

Захисна пошарова модель багатокомпонентної архітектурно-компонованої структури оптоелектронного каналу витоку інформації

Protective Layered Model of a Multi-Component Architectural-Composite Structure of an Optoelectronic Information Leakage Channel

Назарій Дзяний

Nazarii Dzyanyy

доктор філософії, доцент кафедри захисту інформації, e-mail: azpiskozub@gmail.com, nazarii.r.dzianyiy@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-9101-3701

Doctor of Philosophy, Associate Professor of the Department Information Protection, e-mail: nazarii.r.dzianyiy@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-9101-3701

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

Received: June 21, 2025 | Revised: August 01, 2025 | Accepted: August 31, 2025

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.4.15>

Мета роботи. Розробка захисної моделі багатокомпонентної архітектурно-компонованої структури оптоелектронного каналу витоку інформації, яка, на відміну від існуючих підходів, враховує складну взаємодію пошарових елементів та дозволяє більш точно оцінити та мінімізувати ризики витоку мовної інформації.

Метод дослідження. Теоретичне узагальнення та практичне моделювання на основі результатів попередніх емпіричних досліджень.

Результати дослідження. Побудовано захисну модель багатокомпонентної архітектурно-компонованої структури оптоелектронного каналу витоку інформації, яка враховує комбінацію пошарових елементів, відгук від проходження лазерного променя в середину приміщень і у зворотному напрямку та розгортається на рівні агрегатної та комплексної моделі. Розроблено математичну модель, що описує мінімізацію втрат інформації через оптоелектронний канал витоку від лазерними системами акустичної розвідки (ЛСАР), дозволяє визначити оптимальну величину зменшення ризику для кожного гіпотетичного шару вихідного матеріалу, що, в свою чергу, відповідає максимальному ступеню захищеності приміщення.

Теоретична цінність дослідження. Дослідження розвиває теоретичні засади захисту інформації, пропонуючи комплексну модель оптоелектронного каналу витоку, яка враховує складні процеси взаємодії лазерного випромінювання з багатошаровими структурами.

Практична цінність дослідження. Дослідження надає наукову основу для проектування та оптимізації захисних систем, дозволяючи досягти найбільш ефективної протидії лазерним системам акустичної розвідки шляхом цілеспрямованого впливу на фізичні властивості багатошарових архітектурних компонентів. Результати дослідження можуть бути використані для модернізації існуючих систем захисту інформації, наприклад, шляхом розробки нових типів захисних плівок або покриттів для вікон.

Цінність дослідження. Дослідження демонструє, що розроблена модель та отримані результати можуть бути використані для створення більш ефективних засобів захисту, що сприятиме підвищенню безпеки інформаційних систем і об'єктів та стимулює подальші міждисциплінарні дослідження у цій важливій галузі.

Тип статті. Теоретичне узагальнення та практичне моделювання на основі результатів попередніх емпіричних досліджень.

Purpose. Development of a protective model of a multi-component architectural-composite structure of an optoelectronic information leakage channel, which, unlike existing approaches, takes into account the complex interaction of layered elements and allows for a more accurate assessment and minimization of the risks of speech information leakage.

Method. Theoretical generalization and practical modeling based on the results of previous empirical studies.

Findings. A protective model of a multi-component architecturally-composed structure of an optoelectronic information leakage channel has been constructed, which takes into account the combination of layered elements, the response from the passage of a laser beam into the interior of the premises and in the opposite direction, and is deployed at the level of an aggregate and complex model. A mathematical model has been developed that describes the minimization of information loss through the optoelectronic information leakage channel from the Laser Acoustic Reconnaissance Systems, allowing to determine the optimal amount of risk reduction for each hypothetical layer of the source material, which, in turn, corresponds to the maximum degree of security of the premises.

Theoretical implications. The study develops the theoretical foundations of information protection by proposing a complex model of the optoelectronic leakage channel, which takes into account the complex processes of interaction of laser radiation with multilayer structures.

Practical implications. The research provides a scientific basis for the design and optimization of protective systems, allowing to achieve the most effective counteraction to laser acoustic reconnaissance systems by targeted influence on the physical properties of multilayer architectural components. The results of the research can be used to modernize existing information protection systems, for example, by developing new types of protective films or coatings for windows.

Value. The study demonstrates that the developed model and the obtained results can be used to create more effective protection tools, which will contribute to increasing the security of information systems and objects and stimulate further interdisciplinary research in this important field.

Paper type. Theoretical generalization and practical modeling based on the results of previous empirical research.

Ключові слова: мовна інформація, оптоелектронний канал витоку інформації, лазерні системи акустичної розвідки, захист інформації, пошарова модель.

Key words: language information, optoelectronic information leakage channel, laser acoustic reconnaissance systems, information protection, layered model.

Вступ

Мовна інформація часто містить державні та комерційні таємниці, особисті дані або стратегічні плани. Витік такої інформації може призвести до значних фінансових втрат, репутаційних ризиків, юридичної відповідальності або навіть загрози національній безпеці. Моделювання та мінімізація втрат через оптоелектронний канал витоку є прямою відповіддю на цю загрозу.

Витік конфіденційної інформації залишається однією з найсерйозніших проблем у сфері забезпечення національної безпеки. Лазерно-локаційне зондування віконних шибок та інших відбиваючих поверхонь робить можливим відтворення розмови, що ведеться під час конфіденційних переговорів, виступів тощо. Протягом останніх десятиліть розроблялись численні методи захисту інформації від витоку різними каналами. Одним із ключових напрямків забезпечення інформаційної безпеки є виявлення та локалізація можливих технічних каналів витоку акустичної інформації. В цій галузі було досліджено багато методів, включаючи як активні, так і пасивні методи захисту мовної інформації з використанням спеціальних приладів, магнітостатики та електростатики, оптичних властивостей.

Одним з найактуальніших та найперспективніших напрямків пасивного захисту мовної інформації на даний час є розробка спеціальних покриттів та плівок, застосування яких може суттєво знизити ризик витоку конфіденційної інформації за рахунок: поглинання або розсіювання лазерного випромінювання, що використовується для зондування; зниження амплітуди вібрацій відбивних поверхонь, що ускладнює відтворення звуку та комбінації пошарових елементів, що відповідає максимальному ступеню захищеності приміщення. Захищеність приміщень від зняття мовної інформації лазерними системами акустичної розвідки (ЛСАР) має складну залежність, що формується багатьма взаємопов'язаними величинами. Це завдання вимагає комплексного підходу, який враховує властивості матеріалів (скла, захисних плівок), їх пошарові комбінації, взаємодію лазерного променя з поверхнями. Розробка математичної моделі, яка враховує всі ці фактори, є критично важливою для створення ефективних рішень.

Теоретичні основи дослідження

У закритих приміщеннях акустична інформація може бути перехоплена, оскільки будівельні конструкції (стіни, підлога, стеля, вікна, труби, закриті двері) по суті є акустичними мембранами і добре передають звукові коливання. З будь-якого приміщення через стіни, підлогу або стелю можна перехоплювати акустичний сигнал за допомогою віброперетворювача і підсилювача.

Здалеку акустичний сигнал від закритих вікон можна зняти, спрямувавши лазерне випромінювання на скло або використовуючи спрямований мікрофон. Акустична інформація також може бути знята з побутової техніки, апаратури зв'язку. Вібруючі тіла і механізми, що коливаються, такі як рухомі елементи машин, телефонні апарати, звукопідсилюючі системи, голосові зв'язки людини і т.д. є джерелом утворення акустичного каналу витоку інформації.

При розповсюдженні акустичної хвилі, частинки повітря, якщо на їх шляху немає перешкод, утворюють пружну хвилю, що коливається, розповсюджуючись у всі сторони. В межах приміщень або інших закритих просторів на шляху поширення звукових хвиль виникає багато перешкод, на які акустичні хвилі чинять тиск (двері, вікна, стіни, стеля, підлога і т.п.), заставляючи їх коливатися. Така дія акустичних хвиль являється причиною утворення акустичного каналу витоку інформації.

Акустичні канали витоку інформації утворюються шляхом (рис. 1.) [1]:
поширення акустичних коливань у вільному повітряному просторі;
впливу звукових коливань на елементи та будівельні конструкції;
впливу звукових коливань на технічні засоби обробки інформації.



Рисунок 1 – Утворення акустичних каналів витоку інформації

Залежно від середовища розповсюдження голосових сигналів і способів їх перехоплення, технічні канали витоку інформації можна розділити на: акустичні, вібраційні, електроакустичні, оптоелектронні та параметричні.

Процес обміну інформацією за допомогою акустичного сигналу ґрунтується на його поширенні в навколишньому середовищі. Відповідно, акустичні сигнали можуть поширюватись у будь-якому середовищі, за винятком вакууму. Саме цей факт обумовлює можливість проходження акустичного сигналу через складові будівельних конструкцій, скло та зняття його лазерними системами акустичної розвідки (ЛСАР).

Структура каналу витоку інформації через скло зображена на рисунку 2.

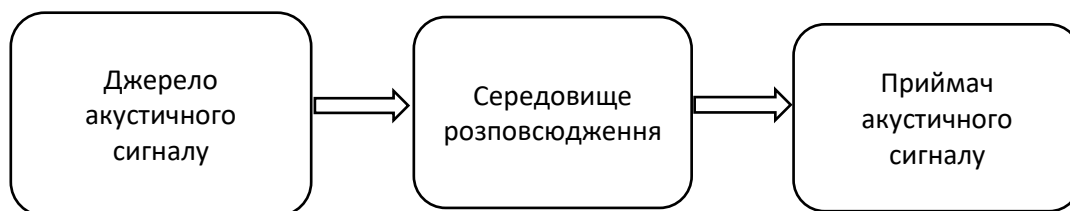


Рисунок 2 – Структура акустичного каналу витоку інформації

Акустичні канали витоку інформації є одними із найнебезпечніших, де серед усіх видів акустичних сигналів-носіїв значну частину становить мовна інформація, яка отримується у режимі реального часу.

Лазерні системи акустичної розвідки є одними із високотехнологічних інструментів, що дозволяють знімати акустичну інформацію дистанційно, використовуючи вібрації поверхонь (наприклад, віконного скла), спричинені звуковими хвилями. Це робить їх надзвичайно небезпечними для будь-яких приміщень, де обговорюється конфіденційна інформація.

Оптоелектронний (лазерний) канал витоку інформації широко використовується в інформаційній розвідці та є досить простим у використанні, оскільки здебільшого зняття інформації відбувається з вібруючого скла. Крім того, використання лазерного мікрофону не потребує його безпосередньої присутності на об'єкті [2].

Оптоелектронний канал витоку інформації формується при опроміненні лазерним променем тонких відбивних поверхонь (скла, вікон, картин, дзеркал тощо), що коливаються в акустичному полі. Відбите лазерне випромінювання (дифузне або дзеркальне) модулюється

по амплітуді та фазі і приймається приймачем оптичного випромінювання, яке демодулюється для вивільнення голосової інформації.

Сутність оптоелектронних каналів витоку інформації полягає в тому, що на об'єкті інформаційної діяльності, де озвучується інформація, під впливом небезпечного акустичного сигналу знаходяться усі предмети. Ті предмети, що мають оптичні властивості віддзеркалення, вібрують. Вібрація таких предметів пов'язана з коливанням їх поверхні. Якщо на поверхню цих предметів спрямувати лазерний промінь, то він віддзеркалиться від поверхні у вигляді променя, модульованого тремтінням від сигналу вібрації і розповсюджуватиметься далі (Рис. 3.) [3].

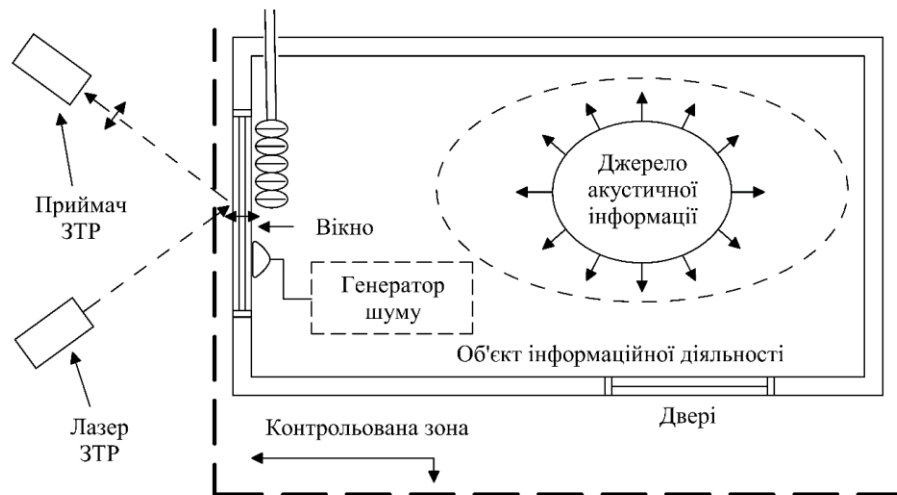


Рисунок 3 – Акустооптоелектронний (лазерний акустичний) канал витоку інформації

Віддзеркалений промінь може бути перехоплений противником, здійснена його демодуляція і відновлений смисл початкового інформаційного мовного сигналу.

Запобігання витоку інформації акустооптоелектронним каналом можна досягти наступними способами:

- використання вакуумних та інших захищених вікон, матування зовнішньої поверхні скла;
- використання щодо вікон та інших предметів віддзеркалення вібраційного зашумлення.

Захист мовної інформації – це комплекс заходів, спрямованих на запобігання несанкціонованому доступу, використанню, поширенню або зміні мовної інформації.

У роботах [4–8] вітчизняні науковці розглядають питання захисту мовної інформації від витоку за допомогою оптоелектронного каналу. Запропоновані методи пасивного захисту з використанням сонцезахисних плівок не дають бажаного ефекту як антилазерні.

Плівки на основі сполук міді, які захищають вікна від випромінювання в ультрафіолетовому та видимому інфрачервоному діапазонах, як описано в [9], працюють найбільш ефективно в діапазоні 500 нм, який не може забезпечити бажаний захист від сканування, оскільки лазери працюють в робочому діапазоні 650 – 3000 нм.

Зарубіжними авторами в роботі [10] проаналізовано варіанти для зменшення вібрації скла та запобігання лазерному прослуховуванню. Враховано вплив конструкції склопакета на захисні властивості від ЛСАР. Результати дослідження показують, що лише 1% коливань скла передається віконними рамами, а решта – віконним склом.

Вплив антилазерних аерозолів на інтенсивність акустичних сигналів розглянуто в роботі [11]. Було встановлено, що оптимальна сила сигналу відповідає кількості абляційного

матеріалу. Це дозволяє відповідним чином регулювати лазерний фокус під час відбору зразків для оптимальної абляції на основі інтенсивності акустичного сигналу.

При дистанційній лазерній зйомці голосу, проаналізовані характеристики зворотного розсіювання об'єктів [12]. Результати показали, що відновлена амплітуда мовного сигналу поступово зменшується зі збільшенням шорсткості поверхні. Крім того, відновлена амплітуда акустичного сигналу збільшується зі збільшенням коефіцієнта ослаблення металу.

На основі надрешіток з фотонних кристалів та наноматеріалів, розроблені багаточастотні багат шарові плівки та покриття з матеріалів [13]. Ці матеріали забезпечують фільтрацію певних довжин хвилі світла, зберігаючи прозорість у іншому спектрі.

Аналізування праць зарубіжних та вітчизняних вчених дає підстави стверджувати, що захист мовних даних від можливого витоку технічними каналами є одним з важливих завдань забезпечення інформаційної безпеки, як у державних, так і бізнес-структурах.

Будь-який канал витоку інформації формується на основі трьох складових: передавач (джерело небезпечного сигналу), середовище розповсюдження небезпечного сигналу, приймач (пристрій знімання інформації). Оптико-електронний канал – не виняток. Небезпечним сигналом в даному випадку є мова співрозмовників, тобто обговорювана вголос закрита інформація. Середовищем поширення небезпечного сигналу, в нашому випадку, можуть бути вікна, картини, дзеркала, та інші предмети побуту, що знаходяться у приміщенні. Ці конструкції мають властивості мембрани і піддаються сильному впливу звукових коливань [14].

Таким чином, для використання оптоелектронного каналу витоку інформації зловмиснику немає необхідності проникати в приміщення, достатньо лише отримати доступ до суміжних будівель та встановити там пристрої знімання інформації, що перетворюють коливання конструкцій контрольованої зони в електричні.

Захист мовної інформації може відбуватися у двох напрямках. По-перше, захистити переговори, які відбуваються в закритих приміщеннях або на контрольованій території. Другий аспект – захистити мовну інформацію в каналах зв'язку.

Постановка проблеми

Існуючі архітектурні та будівельні рішення, що застосовуються при будівництві або модернізації приміщень, не завжди забезпечують належний рівень захисту мовної інформації від ЛСАР. Це зумовлено тим, що принципи функціонування ЛСАР ґрунтуються на дистанційному зчитуванні мікровібрацій поверхонь (наприклад, віконного скла), що виникають під впливом звукових хвиль усередині приміщення. Навіть незначні вібрації можуть бути перетворені назад у мовну інформацію з використанням чутливого оптичного обладнання.

Захист від ЛСАР є надзвичайно складним, багатофакторним заданням, що залежить від значної кількості взаємопов'язаних параметрів. Це включає в себе характеристики матеріалів (особливо скла), їхню товщину, кількість шарів, наявність і властивості спеціальних покриттів, а також динаміку та архітектуру взаємодії лазерного променя з цими елементами.

Відсутність комплексних та науково обґрунтованих моделей, які б враховували комбінацію пошарових елементів та відгук від проходження лазерного променя в обох напрямках (у приміщення та у зворотному напрямку), ускладнює проектування дійсно захищених об'єктів. Це призводить до того, що заходи безпеки часто є недостатніми, неефективними або надмірно витратними без досягнення бажаного рівня захисту.

Необхідність мінімізації втрат інформації через оптоелектронний канал витоку вимагає не просто блокування сигналу, а оптимізації захисних характеристик кожного елемента архітектурної композиції. Це дозволяє досягти максимального ступеня захищеності приміщення з урахуванням усіх аспектів взаємодії.

Таким чином, актуальною науково-технічною проблемою є розробка та впровадження ефективної моделі, яка дозволить кількісно оцінювати, прогнозувати та мінімізувати ризики

витоку мовної інформації через оптоелектронний канал від ЛСАР, забезпечуючи максимальну захищеність приміщень у сучасних умовах загроз інформаційній безпеці.

Методологія

Методологія даного дослідження опирається на комплексну методику вивчення параметрів захищеності оптоелектронного каналу витоку інформації, яка дає змогу дослідити пошарову взаємозалежність та вплив захисних оптичних шарів і внутрішньої будови скла на його захисні характеристики від ЛСАР. Зокрема, на основі оцінювання захищеності скла та плівкових покриттів від лазерних систем розвідки, що здійснювалося за допомогою рентгенофлуоресцентного і спектрального аналізу та симплекс-решітчатого планування при моделюванні характеристик скла, можна узагальнити, що застосовані методи, розроблені на їхній основі методики та експериментальні дослідження становлять таку методологію, що повністю довершує поставлені завдання.

Для побудови захисної пошарової моделі багатокомпонентної архітектурно компонованої структури оптоелектронного каналу витоку інформації використовувалися отримані нами результати попередніх досліджень.

Зокрема, проведені дослідження захисних можливостей скла від лазерного зондування залежно від його елементного складу, зокрема щодо впливу елементного складу листового скла на коефіцієнти відбивання та поглинання зондуючого випромінювання. Систематизація елементного та кількісного складу досліджуваного віконного скла за періодами та групами періодичної системи хімічних елементів, дала змогу побачити залежність між електронною будовою хімічних елементів і захисними властивостями скла. Отримані результати показали, що коефіцієнти відбивання та поглинання змінюються відповідно до зміни хімічного складу досліджуваного скла, що дає можливість прогнозувати властивості та моделювати хімічний склад скла із заданими захисними властивостями [15].

На основі дослідження коефіцієнту відбивання скла з напиленням одношаровим покриттям діоксиду гафнію за допомогою спектральних характеристик, нами запропоновано використання захисних плівок з високою відбиваючою здатністю, що ускладнює або робить неможливим зняття інформації оптичним методом. Обґрунтовано можливі переваги використання діелектричних плівок діоксиду гафнію, так як коефіцієнт відбивання скла з напиленою плівкою значно вищий в порівнянні з чистим склом, що в разі підвищує захисні характеристики скла від витоку мовної інформації. Крім того, затрати на виготовлення та нанесення таких покриттів є суттєво меншими, ніж затрати на розробку та виробництво будь-яких активних засобів захисту у сучасному світі, що підтверджує переваги пасивних методів захисту мовної інформації від зчитування оптоелектронним каналом [16].

Проведені також дослідження та оцінка ефективності застосування захисної напівпровідникової плівки BaCuTeF , запропоновано спосіб одержання вдосконаленої структури аморфної електропровідної захисної плівки з подальшим отриманням кристалічної структури за допомогою проведення відпалу в атмосфері аргону, що за різних температур може значно покращити властивості пропускання видимого світла, збільшити потужність відбитого лазерного променя та більшою мірою поглинати потужність лазерного випромінювання у порівнянні з простими металізованими плівками. Дане дослідження дозволило зробити висновок, що встановлення такої захисної плівки у поєднанні з шаром барвника з високою відбивною здатністю на зовнішньому віконному склі будівлі знижує або повністю виключає ефективність лазерних засобів перехоплення голосової інформації, в основному через різке падіння потужності відбитого або поглиненого сигналу зовнішнім шаром скла з плівковим покриттям [17].

Аналізуючи результати дослідження, де авторами описана методика напилення одношарового покриття діоксиду гафнію з подальшим дослідженням коефіцієнту відбивання

скла з напиленою плівкою, та роботи [18], в якій було проведено дослідження захисних характеристик напилених на скло рельєфних плівок, ми дійшли висновку, що зміна кута нахилу склопакету та використання рельєфних плівок із зовнішнього боку скла суттєво впливають на коефіцієнт відбивання, що може ефективно та з мінімальними витратами забезпечити захист мовної інформації від ЛСАР.

На основі аналізу та узагальнення результатів попередніх досліджень стало можливим побудувати комплексну модель багатокомпонентної архітектурно-компонованої структури оптоелектронного каналу витоку інформації.

Результати

Складений оптоелектронний канал витоку інформації утворюється шляхом знімання інформації лазерним променем в ІЧ-діапазоні (ЛСАР) з плоскої поверхні скла, що коливається під дією акустичної хвилі з інформацією. Якщо ж брати за основу класичну структуру оптоелектронного каналу витоку інформації, то можемо констатувати, що джерелами акустичного сигналу в приміщенні може бути, в першу чергу, сама людина в процесі розмови і відбиті джерела сигналів. У нашому випадку – це віконне скло у відповідному розташуванні, встановленого хімічного складу, з використанням різноманітних напилень і плівок, яке з середовища розповсюдження стає також джерелом вібраційних коливань, тобто в залежності від кількості захисних шарів на склі, воно може послаблювати або посилювати джерела сигналів для зняття ЛСАР.

Разом з тим, на основі проведених експериментів і досліджень, можемо зазначити, що поширення вібрацій відрізняється в залежності від компонування матеріалів перешкоди (скла та ін. огорожувальних об'єктів), якою вони поширюються, та попередньої відповіді на скануючу дію лазерного променя.

Отже, структуру оптоелектронного каналу витоку інформації пропонуємо представити у вигляді пошарової моделі (Рис. 4.).

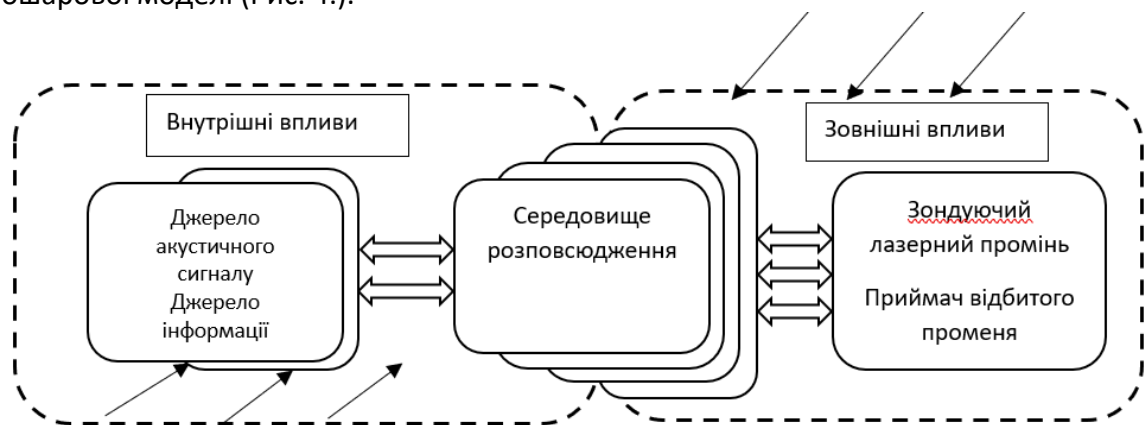


Рисунок 4 – Захисна пошарова модель багатокомпонентної архітектурно компонованої структури оптоелектронного каналу витоку інформації

Як видно з рисунка, поряд з джерелом вібраційних коливань прямої дії формується також відгук від проходження лазерного променя в середину приміщення і у зворотному напрямку.

Отже, захищеність приміщень від зняття мовної інформації системами лазерної розвідки має достатньо складну залежність і формується компонуванням багатьох взаємопов'язаних величин:

K_1 – якісний коефіцієнт захисту (елементний склад скла);

K_2 – кількісний коефіцієнт захисту (стехіометрія елементів скла);

K_3 – коефіцієнт захисних покриттів (плівки);

- K_4 – кутовий коефіцієнт (кут нахилу склопакету);
 K_5 – кутовий коефіцієнт (кут падіння лазерного променя);
 K_6 – «сендвіч» коефіцієнт (компонування захисних шарів);
 K_7 – коефіцієнт технічних характеристик приладів;
 K_n – n -ий коефіцієнт захисту.

Математична модель описує мінімізацію втрат інформації через оптоелектронний канал витоку від ЛСАР, що відповідає максимальному ступеню захищеності приміщення. Загальні або сумарні втрати інформації складаються з декількох складових, які пошарово компонуються на вихідному матеріалі (склі). Для кожного гіпотетичного шару існує повна (оптимальна) величина зменшення ризику витоку інформації оптоелектронним каналом від ЛСАР, який відповідає мінімуму. Цей мінімум втрат корелює з реальною чисельною характеристикою $K_{min}^{лсар}$, яка враховує компонування пошарових елементів, їх комбінацію, що беруть участь у вирішенні питання безпеки приміщення. У загальному випадку кінцева множина $K_{min}^{лсар}$ складається з n захисних шарів, тобто:

$$K_{min}^{лсар} = \sum_{i=1}^n K_n$$

де $K_{min}^{лсар}$ – коефіцієнт мінімальних втрат мовної інформації;
 K_n – коефіцієнт мінімальних втрат мовної інформації n -м захисним шаром.

Можемо припустити, що пошарова модель багатокомпонентної архітектурно компонованої структури оптоелектронного каналу витоку інформації розгортається на рівні агрегатної та комплексної моделі.

Агрегатна модель складної (пошарової) системи буде складатись з окремих підсистем та опису їх взаємодії (за класичною схемою). При вивченні цієї моделі підсистеми представлені окремими рівняннями, що пов'язують вихідні сигнали з вхідними сигналами та з параметрами підсистеми. Агрегатна модель буде подаватись системою цих рівнянь:

$$\begin{cases} K_1 = f_1(x_1, x_2, x_n \dots) \\ K_2 = f_2(x_1, x_2, x_n \dots) \\ K_n = f_n(x_1, x_2, x_n \dots) \end{cases}$$

Взаємодія підсистем (скло, напилення, захисні плівки, компонування та ін.) полягає в тому, що вихідні сигнали однієї підсистеми є вхідними для іншої і мають однакове позначення в агрегатній моделі. Вихідні сигнали однієї підсистеми вводяться в іншу і мають однакові назви в агрегатній моделі.

Комплексна (системна) модель розглядає джерело (середовище розповсюдження) в цілому, не розділяючи його на підсистеми і окремі внутрішні процеси. Коефіцієнт захисту можна представити у вигляді:

$$K_{зах} = f K_n$$

Разом з тим, комплексна модель при вирішенні конкретних завдань, може теж бути отримана і представлена у вигляді сумарної агрегатної моделі, шляхом зведення системи рівнянь до одного виразу, що пов'язує вхідні і вихідні сигнали системи, методом підстановки, в залежності від компонування складових захисту інформації від витоку оптоелектронним каналом.

Переваги цих підходів полягають в тому, що в залежності від завдань, які стоять перед системою і вихідних характеристик елементів, ми можемо довільно компоувати роботу системи в цілому, з готових компонентів з визначеними параметрами або критеріями і без

дослідження внутрішньої структури, опираючись тільки на потрібний результат. Очевидно, що представлена модель дозволить використовувати обидва підходи як для проведення експериментальних досліджень пошарових елементів, так і прогнозування теоретичних можливостей цілої системи захисту мовної інформації від ЛСАР.

Висновки

У результаті проведеного дослідження побудовано захисну модель багатокомпонентної архітектурно-компонованої структури оптоелектронного каналу витоку інформації, яка враховує комбінацію пошарових елементів, відгук від проходження лазерного променя в середину приміщень і у зворотному напрямку та розгортається на рівні агрегатної та комплексної моделі.

Встановлено, що **захищеність приміщень від зняття мовної інформації ЛСАР не є лінійною функцією, а формується складною комбінацією взаємопов'язаних параметрів**, включаючи відгук від проходження лазерного променя крізь багат шарові елементи будівельних конструкцій (наприклад, скло, захисні плівки та ін.).

Розроблена математична модель, що описує мінімізацію втрат інформації через оптоелектронний канал витоку від ЛСАР, дозволяє визначити **оптимальну величину зменшення ризику** для кожного гіпотетичного шару вихідного матеріалу, що, в свою чергу, відповідає **максимальному ступеню захищеності приміщення**.

Концепція “мінімуму втрат” відображає реальну чисельну характеристику ефективності комбінації пошарових елементів, які формують систему забезпечення безпеки приміщення. Таким чином, дослідження надає **наукову основу для проектування та оптимізації захисних систем**, дозволяючи досягти найбільш ефективної протидії лазерним системам акустичної розвідки шляхом цілеспрямованого впливу на фізичні властивості багат шарових архітектурних компонентів.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. Іванченко, С. О., Гавриленко, О. В., Липський, О. А., & Шевцов, А. С. (2016). *Технічні канали витоку інформації. Порядок створення комплексів технічного захисту інформації: Навч. посіб.* ІСЗІ НТУУ «КПІ».
2. Горбенко, І., & Ковальчук, Ю. (2008). Оцінка характеристик лазерного каналу витоку мовної інформації з урахуванням багатомодового випромінювання лазера. *Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні*, (2), 83-88.
3. Громико, І. О. (2006). Загальна парадигма захисту інформації: визначення термінів від носіїв до каналів витоку інформації. *Системи обробки інформації*, 9(58), 3-9.
4. Дудикевич, В. Б., Собчук, І. С., Ракобовчук, В. О., & Лич, С. В. (2015). Дослідження властивостей плівок на основі діоксиду гафнію для захисту інформації від лазерного зондування. *Захист інформації і безпека інформаційних систем: матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції* (С. 185–186).
5. Дудикевич, В. Б., Ракобовчук, В. О., Гаранюк, П. І., & Дей, В. А. (2014). Вплив діелектричного покриття на захисні властивості скла від витоку інформації через оптико-електронний

- канал. *Проблеми створення, розвитку та застосування високотехнічних систем спеціального призначення: Тези доповідей 20 Всеукр. наук.-практ. конф.*, 196-197.
6. Катаєв, В., & Яремчук, Ю. (2019). Метод активного захисту інформації від зняття лазерними системами акустичної розвідки. *Захист інформації*, 21(1), 34-39. <https://doi.org/10.18372/2410-7840.21.13545>
7. Abramov, P. I., Kuznetsov, E. V., & Skvortsov, L. A. (2017). Prospects of using quantum-cascade lasers in optoelectronic countermeasure systems: review. *J. Opt. Technol.*, 84, 331-341.
8. Horev, A., & Savin, A. (2021). Efficiency Research of Sun Protection Window Films for Speech Information Protection from LEAKAGE by Optoelectronic Channel. *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering* (pp. 2335-2339). <https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396253>
9. Klochko, N. P., Barbash, V. A., Klepikova, K. S., Kopach, V. R., Tyukhov, I. I., Yashchenko, O. V., Zhadan, D. O., Petrushenko, S. I., Dukarov, S. V., Sukhov, V. M., & Khrypunova, A. L. (2021). Biodegradable flexible transparent films with copper iodide and biomass-derived nanocellulose for ultraviolet and high-energy visible light protection. *Solar Energy*, 220, 852-863. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.014>
10. Zeng, U., Pan, B., Cao, Y., & Ai, H. (2021). Test and analysis of window vibration for anti-laser-eavesdropping. *Applied Acoustics*, 176, 107871. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107871>
11. Kradolfer, S., Heutschi, K., Koch, J., & Gunther, D. (2021). Listening with curiosity—tracking the acoustic response of portable laser ablation. *Chimia*, 75(4), 300-304. <https://doi.org/10.2533/Chimia.2021.300>
12. Li, L., Zeng, H., Zhang, Y., Kong, Q., Zhou, Y., & Liu, Y. (2014). Analysis of backscattering characteristics of objects for remote laser voice acquisition. *Appl. Opt.*, 53, 971-978.
13. Zhang, W., Zhang, L., Liang, X., et al. (2017). Unconventional High-Performance Laser Protection System Based on Dichroic Dye-Doped Cholesteric Liquid Crystals. *Sci Rep*, 7, 42955. <https://doi.org/10.1038/srep42955>
14. Катаєв, В., & Яремчук, Ю. (2019). Метод активного захисту інформації від зняття лазерними системами акустичної розвідки. *Захист інформації*, 21(1), 34-39. <https://doi.org/10.18372/2410-7840.21.13545>
15. Dzianyi, N., Dudykevych, V., Opirskyy, I., Rakobovcuk, L., & Haraniuk, P. (2022). Investigation of the protective capabilities of glass from laser sounding depending on its elemental composition. *Eureka: Physics and Engineering*, (5), 162–174. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002527>
16. Rakobovcuk, L., Dzianyi, N., Antonevych, M. (2023). Захисні характеристики плівок від лазерних систем акустичної розвідки на прикладі одношарового відбиваючого покриття діоксиду гафнію. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, 29(1), 32-40. <http://infosecurity.nau.edu.ua>; <https://doi.org/10.18372/2225-5036.29.17550>
17. Dzianyi, N.R. (2019). Електропровідна плівка на вікна для захисту інформації від витoku оптоелектронним каналом. *Актуальні питання забезпечення кібербезпеки та захисту інформації: тези доповідей учасників IV Міжнар. наук.-практ. конф.* (С. 54-59). Видавництво Європейського університету.
18. Пархуць, Л. Т., Совин, Я. Р., & Ракобовчук, Л. М. (2024). Вплив інтер'єру приміщення на протидію лазерним системам акустичної розвідки. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*, 3(23), 246-257.

References

1. Ivanchenko, S. O., Havrylenko, O. V., Lyps'kyy, O. A., & Shevtsov, A. S. (2016). *Tekhnichni kanaly vy-toku informatsiyi. Poryadok stvorenniya kompleksiv tekhnichnoho zakhystu informatsiyi:*

- Navch. posib.* [Technical channels of information leakage. The procedure for creating complexes of technical information protection: Tutorial]. ISZZI NTUU «KPI».
2. Horbenko, I., & Kovalchuk, Y. (2008). Otsinka kharakterystyk lazernoho kanalu vy-toku movnoyi informatsiyi z urakhuvannyam bahatomodovoho vy-prominyuvannya lazera [Evaluation of the characteristics of the laser channel of speech information leakage taking into account multimode laser radiation]. *Pravove, normatyvne ta metrolohichne zabezpechennya systemy zakhystu informatsiyi v Ukraini*, (2), 83-88.
 3. Hromyko, I. O. (2006). Zahal'na paradyhma zakhystu informatsiyi: vyznachennya terminiv vid nosiyiv do kanaliv vy-toku informatsiyi [General paradigm of information security: Definition of terms from media to information leakage channels]. *Systemy obrobky informatsiyi*, 9(58), 3-9.
 4. Dudykevych, V. B., Sobchuk, I. S., Rakobovchuk, V. O., & Lych, S. V. (2015). Doslidzhennya vlastyvostry plivok na osnovi dioksydu hafniyu dlya zakhystu informatsiyi vid lazernoho zonduvannya [Investigation of the properties of hafnium dioxide-based films for information protection against laser sounding]. *Zakhyst informatsiyi i bezpeka informatsiynykh system: materialy IV mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi* (pp. 185–186).
 5. Dudykevych, V. B., Rakobovchuk, V. O., Haranyuk, P. I., & Dey, V. A. (2014). Vplyv dielektrychnoho pokryttya na zakhysni vlastyvostry skla vid vy-toku informatsiyi cherez optyko-elektronnyy kanal [The effect of dielectric coating on the protective properties of glass against information leakage through the optoelectronic channel]. *Problemy stvorenniya, rozvytku ta zastosuvannya vysokotekhnichnykh system spetsial'noho pryznachennya: Tezy dopovidey 20 Vseukr. nauk.-prakt. konf.*, 196-197.
 6. Katayev, V., & Yaremchuk, Y. (2019). Metod aktyvnoho zakhystu informatsiyi vid znyattya lazernymy systemamy akustychnoyi rozvidky [Method of active information protection against removal by laser systems of acoustic reconnaissance]. *Zakhyst informatsiyi*, 21(1), 34-39. <https://doi.org/10.18372/2410-7840.21.13545>
 7. Abramov, P. I., Kuznetsov, E. V., & Skvortsov, L. A. (2017). Prospects of using quantum-cascade lasers in optoelectronic countermeasure systems: review. *J. Opt. Technol.*, 84, 331-341.
 8. Horev, A., & Savin, A. (2021). Efficiency Research of Sun Protection Window Films for Speech Information Protection from LEAKAGE by Optoelectronic Channel. *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering* (pp. 2335-2339). <https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396253>
 9. Klochko, N. P., Barbash, V. A., Klepikova, K. S., Kopach, V. R., Tyukhov, I. I., Yashchenko, O. V., Zhadan, D. O., Petrushenko, S. I., Dukarov, S. V., Sukhov, V. M., & Khrypunova, A. L. (2021). Biodegradable flexible transparent films with copper iodide and biomass-derived nanocellulose for ultraviolet and high-energy visible light protection. *Solar Energy*, 220, 852-863. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.014>
 10. Zeng, U., Pan, B., Cao, Y., & Ai, H. (2021). Test and analysis of window vibration for anti-laser-eavesdropping. *Applied Acoustics*, 176, 107871. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107871>
 11. Kradolfer, S., Heutschi, K., Koch, J., & Gunther, D. (2021). Listening with curiosity—tracking the acoustic response of portable laser ablation. *Chimia*, 75(4), 300-304. <https://doi.org/10.2533/Chimia.2021.300>
 12. Li, L., Zeng, H., Zhang, Y., Kong, Q., Zhou, Y., & Liu, Y. (2014). Analysis of backscattering characteristics of objects for remote laser voice acquisition. *Appl. Opt.*, 53, 971-978.
 13. Zhang, W., Zhang, L., Liang, X., et al. (2017). Unconventional High-Performance Laser Protection System Based on Dichroic Dye-Doped Cholesteric Liquid Crystals. *Sci Rep*, 7, 42955. <https://doi.org/10.1038/srep42955>
 14. Katayev, V., & Yaremchuk, Y. (2019). Metod aktyvnoho zakhystu informatsiyi vid znyattya lazernymy systemamy akustychnoyi rozvidky [Method of active information protection

- against removal by laser systems of acoustic reconnaissance]. *Zakhyst informatsiyi*, 21(1), 34-39. <https://doi.org/10.18372/2410-7840.21.13545>
15. Dzianyi, N., Dudykevych, V., Opirskyy, I., Rakobovcuk, L., & Haraniuk, P. (2022). Investigation of the protective capabilities of glass from laser sounding depending on its elemental composition. *Eureka: Physics and Engineering*, (5), 162–174. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002527>
16. Rakobovcuk, L., Dzianyi, N., Antonevych, M. (2023). Захисні характеристики плівок від лазерних систем акустичної розвідки на прикладі одношарового відбиваючого покриття діоксиду гафнію [Protective characteristics of films from laser acoustic reconnaissance systems on the example of a single-layer reflective coating of hafnium dioxide]. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, 29(1), 32-40. <http://infosecurity.nau.edu.ua>; <https://doi.org/10.18372/2225-5036.29.17550>
17. Dzianyi, N.R. (2019). Електропровідна плівка на вікна для захисту інформації від витоку оптоелектронним каналом [Electrically conductive film on windows for protecting information from leakage by optoelectronic channel]. *Aktual'ni pytannya zabezpechennya kiberbezpeky ta zakhystu informatsiyi: tezy dopovidey uchasnykiv IV Mizhnar. nauk.-prakt. konf.* (pp. 54-59). Vydavnytstvo Yevropeys'koho universytetu.
18. Parkhuts', L. T., Sovyn, Y. R., & Rakobovchuk, L. M. (2024). Vplyv inter'yeru primishchennya na protydyu lazernym systemam akustychnoyi rozvidky [The influence of the room interior on countering laser acoustic reconnaissance systems]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*, 3(23), 246-257.