерела випромінювання, здатні генерувати одночасно або послідовно випромінювання на двох близьких довжинах хвиль. Одна з яких в ідеальному випадку збігається із лінією поглинання досліджуваного газового компонента, а інша повинна попадати у найближче вікно прозорості атмосфери. Концентрація газу визначається із порівняння рівня зареєстрованих сигналів на цих довжинах хвиль. В залежності від поставленого завдання в лідарах ДП фотоприймач реєструє оптичні ехосигнали, які відбиті дзеркалами, кутовими відбивачами, або топографічними об’єктами: деревами, будинками, пагорбами і т. п. В результаті лідари ДП визначають усереднені по трасі зондування концентрації газових компонентів. Для дослідження просторового розподілу газових компонентів застосовуються лідари ДПР, у яких в якості розподілених відбивачів використовуються атмосферні аерозолі.

Поглинання атомами або молекулами лазерного випромінювання на частоті певного електронного переходу, яке супроводжується перевипромінюванням на нижчій частоті, характеризує флуоресценцію компонентів атмосфери, що використовується для створення флуоресцентних лідарів. На практиці флуоресцентні лідари не отримали значного поширення через низку причин. У молекулах газів флуоресцентне випромінювання широкополосне і затягнуте в часі, що ускладнює ідентифікацію компонентів атмосфери і зменшує відношення сигнал-шум. Флуоресценція всіх молекул істотно гаситься зіткненнями з іншими молекулами повітря. Крім того, газові компоненти, що мають максимальні значення флуоресценції, присутні в атмосфері в мінімальній кількості.

Перевагою лідарів КР (комбінаційного розсіювання) є можливість одночасного детектування всіх молекулярних компонентів газового середовища, оскільки кожна газова молекула має фіксовані для її будови коливально-обертальні спектри частот, на які зміщується частота розсіяного випромінювання. При цьому потужність сигналу КР будь-якого компонента прямо пропорційна його концентрації. Метод КР є практично безінерційним. Завдяки такому універсальному комплексу властивостей, він особливо перспективний для якісного і кількісного аналізу газових середовищ. Основним недоліком методу є мала інтенсивність сигналів КР, пов’язана з малими значеннями перетину комбінаційного розсіювання. Тому лідари на основі цього методу традиційно використовувалися в основному для аналізу високих рівнів концентрацій газових компонентів атмосфери (димових викидів), що перебувають на невеликій висоті. Однак, використання потужних лазерів і великогабаритної оптики дозволяє визначити профілі розподілу вологості і температури по всій товщині атмосфери.

Виходячи із розглянутих вище параметрів лідарів, створено табл. 1, де показані загальні і відмінні характеристики стаціонарних і мобільних лідарів, незалежно від їх призначення і фізичного ефекту розсіяння, використовуваного при дослідженні зовнішнього середовища. Цифрою «0» відмічені неістотні характеристики для даного типу лідарів, знаком «±» — другорядні характеристики, а «+» — першочергові. Всі мобільні лідари мають обмеження по енергоспоживанню і масогабаритним характеристикам, особливо лідари аерокосмічного базування.

Таблиця 1

Загальні і відмінні риси стаціонарних і мобільних лідарів

Параметри лідарної системи	Вид системи				
	Стаціонарна	Мобільна			
		автотранпортна	авіаційна	морська	супутникова
Енергоспоживання	0	±	±	±	+
Масогабаритні характеристики	0	0	±	±	±
Дальність зондування	+	±	±	+	+
Можливість сканування	±	+	±	±	±
Експлуатаційні характеристики	0	±	±	±	+
Надійність	±	±	+	+	+
Швидкодія	0	±	+	±	+
Ступінь автоматизації управління	±	±	±	±	+
Завадостійкість	±	±	±	+	+
Електромагнітна сумісність	0	0	±	±	+

За весь період створення, розвиток лідарних систем відбувався послідовно від стаціонарних до мобільних наземних, потім до авіаційних, морських і далі до космічних [1]. Це дозволило відпрацювати і оптимізувати схемні і конструктивні рішення, як окремих складових частин, так і лідарної системи заданого призначення в цілому. На рис. 2. зображена загальна структурна схема лідара (крім поворотного пристрою, на якому, зазвичай, при наземному варіанті реалізації лідарної системи встановлюють передавач, приймач, і блок управління, що синхронізує роботу інших блоків і керує їх параметрами).

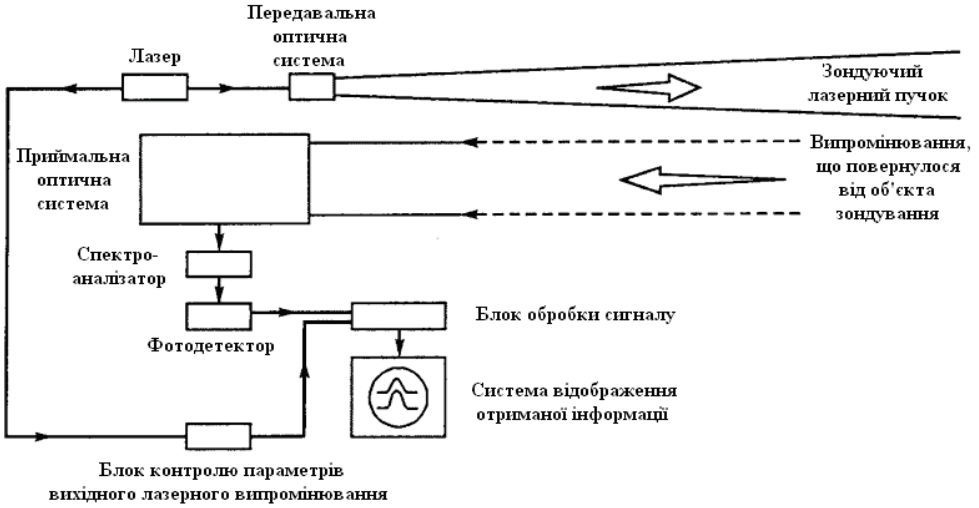

Рис. 2. Загальна структурна схема лідара

У загальному випадку випромінювання, що приймається $P_{\text{пр}}$ являє собою суперпозицію потужностей компонент молекулярного і аерозольного розсіювання на довжині хвилі λ_0, яка співпадає з довжиною хвилі зондувального випромінювання, випромінювання флуоресценції на довжині хвилі, яка менша довжини хвилі випромінювання лазера і ліній комбінаційного розсіювання на довжинах хвиль, близьких до довжини хвилі лазера, а також довших стоксових і коротких антистоксових довжин хвиль $\lambda_1, \lambda_2, \ldots \lambda_n$; $P_{\text{пр}} = \sum_{i=0}^{n} P_{\lambda_i}$. Потужність зворотно-розсіяного на довжині хвилі λ_1, випромінювання $P_{\lambda_1}(z)$, що надходить на приймальну систему моностатичного лідара з ефективною приймальною апертурою $A_{\text{еф}}$ з відстані z, описується в наближенні однократного розсіювання, без урахування поляризації, відомим лідарним рівнянням в скалярній формі [1—4]:

$$P_{\lambda_i}(z) = P_{\lambda_0} c\tau_0 \big/ 2g(z,\lambda_i)\beta_\pi(z,\lambda_i) A_{\text{еф}} z^{-2} \xi(\lambda_i) T_{\lambda_0}(z) T_{\lambda_i}(z), \qquad (1)$$

де P_{λ_i} — потужність випромінювання лазерного передавача, що випливає з виразу

$P_{\lambda_0} = \int_0^{\tau_0} P(t)\,dt$, де $P(t)$ і τ_0 — тимчасовий розподіл потужності і тривалість зондувального імпульсу; c — швидкість світла; $g(z,\lambda_i)$ — функція геометричного фактора; $\beta_\pi(z,\lambda_i)$ — об'ємний коефіцієнт зворотного розсіювання на довжині хвилі розсіяного випромінювання; $A_{\text{еф}}$ — ефективна приймальна апертура з відстані z; $T_{\lambda_0}(z)$ і $T_{\lambda_i}(z)$ — коефіцієнти прозорості атмосфери на довжинах хвиль відповідно зондувального λ_0 і розсіяного λ_i випромінювань, зумовлені виразом $\exp\left[-\int_0^z \alpha(r,\lambda_i)\,dr\right]$, де $\alpha(r,\lambda_i)$ — сумарний об'ємний коефіцієнт послаблення випромінювання в точці r на довжині хвилі λ_i, $\xi(\lambda_i)$ — коефіцієнт, що описує селективні властивості оптичного тракту лідара.

У загальному випадку, під час проведення вимірювань, коефіцієнт послаблення в точці простору z можна представити як

$$\alpha(\lambda_i) = \alpha_{\text{мр}}(\lambda_i) + \alpha_{\text{мп}}(\lambda_i) + \alpha_{\text{ар}}(\lambda_i) + \alpha_{\text{ап}}(\lambda_i) + \alpha_{\text{кп}}(\lambda_i), \qquad (2)$$

де індекси «м», «а» — характеризують ефекти взаємодії лазерного випромінювання з молекулами і аерозолями, індекси «р» і «п» — відповідно ефекти розсіювання і поглинання, а індекс «кп» означає континуальне поглинання газових компонентів атмосфери. При цьому коефіцієнт молекулярного розсіювання $\alpha_{\text{мр}}(\lambda_i)$ визначається ефектами пружного розсіювання на довжині хвилі падаючого випромінювання λ_0, і комбінаційного розсіювання на довжинах хвиль, які мають зсуви відносно λ_0 на $\Delta\lambda_i$, що відповідають частотам коливальних і обертальних спектрів молекул [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 і невеликої кутової розбіжності. Основні види лазерів, які переважно використовуються для зондування атмосфери, зазначені в табл. 2. Конкретний тип лазера і його конструкція визначаються з урахуванням умов застосування лідарної системи. Так, при зондуванні на одній фіксованій довжині хвилі, або в невеликому спектральному діапазоні, доцільно використовувати серійні лазери, або джерела когерентного випромінювання широкого призначення для різних спектроскопічних досліджень. У лідарних системах, призначених для проведення широкоспектральних досліджень, випромінювач може бути виготовлений на основі об'єднання декількох окремих лазерів. Однак таке технічне рішення не може забезпечити високих експлуатаційних показників, оскільки випромінювачі виявляються громіздкими і незручними в роботі. Тому, в таких випадках, а також на особливі вимоги до характеристик і конструкції лазера (лідари для багатокомпонентного газового аналізу, мобільні лідари та ін.) розробляються спеціальні пристрої, які за технічними характеристиками і конструкцією істотно відрізняються від квантових генераторів. Ще ширші 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 отримувати 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 %.

Таблиця 2

Застосування лазерів для зондування атмосфери

Вид взаємодії	Тип лазера і активного середовища	Довжина хвилі, мкм
Зондування атмосферного аерозолю		
АР і МР	Неодимове скло	1,060 і гармоніки
	Алюмоітрієвий гранат	1,064 і гармоніки
	Рубін	0,694 і 0,347 (2-га гармоніка)
	Барвники	0,26—1,1
	CO_2-лазери	9—11
	Пари міді	0,510 і 0,578
	Ексімерні лазери*	0,2—0,35
	Лазери на центрах фарбування в іонних кристалах*	0,7—1,5
Зондування гідрозолю		
АР і МР	2-га гармоніка лазера на неодимовому склі	0,530
	2-га гармоніка лазера на алюмоітрієвому гранаті	0,532
	Пари міді	0,510 і 0,578
Аналіз газового складу атмосфери		
КР	Гармоніки випромінювання лазерів на неодимовому склі і алюмоітрієвому гранаті	0,26; 0,35; 0,53
	Рубін	0,347 (2-га гармоніка)
	Азотні лазери	0,337
	Ексімерні лазери*	0,2—0,35
	Барвники	0,26—1,1
РР Резонансне КР РП	Ексімерні лазери*	0,2—0,35
	Рубін	0,694
	CO_2-лазери	9—11
	Барвники	0,26—1,1
	Лазери на центрах фарбування в іонних кристалах*	0,7—1,5

Примітка. * — лазери, придатні для широкого застосування в системах лазерного зондування.

Клас газових лазерів найбільш різноманітний: у нього входять коротко- і довгохвильові лазери. CO_2-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 ексімерні лазери на молекулах XeCl і KrF, тому що довжини хвиль їх 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 дозволяє отримувати такі характеристики: безперервна сумарна потужність на довжинах хвиль 510,6 й 578,2 нм — 43,5 Вт з частотою проходження імпульсів 20 кГц і імпульсна потужність — 200 кВт при тривалості імпульсу 10 нс. У роботі [2] приводиться 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 75 %). Отже, можна отримати лазерні імпульси тривалістю 10 нс із частотою проходження до 20 кГц на довжинах хвиль 510,6; 255,3; 578,2; 289,1 нм. Всі імпульсні лазери на барвниках можна розділити на два окремих класи: з накачуванням імпульсною лампою і імпульсним твердотільним лазером. 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 більш короткі (1—20 нс) лазерні імпульси, що перебудовуються, накачування барвника здійснюється за допомогою твердотільного лазера з модуляцією добротності або імпульсного газового лазера.

Використання 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 напрямку застосування твердотіль-

них напівпровідникових лазерів в спектроскопічних експериментах. При цьому можна отримувати 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 і експлуатаційну надійність конструкції, пряме електричне збудження із можливою швидкою перебудовою довжини хвилі за рахунок зміни густоти струму, високий ККД (більше 50 %, у інжекторних наближається до 100 %) і широкий спектральний діапазон (0,4—34 мкм). Напівпровідникові лазери відрізняє невелика пікова потужність (до 100 Вт) і велика розбіжність променя [3, 4]. Однак, висока частота проходження імпульсів дозволяє при реєстрації лідарного сигналу скоротити час нагромадження імпульсів при збереженні дистанції зондування.

3. Системи реєстрації систем лідарного зондування

Сигнал фотоприймача може піддаватися аналоговій або цифровій обробці. Раніше використовувався аналоговий підхід, при якому сигнал зворотного розсіювання відтворювався на широкосмуговому осцилографі як функція часу затримки, пропорційна відстані, яка потім фотографувалася. Використання швидкодійних АЦП дозволило проводити обробку даних у реальному масштабі часу.

Зростання сигналу зворотного розсіяння на початковій ділянці траси зондування зумовлено звичайно некоаксіальністю оптичної схеми: зі збільшенням відстані зростає перекривання 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} призводить 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 і керування підсиленням фотоприймачів за законом t^2 [2]. Крім цього можна застосовувати й оптичні методи, наприклад, прийомну систему зі змінною фокусною відстанню [2—6]. Коли сигнал зворотного розсіювання є дуже слабким, як в експериментах із КР або при дослідженні верхніх шарів атмосфери, необхідно працювати в режимі накопичення сигналу. Для цього випадку використовується режим підрахунку фотонів, коли реєструються і підраховуються імпульси струму при детектуванні окремих фотонів.

Рівняння (1) дозволяє оцінити динамічний діапазон лідарних сигналів у заданому інтервалі дальності (початку і кінця) зондування $(z_{\text{П}} + z_{\text{К}})$, якщо попередньо відомі характеристики коефіцієнтів розсіювання $\alpha(z,\lambda_i)$ і $\beta_x(z,\lambda_i)$. Самі величини коефіцієнтів $\alpha(z,\lambda_i)$ і $\beta_x(z,\lambda_i)$ залежать від оптико-метеорологічного стану атмосфери і від забруднення її промисловими викидами.

Величина динамічного діапазону прийнятого лідарного сигналу $D_{\text{ЛС}}$ в інтервалі $(z_{\text{П}} + z_{\text{К}})$, що відповідає початку і кінцю його реєстрації, дорівнює:

$$D_{\text{ЛС}} = \frac{P(z_{\text{П}})}{P(z_{\text{К}})} = \frac{z_{\text{К}}^2 \beta_x(z_{\text{П}})}{z_{\text{П}}^2 \beta_x(z_{\text{К}})} \exp\left(2\int_{z_{\text{П}}}^{z_{\text{К}}} \alpha(z,\lambda_i)dz\right). \quad (3)$$

Можна також записати $D_{\text{ЛС}}$ у вигляді, що використовується для радіосистем,

$$D_{\text{ЛС}} = 20\lg\frac{z_{\text{К}}}{z_{\text{П}}} + 10\lg\frac{\beta_x(z_{\text{П}})}{\beta_x(z_{\text{К}})} + 8{,}686\int_{z_{\text{П}}}^{z_{\text{К}}} \alpha(z,\lambda_i)dz. \quad (4)$$

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

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, 5]. Шуми у цьому випадку можуть мати оптичну або теплову природу. Найістотніше впливають на роботу лідарів шуми і завади, які можна розбити на три групи:

1) фонові завади атмосфери і зовнішніх джерел;

2) шуми приймальної системи;

3) дробові шуми сигналу, зумовлені статистичними флуктуаціями фотоемісії.

Потужність потоку фонового випромінювання N, що потрапляє на фотоприймач лідара в момент часу t, дорівнює

$$N(t) = B_\lambda(t) A_{\text{еф}} \Omega_\Pi K_\Pi K_C \Delta\lambda_C, \tag{5}$$

де $B_\lambda(t)$ — спектральна яскравість фонового випромінювання, що залежить від часу доби, довжини хвилі випромінювання, напрямку зондування, місцезнаходження фонового випромінювання (Сонце, Місяць, хмари і т. п.); Ω_Π — тілесний кут поля зору приймальної системи лідара; K_Π і K_C — коефіцієнти пропускання оптичного тракту приймальної системи і спектрального фільтра; $\Delta\lambda_C$ — смуга пропускання спектрального фільтра. В залежності від умов роботи лідара величина B_λ може змінюватися на 4…6 порядків.

Фонове випромінювання викликає анодний струм фотоелектронного помножувача (ФЕП)

$$I_\Phi(t) = S_{K\lambda} M N(t), \tag{6}$$

де $S_{K\lambda}$ — спектральна чутливість катода; M — коефіцієнт множення дінодної системи. Цей струм змінює умови роботи ФЕП. По-перше, за рахунок зсуву робочої точки на світловій характеристиці, зменшуючи тим самим її лінійну ділянку; по-друге, дінодні струми що виникають в останніх каскадах ФЕП змінюють розподіл потенціалу на дільнику напруги ФЕП, що призводить до зміни коефіцієнтів множення останніх динодів і, як наслідок, зміни загального коефіцієнта множення M. Вихідний струм ФЕП, окрім складової $I_\Phi(t)$, що надалі відфільтровується за допомогою розділової ємності, містить шумову складову, середньоквадратичне значення якої дорівнює

$$i_\Phi(t) = M\sqrt{2eS_{K\lambda}N(t)\Delta f}\,. \tag{7}$$

Для більшості випадків $N(t)$ можна вважати незмінною за час реєстрації лідарного сигналу, що для лідарів працюючих на відстанях у декілька кілометрів, не перевищує 100 мкс.

Аналогічним чином записуються вирази для струму сигналу $I_C(t)$ і його середньоквадратичної складової дробового шуму $i_{\text{СШ}}(t)$

$$I_C(t) = S_{K\lambda} \text{M}\Phi(t); \tag{8}$$

$$i_{\text{СШ}}(t) = M\sqrt{2eS_{K\lambda}\Phi(t)\Delta f}\,. \tag{9}$$

Шуми приймальної системи визначаються власним променистим потоком $\Phi_{\text{ПР}}$ від елементів оптичної частини приймальної системи, шумом фотодетектора і теплових шумів на навантажувальному опорі фотодетектора і в електронному підсилювачі. Струми, ініційовані потоком $\Phi_{\text{ПР}}$, розраховуються за співвідношеннями, аналогічним (6) і (7). Однак, для випромінювань у діапазоні довжин хвиль 0,25…1,2 мкм цими шумами можна знехтувати. Для розглянутих режимів роботи лідара теплові шуми навантаження і підсилювача також є незначними. Найбільш істотними є власні шуми ФЕП, які визначаються темновими струмами. Середньоквадратичну складову i_C дробового шуму анодного струму I_{AC}, створювану темновим струмом фотокатоду $I_{\text{СК}}$, отримаємо з виразу

$$i_C = M\sqrt{2eI_{\text{СК}}\Delta f} = \sqrt{2eMI_{AC}\Delta f}\,. \tag{10}$$

Присутність шумового струму ФЕП

$$i_{\text{Ш}}(t) = \sqrt{i_\Phi^2(t) + i_{\text{СШ}}^2(t) + i_C^2(t)} \tag{11}$$

обмежує реальну дальність зондування z_K і, відповідно, величину динамічного діапазону лідарного сигналу. Відношення потужностей корисного сигналу і шуму на навантаженні ФЕП визначаєть-

ся зі співвідношення сигнал-шум

$$D_{SN}(t) = \frac{I_{\text{С}}^2(t)}{i_{\text{Ш}}^2(t)}. \tag{12}$$

Задаючись певним граничним відношенням сигнал-шум, $D_{SN}(t) \geq 1$, можна з (12) визначити максимальну дальність зондування, і, відповідно, з (3) — динамічний діапазон лідарного сигналу, що підлягає реєстрації. Рівняння (12) для відстані $z = ct/2$ є трансцендентним, тому для конкретних типів ФЕП використовується його графічне розв'язання [1, 3—5].

Припустивши, що величина перевищення відношення сигнал-шум на вході ФЕП рівна 5…10, можна визначити потенційнодосяжну дальність зондування $z_{\text{К}}$ і, відповідно, граничну величину $D_{\text{ЛС}}$.

Розпишемо вираз (12), з якого можна визначити відношення сигнал-шум на навантаженні ФЕП

$$D_{SN}(t) = \frac{\left[K_{\text{П}} K_{\text{С}} g(t) S_{\text{К}\lambda} A_{\text{еф}} P_0 \tau_0 \beta_\pi(t) T^2(t) t^{-2} / c\right]^2}{2e\Delta f \left\{K_{\text{П}} K_{\text{С}} S_{\text{К}\lambda} A_{\text{еф}} \left[g(t)\tau_0 \beta_\pi(t) T^2(t) t^{-2}/c + B_\lambda(t)\Omega_{\text{П}}\Delta\lambda_C\right] + I_{\text{СК}}\right\}}. \tag{13}$$

З (13) видно, що $D_{SN}(t)$ не залежить від величини коефіцієнта множення M дінодної системи ФЕП.

Для нічних умов роботи, коли в $i_{\text{Ш}}(t)$ основний внесок робить перший доданок знаменника (13), отримуємо

$$D_{SN}(t) \approx T(t) t^{-2}. \tag{14}$$

Для денних умов, коли істотний вплив дають фонові шуми,

$$D_{SN}(t) \approx T(t) t^{-4}. \tag{15}$$

В результаті дальність зондування і величина динамічного діапазону лідарних сигналів відповідно зменшується.

У багатьох випадках вдається збільшити відношення сигнал—шум за рахунок заглушення шуму. Так, для зменшення впливу тривалої флуоресценції, індукованої лазерним випромінюванням, раніше застосовували рознесення лазерного передавача і приймача на достатню відстань. В даний час найбільше розповсюджений метод з використанням відсікача флуоресценції [2]. Іншим способом заглушення шуму є спектральне заглушення розсіяного лазерного випромінювання в тих випадках, коли довжина хвилі сигналу відрізняється від довжини хвилі лазерного випромінювання.

Використовуючи сигнал КР, можна уникнути люмінесценції, почергового перемикаючи дві довжини хвиль лазера. Якщо дві лінії лазерного випромінювання досить близькі, то можна вважати, що сигнал люмінесценції майже не міняється, і його можна відняти із сумарного сигналу й одержати «істинний» сигнал КР [6].

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.

Висновок

Із всього різноманіття методів і систем для зондування і контролю атмосферного середовища, або дослідження газових сумішей і потоків в технологічних умовах, за умов розсіяння у атмосферному середовищі найдоцільнішими є системи лідарного контролю різних типів, що реалізовують розсіяння на аерозольних частинках, комбінаційне розсіяння, флуоресценцію і диференціальне поглинання лазерного випромінювання молекулами газів. Прийняття рішення про доцільність використання однієї із подібних систем вимагає детального дослідження метрологічних характеристик таких лідарів і впливу на них умов експлуатації. Тільки в цьому випадку можна зменшити

похибку вимірювань і підвищити їх достовірність зі збереженням заданої продуктивності. На основі проведеного аналізу систем лідарного зондування атмосферного середовища, призначених для дослідження та контролю багатокомпонентних газових сумішей, зокрема для потреб екологічного моніторингу, можна зробити висновок про доцільність застосування, як стаціонарних, так і мобільних лідарних систем на основі КР. Лідари КР, будучи повноцінними лазерними локаторами, дозволяють отримати додаткову інформацію про параметри джерела викиду, а саме: склад газової суміші викиду; висоту температурної інверсії над рівнем розміщення лідара, діаметр і висоту труби (джерела викиду); об'ємні викиди кожного із забруднювачів, що дозволяє визначити валовий викид джерела забруднень. Крім концентрацій забруднювальних газів лідар КР може визначати такі важливі характеристики, як швидкість витікання і температуру струменя газоповітряної суміші.

Отже, використання лідарів КР, дозволяє проводити інвентаризацію викидів в атмосферу не тільки в якісному, але й у кількісному відношенні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Андреев Ю. М. 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 Институт ОА СО РАН, 2004. — 526 с.

2. Привалов В. Е. Параметры лидаров для дистанционного зондирования газовых молекул и аэрозоля в атмосфере : учеб. пос. / В. Е. Привалов, В. Г. Шеманин. — СПб: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. — 56 с.

3. Петрук В. Г. Спектрофотометрія світлорозсіювальних середовищ (теорія і практика оптичного вимірювального контролю) : монографія (Ч. ІІ). / В. Г. Петрук. — Вінниця: Універсум-Вінниця, 2000. — 207 с.

4. Зуев В. Е. Лазерное зондирование индустриальных аэрозолей / В. Е. Зуев, Б. В. Кауль, И. В. Самохвалов. — Новосибирск : Наука, 1996. — 312 с.

5. Иванов В. И. Многофункциональные лидарные системы / В. И. Иванов, И. А. Малевич, А. П. Чайковский. — Мн. : Университетское, 1996. — 286 с.

6. Аршинов Ю. Ф. КР-лидар для дистанционного контроля промышленных загрязнений атмосферы / Ю. Ф. Аршинов, С. М. Бобровников // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений. — Томск : Изд-во СО РАН, 1997. С. 112—130.

Рекомендована кафедрою екології та екологічної безпеки

Надійшла до редакції 21.09.09
Рекомендована до друку 5.10.09

Васильківський Ігор Володимирович — доцент, ***Петрук Василь Григорович*** — завідувач кафедри, ***Кватернюк Сергій Михайлович*** — науковий співробітник.

Кафедра екології та екологічної безпеки, Вінницький національний технічний університет