

ВПЛИВ АТМОСФЕРИ НА ПОШИРЕННЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Стаття присвячена проблемі захисту інформації від зчитування оптоелектронним каналом шляхом вивчення впливу параметрів атмосфери на поширення лазерного випромінювання. У роботі розглядаються ключові аспекти послаблення випромінювання за рахунок розсіювання і поглинання повітряними газами та аерозольними частинками. Показано, що ефективність зондуючого лазерного променя залежить від екстремальних кліматичних умов і через розсіювання та поглинання потужність лазерного променя зменшуватиметься в міру його поширення в атмосфері. Враховуючи особливості проходження лазерного променя через атмосферу та вплив різного роду завад на зондуючий сигнал, можна спрогнозувати його затухання і блокування, а саме, для зчитування конфіденційної мовної інформації слід брати лазери з випромінюванням, що знаходиться на ділянках спектра атмосфери, зайнятих широкими вікнами прозорості за відповідних погодних умов; для захисту інформації від зчитування оптоелектронним каналом, потрібно використовувати параметри зовнішнього середовища, що унеможливають безпосередній доступ лазерного променя до об'єкту інформації. Представлене авторське бачення досліджень впливу атмосфери на поширення лазерного випромінювання, дозволить застосовувати узагальнені у цій статті результати, ідеї та пропозиції для вирішення актуальних завдань у сфері захисту інформації.

Ключові слова: захист інформації, лазерне випромінювання, лазерні системи акустичної розвідки, оптоелектронний канал, розсіювання, поглинання, атмосфера.

Вступ

На сучасному етапі розвитку інформаційного суспільства загострюється питання захисту конфіденційної інформації від несанкціонованого доступу. Відомі засоби негласного отримання інформації постійно вдосконалюються і мають високі технічні характеристики. Саме лазерні системи акустичної розвідки широко застосовуються для зняття інформації оптоелектронним каналом. Для захисту інформації від лазерного сканування широко використовуються активні і пасивні методи і засоби [1]. Разом з тим, на увагу заслуговує вивчення можливостей послаблення лазерного променя на шляху його поширення через атмосферу.

Постановка проблеми

Лазерні системи акустичної розвідки за допомогою невидимого лазерного променя забезпечують максимально приховане зняття конфіденційної інформації. Перевагою оптичних систем розвідки є максимально безпечне знімання мовної інформації на відстані, поза приміщенням. А це підтверджує, що лазерний промінь перш, ніж потрапити в приміщення, проходить через атмосферу. Тому вивчення впливу параметрів атмосфери на поширення лазерного випромінювання є актуальним питанням та висвітлюється в працях багатьох авторів різних наукових напрямків.

Викладення основного матеріалу

Наявність в повітрі різного роду забруднень, пилу, диму, а також метеорологічні умови значною мірою впливають на поширення лазерного випромінювання в атмосфері. Турбулентні явища, що спостерігаються в атмосфері також можуть призвести до зміни показника заломлення середовища, коливань променя і перекручень прийнятого сигналу [2]. Однак, незважаючи на зазначені перешкоди, використання ЛСАР для зчитування мовної інформації на відстані до кілометрів є особливо перспективним для розв'язання проблеми захисту інформації від витоку оптоелектронним каналом. Вплив атмосфери на лазерне випромінювання, що поширюється в ній, в загальному випадку зводиться до впливу трьох факторів: послаблення випромінювання за рахунок розсіювання і поглинання, астрономічної рефракції і турбулентного спотворення лазерних променів. Загальне послаблення лазерного випромінювання в атмосфері відбувається шляхом вибіркового поглинання елементами атмосфери, аерозольного поглинання і розсіювання, молекулярного розсіювання молекулами газу. У діапазоні довжин хвиль понад 1 мкм вибіркоче поглинання в першу чергу призводить до ослаблення випромінювання, або до розфокусування та відхилення.

В атмосфері основними поглинаючими газами в інфрачервоній області спектра є озон, кисень, водяна пара і вуглекислий газ [3]. Крім того, в атмосфері містяться невеликі домішки газів, які також можуть поглинати випромінювання в інфрачервоному діапазоні - особливо чадний газ, метан і оксиди азоту. Крім того, в атмосфері певних регіонів можуть міститися різні промислові гази, які також мають властивість поглинати енергію.

Атмосфера має істотний вплив на зниження інтенсивності лазерного сигналу. Це підтверджується результатами експериментальних досліджень [4, 5]. Недоліком експериментальних досліджень є те, що вони дійсні лише для тих метеорологічних умов та місцевості, у якій проводилися дослідження. На послаблення лазерного випромінювання також може впливати розсіювання і поглинання аерозольними частинками. За своєю природою аерозолі є дуже різними: за походженням, формою та хімічним складом. Відома велика кількість моделей аерозольної атмосфери, за допомогою яких можна достатньо точно оцінити послаблення лазерного променя.

Основні оптичні параметри, що визначають поширення лазерного випромінювання в атмосфері, є показники розсіювання σ і поглинання k . В даному випадку ослаблення ϵ можна визначити за формулою:

$$\epsilon = \sigma + k. \quad (1)$$

Для розрахунку показників послаблення, розсіювання і поглинання за різних метеорологічних умов використовують емпіричні співвідношення, отримані експериментально. Завдяки дослідженням, які проводили в приземному шарі атмосфери, виділяють такі типи оптичної погоди [6]:

серпанок, за якого метеорологічна дальність видимості $SM \geq 3$ км;

туманний серпанок з характерними значеннями $1 \text{ км} \leq SM \leq 3 \text{ км}$;

хмари, тумани, $SM < 1$ км.

Практично 90 % часу атмосфера перебуває в стані серпанку і туманного серпанку, тому це є типові умови під час проведення лазерної локації. Для інтегрального врахування впливу атмосфери на результати лазерних вимірювань виділяють основні періоди, пов'язані із сезонними змінами, протягом яких властивості атмосферних серпанків є однотипними: зимовий, літній і весняно-осінній.

Метеорологічну дальність видимості можна отримати з міжнародної шкали видимості (табл. 1), наведеної в [3].

Таблиця 1

Міжнародна шкала видимості [3]

Характеристика видимості	Бали	Інтервали видимості	Умови видимості
Дуже погана	0	0–50 м	Дуже сильний туман
	1	50–200 м	Сильний туман або дуже густий сніг
	2	200–500 м	Помірний туман або сильний сніг
Погана	3	500–1000 м	Слабкий туман, помірний сніг або сильний серпанок
	4	1–2 км	Помірний сніг, помірний серпанок або сильний дощ
Середня	5	2–4 км	Слабкий сніг, сильний дощ або слабкий серпанок
	6	4–10 км	Помірний дощ, дуже слабкий сніг або слабкий серпанок
Добра	7	10–20 км	Без опадів або слабкий дощ
Дуже добра	8	20–50 км	Без опадів
Надзвичайна	9	Більше 50 км	Абсолютно чисте повітря

Значення показника аерозольного послаблення $\epsilon(\lambda)$ для різних типів серпанку та типових довжин хвиль лазерних сканерів подано в табл. 2 [3].

Таблиця 2

Розраховані значення $\epsilon(\lambda)$ для різних типів серпанку [3]

Періоди	Тип аерозолю	$\epsilon(\lambda=1,064 \text{ мкм}), \text{ км-1}$						$\epsilon(\lambda=1,560 \text{ мкм}), \text{ км-1}$					
		1 км	2 км	3 км	4 км	5 км	6 км	1 км	2 км	3 км	4 км	5 км	6 км
Зимовий	“Льодяний” серпанок	2,588	1,294	0,863	0,647	0,517	0,431	1,977	0,988	0,659	0,494	0,395	0,329
	Зимній серпанок	2,100	1,050	0,700	0,525	0,420	0,350	1,307	0,653	0,436	0,327	0,261	0,218
	Серпанок зі снігом	3,536	1,768	1,179	0,884	0,707	0,589	3,337	1,669	1,112	0,834	0,667	0,556
Весняно-осінній	Стійкий серпанок	2,303	1,152	0,768	0,576	0,461	0,384	1,610	0,805	0,537	0,402	0,322	0,268
	Туманний серпанок	3,059	1,530	1,020	0,765	0,612	0,510	2,557	1,278	0,852	0,639	0,511	0,426
	Серпанок з мжичкою	2,738	1,369	0,913	0,684	0,548	0,456	2,171	1,085	0,724	0,543	0,434	0,362
Літній	Після сильного дощу	1,392	0,696	0,464	0,348	0,278	0,232	0,678	0,339	0,226	0,169	0,136	0,113
	Стійкий серпанок	1,487	0,744	0,496	0,372	0,297	0,248	0,845	0,422	0,282	0,211	0,169	0,141

Як видно з таблиці, літній час є найбільш сприятливим для лазерного сканування. Приведені для цього періоду коефіцієнти є меншими, ніж коефіцієнти зимового та весняно-осіннього періодів. Залежно від дальності видимості коефіцієнти послаблення збільшуються. Зі збільшенням видимості на 1 км коефіцієнти зменшуються приблизно вдвічі. Ця залежність зменшується зі збільшенням видимості. Менш чутливими до наявності аерозолів в атмосфері є лазерні сканери з довжиною хвилі 1,560 мкм, ніж лазерні сканери з меншою довжиною хвилі.

Як зазначалося вище, приведені в таблиці дані відповідають певним метеорологічним умовам, а реальні значення коефіцієнтів послаблення можуть істотно різнитися, залежно від місцевості. Особливо це стосується промислових зон, де в повітрі є значна кількість великих аерозольних частинок, що мають різну щільність і різні показники заломлення.

Як відомо, атмосфера містить механічну суміш з різних газів, пари, крапель рідини і твердих частинок пилу. Тому атмосфера є аерозолем, склад якого постійно перемішується та змінюється.

На основі даних [6], види атмосферних аерозолей об’єднані в наступні основні класи: опади – дощ чи сніг, хмари, тумани, димки, наморозь. Найімовірніше, у хмарах і туманах величина радіуса частинок – 5-6 мкм, а в димках значно менше, тому й послаблення випромінювання в димках теж нижче. Спостерігається, що послаблення оптичного сигналу при дощі та снігопаді є меншим, ніж при тумані (табл.3) [2]:

Таблиця 3

Послаблення випромінювання в діапазоні 0,85 мкм залежно від погодних умов [2]

Погодні умови	Згасання, дБ/км
Ясна погода	0 – 3
Слабкий дощ	3 – 6
Сильний дощ	6 – 7
Сніг	6 – 26
Легкий туман	20 – 30
Густий туман	50 – 100

Отже, аерозольне послаблення може бути значним при несприятливих погодних умовах та може збільшуватися у 1,5–2,5 рази при тумані, снігу або мжички.

Поширення лазерного випромінювання в атмосфері супроводжується низкою взаємопов'язаних явищ взаємодії світла з навколишнім середовищем. Виходячи з суто якісних характеристик, ці явища можна розділити на три основні групи: поглинання і розсіювання молекулами повітряних газів, послаблення аерозолями (пил, дощ, сніг, туман) і флуктуації випромінювання внаслідок атмосферної турбулентності. Поглинання світлового потоку у видимому та інфрачервоному діапазонах визначається, перш за все, нерівномірним молекулярним поглинанням, що є максимальним на резонансних частотах молекул повітря, води, вуглекислого газу, озону та інших компонентів атмосфери.

Існують так звані вікна прозорості, ділянки спектра, де поглинання незначне. І якщо лазерне випромінювання потрапляє в центр сильної лінії спектра, то поглинається атмосферою на 100 % навіть на невеликій відстані. В роботі [7] приведено спектр поглинання сонячного випромінювання атмосферними газами, де можна побачити просвітління, або вікна прозорості (Рис. 1.).

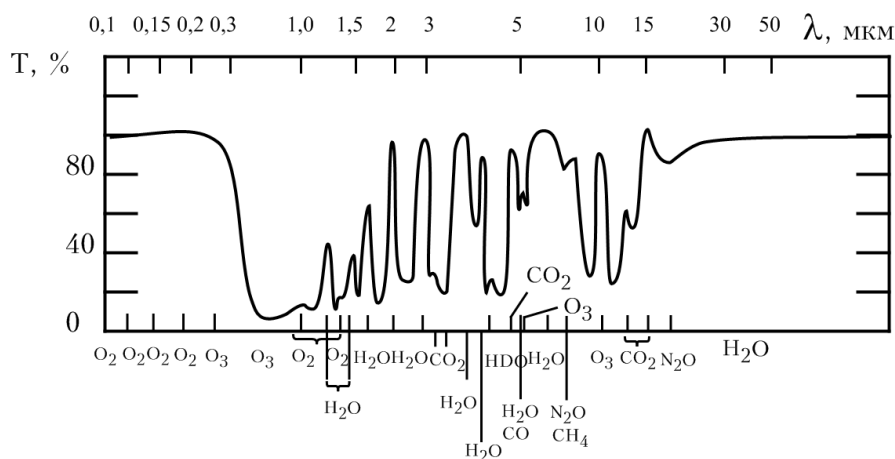


Рис. 1. Спектр поглинання сонячного випромінювання атмосферними газами [7]

Смуги поглинання є результатом накладання і перекривання різних смуг одного і того ж та різних газів. У вікнах прозорості існують цілі сукупності різних слабких смуг. На рисунку 2 представлений спектр поглинання атмосфери в області випромінювання лазера на рубіні з роздільною здатністю $2,3 \cdot 10^{-6}$ мкм (Рис. 2) [7].

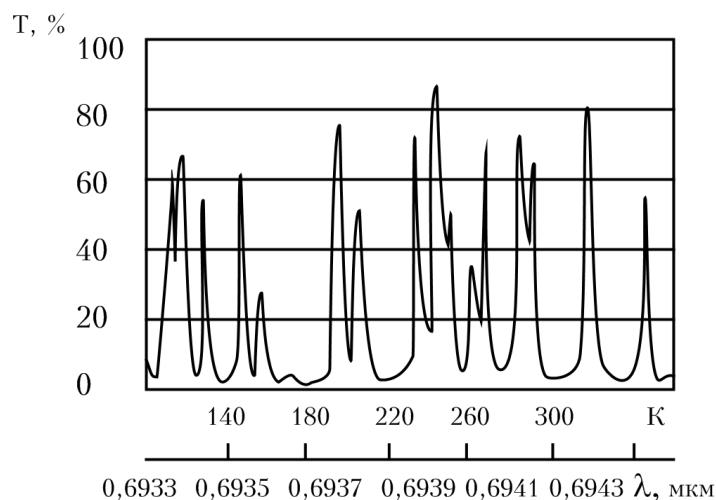


Рис. 2. Спектр поглинання атмосфери в діапазоні хвиль близько 0,69 мкм [7]

У підсумку, можна сказати, що атмосфера значно впливає на поширення лазерного променя, а саме:

затухання від розсіювання та поглинання променя аерозолями і молекулами в атмосфері; теплове світіння, що виникає в результаті аерозольного та молекулярного поглинання і може призвести до зміни показника заломлення;

плазмоутворення, що веде до локальної іонізації атмосфери.

Поширюючись через атмосферу, хвильовий фронт лазерного променя може спотворюватися атмосферною турбулентністю, що впливатиме на форму променя, його яскравість і навіть положення в просторі [8].

В статті [9] представлено теоретичну модель послаблення лазерного випромінювання через розсіювання атмосферними частинками залежно від дальності видимості. Поглинання, що відбувається через вуглекислий газ, озон та водяну пару, залежить від погоди та довжини шляху. Загальний спосіб зменшення променевого потоку під час проходження через атмосферу називається згасанням.

Коефіцієнт згасання визначають чотири окремі процеси: молекулярне поглинання, молекулярне розсіювання, аерозольне поглинання та аерозольне розсіювання, котрі в свою чергу залежать від довжини хвилі лазерного випромінювання. Коефіцієнт атмосферного послаблення можна представити у вигляді [8]:

$$\gamma = \alpha_m + \beta_m + \alpha_a + \beta_a \quad (2)$$

де γ – коефіцієнт атмосферного послаблення,

α – коефіцієнт поглинання

β – коефіцієнт розсіювання,

(m) і (a) позначають молекулярний та аерозольний процеси, відповідно.

У підсумку зазначимо, що ефективність зондуючого лазерного променя залежить від екстремальних кліматичних умов. Когерентність лазерного випромінювання та оптичної хвилі також порушує атмосфера турбулентність. Всі зазначені чинники можуть спотворювати поширення хвилі і призвести до розширення променя, перерозподілу енергії пучка та флуктуацій опромінення.

Отже, через розсіювання та поглинання потужність лазерного променя буде зменшуватися в міру його поширення в атмосфері. Таким чином, враховуючи особливості проходження лазерного променя через атмосферу та вплив різного роду завад на зондуючий сигнал, можна спрогнозувати його затухання і блокування.

В таблиці 4 приведено результати залежності втрат енергії зондуючого випромінювання від довжини хвилі з врахуванням молекулярного розсіювання [7].

Таблиця 4

Залежність втрат енергії випромінювання від довжини хвилі
за рахунок молекулярного розсіювання [7]

λ , мкм	Втрати енергії випромінювання (%) різних довжин хвиль за рахунок молекулярного розсіювання		
	В приземному шарі атмосфери на відстані, км		У вертикальному стовпі всього шару атмосфери
	1	10	
0,30	13,4	76,3	70,4
0,55	1,1	10,9	9,1
0,63	0,8	7,2	6,7
0,60	0,5	4,6	3,9
0,80	0,3	2,5	2,1
1,06	0,1	0,9	0,7

Як бачимо з таблиці, для довжини хвилі 0,3 мкм у вертикальному стовпці всієї товщі атмосфери втрати складають 70,4%. Для довжини хвилі 0,55 мкм втрати значно менші – 9,1%. Те саме спостерігаємо і для приземного шару атмосфери.

В сучасній науці розроблені методи кількісного визначення коефіцієнтів поглинання для ділянок спектру, в котрі потрапляє лазерне випромінювання. Якщо ж спектр випромінювання лазера відомий, то його поглинання атмосферними газами можна попередньо кількісно визначити для реальних атмосферних умов.

Висновки

У підсумку зазначимо, що є велика кількість робіт, в яких з різних точок зору актуалізуються дослідження проходження лазерного випромінювання через атмосферу. Враховуючи особливості проходження лазерного променя через атмосферу та вплив на нього різного роду завад, для зчитування конфіденційної мовної інформації слід брати лазери з випромінюванням, що знаходиться на ділянках спектра атмосфери, зайнятих широкими вікнами прозорості за відповідних погодних умов. Якщо ж постає питання захисту інформації від зчитування оптоелектронним каналом, потрібно використовувати параметри зовнішнього середовища, що унеможливають безпосередній доступ зондуючого променя до об'єкту інформації.

Представлене авторське бачення досліджень впливу атмосфери на поширення лазерного випромінювання, дозволить застосовувати узагальнені у цій статті результати, ідеї та пропозиції для вирішення актуальних завдань у сфері захисту інформації.

Перелік посилань

1. Катаєв, В. С. Захист інформації від перехоплення лазерними мікрофонами. Перспективні напрями захисту інформації: матеріали шостої міжнародної наук.-пр. конф. (Одеса, 02-06 вересня 2020 р.). Одеса: Бондаренко М.О., 2020. С. 76-78.
2. Поплавський, О. А., Поплавська, А. А., Коротун, І. А. Особливості організації передачі інформації лазером через атмосферу для розробки методів та програмно-апаратних засобів прогнозування характеристик зображень сигналу // Волоконно-оптичні технології в інформаційних та енергетичних мережах. 2014. С. 209-206.
3. Бурштинська, Х. В., Бабушка, А. В. Вплив атмосфери на послаблення лазерного променя при скануванні місцевості // Геодезія, картографія і аерофотознімання. Вип. 78, 2013. С. 49-53.
4. Wolfe, W. and Zissis, G. J. The infrared handbook. The Infrared Information Analysis Center. / Environmental Research Institut of Michigan, 1989. 1700p. 10. URL: <http://encyclopaedia.biga>.
5. Basics of pulsed laser ranging: Textbook manual for universities / V.I. Kozintsev, M.L. Belov, V.M. Orlov et al.: ed. V.N. Rozhdestvina – M.: Publishing house of MSTU im. N.E. Baumen, 2006. – 512 pp.
6. Воробієнко, П. П., Нікітюк, Л. А., Резніченко, П. І. Телекомунікаційні та інформаційні мережі // – К.: САММІТ-Книга, 2010. – 708 с.
7. Дослідження розповсюдження лазерного випромінювання в атмосферному середовищі / В. Г. Петрук, С. М. Квартенюк, І. В. Васильківський, А. П. Іванов, П. М. Турчик // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. 2008. № 2 (16). С. 114-125.
8. Tyson, R. K. Principles of Adaptive optics // Academic Press. Orlando USA, 1991.
9. Frehlich, R. Simulation of laser propagation in a turbulent atmosphere // Applied Optics, № 39(3), 2000. pp. 393-397. doi: 10.1364/AO.39.000393.

Надійшла 14.02.2024