

ПРИЛАДИ

УДК 535.232

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/05>

Романюк В.А.

Національна академія Національної гвардії України

Стародубцев С.О.

Національна академія Національної гвардії України

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛАЗЕРНИХ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Стаття присвячена визначенню способів протидії малорозмірним літальним апаратам, у яких невелика ефективна відбивна поверхня. Сьогодні у світі стрімко розвивається розробка та випробування різних лазерних систем. Вже було проведено випробування лазерного озброєння на землі/воді/повітря/космосі. Випробування показують ефективність нових розробок, і лише існуючі технології обмежують вчених у розвитку лазерів. Над розвитком лазерних систем працюють приватні і державні організації різних країн, а щодо перспектив їх застосування – це лише питання часу. Це також стосується і проблеми щодо виявлення безпілотних літальних апаратів.

З'ясовано, що важко виявити такі об'єкти існуючими засобами протиповітряної оборони, особливо в темну пору доби, коли візуально їх неможливо ідентифікувати. Але це можливо зробити завдяки використанню лазерних засобів, які отримують інформацію про такі об'єкти методами, які визначають суттєву відмінність оптико-атмосферних характеристик збуреної літальним апаратом області простору відносно навколишнього повітря.

Радіолокаційні і лазерні системи працюють по відбитому від безпілотного апарату сигналу, а запропоновані засоби аналізують методами лазерного зондування розсіяне слідом літального апарату випромінювання. Взаємодія випромінювання із середовищем проявляється у формі таких фізичних явищ, як аерозольне й молекулярне розсіювання, резонансне поглинання, комбінаційне, резонансне види розсіювання, зміна вигляду прийнятого сигналу, доплеровське поглинання й збільшення або зменшення частоти випромінювання. У розсіяному в зворотному напрямку сигналу міститься інформація про характеристики області простору, в якому проводилося зондування.

Обробка результатів зондування дозволяє в поточному часі з високою ймовірністю визначити, є чи немає в області простору, де проводилося зондування, літальний апарат. Таким чином, у повітряному просторі, який досліджується, у певних межах будуть змінюватися концентрація часток й їхній просторовий розподіл відносно незбуреної частини повітряного простору, що слугуватиме інформаційною ознакою наявності повітряних об'єктів в даному об'ємі повітряного простору.

Ключові слова: лазерна зброя, методи зондування, лазерне випромінювання, параметри випромінювання.

Постановка проблеми. Масове застосування безпілотних літальних апаратів є характерною ознакою ведення бойових дій в сучасних війнах. Без цих невеликих пристроїв вже неможливо зараз уявити, що воювати можна по іншому: розвідка, нанесення бомбових ударів, дрони – камікадзе. Велика кількість, гнучка тактика застосування, вдень і в нічний час. Особливістю даного виду техніки є те, що їх важко виявити, особливо в темну пору доби завдяки значною відмінністю у порівнянні із іншими повітряними об'єктами: невеликі розміри і, відповідно мала ефективна відбивна поверхня.

Можливість виявлення подібних об'єктів лазерними засобами обумовлена істотною відмінністю параметрів досліджуваного об'єму простору від характеристик навколишнього повітря. Фіксація цих відмінностей здійснюється в процесі обробки результатів зондування досліджуваної області простору й полягає в порівнянні отриманих даних лазерних вимірів концентрації характерних компонентів з деяким граничним (фоновим) їхнім значенням, характерним для звичайної атмосфери в даному місці. Такі виміри роблять шляхом посилки випромінювачем лазера короткого

світлового імпульсу в напрямку обраного об'єму простору й реєстрації приймальним пристроєм розсіяного у зворотному напрямку лазерного випромінювання. При цьому стробування по дальності роблять залежно від умов і завдань виявлення різних типів об'єктів [5, с. 7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Актуальні питання дослідження і розробки способів протидії малорозмірних, з малою відбивною поверхнею літальних апаратів викладено як в наукових працях вітчизняних (М.М. Биков, С.М. Тюрін, А.Г. Єрилкін, Д.В. Карлов та ін.) так і зарубіжних дослідників. За досвідом війни в Україні зарубіжні фахівці вважають, що тенденція зростання загрози малих безпілотних літальних систем буде лише посилюватись у найближчий час. І хоча ця проблема існувала і раніше, нині хід і логіка бойових дій ясно дає зрозуміти важливість ефективної протидії БПЛА [1, с. 1].

Для боротьби з ударною безпіотною авіацією застосовують різні методи протидії ударним БПЛА противника. Їх можна поділити на контактні і безконтактні.

При контактних методах боротьби застосовуються такі засоби як сітки, стрілецька зброя, тощо. При безконтактних – засоби радіоелектронної боротьби, лазери. До безконтактних методів боротьби з БПЛА також відноситься лазерна зброя, яка розробляється різними державами і компаніями світу [2, с. 16, 19].

Лазерні засоби виявлення подібних літальних апаратів використовують результати зондування повітряного простору в напрямку можливої атаки БПЛА і оцінюють відмінність параметрів досліджуваного об'єму простору від характеристик навколишнього повітря. При перевищенні концентрації певних речовин її граничного рівня для незбуреної атмосфери приймається рішення про наявність в даному напрямку літального апарату [3, с. 58; 4, с. 24].

Метою роботи є оцінка ефективності використання різних методів лазерного дистанційного зондування і вибір найбільш ефективних із них для застосування в лазерних системах виявлення повітряних об'єктів.

Виклад основного матеріалу. У найбільш загальному виді застосовується схема моностатичного зондування, що характерна для вирішення локаційних завдань.

Значні труднощі, що виникають при реалізації такої схеми, зв'язані зі специфічними особливостями вимірів лазерно-локаційного типу, основні з яких викликані високою невизначеністю стану

об'єкта дослідження, відсутністю апріорних відомостей про нього, більшим динамічним діапазоном зміни інтенсивності (до 160 дБ) сигналу зворотного розсіювання. В умовах впливу сильних світлових перешкод оптичні засоби виміру сигналів зворотного розсіювання повинні забезпечити вимір форми однократних імпульсних аналогових сигналів у струмовому режимі фотодетекторів, амплітудно-часових параметрів стохастичних імпульсних потоків у багатофотонному режимі і їхніх лічильно-часових характеристиках в однофотонному режимі.

Крім описаних труднощів варто враховувати статистичний характер розсіяного сигналу, обумовлений великою мінливістю в просторі й часі концентрації, розмірів, хімічного складу компонентів, що розсіюють, а також флуктуаціями їх динамічних й оптичних характеристик. Турбулентні флуктуації показника переломлення на атмосферній трасі призводять до перекручування вихідних параметрів лазерного пучка, що мають важливе значення для інтерпретації результатів лазерного дистанційного зондування, а також є причиною флуктуацій сигналу, які обмежують чутливість методу поглинання на протяжних локаційних трасах. Важливим аспектом функціонування лазерних систем є методи, що використовуються, реєстрації сигналів зворотного розсіювання. У вимірювальних системах, що використовують осцилографічний метод реєстрації, для одержання інтенсивності сигналу як функції часу, обробка візуальної інформації з екрана осцилографа здійснюється шляхом поділу площі, обмеженою повною огинаючою зареєстрованого сигналу, на усереднену площу одноелектронного імпульсу [6, с. 175]. Однак такий метод реєстрації не забезпечує необхідну точність й оперативність вимірів форми аналогового сигналу зворотного розсіювання і практично не дозволяє здійснити вимір в однофотонному або близькому до нього режимі.

Крім осцилографічних систем відомі одноканальні вимірювальні системи, що реалізують стробоскопічний метод виміру сигналу зворотного розсіювання. У них виміри здійснюють шляхом додаткового інтегрування сигналу в зоні строба за допомогою стробоінтеграторів. Однак дані сигнали також не забезпечують необхідну точність й оперативність вимірів, тому що на кожному циклі зондування вони вимірюють значення лише однієї точки вибірки сигналу розсіювання. При цьому для повного аналізу траси довжиною R із просторово-часовим дозволом R потрібно N_p реалізацій сигналу й відповідно циклів зондування, необхідне число яких визначається зі співвідношення [7, с. 231],

$$N_p = \frac{R}{\Delta R} = \frac{R \cdot C}{2 \cdot T_c}, \quad (1)$$

де T_c – тривалість строб-сигналу інтегратора.

Даний метод має низьку інформаційну продуктивність і його ефективність знижується при збільшенні необхідного просторово-часового дозволу й довжини траси, тому що при цьому зростає загальний час виміру t :

$$T = N_p t_n = \frac{R}{\Delta R} t_n, \quad (2)$$

де t_n – період проходження зондувальних імпульсів.

За результатами досліджень [8, с. 11] можливими методами багатопараметричного аналізу сигналів зворотного розсіювання є методи багатоканального аналогоцифрового кодування і однофотонний статистичний метод. Вони істотно підвищують оперативність і вірогідність вимірів. Однак розроблені багатоканальні вимірювальні системи не забезпечують виміру досить довгих реалізацій сигналу зворотного розсіювання за однократний моноімпульсний цикл зондування. До того ж вони мають малий показник багатоканальності системи, загальне число інформаційних каналів яких не перевершує $20 \div 30$ при досить великій відносній погрішності $\Delta\delta = 13 \div 15\%$ виміру сигналів у кожному каналі. Вимоги реєстрації максимальних по довжині реалізацій сигналу розсіювання з високими точністю й часовим дозволом пов'язане із забезпеченням показника багатоканальності вимірювальних систем на рівні $500 \div 2000$, і є дуже важливим як з погляду досягнення вірогідності результатів виміру, так і з погляду інформаційної продуктивності. Ступінь виконання даної вимоги визначає точність відновлення сигналу зворотного розсіювання і його повну неухвалювану енергію в напрямку прийому.

Фотодетектування сигналів широкого динамічного діапазону [8, с. 10]. Основні шляхи розширення діапазону пов'язані з розробкою фотодетекторів, що мають логарифмічну амплітудну характеристику і часове автоматичне регулювання посилення. Перспективним напрямком є розробка універсального методу управління чутливістю фотодетектора за законом, пов'язаному з енергетичними характеристиками детектуємих сигналів, і вироблення критеріїв для створення адаптивних алгоритмів обробки сигналів зворотного розсіювання з усередненням їх по ансамблі реалізації.

Досить значну погрішність у результат вимірів форми сигналів можуть вносити некомпенсовані флуктуації опорних часових шкал системи, що

визначають часові координати дискретизації процесу. Досить значну погрішність у результат вимірів форми сигналів можуть вносити некомпенсовані флуктуації опорних часових шкал системи, що визначають часові координати дискретизації процесу. У цьому зв'язку використання нефазуємих джерел опорної частоти пов'язане з появою невизначеності часового положення δT реперних точок шкали лазера, рівної

$$\delta T = \pm \frac{T_0}{2}, \quad (3)$$

де T_0 – період опорного нефазуємого генератора.

Це призводить до істотного зниження просторово-часового дозволу системи,

$$\Delta R = \frac{CT_0}{4} \quad (4)$$

Застосування фазуємих джерел опорної частоти дозволяє мінімізувати зазначені погрішності.

Питання підвищення метрологічних характеристик вимірювальних систем лазерно-локаційного призначення пов'язані зі створенням методів контролю й калібрування їхніх параметрів. Процес технічної діагностики лазерних засобів повинні проводитися як перед циклом вимірів у режимі заелементного контролю, так й у процесі проведення натурних вимірів.

Таким чином, побудова лазерної системи дистанційного зондування, що здійснює вимір параметрів локальних об'ємів простору, являє собою складне науково-технічне завдання, рішення якого визначається вибором реальних моделей вихідних параметрів й ефективного методу лазерних вимірів.

Результати досліджень, [7, с. 230], показали, що найбільш чутливим і селективним методом виміру поточних значень концентрації складових викидів вихлопних газів є метод диференційного поглинання й розсіювання лазерного випромінювання молекулами речовини досліджуваного компонента. При цьому було відзначено, що ефективність даного методу фактично визначається відношенням величин енергій прийнятих сигналів на двох різних довжинах хвиль, одна з яких $E(\lambda_0)$ відповідає лінії поглинання лазерного компонента в сліді аеродинамічного ланцюга, а інша $E(\lambda_w)$ перебуває поза цією лінією.

Дальність дії такої системи визначається рівнем прийнятих енергій сигналів, що у свою чергу, повинен бути не менш граничної чутливості приймального пристрою.

Основною перевагою лазерних засобів при вирішенні локаційних завдань є те, що результати зондування не залежать від характеру поверхні

і її параметрів, а визначаються тільки чутливістю й просторовим дозволом обраного методу лазерних вимірів.

Аналіз результатів зондування в реальному масштабі часу дозволяє з високою вірогідністю встановити факт знаходження в досліджуваній області простору будь-який об'єкт. Причому, залежно від типу об'єкта, у певних границях будуть мінятися склад сліду, концентрація часток й їхній просторовий розподіл, що, у свою чергу, може служити додатковою інформаційною ознакою селекції й розпізнавання цілей.

Для такого об'єкта лазерне рівняння з врахуванням однократного розсіювання описується відомим рівнянням [3, с. 59; 4, с. 25, 26]:

$$E(\lambda, R) = E_0 \cdot \xi(\lambda) \cdot T(\lambda)^2 \cdot Y(R) \cdot \beta_\pi(\lambda, R) \cdot \Delta R \cdot \frac{A}{R^2}, \quad (5)$$

де

$$T(\lambda) = \exp\left(\int_0^R K(\lambda, R) dR\right) \quad (6)$$

коефіцієнт пропускання атмосфери для довжин хвиль λ_0 на шляху R;

$K(\lambda, R)$ – коефіцієнт ослаблення в атмосфері;

E_0 – вихідна енергія лазерного імпульсу;

$\xi(\lambda)$ – коефіцієнт спектрального пропущення оптичної системи;

A/R^2 – тілесний кут, у якому здійснюється прийом сигналів оптичною системою;

A – площа лінзи або дзеркала об'єктива;

R – відстань до досліджуваного об'єму простору;

Y(R) – геометричний коефіцієнт, що враховує перекриття лазерного променя й кута поля зору приймального пристрою;

$$\Delta R = \frac{C \cdot \tau_d}{2} \text{ – просторове розрішення;}$$

τ_d – час детектування оптичного сигналу;

$\beta_\pi(\lambda, R)$ – об'ємний коефіцієнт зворотного розсіювання;

Для даного методу з урахуванням співвідношення (5) енергії прийнятих сигналів на двох довжинах хвиль із об'єму, довжиною R, будуть відповідно рівні:

$$E(\lambda_0, R) = E_0 \xi(\lambda_0) Y(R) \beta(\lambda_0, R) \Delta R \frac{A}{R^2} \exp(-2 \int_0^R (K(\lambda_0, R) + N(R) \sigma(\lambda)) dR) \quad (7)$$

$$E(\lambda_\omega, R) = E_0 \xi(\lambda_\omega) Y(R) \beta(\lambda_\omega, R) \Delta R \frac{A}{(R)^2} \exp(-2 \int_0^R K(\lambda_\omega, R) dR). \quad (8)$$

Аналіз виразів (7), (8) показує, що рівень розсіяного сигналу визначається багатьма параме-

трами, що залежать як від характеристик властивостей лазерної системи, так і від стану траси. Параметри, що залежать від конструктивних особливостей системи, звичайно задають або оцінюють розрахунковим шляхом. Для параметрів, що характеризують стан траси, необхідно задавати модельні профілі цих величин, що найбільш адекватно відбивають властивості реальної атмосфери. Їхнє моделювання потрібно також для прогнозу умов поширення оптичних хвиль через атмосферу. Багатопараметричність даних виразів диктує необхідність такого математичного моделювання роботи лазерної системи, що дозволяє оптимально вибрати характеристики приймально-передавального каналу і вимірювального пристрою, а також оцінити ефективність методу при вирішенні завдань виявлення об'єктів.

Оцінка дальності дії лазерної системи виходила з виразу (7), оскільки послаблення сигналу, викликане поглинанням досліджуваних компонентів газів лазерного випромінювання, є одним з основних обмежуючих факторів. У цьому випадку з врахуванням $R \gg \Delta R$ для випадку, коли домінуючим шумом є шуми темного струму, дальність зондування буде описуватися виразом [3, с. 59]:

$$R = \left[\frac{E_0 \cdot A \cdot c \cdot D^* \cdot \beta_\pi(\lambda_0, R) \cdot \xi(\lambda_0) \cdot \xi(R)}{2 \cdot q \cdot (A_d \cdot B)^{0.5}} \exp(-2 \int_0^R K(\lambda_0, R) dR) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

Аналіз залежності дальності виявлення від енергії зондувального імпульсу $R=f(E, A, \tau)$ показав, що збільшення дальності зондування обмежується можливостями створення потужних передавачів, істотне збільшення дальності виявлення пов'язане зі значним ростом площі антени, помітного збільшення дальності зондування можна досягти за рахунок значного збільшення тривалості імпульсу, але при цьому погіршується роздільна здатність лазера.

Висновки. Лазерна система з врахуванням вимог до параметрів приймально-передавальних і вимірювального каналів здатна виявляти об'єкти на основі вимірів концентрації характерних для них газових компонентів. Ефективність функціонування й дальність дії такої системи залежить від вибору оптимальних моделей вихідних параметрів, умов локації й механізму розсіювання лазерного випромінювання.

Список літератури:

1. Пентагон: боротьба з БПЛА виходить на новий рівень. Armyinform веб-сайт. URL: <https://armyinform.com.ua/2023/03/15/pentagon-borotba-z-bpla-vyhodyt-na-novuj-riven> 2с. (дата звернення: 08.08.2023).

2. Єрилкін А.Г. Огляд та аналіз світового досвіду боротьби з ударною безпілотною авіацією. А.Г. Єрилкін, Д.О. Гур'єв, Д.В. Карлов, О.В. Коробецький, Ю.А. Шевченко. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2022. № 4 (49). С. 15-22.

3. Романюк В.А. Оцінювання можливостей використання лазерного методу диференціального поглинання і розсіювання для виявлення факту перетину периметра, що охороняється. В.А. Романюк, А.А. Побережний, О.М. Сальников. Збірник наукових праць. Академія ВВ МВС України – Х. : Акад. ВВ МВС України, 2013. Вип. 2. С. 58-60.

4. Романюк В.А. Дослідження можливості підвищення точності вимірювань концентрації частинок вибухових речовин методами дистанційного зондування. В.А. Романюк, С.О. Стародубцев, С.В. Шаповалов. Радіотехніка. Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2018. Вип. 194. С. 23-28.

5. Боротьба з безпілотними літальними апаратами (за досвідом проведення ООС (раніше АТО). — Київ: «Центр учбової літератури», 2022. 43 с.

6. Малявкін Л.Н. Установка для дистанційного виявлення забруднень атмосфери за спектрами комбінаційного розсіяння світла. Л. Н. Малявкін, Ю.Г. Вайнер, В.В. Золотарьов. Журнал прикладної спектроскопії, 1977. Т. 26. вип. 1. С. 174-179.

7. Ванін Н.В. Лідар для дослідження атмосфери різними методами. Н.В. Ванін, А.В. Мигулін, С.Ю. Рибаків: Квантова електроніка, 1976. Т. 3, № 9. С. 229-234.

8. Демьянова Т.А. Порівняльна ефективність різних способів обробки сигналу на виході фотопомножувача. Т.А. Демьянова, Г.М. Креков, М.М. Крекова. Оптико-механічна промисловість, 1973. № 6. С. 9-11.

Romanyuk V.A., Starodubtsev S.O. STUDY OF THE EFFICIENCY OF LASER METHODS FOR THE DETECTION OF UNMANNED AIRCRAFT DEVICES

The article is devoted to the definition of methods of countering small-sized aircraft, which have a small effective reflective surface. Today, the development and testing of various laser systems is rapidly developing in the world. Laser weapons have already been tested on land/water/air/space. Tests show the effectiveness of new developments, and only existing technologies limit scientists in the development of lasers. Private and state organizations of various countries are working on the development of laser systems, and the prospects for their use are only a matter of time. This also applies to the problem of detecting unmanned aircrafts.

It has been found that it is difficult to detect such objects with existing means of air defense, especially in the dark, when it is impossible to visually identify them. But it is possible to do this thanks to the use of laser devices that obtain information about such objects by methods that determine the significant difference in the optical-atmospheric characteristics of the area of space disturbed by the aircraft relative to the surrounding air.

Radar and laser systems work on the signal reflected from the unmanned aircraft, and the proposed means analyze the radiation scattered by the aircraft's wake using laser probing methods. The interaction of radiation with the environment is manifested in the form of such physical phenomena as aerosol and molecular scattering, resonance absorption, combination, resonance types of scattering, a change in the form of the received signal, Doppler absorption and an increase or decrease in the radiation frequency. The backscattered signal contains information about the characteristics of the area of space in which the sounding was carried out.

The processing of sounding results makes it possible to determine in the current time with a high probability whether there is or is not an aircraft in the area of space where the sounding was carried out. Thus, in the airspace under investigation, within certain limits, the concentration of particles and their spatial distribution relative to the undisturbed part of the air space will change, which will serve as an informative sign of the presence of air objects in a given volume of air space.

Key words: laser weapons, sounding methods, laser radiation, radiation parameters.