

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2026-86-36>

УДК 004.056.53:534.2

КОНОТОПЕЦЬ Микола

Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації  
Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
<https://orcid.org/0000-0002-6963-1877>  
[nikolyalux@gmail.com](mailto:nikolyalux@gmail.com)

ГОЛЬ Владислав

Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації  
Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
<https://orcid.org/0000-0002-9995-9590>  
[vladgol1971@gmail.com](mailto:vladgol1971@gmail.com)

ПЕПА Юрій

Державний університет інформаційно-комунікаційних систем  
<https://orcid.org/0000-0003-2073-1364>  
[yurka14@ukr.net](mailto:yurka14@ukr.net)

КОТЕНКО Андрій

Державний університет інформаційно-комунікаційних систем  
<https://orcid.org/0000-0002-0483-6353>  
[dutkotenko@gmail.com](mailto:dutkotenko@gmail.com)

## УДОСКОНАЛЕННЯ ПАСИВНОГО МЕТОДУ ЗАХИСТУ АКУСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ВІД ВИТОКУ АКУСТО-ЕЛЕКТРИЧНИМ КАНАЛОМ НА ОБ'ЄКТАХ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Наведений в роботі математичний апарат дав змогу проаналізувати математичні залежності параметрів, які сприяють дифузному розсіюванню від огорожувальної конструкції в якості якої розглядається скло. Для цього було розроблено формалізовану модель акусто-електричного каналу витоку інформації на об'єктах інформаційної діяльності (ОІД) за енергетичним критерієм, що включає в себе основні фізичні характеристики приймача лазерної системи акустичної розвідки (ЛСАР – надалі). Проведено моделювання процесу перетворення прийнятого вхідного сигналу приймача ЛСАР. На основі отриманих результатів запропоновано удосконалення пасивного та активного методу захисту акустичної інформації від витоку акусто-електричним каналом. За допомогою методу синтезу розроблено пропозиції стосовно отримання вихідних даних для виготовлення ситалів (склокристалічних матеріалів), які на відміну від звичайного скла відрізняються більш зернистою та однорідною мікрокристалічною структурою та можуть бути застосовані в віконних конструкціях об'єктів інформаційної діяльності замість звичайного скла.

Ключові слова: мовна інформація, лазерні системи акустичної розвідки, акусто-електричний канал витоку інформації, джерело сигналів, приймач зловмисника, середовище поширення сигналів, об'єкт інформаційної діяльності, методи пасивного захисту.

KONOTOPETS Mykola, HOL Vladyslav

Institute of Special Communication and Information Protection  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

PEPA Yuriy, KOTENKO Andrei

State University of Information and Communication Technologies

## IMPROVEMENT OF THE PASSIVE METHOD OF PROTECTING ACOUSTIC INFORMATION FROM LEAKAGE THROUGH AN ACOUSTIC-ELECTRICAL CHANNEL AT INFORMATION ACTIVITY FACILITIES

The paper addresses the problem of protecting speech information from leakage through an acousto-electric channel at information activity facilities under conditions of rapid development of technical reconnaissance systems. A mathematical apparatus is presented that allows analysis of the dependencies between parameters affecting diffuse scattering from enclosing structures, particularly glass surfaces that can act as reflecting elements for laser acoustic reconnaissance systems (LARS). A formalized model of the acousto-electric information leakage channel based on an energy criterion is developed, taking into account the key physical characteristics of the receiver of a laser acoustic reconnaissance system, the signal propagation environment, and the properties of the reflecting surface. The process of transformation of the received optical signal at the input of the LARS receiver is modeled, including the influence of optical, geometric, and structural parameters of the glass surface. Particular attention is paid to the mechanisms of specular and diffuse reflection of laser radiation and their influence on the possibility of extracting speech information by an attacker. Based on the obtained results, approaches to improving both passive and active methods of protecting acoustic information are proposed. Using the synthesis method, recommendations are formulated for obtaining initial parameters for manufacturing glass-ceramic materials (sital). Unlike conventional glass, these materials have a controlled granular and homogeneous microcrystalline structure capable of forming a surface roughness comparable to the wavelength of probing laser radiation. Such a structure ensures effective diffuse scattering of the incident laser beam and significantly reduces the power of the reflected signal received by the reconnaissance system.

The proposed approach allows a substantial reduction in the maximum operational range of laser acoustic reconnaissance systems and increases the resistance of protected facilities to remote speech interception. The obtained results can be used in the

*design of window structures and other enclosing elements of information activity facilities to improve passive protection of acoustic information without the need for additional energy consumption or complex active countermeasures.*

*Keywords: speech information, laser acoustic reconnaissance systems, acousto-electric information leakage channel, signal source, attacker receiver, signal propagation medium, information facility, passive protection methods.*

Стаття надійшла до редакції / Received 08.04.2026  
Прийнята до друку / Accepted 30.04.2026  
Опубліковано / Published 31.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© КОНОТОПЕЦЬ Микола, ГОЛЬ Владислав,  
ПЕПА Юрій, КОТЕНКО Андрій

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

У сучасних умовах стрімкого розвитку технічних засобів розвідки питання захисту акустичної інформації набуває особливої значущості. Пасивні методи протидії ЛСАР базуються на зміні конструктивних, фізичних або геометричних параметрів об'єкта захисту таким чином, щоб мінімізувати можливість перехоплення акустичної інформації без застосування активних джерел енергії. На відміну від активних методів, вони не вимагають постійного енергоспоживання, мають необмежений термін дії, не створюють додаткового дискомфорту для персоналу та забезпечують стабільний рівень захисту незалежно від людського фактору. Ефективність пасивних методів визначається якістю проектування, вибором матеріалів та точністю виконання конструктивних рішень. Це, як раз, і є застосування багатошарових склопакетів з асиметричною конструкцією – базовим рішенням для підвищення акустичного захисту. Асиметрія конструкції (різна товщина шарів скла) запобігає збігу резонансних частот та формуванню резонансів системи в цілому [1, 2].

Іншим підходом в реалізації пасивних методів захисту є використання акустичного триплексу (ламінованого скла), який складається з двох або більше шарів скла, склеєних полімерною плівкою, що створює високе демпфування коливань.

Разом з цими рішеннями отримали застосування оптичні методи пасивного захисту спрямовані на зміну характеристик відбиття лазерного випромінювання від поверхні скла таким чином, щоб зменшити потужність відбитого сигналу, що надходить до приймача ЛСАР, або змінити характер відбиття з дзеркального на дифузне.

Ще один з напрямків розвитку пасивних методів є використання поглинаючих покриттів та плівок що трансформують енергію падаючого лазерного випромінювання у тепло, зменшуючи інтенсивність відбитого сигналу. Недоліком є можливе нагрівання та термічна деградація покриттів та плівок при опромінюванні потужними ЛСАР.

Застосовують використання покриттів з властивостями дифузного розсіювання опромінюючих сигналів. В даному випадку утворюється близьке до ізотропного розсіювання відбитого лазерного випромінювання замість дзеркального, що унеможливило ефективне добування мовної інформації за допомогою ЛСАР.

На сьогоднішній день існують декілька шляхів вирішення питання з виявлення та блокування потенційно можливого акусто-електричного каналу витоку інформації на ОІД, що виникає внаслідок перетворення акустичних коливань у електричні сигнали на різних елементах конструкцій та технічних пристроїв. Він характеризується високою прихованістю та результативністю, можливістю віддаленого добування інформації, що суттєво ускладнює його виявлення та локалізацію.

Попри наявність окремих захисних рішень, комплексні та ефективні методи виявлення та блокування акусто-електричного каналу залишаються недостатньо розробленими. Це зумовлює потребу у поглибленому аналізі фізичних процесів формування інформативних сигналів, моделювання каналу витоку, вивчення параметрів які впливають на добування інформації зловмисником, з подальшим удосконаленням методів захисту.

Тому постає наукове завдання – підвищення спроможностей пасивних методів з блокування акусто-електричного каналу витоку інформації. Це завдання стає особливо актуальним в умовах значного вдосконалення технологій виробництва ЛСАР та їх окремих складових.

## АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Автори в роботі [1] зосередили основні зусилля, які направлені на вивчення залежності роботи лазерного мікрофону відносно таких факторів як: розташування джерела випромінювання та приймача променю від мембрани; матеріал поверхні мембрани; тип приймача; матеріали огорожувальних конструкцій ОІД з метою створення стенду для демонстрації роботи лазерного мікрофону. Вивчення впливу обраних факторів було проведено шляхом виміру рівня напруги та гучності акустичного сигналу за допомогою мультиметра та сертифікованої програми на планшеті.

В роботі [3] представлені дані з електронно-променевої обробки приповерхневого шару скла низькоенергетичним електронним потоком з енергією  $E \leq 8$  меВ, яка може використовуватися в якості інструменту для спрямованої зміни нанорельєфу поверхні та фізико-хімічного стану приповерхневого шару

скла після будь-якого його шліфування і полірування. Така зміна фізико-хімічного стану приповерхневого шару технічного силікатного скла з використанням електронно-променевого методу його мікрообробки може вигідно використовуватися в прецизійних технологіях мікрообробки технічного скла.

Авторами монографії [4] розглянуті питання теоретичних основ прийому та обробки оптичних сигналів в системах оптичної локації. Представлено опис оптичних сигналів на основі комплексного підходу з позиції хвильової та корпускулярної теорії світла. Основна увага приділена була питанням виявлення та вимірювання параметрів оптичних сигналів на основі статистичного аналізу. Представлені методи подальшої обробки зображень.

У науковій публікації [5] розроблено лазерний мікрофон, який застосовує самозв'язуючий ефект лазерного детектора для детектування звукових хвиль. Він має плоску та широку частотну характеристику за рахунок використання ефекту самозчеплення. За результатами експерименту, лазерний мікрофон має практично плоску частотну характеристику від 40 Гц до 50 кГц. Однак коефіцієнт сигнал/шум зменшується при низькому звуковому тиску. В подальшому автори поліпшують чутливість. Уловлювання звукових хвиль за допомогою параболічного звукового відбивача підвищує чутливість. Однак частотні характеристики виникають в чутному діапазоні. Подовження світлового шляху за допомогою призми під прямим кутом покращує чутливість. Мінімальний звуковий тиск, що визначається, зменшується з 54 дБ до 47 дБ при розширенні світлового шляху.

Для послаблення причинно-наслідкового зв'язку в роботі [6] була запропонована система активного шумозаглушення з оптичним лазерним мікрофоном. Однак його ефективність шумозаглушення погіршується в реверберантних середовищах, оскільки ця активна система контролю шуму набуває вібраційну швидкість небажаного шуму. У статті запропонована багатоканальна система активного шумозаглушення прямого зв'язку з оптичним лазерним мікрофоном і повітряно-провідниковим мікрофоном для зниження шуму в реверберантних середовищах. Запропонована система набуває компонентів реверберації за рахунок використання додаткового мікрофона, що сприймає шум повітря.

В дослідженні [7] системи вимірювання мови на відстані, які привертають до себе увагу, оскільки можуть бути використані для безпеки та ліквідації наслідків стихійних лих. Для системи підходить оптичний лазерний мікрофон, який вимірює вібрацію, спричинену звуком, за допомогою лазерного променю. Він може вловлювати тільки цільовий звук навіть в галасливому місці. Однак звук, що отримується оптичним лазерним мікрофоном, залежить від опромінюваних об'єктів, і більшість об'єктів спричиняють погіршення якості звуку. У зв'язку з різними погіршеннями звуку, що сприймається лазерним мікрофоном, результати загальноприйнятих методів посилення мови є недостатніми. Тому в даній роботі пропонується метод підвищення мовлення з використанням двоетапного процесу придушення шуму та реконструкції акустичної структури для оптичних лазерних мікрофонів та проводимо об'єктивний експеримент для оцінки ефективності запропонованого методу.

В роботі [8] запропонована система прямого активного шумозаглушення (ANC) з оптичним лазерним мікрофоном. Система прямого зв'язку ANC складається з еталонного мікрофона, мікрофона з помилками та додаткового гучномовця. Основною проблемою системи прямого зв'язку ANC є погіршення її показників шумозаглушення через обмеження причинно-наслідкових зв'язків, тобто існує потреба в системі ANC для оновлення фільтра контролю шуму та випромінюванні антишуму до тих пір, поки небажаний шум не досягне мікрофона помилки. Для вирішення цієї проблеми запропонована система прямого зв'язку ANC з оптичним лазерним мікрофоном. Запропонована система ANC використовує оптичний лазерний мікрофон як еталонний мікрофон, який визначає вібрацію джерела шуму. Оскільки в оптичному лазерному мікрофоні використовується оптичний лазер, небажаний шум вловлюється швидше, ніж звичайним мікрофоном. Однак когерентність сигналів, одержуваних еталонними і похибковими мікрофонами, зменшується, а показники шумозаглушення можуть погіршуватися, так як запропонована система ANC використовує звичайний мікрофон в якості мікрофона для виявлення помилок. Щоб вирішити цю проблему, запропонована система ANC використовує диференціатор для опорного сигналу через залежність між звуковим тиском і швидкістю. Тобто звуковий тиск виходить шляхом диференціювання швидкості.

У статті [9] описано шумозаглушення за допомогою мікрофонів і лазерних пристроїв для прослуховування. Мікрофонна решітка є одним з корисних підходів для зниження шуму. Однак, коли мікрофони встановлюються на роботизовані системи, виникає проблема внутрішнього шуму від роботів, таких як двигуни та шестерні. За допомогою звичайної мікрофонної решітки важко зменшити внутрішній шум, оскільки джерело шуму знаходиться дуже близько до мікрофонів. Оскільки внутрішній шум не завжди стаціонарний або розріджений, деякі корисні підходи до розділення сліпих джерел, такі як незалежний компонентний аналіз та підхід розрідженості, не можуть бути використані. Необхідно зменшити внутрішні шуми за допомогою сенсорного злиття мікрофонів і лазерних пристроїв для прослуховування. У даній роботі будлаописана проблема типової мікрофонної решітки і показано конструкцію лазерних прослуховуючих пристроїв. Далі описується шумозаглушення в поєднанні мікрофонів і лазерних пристроїв для прослуховування. Також наводяться експериментальні результати, що показують ефективність запропонованого методу.

Наукова публікація [10] висвітлює метод відновлення фазового спектру для посилення низькоякісної мови, що вловлюється лазерними мікрофонами, яка погіршується не адитивними спотвореннями під час захоплення сигналу. Наше попереднє дослідження показує, що поширені методи вдосконалення мови, засновані на оцінці спектра амплітуди, не можуть досягти задовільної роботи з цим завданням. Таким чином, у цій статті розроблено модель покращення мовлення, яка складається з оцінювача амплітудного спектру (ASE) та оцінювача фазового спектру (PSE). ASE використовує авторегресійні LSTM-моделі і багатоцільову структуру навчання для прогнозування чистих амплітудних спектрів від зашумлених. PSE спочатку використовує модель на основі форми сигналу для посилення зашумленої мови в часовій області, а потім виділяє фазові спектри з посилених форм сигналів. Згодом виходи двох оцінювачів об'єднуються для реконструкції кінцевих посилених форм мовних хвиль. Експериментальні результати демонструють, що запропонований метод може досягти більш високого балу PESQ, ніж метод, який використовує тільки ASE і методи поліпшення мови на основі форми хвилі, включаючи UNet і TCNN.

В роботі [11] була визначена й розв'язана актуальна науково-технічна проблема: підвищення ефективності оптико-електронних систем завдяки розвитку математичних моделей і стохастико-детермінованих методів приймання й оброблення сигналів, що ґрунтуються на спільному застосуванні корпускулярного, хвильового і статистичного опису оптичних сигналів в оптико-електронних системах.

Урахування додаткових властивостей сигналів, таких, як енергетичні, просторово-часові, парно корельовані, груповані, що підпорядковуються узагальненим граничним теоремам, дозволили усунути суперечності і визначити напрями розроблення більш повних математичних моделей. Застосування такого підходу уможливило більш адекватний опис процесів взаємодії світла з об'єктом спостереження, елементами оптико-механічного тракту, а також перетворення оптичного випромінювання фоточутливими елементами, дало можливість оптимізувати алгоритми приймання й оброблення сигналів, які істотно впливають на здатність оптико-електронних систем виявляти сигнали та їхню ефективність у цілому [11].

Враховуючи вище зазначене, удосконалення пасивних методів унеможливлення перехоплення інформації за допомогою лазерних системами акустичної розвідки на ОІД в сучасних умовах є актуальним науковим завданням.

### ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

**Метою статті** є розроблення удосконаленого методу захисту акустичної інформації від витоку акусто-електричним каналом на ОІД з урахування розвитку сучасного оптичного матеріалознавства.

Для досягнення мети роботи необхідно:

1. Розробити формалізовану математичну модель акусто-електричного каналу витоку інформації на ОІД з урахуванням параметрів ЛСАР та умов поширення сигналів.
2. Дослідити вплив оптичних і геометричних параметрів поверхні огорожувальних конструкцій (скла) на характер відбиття лазерного випромінювання та можливість добування мовної інформації з використанням ЛСАР.
3. Обґрунтувати та запропонувати удосконалений пасивний метод захисту акустичної інформації, заснований на використанні матеріалів із контрольованою мікроструктурою поверхні, що забезпечують ефективне дифузне розсіювання лазерного випромінювання.

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

На сьогоднішній день одним з небезпечних каналів витоку інформації є акусто-електричний канал, який в процесі свого функціонування дозволяє непомітно отримати несанкціонований доступ до мовної інформації зловмиснику, завдяки чому існує потенційна загроза витоку інформації даним каналом.

Для того, щоб провести моделювання процесів, що відбуваються при утворенні каналу витоку інформації за рахунок високочастотного нав'язування (ВЧ-нав'язування) необхідно послідовно описати процеси, які відбуваються при розповсюдженні небезпечних інформативних сигналів від джерела їх походження до приймального пристрою ЛСАР.

Для цього в першу чергу необхідно розрахувати співвідношення сигнал/шум на вході приймального пристрою ЛСАР зловмисника. В подальшому здійснити моделювання процесу перетворення прийнятого вхідного сигналу приймальним пристроєм (лазерною станцією акустичної розвідки) зловмисника. На завершальному етапі отримати інформаційний критерій (показник), який дозволить визначити ефективність роботи приймального пристрою (лазерної станції акустичної розвідки) зловмисника та визначити заходи, які дозволять протидіяти ЛСАР.

Щодо технічного каналу витоку інформації за рахунок ВЧ-нав'язування, його структурна схема може бути представлена на рис. 1 та є сукупністю джерела ВЧ-нав'язування, середовища поширення інформативних сигналів, враховуючи зовнішні шуми та завади, та приймального пристрою ЛСАР зловмисника з відповідними характеристиками.



Рис. 1. Узагальнена структурна схема акусто-електричного каналу витоку інформації за рахунок ВЧ-нав'язування

Основними характеристиками джерела інформації, які суттєво впливають на можливості добування інформації зловмисником, є потужність мовного сигналу в приміщенні, товщини і марки скла, жорсткості закріплення скла в віконній рамі, способи кріплення рами до стіни, види модуляції відбитих пучків оптичного випромінювання:

- по-перше, – *частотної модуляції*, яка викликана ефектом Доплера, внаслідок радіальних коливальних рухів віконного скла під впливом акустичних сигналів;
- по-друге, – *фазової модуляції*, яка викликана наявністю в відбитому сигналі як дзеркально-відбитого, так і дифракційного компонентів;
- по-третє, – *амплітудної модуляції*, яка викликана коливаннями проміння ВЧ-нав'язування відносно напрямку дзеркального (максимального) відбиття.

Крім цього важливими є параметри передавача ЛСАР. До них відносяться енергетичні параметри та характеристики, які визначають величини енергії та потужності лазерного випромінювання, щільності цих величин. Разом з просторовими параметрами вони визначають фотометричні співвідношення в лазерному пучці. До них належать наступні: ближня та дальня зони; діаметр пучка; розбіжність пучка; діаграма спрямованості.

Ще одними характеристиками та параметрами лазерного випромінювання є спектральні (частотні) параметри, які описують спектр лазерного випромінювання. До них відносяться: частота лазерного випромінювання, довжина хвилі лазерного випромінювання, ширина лінії лазерного випромінювання, ширина огинаючої спектра лазерного випромінювання, кількість спектральних ліній випромінювання. А також необхідно враховувати режим роботи ЛСАР, він може бути неперервним або імпульсним.

До основних характеристик середовища поширення інформативних сигналів, що істотно впливають на можливості добування інформації зловмисником, належать:

- дальність між джерелом інформації та приймальним пристроєм зловмисника;
- наявність неоднорідностей в атмосфері, на яких сигнал може зазнати розсіювання та поглинання;
- наявність завад в атмосфері.

Що стосується основних характеристик приймального пристрою зловмисника, то до них відносяться чутливість приймального пристрою, коефіцієнт спрямованої дії лазерного мікрофона, рівень шумів приймального пристрою. Також при прийомі сигналу важливу роль відіграють постійна часу встановлення режиму роботи, яка повинна бути менше тривалості імпульсу; прийом сигналу необхідно проводити на лінійній ділянці характеристики вимірювальної системи.

Порівняння основних технічних характеристик зразків лазерних акустичних систем розвідки наведено в табл. 1, що складена авторами з використанням [12 - 18].

Для визначення максимальної дальності дії ЛСАР припустимо, що атмосфера в якій розповсюджується оптичний сигнал є однорідною, тобто немає рефракції та відсутні турбулентності. А також, для ідеального випадка будемо вважати, що затухання сигналу, який зондує – відсутні. Тоді можливо скористатися формулою для потужності сигналу на вході приймача ЛСАР [19]:

$$P_{\text{ПРМ}} = \frac{P_{\text{ПРД}} \sigma_{\text{Ц}} S_{\text{А}} \eta K}{4\pi R^2 \Omega_{\text{ПРД}}}, \quad (1)$$

де  $P_{\text{ПРД}}$  – імпульсна потужність передавача ЛСАР;

$\sigma_{\text{Ц}}$  – ефективна площа розсіювання цілі (скла);

$S_{\text{А}}$  – площа приймальної оптичної антени ЛСАР;

$\eta = \eta_{\text{ПРМ}} \eta_{\text{ПРД}}$  – коефіцієнт повного оптичного перепускання приймально-передавального тракту;

$K$  – коефіцієнт підсилення оптичної антени ЛСАР;  
 $\Omega_{\text{прд}}$  – тілесний кут в якому випромінює лазер (діаграма спрямованості або індикатриса оптичної антени ЛСАР).

Таблиця 1

**Основні технічні характеристик зразків лазерних акустичних систем розвідки**

	Laser-3000 (PK1 3100)	SIM- LAMIC	Laser model AA79106-B	SPECTRA Laser M	LASER- 2000	Laser- 3500	MR- 7800	LASER EMAX- 3100 TX	FGLD- 786
<b>Лазерний передавач</b>									
Напівпровідниковий									
Тип лазера									
Довжина хвилі, мкм	0,88 (0,79)	0,82	нд.	0,77... 0,84	0,75... 0,84	1,75... 1,84	0,77 0,84	0,79	0,808
Потужність випромінювання, мВт	< 10 (30...50)	5	нд.	25	5	5	25	30...50	5
Розбіжність променя, мрад	нд.	0,5	нд.	нд.	нд.	нд.	нд.	нд.	нд.
Фокусна відстань об'єктива, мм	135	135	135	135	135	135	135	75	нд.
<b>Приймач лазерного випромінювання</b>									
Тип приймача	Малошумлячий PIN-діод			Малошумлячий PIN-діод; ближній Ч-спектр					PIN- діод
Довжина хвилі, мкм	1,55	1,55	нд.	0,77...0,84	нд.	нд.	нд.	нд.	нд.
Фокусна відстань об'єктива, мм	135 (1:2,8)	500	500	500	500	500	500	75	75... 300
Ефективна відстань, м	300	нд.	500	500... 1000	нд.	нд.	нд.	нд.	нд.

Розрізняють три випадки розсіювання сигналів ЛСАР на відбиваючій поверхні: дзеркальне, дифузне та проміжний варіант, який є сукупністю першого та другого типів розсіювання.

Для дзеркального відбиття, формула що описує потужність оптичного сигналу на вході приймача буде мати наступний вигляд [19]:

$$P_{\text{прм}} = \frac{P_{\text{прд}} S_{\text{екв}} R_i S_A \eta K}{\Omega_{\text{прд}} \Omega_{\text{ц}} R^4}, \quad (2)$$

де  $S_{\text{екв}}$  – еквівалентна площа відбивача;

$R_i$  – коефіцієнт дзеркального відбиття;

$\Omega_{\text{ц}}$  – тілесний кут відбитого світлового потоку.

В цьому разі, при дзеркальному відбитті зондуючого сигналу, дії зловмисника по добуванню мовної інформації будуть досягати своєї мети.

Для дифузного відбиття сигналу що зондує, вираз для потужності сигналу на вході приймача ЛСАР буде мати наступний вигляд [19]:

$$P_{\text{прм}} = \frac{P_{\text{прд}} S_A \eta k S_{\text{екв}} K \cos \gamma}{\pi \Omega_{\text{прд}} R^4}. \quad (3)$$

Якщо в формулі (2) замість  $P_{\text{прм}}$  підставити мінімальну потужність сигналу на приймачній стороні  $P_{\text{прм.мін}}$ , при який забезпечується задана достовірність його виявлення, то отримаємо вираз для максимальної відстані дії ЛСАР:

$$P_{\text{прм.мін.дз}} = \frac{P_{\text{прд}} S_{\text{екв}} R_i S_A \eta K}{\Omega_{\text{прд}} \Omega_{\text{ц}} R_{\text{макс.дз}}^4}.$$

Для малих кутів:  $\Omega_{\text{прд}} = 0,25\pi\theta_{\text{прд}}^2$ ;  $\Omega_{\text{ц}} = 0,25\pi\theta_{\text{ц}}^2$ , тому вираз для  $R_{\text{макс}}$  при дзеркальному відбитті сигналу прийме вигляд:

$$R_{\text{макс.дз}} = \sqrt[4]{\frac{16P_{\text{прд}} S_{\text{екв}} R_i S_A \eta K}{P_{\text{прм.мін.дз}} \theta_{\text{прд}}^2 \theta_{\text{ц}}^2}}. \quad (4)$$

Припустимо, що для кращого відтворення отриманої інформації намагаються щоб в випадку дзеркального відбиття  $\theta_{\text{прд}} = \theta_{\text{ц}} = \theta_{\text{прм}}$ . Тоді формулу (4) можна спростити наступним чином:

$$R_{\text{МАК.ДЗ}} = \frac{2}{\theta_{\text{ПРД}}} \sqrt[4]{\frac{P_{\text{ПРД}} S_{\text{ЕКВ}} R_i S_A \eta K}{P_{\text{ПРМ.МІН.ДЗ}}}}$$

Проробимо з формулою (3) аналогічні операції та отримаємо вираз для максимальної відстані дії ЛСАР для *дифузного відбиття сигналу*:

$$P_{\text{ПРМ.МІН.ДИФ}} = \frac{P_{\text{ПРД}} S_A \eta k S_{\text{ЕКВ}} K \cos \gamma}{\pi \Omega_{\text{ПРД}} R_{\text{ДИФ}}^4}$$

Для малих кутів:  $\Omega_{\text{ПРД}} = 0,25\pi\theta_{\text{ПРД}}^2$ , тому вираз для  $R_{\text{МАК}}$  при *дифузному відбитті сигналу* прийме вигляд:

$$R_{\text{ДИФ}} = \sqrt[4]{\frac{4P_{\text{ПРД}} S_A \eta k S_{\text{ЕКВ}} K \cos \gamma}{\pi\theta_{\text{ПРД}}^2 P_{\text{ПРМ.МІН.ДИФ}}}}$$

Явище відбиття та заломлення світла, підпорядковується законам Френеля [20], спостерігаються лише для дзеркальних поверхонь розділу двох середовищ та є ідеальними. В більшості випадків трапляються явища взаємодії світла з недзеркальними поверхнями матеріалів, які мають мікро- та макронерівності, що впливають на характер цієї взаємодії.

Розсіювання що визвані оптичними неоднорідностями середовища (сторонніми частинками) або флуктуаціями щільності речовини та показника заломлення носять назву молекулярних.

Розсіювання на неоднорідностях середовища відбувається із-за відзеркалення, заломлення та дифракції на сторонніх вклученнях. Якщо розміри частинок розсіювання кристалічно малі (атоми) в порівнянні з довжиною хвилі, то розсіювання практично відсутнє. При цьому відбитті *розбіжність лазерного променя зберігається*.

Зі збільшенням розміру частинок, (при переході від атомів до молекул), коли вони співвідносні з довжиною хвилі, розсіювання значно збільшується та суттєво залежить від довжини хвилі. Такі поверхності носять назву шорстких поверхонь [20]), лазерне випромінювання буде розсіюватись в напівсферу в відповідності з законом Ламберта [20].

Потужність сигналу, який приймається в даному випадку від віддаленого об'єкту, суттєво зменшується в порівнянні з випадком дзеркального відбиття.

Відзначимо, що в практичній площині часто відбиття від реальних об'єктів носять змішаний характер [20, 21].

Для чіткого розуміння процесів що відбуваються при перехопленні мовної інформації за допомогою ЛСАР, необхідно провести модулювання процесу відзеркалення світлового потоку від поверхні об'єкту.

Відомо що основний закон, який описує ідеальне відбиття світла від відбиваючої поверхні має вигляд [20]:

$$I_{\text{ДЗ}} = \bar{\rho} \cdot I_0,$$

де  $I_{\text{ДЗ}}$  – інтенсивність дзеркальної складової;

$I_0$  – інтенсивність дзеркальної складової;

$\bar{\rho}$  – коефіцієнт віддзеркалення.

Як бачимо ця залежність носить лінійний характер та не враховує *характер поверхні, що відбиває*. Тому і адекватно не описує процеси, що відбуваються при перехопленні мовного сигналу ЛСАР.

Формулою (1) можливо користуватися лише в випадку коли коефіцієнт відбиття дорівнює одиниці, а мікронерівності на поверхні, що віддзеркалює відсутні. Для більш досконалого опису процесу слід використовувати уточнену формулу отриману в [21]

$$I_{\text{ДЗ}} = \bar{\rho} \cdot I_0 \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 h_{\text{СК}}^2 \cos^2 \psi}{\lambda^2}\right). \quad (5)$$

Даний вираз зв'язує залежність дзеркальної складової сигналу, яка отримана в наслідок віддзеркалення від вібруючої поверхні. Такими параметрами є: довжина хвилі, середня висота мікронерівностей та кут падіння сигналу.

Множник  $R_i = \exp\left(-\frac{\pi^2 h_{\text{СК}}^2 \cos^2 \psi}{\lambda^2}\right)$ , який в більшості літератури називають коефіцієнтом

дзеркальності, визначає основні фактори, що можуть оказувати вплив на віддзеркалення світового потоку.

В зв'язку з цим, проаналізуємо їх більш детально, що в подальшому дозволить визначити параметри яких необхідно досягнути стороні, яка захищає інформацію, щоб унеможливити утворення такого каналу витоку інформації. Тобто цей коефіцієнт залежить від геометрії поверхні, що відбиває сигнал, та довжини хвилі сигналу який опромінює поверхню. Оптичні ж властивості віддзеркалюючого матеріалу закладені в коефіцієнт віддзеркалення  $\bar{\rho}$ .

З рівняння (5) можливо знайти середньоквадратичну величину мікронерівностей  $h_{СК}$ , якою повинна володіти поверхня, щоб при заданому куті падіння  $\psi$ , дзеркально відбивати визначену кількість світла. Якщо вирішити таку задачу для коефіцієнта дзеркальності

$$\frac{I_{ДЗ}}{\bar{\rho} \cdot I_0} = 0,95,$$

то середньоквадратична висота мікронерівностей повинна дорівнювати  $h_{СК} = 0,07\lambda$ .

Якщо поверхня віддзеркалення буде ідеальною, тобто значення  $h_{СК} = 0$ . Тоді асимптотичне значення коефіцієнта дзеркальності повинно дорівнювати 1:

$$\exp\left(-\frac{\pi^2 h_{СК}^2 \cos^2 \psi}{\lambda^2}\right) = 1.$$

Таким чином формула (5) описує дзеркальне відбиття, як від шорстких поверхонь, так і від гладких поверхонь, причому останнє є частковим випадком першого.

Як показано в [21] існує певна залежність екстремума величини дифузного максимуму від кута падіння. Причому, чим менша шорсткість поверхні, тим нижче максимум та більше виражена його напівширина. А в разі зростання параметру  $h_{СК}$  (висоти шорсткості), максимум буде зсуватись в бік більших кутів.

В тому випадку коли дзеркальна складова має великі значення  $\left(\frac{h_{СК} \cos \psi}{\lambda} \ll 1\right)$  вираз для коефіцієнту дзеркальності можливо представити в вигляді розкладення в ряд за ступенями  $\left(\frac{h_{СК} \cos \psi}{\lambda}\right)$ . Обмежившись першими двома членами розкладення, отримаємо [21]:

$$\exp\left(-\frac{\pi^2 h_{СК}^2 \cos^2 \psi}{\lambda^2}\right) \approx 1 - \frac{\pi^2 h_{СК}^2}{\lambda^2} \cos^2 \psi. \quad (6)$$

Відтепер вираз (2) для інтенсивності дзеркальної складової прийме вигляд:

$$I_{ДЗ} = \bar{\rho} \cdot I_0 \left(1 - \frac{\pi^2 h_{СК}^2}{\lambda^2} \cos^2 \psi\right) = \bar{\rho} \cdot I_0 - I_{Д}.$$

В формулі (6) друга складова виражає інтенсивність всього розсіяного світла:

$$I_{Д} = \bar{\rho} \cdot I_0 \frac{\pi^2 h_{СК}^2}{\lambda^2} \cos^2 \psi.$$

Таким чином, кількість сигналу, дифузно розсіяного поверхнею, пропорційна квадрату середньоквадратичної висоти мікронерівностей та обернено пропорційна квадрату довжини хвилі що падає. Також суттєву роль відіграє кут падіння: з збільшенням кута падіння кількість розсіяного світла зменшується.

Результати моделювання представлені на рис. 2.

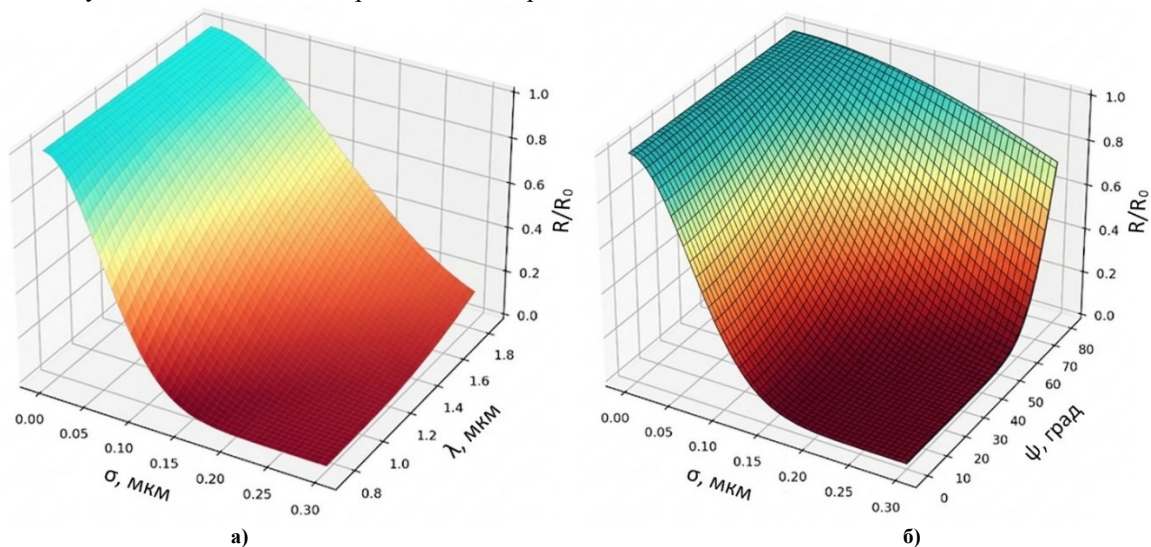


Рис. 2 – 3D-залежності відносної дальності  $R/R_0$  ЛСАР: а) від шорсткості  $\sigma$  та довжини хвилі променя  $\lambda$ ; б) від шорсткості  $\sigma$  та кута падіння променя  $\psi$

Суттєву роль відіграє також і відстань між нерівностями, тому в [22] передбачено ще два параметра – середній шаг нерівностей профілю  $S_m$  та середній шаг нерівностей профілю по вершинах  $S$ . Ці параметри дають уявлення про те, наскільки щільно розподілені нерівності по поверхні та який нахил схилів нерівностей [22]:

$$\operatorname{tg}\gamma_{\text{CP}} = \frac{2h_{\text{CK}}}{S}, \quad (7)$$

$h_{\text{CK}}$  – середньоквадратична висота мікронерівностей;

$S$  – середній крок нерівностей профілю по вершинах.

Вираз (7) поєднує три параметри профіля шорсткої поверхні:  $\operatorname{tg}\gamma_{\text{CP}}$ ,  $h_{\text{CK}}$  та  $S$ .

Останнім часом з'явилися профілографи з високою розрізнявальною здатністю. Лімітне значення параметру, яке визначається сучасними профілографами складає приблизно 0,2 нм. Зафіксований профіль шорсткостей поверхні володіє дуже важливою властивістю – наочністю і, що особливо суттєво, є зафіксованою характеристикою поверхні, яка в подальшому може бути піддана статистичній обробці з метою отримання необхідних параметрів.

Як альтернативу дослідники використовують оптичні профілометри. Перевагами яких є поєднання в собі фазозсувної технології інтерферометра з високою розрізнявальною здатністю до 0,01 нм та швидкість сканування одного відтинка поверхні, що може досягати в середньому восьми секунд. А головне – це отримання 3D-параметрів шорсткості всього відтинку зразка, що досліджується, а не його зрізу.

В якості матеріалів, які можуть бути застосовані для заміни скла, пропонується використати ситали – склокристалічні матеріали, які отримуються в результаті об'ємної керованої кристалізації скла з додаванням до його складу речовин для його кристалізації. При цьому утворюються декілька кристалічних фаз рівномірно розподілених в скловидній фазі. Дані матеріали володіють високою міцністю, особливо на стискання, вони легкі, термічно стійкі, тверді, технологічні.

### ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Наукова новизна полягає в конкретизації відомих даних та їх поширенні на нові об'єкти дослідження, в якості яких виступають огорожувальні конструкції на ОІД та використання новітніх матеріалів для втілення пасивного методу захисту акустичної інформації від витоку акусто-електричним каналом на ОІД. Цінність отриманих результатів дослідження у військовій та технічній сферах полягає в отриманні знань щодо можливостей удосконалення методів захисту акустичної інформації від витоку акусто-електричним каналом на ОІД, особливо в умовах воєнного стану.

Таким чином, отримано удосконалення пасивного методу захисту акустичної інформації від витоку акусто-електричним каналом на ОІД, заснований на зміні фізичних властивостей пружного середовища. В даному випадку замість скла запропоновано застосовувати оптичні ситали із контрольованою мікроструктурою поверхні, яка забезпечує ефективне дифузне розсіювання лазерного випромінювання шляхом утворення шорсткої поверхні за висотою, що порівнянна з довжиною хвилі випромінювання ЛІСАР.

Цей підхід дозволяє суттєво зменшити максимальну відстань роботи розвідувальних систем та може бути реалізований у вигляді одношарових або багатшарових конструкцій залежно від необхідного рівня захисту.

Практична реалізація розробленого методу вимагає ретельного підбору параметрів захисних елементів з урахуванням специфіки об'єкта захисту, характеристик потенційних загроз та умов експлуатації, що забезпечить оптимальне співвідношення ефективності захисту та економічних витрат на його впровадження та підтримку.

В подальшому дослідження захисту акустичної інформації від витоку акусто-електричним каналом на ОІД будуть пов'язані з удосконаленням активного методу захисту акустичної інформації від витоку акусто-електричним каналом на ОІД. Найвищий рівень захисту акустичної інформації може бути досягнутий шляхом комплексного застосування активних та пасивних методів у поєднанні з архітектурно-планувальними рішеннями та системами виявлення загроз.

#### Література

1. Марценюк М.С., Складанний П.М., Астапеня В.М. (2021) Експериментальні дослідження стенду імітаційного моделювання роботи лазерного мікрофону для зняття акустичної інформації. Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка». №2(14). 131–147. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2021.14.131147>.
2. Goodman J.W. (2015) Statistical Optics. 2nd ed. Hoboken: Wiley. 592 p. ISBN: 978-111-9009-46-6.
3. Holub M., Matsepa S., Kanashevych G., Alekseeva O., Khyzhniak I., Dmitrenko P. (2018). Metalization of a technical glass with using the electron beam method of a surface microprocessing. Bulletin of Cherkasy State Technological University, Issue 23(2). pp. 34–38. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2018.161938>.

4. Стрелков А.І., Стрелкова Т.А., Лютюга А.П., Москвітін С.В. Оптична локація. Теоретичні основи прийому та обробки оптичних сигналів. Монограф. / Под ред. А.І. Стрелкова. – Х.: Вировець А.П. «Апостроф», 2010. – 311 с. ISBN 978-966-2579-31-4.
5. Mizushima D., Tsuda N., Yamada J. (2016) Study on laser microphone using self-coupling effect of semiconductor laser for sensitivity improvement. *IEEE SENSORS*. Orlando, USA. pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2016.7808478>.
6. Mizutani M., Iwai K., Nishiura T., Soeta Y. (2025) *Evaluation of noise reduction performance of active noise control with optical laser microphone in reverberant environments*. Proceedings of Meetings on Acoustics (Acoustical Society of America). New Orleans, USA. pp. 1–13. <https://doi.org/10.1121/2.0002038>.
7. Mizutani M., Iwai K., Nishiura T., Soeta Y. (2024) Reduction of Noise in Reverberant Environments of Multichannel Feedforward Active Noise Control System with Optical Laser Microphone. IEEE 13th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE). Kitakyushu, Japan. pp. 415–418. <https://doi.org/10.1109/GCCE62371.2024.10760674>.
8. Iwai K., Nishiura T. (2020) Study on Feedforward Active Noise Control System with Optical Laser Microphone to Detect Reference Signal with Short Delay. *Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)*. Auckland, New Zealand. pp. 266–271. <https://www.apsipa.org/proceedings/2020/pdfs/0000266.pdf>.
9. Matsumoto M., Abe T., Hashimoto S. (2008) Noise reduction combining microphones and laser listening devices. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. Takamatsu, Japan. pp. 104–109. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2008.4798734>.
10. Liu C., Ai Y., Ling Z. (2021) Phase Spectrum Recovery for Enhancing Low-Quality Speech Captured by Laser Microphones. *12th International Symposium on Chinese Spoken Language Processing (ISCSLP)*. Hong Kong, China. pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISCSLP49672.2021.9362112>.
11. Стрелкова Т.О. (2017) Розвиток стохастико-детермінованої теорії прийому та обробки сигналів в оптико-електронних системах: дис. д-ра техн. наук: 05.11.07 «Оптичні прилади та системи». – Харків: Харківський національний університет радіоелектроніки. 420 с.
12. Laser-3500 Laser Room Monitoring System [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.spyzones.com/laser.html> (дата звернення: 20.10.2025).
13. Electromax Int'l Surveillance, Countersurveillance and Personal Protection. LASER EMAX-3100 Laser Monitoring System. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.electromax.com/EMAX-3100\\_LASER\\_MONITOR.pdf](http://www.electromax.com/EMAX-3100_LASER_MONITOR.pdf) (дата звернення: 23.10.2025).
14. Laser Microphone Basic Version, model AA79106-B. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://argo.eu/en/products/long-range-laser-listening-device/> (дата звернення: 23.10.2025).
15. SPECTRA Laser M type professional laser microphone. The best Laser listening microphones in the world. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://lasermicrophone.com/spectra-laser-m/> (дата звернення: 15.10.2025).
16. Лазерний мікрофон. Номер продукту: PKI 3000. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pki-electronic.com/products/audio-surveillance-equipment/laser-microphone/> (дата звернення: 23.10.2025).
17. Електромакс Інтернешнл, Інк. «Laser Listening Systems». Шпигунське спостереження: лазерні системи прослуховування. Лазерний моніторинг приміщень LASER-2000 Система. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://gbppr.net/mil/laser/laser-2000.html> (дата звернення: 24.10.2025).
18. Лазерна система прослуховування (FGLD-786). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://web.archive.org/web/20161018035252/> (дата звернення: 15.10.2025).
19. Richards M.A. (2014) *Fundamentals of Radar Signal Processing*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill. 784 p. ISBN: 978-007-1798-32-6.
20. Намітоков К. (2018) Конспект лекцій з технічної фізики (Том III. Оптика, атомна фізика, світлотехніка). Харків: ХНУГХ ім. А.Н. Бекетова. 3 вид. 470 с. <https://eprints.kname.edu.ua/52220/1/%D1%82%D0%BE%D0%BC%203%20%282%29.pdf>
21. Stover J.C. (2012) *Optical Scattering: Measurement and Analysis*. 3rd ed. Bellingham: SPIE Press. 384 p. ISBN: 978-0-8194-9251-7.
22. ДСТУ ISO 4287:2018 «Геометричні характеристики виробів (GPS). Структура поверхні: профільної метод. Терміни, визначення та параметри шорсткості поверхні». 24 с.

#### References

1. Martsenyuk M., Skladannyi P., Astapenya V. (2021). Experimental studies of a simulation stand for modeling the operation of a laser microphone for acoustic information acquisition. *Cybersecurity: Education, Science, Technique*, No. 2(14), pp. 131–147. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2021.14.131147>
2. Goodman J.W. (2015). *Statistical Optics*. 2nd ed. Hoboken: Wiley. 592 p. ISBN 978-111-9009-46-6.

3. Holub M., Matsepa S., Kanashevych G., Alekseeva O., Khyzhniak I., Dmitrenko P. (2018). Metalization of technical glass using the electron beam method of surface microprocessing. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, Issue 23(2), pp. 34–38. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2018.161938>.
4. Strelkov A.I., Strelkova T.A., Lyutyuga A.P., Moskvitin S.V. (2010). *Optical Location. Theoretical Foundations of Reception and Processing of Optical Signals*. Monograph. Kharkiv: Apostrof Publishing House. 311 p. ISBN 978-966-2579-31-4.
5. Mizushima D., Tsuda N., Yamada J. (2016). Study on laser microphone using self-coupling effect of semiconductor laser for sensitivity improvement. *IEEE Sensors*. Orlando, USA, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2016.7808478>.
6. Mizutani M., Iwai K., Nishiura T., Soeta Y. (2025). Evaluation of noise reduction performance of active noise control with optical laser microphone in reverberant environments. *Proceedings of Meetings on Acoustics (Acoustical Society of America)*. New Orleans, USA, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1121/2.0002038>.
7. Mizutani M., Iwai K., Nishiura T., Soeta Y. (2024). Reduction of noise in reverberant environments of a multichannel feedforward active noise control system with optical laser microphone. *IEEE 13th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*. Kitakyushu, Japan, pp. 415–418. <https://doi.org/10.1109/GCCE62371.2024.10760674>.
8. Iwai K., Nishiura T. (2020). Study on feedforward active noise control system with optical laser microphone to detect reference signal with short delay. *Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)*. Auckland, New Zealand, pp. 266–271.
9. Matsumoto M., Abe T., Hashimoto S. (2008). Noise reduction combining microphones and laser listening devices. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. Takamatsu, Japan, pp. 104–109. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2008.4798734>.
10. Liu C., Ai Y., Ling Z. (2021). Phase spectrum recovery for enhancing low-quality speech captured by laser microphones. *12th International Symposium on Chinese Spoken Language Processing (ISCSLP)*. Hong Kong, China, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISCSLP49672.2021.9362112>.
11. Strilkova T.O. (2017). Development of stochastic-deterministic theory of signal reception and processing in optoelectronic systems. *Dr. Sci. (Engineering) dissertation, specialty 05.11.07 “Optical Devices and Systems”*. Kharkiv: Kharkiv National University of Radio Electronics. 420 p.
12. Laser-3500 Laser Room Monitoring System. Available at: <http://www.spyzones.com/laser.html> (accessed: 20 October 2025).
13. Electromax Int'l Surveillance, Countersurveillance and Personal Protection. LASER EMAX-3100 Laser Monitoring System. Available at: [http://www.electromax.com/EMAX-3100\\_LASER\\_MONITOR.pdf](http://www.electromax.com/EMAX-3100_LASER_MONITOR.pdf) (accessed: 23 October 2025).
14. Laser Microphone Basic Version, Model AA79106-B. Available at: <https://argoa.eu/en/products/long-range-laser-listening-device/> (accessed: 23 October 2025).
15. SPECTRA Laser M Type Professional Laser Microphone. Available at: <https://lasermicrophone.com/spectra-laser-m/> (accessed: 15 October 2025).
16. Laser Microphone, Product No. PKI 3000. Available at: <https://pki-electronic.com/products/audio-surveillance-equipment/laser-microphone/> (accessed: 23 October 2025).
17. Electromax International Inc. Laser Listening Systems. Laser-2000 Room Monitoring System. Available at: <http://gbppr.net/mil/laser/laser-2000.html> (accessed: 24 October 2025).
18. Laser Listening System (FGLD-786). Available at: <https://web.archive.org/web/20161018035252> (accessed: 15 October 2025).
19. Richards M.A. (2014). *Fundamentals of Radar Signal Processing*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill. 784 p. ISBN 978-007-1798-32-6.
20. Namitkov K. (2018). *Lecture Notes on Technical Physics (Vol. III: Optics, Atomic Physics, Lighting Engineering)*. Kharkiv: O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. 3rd ed. 470 p.
21. Stover J.C. (2012). *Optical Scattering: Measurement and Analysis*. 3rd ed. Bellingham: SPIE Press. 384 p. ISBN 978-0-8194-9251-7.
22. ISO 4287:2018. *Geometrical Product Specifications (GPS). Surface Texture: Profile Method. Terms, Definitions and Surface Texture Parameters*. 24 p.