

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра Безпеки інформаційних технологій
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Захист об'єктів інформаційної діяльності від лазерних засобів акустичних
розвідок
(тема)

Виконала: Шаповал З.В.
(прізвище, ініціали)

студент 2 курсу, групи БІКСм-19

Спеціальність 125 Кібербезпека
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Безпека інформаційних і
комунікаційних систем»
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Заболотний В.І.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Халімов Г.З.
(прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра Безпеки інформаційних технологій
(повна назва)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 125 Кібербезпека
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна, або освітньо-наукова)

Освітня програма «Безпека інформаційних і комунікаційних систем»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« ____ » грудня 2020 р.

ЗАВДАННЯ
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Шаповал Зої Василівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Захист об'єктів інформаційної діяльності від лазерних засобів акустичних розвідок*

затверджена наказом по університету від "22" ЖОВТНЯ 2020 р. № 1412Ст

2. Термін подання студентом роботи (проєкту) 17. 12.2020

3. Вихідні дані до роботи (проєкту) лазерний засіб акустичної розвідки

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі (зміст пояснювальної записки)

1. Актуальний стан та перспективи розвитку сучасних ЛЗАР

2. Аналіз властивостей лаєрів

3. Сучасні засоби захисту від лазерних засобів акустичної розвідки

4. Дослідження явища розходження лазерного променя

5. Дослідження властивостей кутикових відбивачів

6. Аналітичне дослідження створення перешкиди ЛЗАР

7. Оцінка фізичної реалізації способу захисту від ЛЗАР

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Презентаційний матеріал у вигляді слайдів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів магістерської атестаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Отримання завдання</i>	<i>02.09.20</i>	
2	<i>Пошук літератури</i>	<i>04.09.20-28.09.20</i>	
3	<i>Аналіз властивостей лазерів</i>	<i>28.09.20-15.10.20</i>	
4	<i>Аналіз можливостей ЛЗАР</i>	<i>15.10.20-11.11.20</i>	
5	<i>Аналіз властивостей кутикових відбивачів і можливості їх використання для захисту від ЛЗАР</i>	<i>11.11.20-25.11.20</i>	
6	<i>Обґрунтування можливості створення перешкоди ЛЗАР</i>	<i>25.11.20-04.12.20</i>	
7	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	<i>04.12.20-16.12.20</i>	

Дата видачі завдання _____ 20__ р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи (проекту) _____ проф. Заболотний В.І. _____
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 118 сторінок, 3 таблиці, 33 рисунки, 89 формул, 44 джерела.

Об'єкт дослідження – способи захисту від лазерних засобів акустичної розвідки.

Предмет дослідження – способи захисту від лазерної акустичної розвідки та захисту від ЛЗАР.

Мета роботи - аналіз особливостей побудови ЛЗАР, аналіз можливості розробки засобів захисту від ЛЗАР на основі кутикових відбивачів за рахунок явища зменшення контрасту шляхом збільшення амплітуди не модульованого сигналу.

Метод дослідження – вивчення літератури, аналіз структури та особливостей лазерних засобів акустичної розвідки, дослідження створення перешкоди ЛЗАР за допомогою кутикових відбивачів за рахунок явища зменшення контрасту шляхом збільшення амплітуди не модульованого сигналу, розрахунок основних значень, аналіз отриманих результатів та написання висновків.

ЛАЗЕР, АКУСТИЧНА ІНФОРМАЦІЯ, КАНАЛИ ВИТОКУ, ОБ'ЄКТ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ, ЛАЗЕРНІ ЗАСОБИ АКУСТИЧНОЇ РОЗВІДКИ, ДІАГРАМА СПРЯМОВАНOSTІ, ЕФЕКТИВНА ПЛОЩА РОЗСІЮВАННЯ, ІНТЕНСИВНІСТЬ ВИПРОМІНЮВАННЯ.

ABSTRACT

The explanatory note contains 118 pages, 3 tables, 33 figures, 89 formulas, 44 sources.

The object of research – methods of protection against laser acoustic reconnaissance.

The subject of research – methods of protection against laser acoustic reconnaissance and protection against laser acoustic intelligence.

The purpose of the work - analysis of the features of the construction of against laser acoustic intelligence, analysis of the possibility of developing protection against laser means of acoustic reconnaissance on the basis of angular reflectors due to the phenomenon of reducing the contrast by increasing the amplitude of the non-modulated signal.

Research method – study of literature, analysis of structure and features of laser means of acoustic reconnaissance, research of against laser acoustic intelligence interference creation by means of angle reflectors due to the phenomenon of contrast decrease by increase of amplitude of not modulated signal, calculation of basic values, analysis of obtained results and writing conclusions.

LASER, ACOUSTIC INFORMATION, SOURCE CHANNELS, OBJECT OF INFORMATION ACTIVITY, AGAINST LASER ACOUSTIC INTELLIGENCE, DIAGRAM DIRECTED, EFFICIENT SCATTERING AREA, RADIATION INTENSITY, RADIATION INTENSITY.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧОК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ...	9
ВСТУП.....	10
1 ЛАЗЕРИ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ.....	12
1.1 Принцип роботи лазера.....	12
1.2 Типи лазерів.....	18
1.2.1 Твердотільні лазери.....	19
1.2.2 Рідинні лазери.....	20
1.2.3 Газові лазери.....	21
1.3 Типи лазерного випромінювання.....	22
1.3.1 Інфрачервоне випромінювання.....	22
1.3.2 Видиме випромінювання.....	24
1.3.3 Ультрафіолетове випромінювання.....	25
1.4 Властивості випромінювання.....	26
1.4.1 Монохроматичність.....	26
1.4.2 Когерентність.....	30
1.4.3 Інтерференція.....	31
1.5 Розходження лазерного променя.....	36
1.6 Вимірювання кута розходження променя.....	38
1.7 Модель діаграми випромінювання.....	42
1.7.1 Діаграма спрямованості у загальному вигляді.....	42
1.7.2 Діаграма спрямованості круглої площадки.....	45
2 ОСНОВИ РОЗВІДКИ ІНФОРМАЦІЇ, ЩО ОЗВУЧУЄТЬСЯ.....	53
2.1 Основи захисту інформації.....	53
2.2 Види акустичної розвідки.....	56
2.3 Технічні засоби акустичної розвідки.....	59

	7
2.4 Технічні канали витоку інформації.....	61
2.5 Оптико-електронний (лазерний) канал витоку інформації.....	65
3 ЛАЗЕРНІ ЗАСОБИ АКУСТИЧНОЇ РОЗВІДКИ.....	68
3.1 Схеми роботи ЛЗАР.....	69
3.2 Принцип роботи ЛЗАР.....	73
3.3 Компоненти ЛЗАР та їх характеристики.....	76
3.4 Основні проблеми сучасних ЛЗАР.....	77
4 ЗАСОБИ ЗАХИСТУ ВІД ЛАЗЕРНИХ ЗАСОБІВ АКУСТИЧНОЇ РОЗВІДКИ.....	79
4.1 Методи захисту від витоку акустичної інформації.....	79
4.2 Активні засоби захисту від витоку акустичної інформації.....	81
4.3 Методи пасивного захисту від ЛЗАР.....	84
4.4 Рух променя в кутиковому відбивачі.....	89
4.4.1 Закони геометричної оптики.....	90
4.4.2 Проходження променя у загальному вигляді.....	93
4.4.3 Світлові властивості тіл.....	94
4.4.4 Ефективна площа розсіювання.....	99
5 ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ПЕРЕШКОДИ ЛЗАР.....	101
5.1 Основні поняття, що використовуються.....	101
5.2 Аналітичне дослідження створення перешкоди ЛЗАР.....	101
5.3 Оцінка фізичної реалізації способу захисту від ЛЗАР.....	103
ВИСНОВКИ.....	105
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	106
ДОДАТОК А Слайди презентації.....	111

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧОК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

АР – акустична розвідка;

ВЧ нав'язування – високочастотне нав'язування;

ЕПР – ефективна площа розсіювання;

ІЧ випромінювання – інфрачервоне випромінювання;

КВ – кутиковий відбивач.

КЗ – контрольована зона;

ЛЗАР – лазерний засіб акустичної розвідки;

НАМ – направлений акустичний мікрофон;

НВЧ діапазон – діапазон надвисокочастотного випромінювання;

ОІД – об'єкт інформаційної діяльності;

ОКГ – оптичний квантовий генератор;

ТЗІ – технічний захист інформації;

ТКВІ – технічний канал витоку інформації;

УФ випромінювання – ультрафіолетове випромінювання;

ФАР – фазові антенні решітки;

ВСТУП

Важливість розвідки інформації з часом не тільки не зменшується, а й навпаки – збільшується. Адже вона є складовою майже всіх сфер нашого життя. Починаючи від військового сектора, до економіки, політики, виробничої сфери та інших.

Маючи доступ до інформації з обмеженим доступом, люди отримують вагомі аргументи при веденні переговорів між конкуруючими сторонами, а правильне використання отриманих даних дає можливість отримати вигоду власнику або, навпаки, приводить до суттєвих втрат у разі такого витоку.

Враховуючи те, що технології все швидше розвиваються, розвиваються також і засоби ведення розвідки. Вони все більше модернізуються і відкривають нові можливості для отримання інформації.

Одним з найпоширеніших способів передачі і поширення інформації є розмова. Тому, розвідка мовної інформації теж займає досить важливе місце серед всіх засобів розвідувальної діяльності. Одним з таких засобів є лазерні засоби акустичної розвідки. ЛЗАР ось уже протягом мінімум півстоліття залишаються незмінними і ефективними засобами акустичної розвідки, їх можливості лише розширюються, а самі системи модернізуються.

Існує досить багато суперечливих даних щодо можливостей лазерної акустичної розвідки. Зазвичай дальність розвідки лежить в межах від декількох сотень метрів до кілометра, що, звісно, також залежить як від зовнішніх чинників, так і від потужності самої системи. Всі максимально можливі теоретичні показники є майже недосяжними, якщо не розглядати їх в ідеальних умовах.

В свою чергу, технічні характеристики сучасних лазерних засобів акустичної розвідки суттєво поліпшились останнім часом, що, звісно, також вплинуло і на надійність роботи таких систем. Наприклад, існують дані, які

стверджують про дальність роботи лазера на відстані до 10 км, або про створення дифузійного лазера, який дозволяє знімати сигнал зі скла під досить великим кутом. Навіть враховуючи те, що всі ці дані, найімовірніше, було подано для використання ЛЗАР в ідеальних умовах, лазерні системи можуть бути досить ефективним засобом технічної розвідки.

Ефективність і привабливість лазерних засобів акустичної розвідки також пояснюється тим, що для отримання мовної інформації не обов'язково бути або попередньо заходити в приміщення, де проводиться розвідка, адже зняття інформації відбувається на відстані. Окрім того, виявити ЛЗАР досить складно, а в деяких випадках технічно неможливо.

Враховуючи всі технічні можливості засобів розвідки інформації по оптико-електронному каналу, здебільшого захист такої інформації забезпечується активними засобами захисту. Наприклад, зашумлення або спеціальне покриття на вікнах. Такі засоби захисту мають ряд недоліків і не завжди є достатньо ефективними. Тому, надійнішим буде використання поєднання активних і пасивних засобів захисту, а також врахування цих проблем ще на етапі будівництва приміщень [1].

Таким чином актуальність даної роботи зумовлена постійним розвитком лазерних засобів акустичної розвідки як з точки зору апаратури, так і з точки зору нових методів зйому інформації, і тому ще більшою важливістю розробки нових систем та методів захисту.

Задача даної роботи – дослідження особливостей лазерних засобів акустичної розвідки, дослідження можливості створення засобу захисту від ЛЗАР.

Мета роботи:

- 1) аналіз особливостей побудови ЛЗАР;
- 2) аналіз можливості розробки засобів захисту від ЛЗАР на основі кутикових відбивачів за рахунок явища зменшення контрасту шляхом збільшення амплітуди не модульованого сигналу.

1 ЛАЗЕРИ, ЇХ ВЛАСТИВОСТІ ТА МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ

1.1 Принцип роботи лазера

Лазер — пристрій для генерування або підсилення монохроматичного світла, створення вузького пучка світла, здатного поширюватися на великі відстані без розсіювання і створювати винятково велику густину потужності випромінювання при фокусуванні (10^8 Вт/см² для високоенергетичних лазерів) [1].

В основу роботи лазерів покладено явище індукованого випромінювання. Поряд з процесами звичайного випромінювання і резонансного поглинання існує третій процес – вимушене (індуковане) випромінювання. Світло резонансної частоти, тобто тієї частоти, яку атоми здатні поглинати, переходячи на вищі енергетичні рівні, повинно викликати світіння атомів, які вже перебувають на цих рівнях, якщо такі є в середовищі.

Атоми середовища можуть поглинати світло, перебуваючи на нижньому енергетичному рівні, а випромінюють вони на верхніх рівнях. Звідси випливає, що при великій кількості атомів на нижніх рівнях (принаймні, більшій, ніж кількість атомів на верхніх рівнях), світло, проходячи через середовище, буде послаблюватися. Навпаки, якщо число атомів на верхніх рівнях більше числа збуджених, то світло, пройшовши через дане середовище, посилиться. Це означає, що в даному середовищі переважає індуковане випромінювання. Простір між дзеркалами, у свою чергу, заповнено активним середовищем, тобто середовищем, що містить більшу кількість збуджених атомів (атомів, що знаходяться на верхніх енергетичних рівнях).

Розглянемо два випадкових енергетичних стани 1 і 2 деякої речовини і позначимо відповідно N_1 і N_2 [2]. Якщо у даній речовині вздовж осі z розповсюджується плоска електромагнітна хвиля з густиною потоку фотонів F , то

мале випромінювання густини потоку dF в тонкому шарі товщиною dz буде викликано як процесами вимушеного випромінювання, так і поглинання, що представлено на рисунку 1.1.

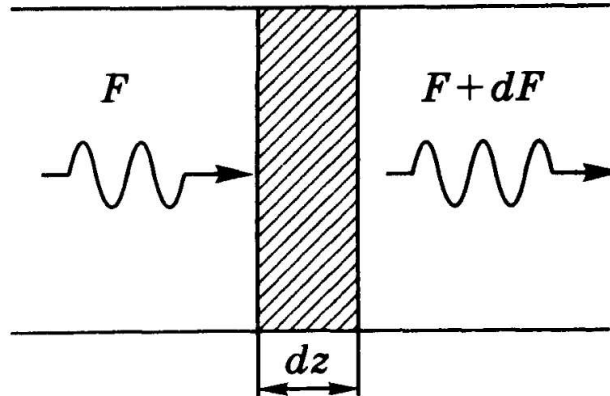


Рисунок 1.1 – Мале випромінювання густини потоку фотонів dF в плоскій електромагнітній хвилі при проходженні через тонкий шар речовини товщиною dz

Нехай через S позначена площа поперечного перерізу пучка. Різниця між числами фотонів, які покидають виділений об'єм і поступають в нього за одиницю часу, буде при цьому дорівнювати SdF . Оскільки в кожному акті вимушеного випромінювання створюється, а в кожному акті поглинання знищується один фотон, то величина SdF повинна дорівнювати різниці між числом актів вимушеного випромінювання і поглинання, які відбуваються в об'ємі, який розглядається, на одиницю часу. Використовуючи співвідношення

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{nr} = -\frac{N_2}{\tau_{nr}}, \quad (1.1)$$

де τ_{nr} – безвипромінювальний час життя переходу. У випадку спонтанного випромінювання значення A визначається тільки властивостями конкретно взятого переходу.

Для вимушеного випромінювання:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{nr} = -W_{21}N_2, \quad (1.2)$$

де $\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{nr}$ – швидкість переходів $2 \rightarrow 1$ за рахунок вимушеного випромінювання,

W_{21} – імовірність вимушеного випромінювання для переходу, або імовірність вимушеного випромінюючого переходу (за одиницю часу).

Можна записати: $SdF = (W_{21}N_2 - W_{21}N_1)(Sdz)$, де Sdz – об'єм заштрихованої області. Можна відмітити, що при виводі цього співвідношення не враховувались спонтанні випромінювальні і безвипромінювальні переходи, оскільки останні не призводять до створення нових фотонів, а спонтанно випущені фотони не дають вкладу в падаючу плоску хвилю. Дійсно, спонтанне випромінювання випускається по всіх напрямках і на довжині хвилі, не обов'язково співпадаючого з довжиною хвилі падаючого випромінювання [2].

Припустимо, що стани, які розглядаємо або невироджені, або мають однакову кратність виродження (тобто, $g_1 = g_2$). З приведеного вище співвідношення за допомогою наступних формул:

$$W_{21} = \sigma_{21}F, \quad (1.3)$$

де F – густина потоку фотонів в падаючій хвилі, а σ_{21} – величина, яка має розмір площі (її називають поперечним перерізом, або перерізом вимушеного випромінювання для переходу, або перерізом вимушеного переходу випромінювання) і залежить від характеристик даного переходу і

$$W_{21} = \sigma_{12}F, \quad (1.4)$$

де σ_{12} – деяка характерна величина з розмірністю площі (яка називається перерізом поглинання для переходу), яка залежить тільки від властивостей переходу отримуємо

$$dF = \sigma F[N_2 - N_1]dz, \quad (1.5)$$

$\sigma_{21} = \sigma_{12} = \sigma$, де σ – поперечний переріз переходу.

Із співвідношення 1.5 випливає, що у випадку коли $N_2 > N_1$ середовище веде себе як підсилююче (тобто, $dF/dz > 0$), а у випадку коли $N_2 < N_1$ – як поглинаюче.

Відомо, що при тепловій рівновазі станів описуються статистикою Больцмана. Так, якщо N_1^e і N_2^e – рівноважні стани, то

$$\frac{N_2^e}{N_1^e} = \exp - \left[\frac{E_2 - E_1}{kT} \right], \quad (1.6)$$

де k – постійна Больцмана, а T – абсолютна температура середовища. Таким чином, видно, що у випадку теплової рівноваги $N_2^e > N_1^e$. Відповідно до формули 1.5 середовище при цьому повинно поглинати випромінювання на частоті ν_0 . Саме це і відбувається при звичних умовах. Звісно, якщо якимось чином реалізуються нерівномірні умови, при яких $N_2 > N_1$, то середовище буде поводитись як підсилювач. В таких випадках кажуть, що в середовищі існує інверсія населеності. Мається на увазі, що різниця населеності $N_2 - N_1$ протилежна по знаку тій, яка існує при тепловій рівновазі ($N_1^e - N_2^e < 0$). Середовище, в якому створюється інверсія населеності, називають активним середовищем.

Якщо частота переходу $\nu_0 = \frac{(E_2 - E_1)}{h}$ потрапляє в НВЧ-діапазон, то підсилювач такого типу називають мазерним (англ. maser), що являється акронімом англійської назви відповідного процесу: Microwave Amplifiwave в назві на Light (світло).

Для того, щоб підсилювач перетворити в генератор, необхідно доповнити його відповідно позитивним зворотним зв'язком. В НВЧ-діапазоні це досягається тим, що активне середовище поміщають в об'ємний резонатор, який має резонанс на частоті ν_0 . У випадку лазерного генератора позитивний зворотний зв'язок зазвичай забезпечують шляхом розміщення активного середовища між двома дзеркалами з високим коефіцієнтом відбиття (наприклад, між паралельними дзеркалами, як показано на рисунку 1.2).



Рисунок 1.2 – Схематичне зображення лазера

При цьому плоска електромагнітна хвиля, яка розповсюджується в середовищі вздовж напрямку нормалі до площин дзеркал, буде по черзі відображатись від них назад і підсилуватись при кожному проході через активне середовище. Якщо одне з двох дзеркал (наприклад, дзеркало 2) зроблено частково прозорим, то за цим дзеркалом можна отримати пучок випромінювання, яке виходить з генератора [2].

Важливо розуміти, що для роботи як мазерних, так і лазерних генераторів потрібно виконання певної, так званої порогової, умови. Так, лазерний генератор починає випромінювати тоді, коли посилення в активному середовищі компенсує втрати в ньому (наприклад, втрати за рахунок часткового виходу випромінювання з резонатора через дзеркало). Згідно співвідношення 1.5 посилення за один проход в активному середовищі (тобто, співвідношення густин потоку фотонів на виході і на вході) складає

$$\exp\{\sigma[N_2 - N_1]l\}, \quad (1.7)$$

де l – довжина активного середовища. Позначимо тепер енергетичні коефіцієнти відображення дзеркал (рисунок 1.2) відповідно через R_1 і R_2 , а внутрішні втрати за один проход всередині резонатора лазера – через L_i . Якщо F – це густина потоку фотонів в резонаторі, відображених на даний момент часу від дзеркала 1 і які рухаються у напрямку дзеркала 2, то густина потоку фотонів F' , відображених від дзеркала 1 після одного повного проходу резонатора, буде складати

$$F' = F \exp\{\sigma(N_2 - N_1)l\} \times \exp\{\sigma(N_2 - N_1)l\} \times (1 - L_i)R_1. \quad (1.8)$$

На порозі генерації має виконуватись умова $F=F'$ і, відповідно, співвідношення $R_1 R_2 (1 - L_i) 2 \exp(2\sigma(N_2 - N_1)l) = 1$. Звідси випливає, що поріг генерації досягається тоді, коли інверсія населеності $N = (N_2 - N_1)$ зростає до величини, яка називається критичною, або пороговою, інверсією населеності, і дорівнює

$$N_c = - \frac{[\ln R_1 R_2 + 2 \ln \ln (1 - L_i)]}{2\sigma l} \quad (1.9)$$

Співвідношення 1.9 можна спростити, якщо ввести позначення

$$\gamma_1 = - \ln \ln R_1 = - \ln \ln (1 - T_1) , \quad (1.9a)$$

$$\gamma_2 = - \ln \ln R_2 = - \ln \ln (1 - T_2) , \quad (1.9б)$$

$$\gamma_i = - \ln \ln (1 - L_i) , \quad (1.9в)$$

де T_1 і T_2 – енергетичні коефіцієнти пропускання дзеркал (для спрощення поглинанням в дзеркалах нехтується). Підстановка співвідношень 1.8 і 1.9 дає

$$N_c = \frac{\gamma}{\sigma l}, \quad (1.10)$$

$$\text{де } \gamma = [2\gamma_i + (\gamma_1 + \gamma_2)]/2 \quad (1.11)$$

Відзначимо, що величину γ , визначену у співвідношення 1.9в, можна назвати внутрішніми логарифмічними втратами. Дійсно, якщо $L_i \ll 1$, що зазвичай виконується, то $\gamma_i = L_i$. Аналогічно, оскільки як T_1 , так і T_2 характеризують втрати за рахунок виходу випромінювання з резонатора, то величини γ_1 і γ_2 , визначаються співвідношеннями 1.9а-б, можна назвати (логарифмічними) втратами на дзеркалах резонатора. Таким чином, величину $2\gamma_i + (\gamma_1 + \gamma_2)$, яка знаходиться в чисельнику виразу 1.11, будемо називати (логарифмічними) втратами за один повний обхід резонатора, а вдвічі меншу величину у із співвідношення 1.11 – (логарифмічними) втратами за один прохід резонатора.

При досягненні порогової інверсії населеностей із спонтанного випромінювання розвивається генерація. Дійсно, фотони, які спонтанно випущені вздовж осі резонатора, ініціюють процес посилення випромінювання. Цей механізм і лежить в основі роботи лазерного генератора, який зазвичай називають

просто лазером. Згідно сенсу акроніма “лазер”, його слід використовувати тільки у відношення до генератора видимого випромінювання. Однак та сама назва широко використовується для позначення будь-якого пристрою, який випускає вимушене випромінювання, – чи то в дальньому або ближньому ІЧ-, УФ- або навіть у рентгенівському діапазонах. Щоб уточнити тип випромінювання, кажуть, відповідно, про лазери інфрачервоного, видимого, ультрафіолетового або рентгенівського діапазонів [3].

1.2 Типи лазерів

Лазери класифікують по фізичному стану активного середовища, то їх називають твердотільними, рідкими або газовими лазерами. До особливого типу відносять такі, в яких активне середовище складається з вільних електронів, які рухаються з релятивістськими швидкостями через просторово-періодичне магнітне поле (лазери на вільних електронах). Якщо лазери класифікують по довжині хвилі, які генерує випромінювання, то кажуть про лазери інфрачервоного (ІЧ), видимого, ультрафіолетового (УФ) або рентгенівського діапазонів. Відповідні довжини хвиль змінюються у межах від ≈ 1 мм (тобто, від області міліметрових хвиль) до ≈ 1 нм (тобто, до верхньої межі жорсткого рентгенівського випромінювання). Діапазон довжини хвиль може досягати, таким чином, 10^6 (видимий діапазон відповідає менш, ніж двократній зміні довжини хвилі – приблизно від 400 до 700 нм). Потужність випромінювання на виході з лазерів перекидає ще більш широкий діапазон величин. У неперервних лазерів типові потужності створюють від декількох мВт – в лазерах, які використовуються в якості джерел оптичних сигналів, до декількох МВт (≈ 5 МВт до цього часу) – в лазерах, які необхідні для деяких військових цілей (наприклад, в якості зброї направленої енергії). В імпульсних лазерів пікова потужність може бути набагато вища, ніж у неперервних, досягаючи таких гігантських величин, як 1000 ТВт (10^{15}

Вт). Крім того, тривалість імпульсу лазерного випромінювання може змінюватись в широких межах – від декількох мс, типових для так званого режиму вільної генерації (тобто, без будь-якого елементу для модуляції добротності або синхронізації мод), до близько 10 фс ($1\text{фс} = 10^{-15}\text{с}$), що типowo для деяких лазерів з синхронізацією мод. Можуть дуже змінюватись і геометричні розміри лазерів [3].

Ширина діапазону фізичних або робочих характеристик лазерів є як перевагою, так і недоліком. Якщо говорити про використання, то широкий спектр параметрів забезпечує великий потенціал можливого використання лазерів в різних областях фундаментальних і прикладних досліджень. З іншого боку, з точки зору ринку більша різноманітність пристроїв і систем може слугувати перешкодою для їх масового виробництва і відповідного здешевшення продукції.

1.2.1 Твердотільні лазери

Твердотільний — лазер, в якому активним середовищем є тверда матриця (кристал або скло), насичена якимсь йоном (напр., Nd^{3+} , Cr^{3+} , Er^{3+}) [4].

Випромінювана довжина хвилі залежить від активного йона, лазерів можна налаштувати у досить широких межах (напр., від 700 до 1000 нм для насиченого Tl^{3+} сапфіру).

Різновидами твердотільного лазера є волоконний лазер і напівпровідниковий лазер. Найпершим твердотільним лазером і одночасно першим працюючим лазером в світі був випромінювач на рубін, накачування якого здійснювалася випромінюванням імпульсної газорозрядної лампи. Цей лазер був створений в 1960 році Т. Майманом [4].

У 60-х роках, було встановлено, що напівпровідники мають великий потенціал як матеріал для лазерів.

Якщо з'єднати разом дві пластини з напівпровідників різних типів, то посередині утворюється перехідна зона. Атоми речовини, що знаходяться в ній,

здатні збуджуватися при проходженні електричного струму поперек зони і генерувати світло. Дзеркалами, необхідними для отримання лазерного випромінювання, можуть служити поліровані і посріблені грані самого кристала напівпровідника.

Серед цих лазерів кращим вважається лазер на основі арсеніду галію – з'єднання рідкісного елемента галію з миш'яком. Його інфрачервоне випромінювання має потужність до десяти ват. Якщо цей лазер охолодити до температури рідкого азоту (-200°), потужність його випромінювання можна збільшити в десять разів. Це означає, що при площі випромінюючого шару в 1 см^2 потужність випромінювання досягла б мільйони ват. Але напівпровідник з перехідним шаром такого розміру виготовити поки неможливо з технічних причин.

Можна порушувати атоми напівпровідника пучком електронів (як в твердотільних лазерах – лампою-спалахом). Електрони проникають глибоко всередину речовини, збуджуючи більшу кількість атомів; ширина випромінюючої зони виявляється в сотні разів ширша, ніж при порушенні електричним струмом. Тому потужність випромінювання таких лазерів з електронним накачуванням досягає вже двох кіловат [3].

Малі розміри напівпровідникових лазерів роблять їх дуже зручними для застосування там, де потрібен мініатюрний джерело світла великої потужності.

1.2.2 Рідинні лазери

Рідинний лазер — лазер в якому активним середовищем є рідина. Практичне застосування мають два типи рідинних лазерів, що суттєво відрізняються один від одного і доповнюють одне одного за властивостями випромінювання [5].

Рідинні лазери на барвниках допускають неперервне перенастроювання довжини хвилі λ випромінювання. При зміні барвників вони можуть генерувати λ від 320 до 1260 нм, як в неперервному так і в імпульсному режимах. Здатність до

перенастроювання обумовлена широкими електронно-коливними смугами спектрів молекул.

Основний недолік, властивий всім рідинним лазерам – відносно мала спрямованість випромінювання (велика розбіжність). Застосуванням активної корекції або методів обернення хвильового фронту можна усунути цей недолік.

1.2.3 Газові лазери

Газовий лазер – це лазер, в якому електричний струм розряджається через газ для отримання когерентного світла. Газовий лазер був першим лазером безперервного випромінювання і першим лазером, що працював за принципом перетворення електричної енергії в лазерний вихід світла. Перший газовий лазер, гелій-неоновий лазер (HeNe), був спільно винайдений ірано-американським фізиком Алі Джаваном та американським фізиком Вільямом Р. Беннеттом-молодшим у 1960 р. Він створив когерентний промінь світла в інфрачервоній області спектр 1,15 мкм. [6]

Газові лазери, що використовують багато газів, побудовані і використовуються для багатьох цілей.

Вуглекислотні лазери або CO₂-лазери можуть випромінювати сотні кіловат [6] при 9,6 мкм та 10,6 мкм, і їх часто використовують у промисловості для різання та зварювання. Ефективність CO₂-лазера становить понад 10%.

Лазери з окисом вуглецю або "CO" мають потенціал для дуже великих виходів, але використання цього типу лазерів обмежується токсичністю газу окису вуглецю. Людські оператори повинні бути захищені від цього смертоносного газу. Крім того, він надзвичайно їдкий для багатьох матеріалів, включаючи ущільнювачі, прокладки тощо.

Гелієво-неонові (HeNe) лазери можуть мати більш, ніж 160 різних довжин хвиль, регулюючи порожнину Q на пік при бажаній довжині хвилі. Це можна зробити шляхом регулювання спектральної реакції дзеркал або за допомогою

дисперсійного елемента (призма Літтроу) у порожнині. Агрегати, що працюють при 633 нм, дуже поширені в школах та лабораторіях через їх низьку вартість та майже ідеальні якості променю.

Азотні лазери працюють в ультрафіолетовому діапазоні, як правило, 337,1 нм, використовуючи молекулярний азот як середовище посилення, що прокачується електричним розрядом.

1.3 Типи лазерного випромінювання

1.3.1 Інфрачервоне випромінювання

Інфрачервоне випромінювання (від лат. *infra* — нижче, скорочено ІЧ) — електромагнітне випромінювання, що охоплює спектральну область між червоною межею видимого світла з довжиною хвилі $\lambda = 700$ нм (частота близько 430 ТГц) та мікрохвильовим випромінюванням з довжиною хвилі $\lambda \sim 1$ мм (частота близько 300 ГГц) [7]. Інфрачервоне випромінювання інколи ще називають інфрачервоним світлом.

Людське око не бачить інфрачервоного випромінювання, органи чуття деяких інших тварин, наприклад, змій та кажанів, сприймають інфрачервоне випромінювання, що допомагає їм добре орієнтуватися в темряві.

Інфрачервоне випромінювання також називають «тепловим випромінюванням» через залежність його спектру та інтенсивності, від температури а також, сприйняттям його шкірою людини як відчуття тепла. Довжини хвиль, що випромінюються тілом, залежать від температури нагрівання: чим вищою є температура, тим коротшою є довжина хвилі та вищою є інтенсивність випромінювання. Отже, зі зростанням температури, максимум інтенсивності випромінювання зміщується в бік коротших хвиль, тобто в напрямку видимого діапазону. Спектр випромінювання абсолютно чорного тіла за відносно невисоких (до декількох тисяч кельвінів) температур, лежить

здебільшого саме в цьому діапазоні. Інфрачервоне випромінювання випускає збуджені атоми або йони.

Інфрачервоні промені випромінюються усіма тілами, що мають температуру вищу за абсолютний нуль.

Приблизно 50 % загальної інтенсивності випромінювання Сонця над поверхнею моря в сонячний день припадає на інфрачервоний діапазон [8].

Значна частка (від 70 до 80 %) енергії випромінювання ламп розжарювання з вольфрамовою ниткою припадає на інфрачервоне випромінювання (вони можуть використовуватись наприклад, для сушіння чи нагрівання). При інфрачервоному фотографуванні в темряві та в деяких приладах нічного бачення лампи для підсвічування забезпечуються інфрачервоним світлофільтром, який пропускає лише інфрачервоне випромінювання. Потужним джерелом інфрачервоного випромінювання є вугільна електрична дуга з температурою ~ 3900 К, випромінювання якої близьке до випромінювання абсолютно чорного тіла, а також різні газорозрядні лампи (імпульсні та безперервного світіння). Для радіаційного обігрівання приміщень застосовують спіралі з ніхромового дроту, що нагріваються до температури ~ 950 К. Для кращої концентрації інфрачервоного випромінювання такі нагрівачі оснащуються рефлекторами.

У наукових дослідженнях, наприклад, для отримання спектрів інфрачервоного поглинання в різних областях спектру (інфрачервоної спектроскопії) застосовують спеціальні джерела інфрачервоного випромінювання: стрічкові вольфрамові лампи (довжина хвилі $\lambda = 0,76 \dots 2,5$ мкм), штифт Нернста, глобар ($\lambda = 2,5 \dots 25$ мкм), платинова смужка, покрита тонким шаром оксидів деяких рідкоземельних металів ($\lambda = 20 \dots 100$ мкм), ртутні лампи високого тиску ($\lambda = 100 \dots 1600$ мкм) тощо [9].

1.3.2 Видиме випромінювання

Видиме випромінювання — область спектра електромагнітних хвиль, що безпосередньо сприймається людським оком. Характеризується довжинами хвиль від 380 (фіолетовий колір) до 750 (червоний колір) нм [11].

Видимий діапазон відповідає енергії фотонів від 1,7 еВ (червоне світло) до 3 еВ (фіолетове світло).

Хвилі з довжиною меншою за 380 нм називають ультрафіолетовими, більшою за 750 нм. — інфрачервоними.

Чутливість людського ока до хвиль різної частоти у видимому діапазоні різна. Вона має максимум у середині діапазону (зелений колір) і зменшується в напрямках границь. Це значить, що серед джерел світла однакової інтенсивності, зелене джерело здаватиметься яскравішим, ніж червоне, або блакитне. В таблиці 1.1 наведено діапазони довжин хвиль, діапазони частот та діапазони енергії фотонів для різних кольорів спектру.

Таблиця 1.1 — Діапазони довжин хвиль, діапазони частот та діапазони енергії фотонів для різних кольорів спектру

Колір	Діапазон довжини хвиль, нм	Діапазон частот, ТГц	Діапазон енергії фотонів, еВ
Фіолетовий	380-440	790-680	2,82-3,26
Синій	440-485	680-620	2,56-2,82
Блакитний	485-500	620-600	2,48-2,56
Зелений	500-565	600-530	2,19-2,48
Жовтий	565-590	530-510	2,10-2,19
Помаранчевий	590-625	510-480	1,98-2,10
Червоний	625-740	480-400	1,68-1,98

1.3.3 Ультрафіолетове випромінювання

Ультрафіолетове випромінювання, скорочено УФ-випромінювання або ультрафіолет — невидиме оком людини електромагнітне випромінювання, що посідає спектральну область між видимим і рентгенівським випромінюваннями в межах довжин хвиль 400-10 нм [12].

Оптичні властивості речовин ультрафіолетової області спектру, значно відрізняються від їх оптичних властивостей у видимій області. Характерною межею, є зменшення прозорості (збільшення коефіцієнта поглинання) більшості тіл, прозорих у видимій області. Наприклад, звичайне скло непрозоре за інтенсивності випромінювання — $\lambda < 320$ нм; в більш короткохвильовій області, прозорі лише увіолеве скло, сапфір, фтористий магній, кварц, флюорит, фтористий літій і деякі інші матеріали. Найдальшу межу прозорості (105 нм), має фтористий літій. Для $\lambda < 105$ нм прозорих матеріалів практично немає. З газоподібних речовин найбільшу прозорість мають інертні гази, межа прозорості яких визначається величиною їхнього іонізаційного потенціалу. Найкороткохвильовішу межу прозорості, має гелій (He) — 50,4 нм. Повітря непрозоре практично при $\lambda < 185$ нм через УФ-поглинання киснем [13].

Коефіцієнт відбиття всіх матеріалів (у тому числі металів), зменшується зі зменшенням довжини хвилі випромінювання. Наприклад, коефіцієнт відбиття щойно-напиленого алюмінію (Al), одного з найкращих ніж інші матеріалів для дзеркальних покриттів, у видимій області спектру, різко зменшується за $\lambda < 90$ нм. Віддзеркалення алюмінію, значно зменшується також, унаслідок окислення поверхні. Для захисту поверхні алюмінію від окислення застосовуються покриття з фтористого літію або фтористого магнію. В області $\lambda < 80$ нм, деякі матеріали мають коефіцієнт відбиття 10-30 % (золото (Au), платина (Pt), радій (Ra), вольфрам (W) та ін.), проте за $\lambda < 40$ нм, їхній коефіцієнт віддзеркалення знижується до 1 % і менше.

1.4 Властивості випромінювання

Лазерне випромінювання характеризується надзвичайно високим ступенем монохроматичності, когерентності, направленості і яскравості. До цих властивостей можна додати п'яту, а саме – малу тривалість лазерних імпульсів, яка безпосередньо пов'язана з можливостями генерації надкоротких імпульсів світла. Ця властивість менш фундаментальна, але тим не менш є досить важливою.

1.4.1 Монохроматичність

Монохроматичне випромінювання – сукупність фотонів, що виділяються джерелом випромінювання, що мають практично однакову довжину хвилі [14].

Лазер генерує електромагнітне випромінювання певної довжини хвилі λ або частоти ν ($\nu = u/\lambda$, де u – швидкість світла в середовищі, яка заповнює резонатор). Для випромінювання, яка генерується лазером, має виконуватись визначену резонатором умову резонансу – на довжині резонатора L має вкладуватись ціле число q напівхвиль $\lambda/2$, тобто $L = q\lambda/2$.

При переході від довжини хвилі до частоти, ця умова: $\nu = qu/2L$.

Насправді енергетичний рівень атомів завжди в якійсь мірі «розмитий»: йому відповідає енергія, яка безперервно змінюється в межах деякого інтервалу значень. Тому, лазерне випромінювання характеризується не якоюсь однією певною частотою, а частотами в деякому інтервалі Δ . Коли кажуть про частоту, відповідний тому чи іншому випромінюванню, то використовують середню частоту. Набір частот, який відповідає даному випромінюванню, називають його спектральною лінією; величина Δ є шириною спектру.

Поняття монохроматичності характеризує ширину спектру випромінювання. Ідеально монохроматичним можна вважати випромінювання, ширина спектра якого

близька до нуля. Відхилення від монохроматичності характеризується ступенем монохроматичності:

$$\xi = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\Delta\nu}{\nu_0}, \quad (1.12)$$

де $\Delta\lambda$ і $\Delta\nu$ – ширина спектру, яка виражена відповідно в довжині і частоті, λ_0 і ν_0 – центральна довжина хвилі і частота.

Величини $\Delta\lambda$ і $\Delta\nu$ оцінюють на рівні інтенсивності спектральної лінії, рівної половині максимального значення.

Орієнтовно ширина спектру, виражена в довжині, складає для газових 10^{-3} - 10^{-4} нм, для твердотільних – 10^{-1} - 10^{-2} нм, для напівпровідникових – 1^{-10} нм.

З кожною резонансною частотою, яка генерується в даному резонаторі, пов'язують поняття «поздовжня мода». Замість того, щоб говорити, що випромінювання даного лазера представлені такі резонансні частоти, кажуть, що випромінювання складається з таких поздовжніх мод.

Фізична природа активного середовища визначає частину спектру, в межах якої можлива генерація, об'єм – потужність (енергію) випромінювання, а довжина і показник заломлення активного середовища впливають на частотні властивості генерації.

Випромінювання лазерів буває багатомодовим і одномодовим. На рисунку 1.3 представлені спектральні характеристики лазерних діодів, тобто розподілення випромінювання $P_{\text{випр}}$ по довжині хвиль.

Найбільш розповсюджений спосіб реалізації одномодового режиму роботи лазера полягає у використанні коротких резонаторів так, щоб посилювалась одна продольна мода. Інший метод полягає у використанні складних кінцевих дзеркал, за допомогою яких створюються два резонатори різної довжини, а лазер працює на частоті, резонансній для обох резонаторів.

Просторові діаграми випромінювання газових лазерів визначаються «попередніми модами».

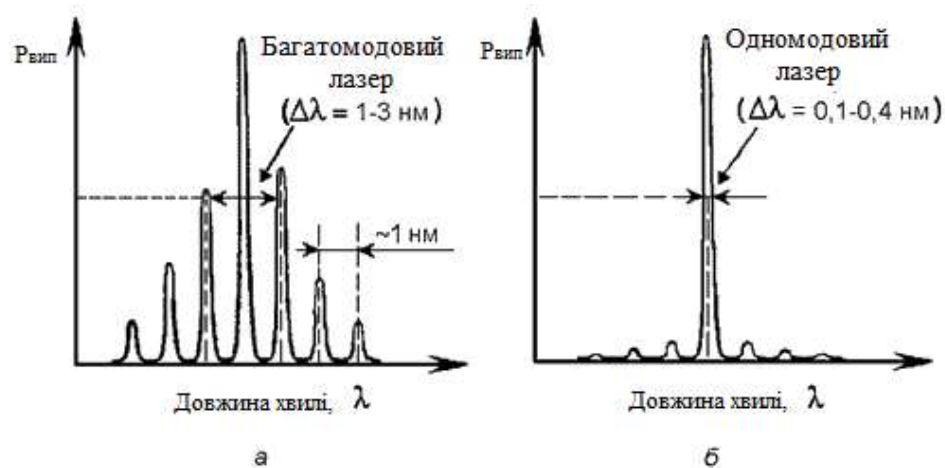


Рисунок 1.3 – Спектральні характеристики лазерних діодів: а – багатомодовий лазер; б – одномодовий лазер

Поперечні моди визначаються умовами резонансу всередині резонатора і представлені певними конфігураціями електромагнітного поля, які задаються граничними умовами в резонаторі. На рисунку 4.2а наведено приклади просторового розподілу світлової інтенсивності у вигляді прямокутних діаграм поперечних мод. Цифрами позначено кількість мінімумів інтенсивності при скануванні поперечного перерізу відповідно по горизонталі і вертикалі.

В багатьох випадках розподілення інтенсивності виявляється дуже складним через суперпозиції декількох мод.

На рисунку 1.4б наведено приклади поперечних мод з осью симетрії. Тут перша цифра означає число мінімумів інтенсивності вздовж радіуса поперечного перерізу, друга дорівнює половині кількості мінімумів інтенсивності в азимутальному напрямку.

При розповсюдженні (в тому числі при проходженні через оптичні системи) просторова форма гауссового пучка залишається незмінною, в той час, коли моди більш високого порядку не зберігають першочергового просторового розподілу.

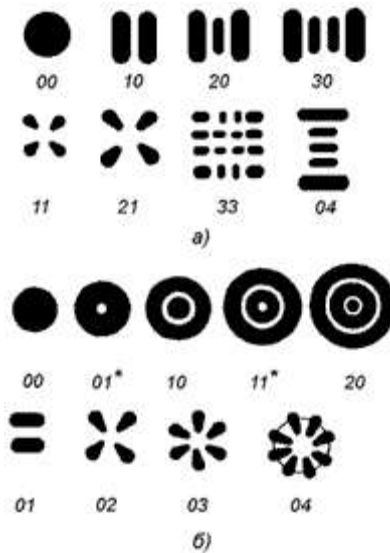


Рисунок 1.4 – Поперечні моди: а – з прямокутною симетрією; б – з осью симетрією

В процесах для запису зображення використовують типи лазерів, наведені на рисунку 1.5.

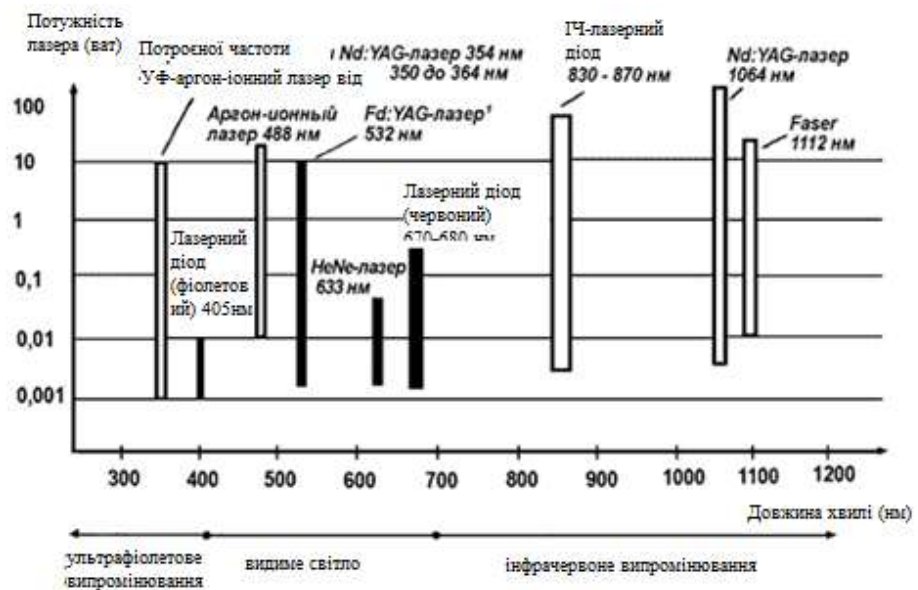


Рисунок 1.5 – Діапазони потужностей і довжини хвиль лазерів

1.4.2 Когерентність

Також однією з властивостей лазерного випромінювання є когерентність.

Когерентність (від латинського *coherens* – той, що знаходиться на зв'язку) розглядається як узгодження протікання під час декількох коливальних або хвильових процесів, які проявляються при їх складанні [15].

Коливання називаються когерентними, якщо різниця їх фаз залишається постійною в часі і при складанні коливань визначає амплітуду сумарного коливання. Два гармонічних (синусоїдальних) коливання однієї частоти когерентні.

При складанні двох гармонічних коливань з однаковою частотою, але з різними амплітудами A_1 і A_2 і фазами φ_1 і φ_2 створюються гармонічні коливання тієї ж частоти ν :

$$A_1 \sin \sin (vt + \varphi_1) + A_2 \sin \sin (vt + \varphi_2) = A \sin \sin (vt + \varphi) , \quad (1.13)$$

амплітуда результуючих коливань

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \cos (\varphi_2 - \varphi_1)} , \quad (1.14)$$

а фазовий зсув

$$\varphi = \arct \frac{A_1 \sin \sin \varphi_1 + A_2 \sin \sin \varphi_2}{A_1 \cos \cos \varphi_1 + A_2 \cos \cos \varphi_2} \quad (1.15)$$

Амплітуда результуючих коливань може змінюватись від $A_1 + A_2$ до $A_1 - A_2$ в залежності від різниці фаз .

Когерентність проявляється як властивість двох (або більше) коливальних процесів, які здатні при складанні взаємно посилювати або ослаблювати ефект взаємодії.

Для представлення когерентності зручно використовувати хвильове представлення світла. На рисунку 1.6 випромінювання зображене у вигляді «елементарних хвиль», які зароджуються в активному середовищі; їх зазвичай називають цугами. Ситуація на рисунку 1.6а відповідає некогерентному світлу, а на рисунку 1.6б – ідеально когерентному. В останньому випадку всі хвильову цуги

розповсюджуються в одному і тому ж напрямку, мають однакову довжину хвилі і знаходяться у фазі одне з одним. При примусовому випусканні вторинних цуг точно копіює первинний цуг у напрямку розповсюдження, по довжині хвиль, по фазі. На рисунку 1.6б штриховою прямою показана поверхня однакової фази (хвильовий фронт).

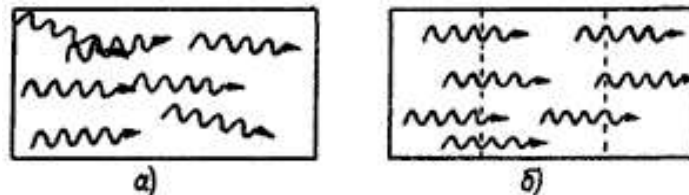


Рисунок 1.6 – Схема розповсюдження світла: а – некогерентного;
б – когерентного

Когерентність лазерного променя проявляється лише у випадках високого ступеня його монохроматичності, а також в дуже малому розходженні лазерного променя.

1.4.3 Інтерференція

Інтерференція — явище накладання двох або більше когерентних хвиль, в результаті чого в одних місцях спостерігається підсилення результуючої хвилі (інтерференційний максимум), а в інших місцях послаблення (інтерференційний мінімум) [14].

В інтерференції і дифракції проявляються хвильові властивості світла.

За допомогою різних приладів, наприклад відбивачів, заломлень можна накласти один світловий пучок на інший. Якщо виконується принцип суперпозиції, то кожен пучок буде проходити через область перекриття так, ніби іншого пучка не було зовсім. Нехай E_1 – напруженість електричного поля, яка створюється першим пучком у довільній точці А області перекриття, а E_2 – другим. Згідно принципу суперпозиції, результуюча напруженість поля в тій же точці А, яка створюється обома пучками, буде представлена сумою $E=E_1+E_2$.

У явищах інтерференції і дифракції цікавлять не абсолютні, а тільки відносні значення цих величини. Наприклад, якщо розглядати відносний розподіл освітленості на екрані, куди потрапляє світло. Таку величину прийнято називати інтенсивністю світла або інтенсивністю коливань. Позначимо її через I . За I зазвичай прийматимемо середнє за часом значення квадрату напруженості електричного поля.

Інтенсивність світла у будь-якій точці простору, де перекриваються два пучки світла:

$$E = E_1 + E_2, \quad (1.16)$$

отримаємо

$$I = I_1 + I_2 + I_{12}, \quad (1.17)$$

де I_1 – інтенсивність світла першого пучка,

I_2 – другого.

Останній доданок $I_{12} = 2(E_1 E_2)$, що враховує взаємодію пучків, називається інтерференційним членом. Якщо взяти незалежні джерела світла, наприклад дві електричні лампи, то повсякденний досвід показує, що $I = I_1 + I_2$, тобто результуюча інтенсивність дорівнює сумі інтенсивностей пучків, які накладаються, а тому інтерференційний член стає нулем. Тоді кажуть, що пучки не корельовані і не когерентні між собою. Однак, якщо пучки, які накладаються, незалежні, наприклад один є відображенням іншого від дзеркала, то в деяких випадках інтерференційний член I_{12} не стає нулем, а тому $I \neq I_1 + I_2$. В одних точках простору результуюча інтенсивність I більша, в інших менше суми інтенсивностей I_1 та I_2 . Це явище називається інтерференцією хвиль, або інтерференцією коливань. Кажуть, що джерела світла і відповідні їм пучки, які дають інтерференцію, корельовані або когерентні між собою, тобто коливальні і хвильові процеси у них протікають в часі узгоджено. Також кажуть, що когерентні пучки інтерферують, а некогерентні не інтерферують між собою.

Все вищеописане про два пучки відноситься і до випадку декількох пучків. Інтерференція двох пучків називається двохраневою, а багатьох – багатораневою.

В ідеальному випадку обидві хвилі монохроматичні і мають одну і ту ж частоту. Монохроматична хвиля – це строго синусоїдальна хвиля з постійними у часі частотою ω , амплітудою a та початковою фазою φ . Амплітуда і фаза коливань можуть змінюватись від однієї точки простору до іншої, частота одна і та ж для коливального процесу у всьому просторі. Монохроматичні коливання у кожній точці простору продовжується нескінченно довго, не маючи ні початку, на кінця у часі. Тому строго монохроматичні коливання і хвилі ніколи не бути точно реалізовані у дійсності.

Припустимо, що у даній точці обидва вектори E_1 і E_2 паралельні чи антипаралельні. Тоді можна відволіктись від векторного характеру коливань, вважаючи їх скалярними. Представимо ці коливання так:

$$E_1 = a_1 \cos(\omega t + \varphi_1), E_2 = a_2 \cos(\omega t + \varphi_2) \quad (1.18)$$

де a_1 і a_2 , φ_1 і φ_2 – амплітуди і початкові фази коливань.

Якщо ввести комплексні амплітуди $A_1 = a_1 e^{i\varphi_1}$ і $A_2 = a_2 e^{i\varphi_2}$, то в комплексній формі також коливання можна представити так:

$$E_1 = A_1 e^{i\omega t}, E_2 = A_2 e^{i\omega t}. \quad (1.19)$$

Результуюче коливання:

$$E = E_1 + E_2 = (A_1 + A_2) e^{i\omega t}. \quad (1.20)$$

Формула 1.20 описує також монохроматичне коливання з тією ж частотою ω і комплексною амплітудою $A = A_1 + A_2$. Щоб знайти амплітуду a і початкову фазу φ результуючого коливання:

$$a e^{i\varphi} = a_1 e^{i\varphi_1} + a_2 e^{i\varphi_2}. \quad (1.21)$$

Помноживши його на комплексно спряжений вираз, отримаємо

$$a^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (1.22)$$

а після відділення речової частини від уявної

$$\begin{aligned} a \cos \cos \varphi &= a_1 \cos \cos \varphi_1 + a_2 \cos \cos \varphi_2, \\ a \sin \sin \varphi &= a_1 \sin \sin \varphi_1 + a_2 \sin \sin \varphi_2, \end{aligned} \quad (1.23)$$

Звідси

$$\tan \varphi = \frac{a_1 \sin \sin \varphi_1 + a_2 \sin \sin \varphi_2}{a_1 \cos \cos \varphi_1 + a_2 \cos \cos \varphi_2} \quad (1.24)$$

На рисунку 1.7 приведена векторна діаграма складання коливань, які розглядаються, з якої також не складно отримати результати виразів 1.23 і 1.24.

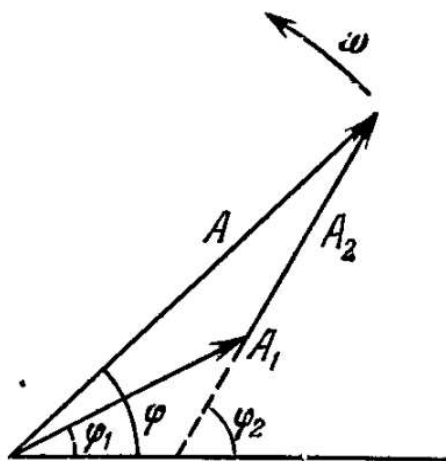


Рисунок 1.7 – Векторна діаграма складання коливань

Введемо інтенсивність коливань:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \cos (\varphi_2 - \varphi_1). \quad (1.25)$$

Якщо коливання синфазні, тобто фази φ_1 і φ_2 однакові або відрізняються на парне число π , то інтенсивність I максимальна і рівна

$$I_{\max} = (\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2})^2. \quad (1.26)$$

Якщо коливання протифазні, тобто фази φ_1 і φ_2 відрізняються на непарне число π , то можна отримати мінімальну інтенсивність:

$$I_{\min} = (\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2})^2. \quad (1.27)$$

Якщо коливання здійснюються в квадратурі, тобто їх фази відрізняються на $m\pi \pm \frac{\pi}{2}$ (m – ціле число), то $I=I_1+I_2$. В такому випадку інтенсивність результуючого коливання дорівнює сумі інтенсивностей коливань, які складаються.

Максимуми інтерференційної картини мають місце в тому випадку, коли різниця ходу хвиль, що інтерферують, рівна парному числу півхвиль $I/2$ або цілому числу довжин хвиль I

$$I_p = I_{\max} \text{ при } \Delta = 0; I; 2I; \dots mI. \quad (1.28)$$

Мінімуми інтерференційної картини виникають при різниці ходу хвиль, що інтерферують, рівному непарному числу півхвиль $I/2$

$$I = I_{\min} \text{ при } \Delta = \lambda/2; 3\lambda/2; \dots (2m+1)\lambda/2. \quad (1.29)$$

На рисунку 1.8 наведено приклад відображення інтерференційної картини.

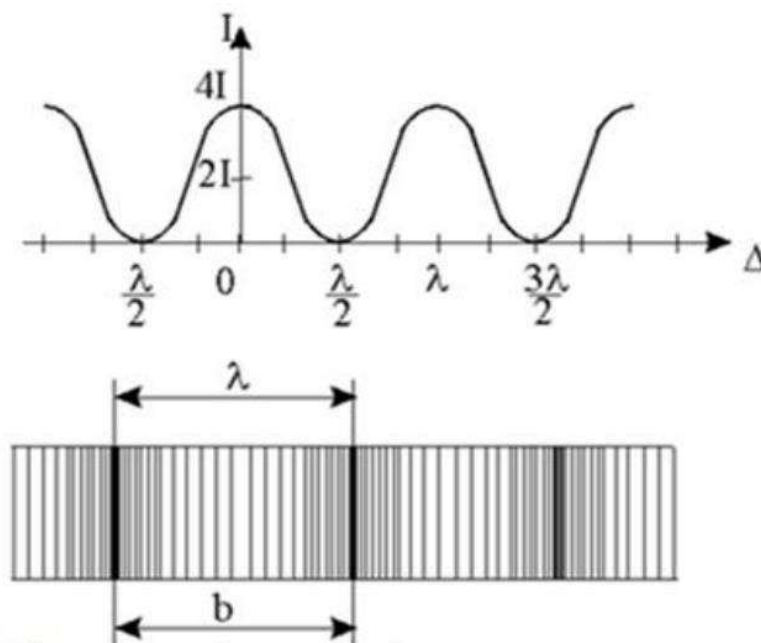


Рисунок 1.8 – Інтерференційна картина

Різниця ходу, що створюється оптичною інтерференційною схемою, складатиме число довжин хвиль, що укладаються на відрізку, який є різницею оптичних довжин шляхів хвиль, що інтерферують. Важливою кількісною

характеристикою якості інтерференційної картини є контраст (водність інтерференційних смуг), для оцінки якого використовують функцію

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (1.29)$$

Ця характеристика може змінюватися від 1 до 0. Причинами, що знижують контраст інтерференційної картини, є нерівність інтенсивностей, фонове засвічення, розмір джерела випромінювання, його немонохроматичність.

Явище інтерференції використовується, наприклад, в радіотехніці і акустиці для створення складних антен. Особливо велике значення інтерференція має в оптиці, вона лежить в основі оптичної та акустичної голографії.

1.5 Розходження лазерного променя

Розходження лазерного променя – кут з вершиною, співпадаючою з точкою перетину осі резонатора з площиною перетяжки.

Таке розходження також називають кутовим. Просторові параметри лазерного променя отримують експериментальним шляхом або розраховують за відомими параметрами резонатора. Зв'язок параметрів променя з параметрами резонатора визначається типом резонатора.

На рисунку 1.9 представлено конфокальний резонатор, який складається з двох дзеркал 1,2 з радіусами r_1 і r_2 відповідно [16]. У випадку $r_1=r_2$ перетяжка випромінювання буде знаходитись в центрі резонатора, її діаметр (для одномодового випромінювання) визначається рівнянням:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{d}{(2v)}}, \quad (1.30)$$

де $v = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число;

d – довжина резонатора.

Діаметр випромінювання на відстані z від перетяжки виражається формулою:

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{zd}\right)^2}. \quad (1.31)$$

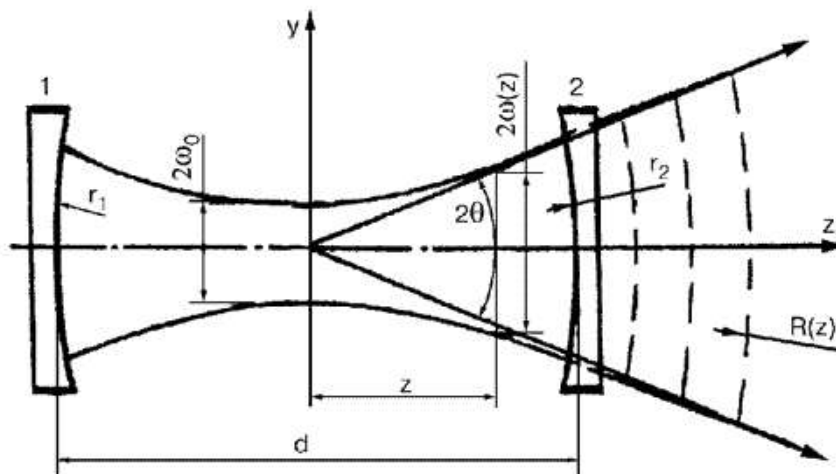


Рисунок 1.9 – Схема конфокального резонатора

Розходження променю при рівномірному розподілі енергії, що відповідає багатомодовому характеру випромінювання, визначається рівністю:

$$\theta = \frac{k_\phi \lambda}{(2y)}, \quad (1.32)$$

де $2y$ – розмір діафрагми на вихідному дзеркалі; k_ϕ – коефіцієнт, який залежить від розподілення енергії і форми активного елемента.

При рівномірному розподілі енергії для круглої діафрагми $k_\phi=1$, для гаусового променя $k_\phi=1,22$.

Без використання додаткових оптичних систем розходження газових лазерів складає одиниці кутових мінут, твердотільних – до деяких десятків мінут, напівпровідникових – до десятків градусів [16].

Розходження променю можна зменшити шляхом його колімації з фокусуванням лазерного променя (у фокусі оптичної системи розміщують діафрагму малого діаметра – просторовий фільтр) і без фокусування лазерного променя – шляхом пропускання променя через телескоп (рисунок 1.10), який перетворює паралельний пучок променів, які входять в систему, також в

паралельний пучок променів на виході з неї зі збільшеною апертурою (діаметром) пучка.

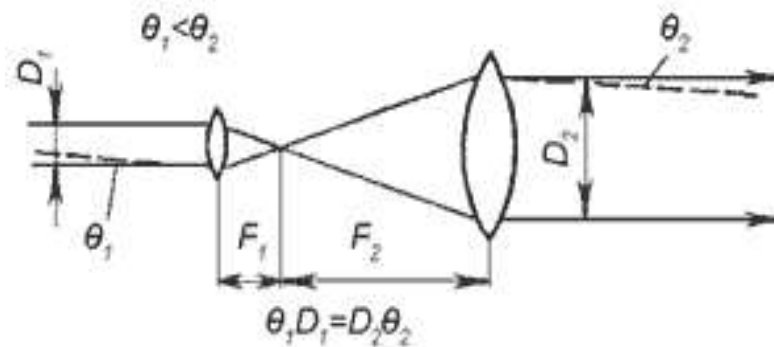


Рисунок 1.10 – Колімація пучка за допомогою двохлінзового телескопа

При цьому розходження лазерного випромінювання оберненопропорційна збільшенню β , телескопа, який використовується ($\beta = D_2/D_1$):

$$\theta_2 = \theta_1 \frac{D_1}{D_2}, \text{ оскільки } \theta_1 D_1 = \theta_2 D_2 \quad (1.33)$$

де θ_1 , θ_2 – розходження пучка на вході в телескоп і на виході з нього відповідно;

D_1 , D_2 – діаметр пучка на вході в телескоп і на виході з нього відповідно.

При цьому лазерний пучок повинен повністю заповнювати телескоп.

Мінімальне значення розходження визначається дифракційними явищами оптичного хвильового фронту на вихідному компоненті колімуючої системи.

В технічній характеристиці (паспорті) зазвичай вказують у якості розходження кут θ_2 .

1.6 Вимірювання кута розходження променю

Визначення розходження пучка лазерного випромінювання відбувається шляхом порівняння розподілення інтенсивності $I(x)$, отриманих на різних відстанях (y_1 і y_2) від вихідного вікна джерела випромінювання (рисунок 1.11). Порівняння відбувається за інтервалом значень Δx , всередині якого інтенсивність

пучка перевищує 50% від максимального значення (так звана “напівширина” розподілення інтенсивності, або “напівширина пучка”).

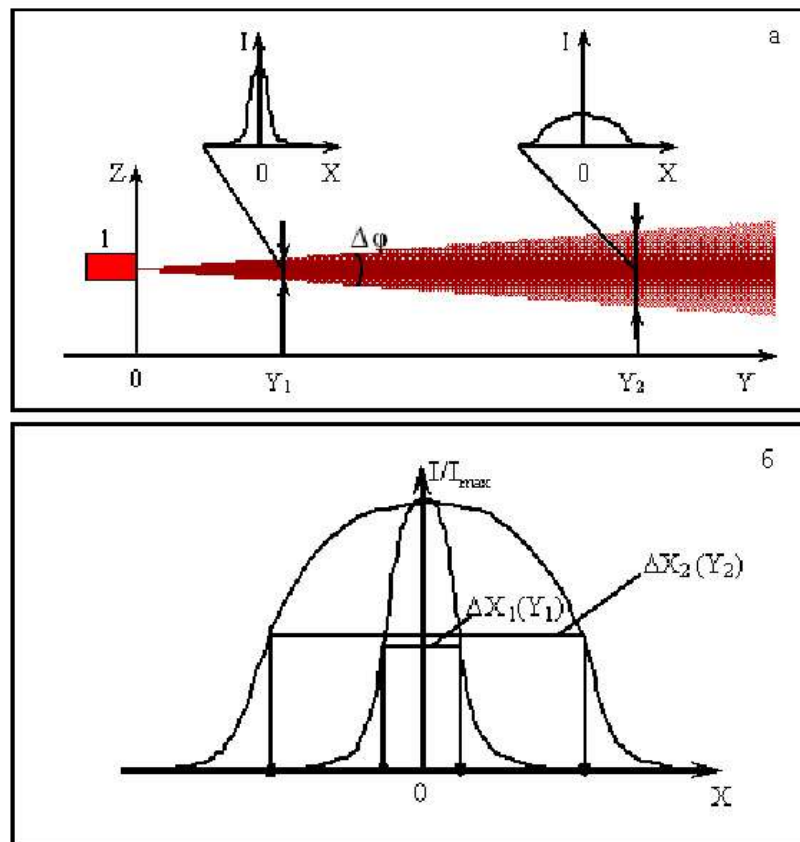


Рисунок 1.11 – Схема, яка пояснює методику оцінки розходження випромінювання: а – геометрія схеми у площині yz ; б – розподілення інтенсивності у перерізі пучка випромінювання в координаті x (профіль пучка випромінювання) на різних відстанях (y_1 і y_2) від вихідного джерела випромінювання

На рисунку 1.11: 1 – джерело випромінювання; $\Delta\varphi$ – розходження пучка випромінювання у площині yz ; y_1 , y_2 – відстань від вихідного вікна джерела випромінювання при проведенні вимірювань профіля пучка випромінювання; Δx_1 – напівширина пучка при y_1 ; Δx_2 – напівширина пучка при y_2 .

Розходження пучка ($\Delta\psi$) оцінюється за наступною формулою:

$$\Delta\psi = (\Delta x_2 - \Delta x_1)/(y_2 - y_1). \quad (1.34)$$

Високу направленість випромінювання і можливість фокусування випромінювання в пляму надзвичайно малих розмірів забезпечує просторова когерентність пучка лазера. Направленість випромінювання характеризується тілесним кутом, в якому розповсюджується більша частина випромінювання. Чим менший тілесний кут, тим більша направленість випромінювання. Часто в якості параметра ОКГ використовується не тілесний кут, а плоский кут розходження пучка. Якщо пучок, який розходить, представляє собою конус, то між плоским і тілесним кутом існує простий зв'язок. Тілесний кут ω , відповідний до плоского кута θ , розраховується за формулою:

$$\omega = 2\pi \left(1 - \cos \cos \frac{\theta}{2}\right). \quad (1.35)$$

Для кутів $\theta < 60$ з достатньою для практики точністю використовується формула

$$\omega = \frac{\pi}{4} \theta^2, \quad (1.36)$$

де ω виражається в радіанах. Теоретично плоский кут розходження пучка ОКГ з плоскопаралельним резонатором можна визначити як кут дифракції на вихідному отворі. Кутова відстань першого дифракційного мінімуму від центру дифракційної картини у випадку дифракції плоскої хвилі на круглому отворі діаметру D дорівнює:

$$\theta_D = \frac{1,22\lambda}{D} \quad (1.37)$$

Ширина дифракційного максимуму не рівна половині інтенсивності для основної моди резонатора з плоскими дзеркалами задається виразом

$$2\theta_{\text{пр}} \approx \frac{\lambda}{D}. \quad (1.38)$$

Це значення являється гранично допустимим кутом розходження пучка лазера. Практично ця дифракційна межа, ще не досягнута. Це пояснюється значенням багатьох поперечних мод резонатора, а головним чином, неоднорідністю активної речовини. Розходження теоретичних даних з практичним результатом пояснюється ще й тим, що часто за діаметр випромінюючої плями

береться діаметр всієї плями, між тим, як випромінювання відбувається часто у вигляді окремих «волокон» [17].

Звісно, чим менше кутове розходження променю, тим точніше вона має бути виміряна. На жаль, до цих пір відсутні точні методи визначення кута розходження пучка ОКГ, особливо імпульсного.

На рисунку 1.12 показано схему, за якою вимірюється кут розходження променю безперервних ОКГ.

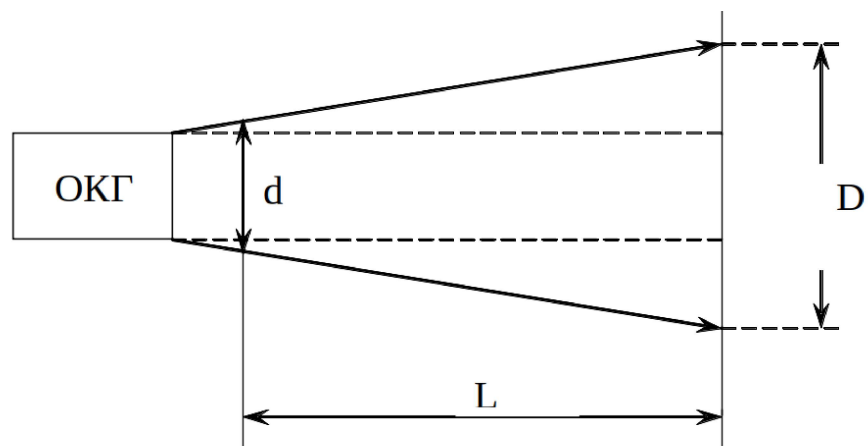


Рисунок 1.12 – Схема вимірювання кута розходження променю ОКГ

Екран D встановлюється перпендикулярно до осі пучка на відстані L від вихідного отвору генератора. Якщо випромінювання відбувається у видимій області спектру, то візуально вимірюються діаметри d і D перерізу пучка відповідно на виході з приладу і на екран. Кут розходження

$$\theta = \arctg \frac{D-d}{2L}. \quad (1.39)$$

У зв'язку з невеликим значенням кута θ точність вимірювань дуже залежить від точності вимірювань діаметрів. Зазвичай вони беруться на рівні половинної інтенсивності. Для візуальної оцінки цей рівень визначається наближено. Для підвищення точності бажано збільшити відстань L [18].

1.7 Модель діаграми випромінювання

1.7.1 Діаграма спрямованості у загальному вигляді

Діаграма спрямованості променя – це графічне зображення радіаційних характеристик променя. Схема, як правило, є графічним зображенням спрямованих характеристик. Вона представляє відносну інтенсивність випромінювання енергії або величину напруженості електричного або магнітного поля як функцію напрямку до променя. Діаграми променя вимірюються або генеруються за допомогою моделювальних програм на комп'ютері, наприклад, для графічного відображення спрямованості [19].

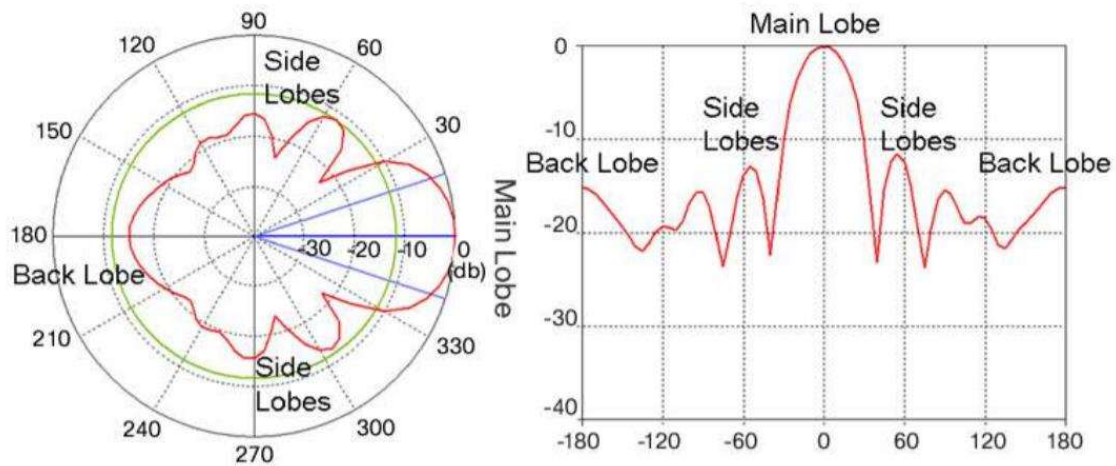


Рисунок 1.13 — Графічне зображення діаграми спрямованості променя:
 а — у полярній системі координат; б — у декартовій системі координат

Використовується багато форматів відображення. Декартові системи координат, як і полярні системи координат, є загальними. Основною метою є відображення діаграми випромінювання, яка є репрезентативною або горизонтально (по азимуту) для повного представлення на 360°, або вертикально (у висоті), переважно лише на 90 або 180 градусів. У декартовій системі координат дані променя можна представити краще. Оскільки ці дані також можна

роздрукувати у вигляді таблиці, зазвичай кращим є більш описове подання у вигляді кривої геометричного місця в полярній системі координат. На відміну від декартової системи координат, це вказує напрямок безпосередньо [20]. Графічне зображення діаграми випромінювання представлено на рисунку 1.13.

Для зручності обробки, прозорості та максимальної універсальності схеми випромінювання зазвичай нормалізуються на зовнішній край системи координат. Це означає, що вимірне максимальне значення вирівнюється до 0° і наноситься на верхній край діаграми. Подальші вимірні значення діаграми випромінювання зазвичай відображаються відносно цього максимального значення в дБ (децибелах).

Типовий графік полярного випромінювання. Більшість променів демонструють малюнок «часток» або максимумів випромінювання. Найбільша пелюстка в бажаному напрямку поширення називається "основною пелюсткою". Інші частки називаються "бічними частками" і зазвичай представляють випромінювання в небажаних напрямках (рис. 1.14).

Масштаб на схемі може бути різним. Загальноживаними є три типи шкал побудови графіків; лінійний, лінійний логарифмічний та модифікований логарифмічний. Лінійна шкала підкреслює основний пучок випромінювання і, як правило, пригнічує всі бічні частки, оскільки вони часто мають порядок менше соті частки основних часток. Однак лінійна логарифмічна шкала добре відображає бокові пелюстки і є кращою, коли рівень всіх бічних пелюсток важливий.

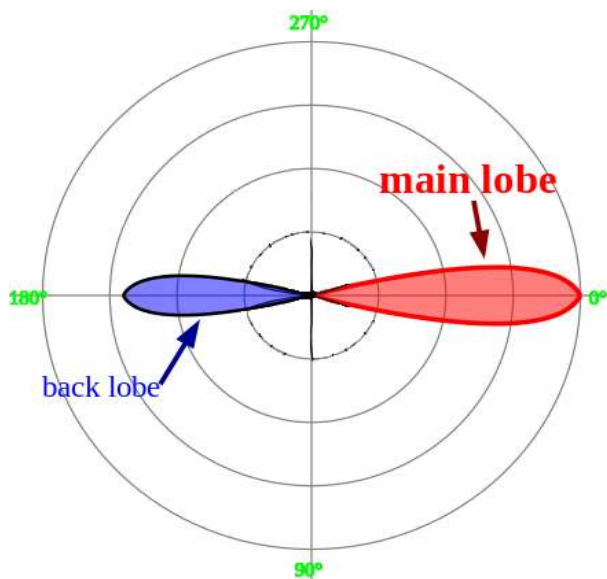


Рисунок 1.14 — Графічне зображення “основних” і “бокових” пелюсток променю

Також діаграма спрямованості може бути представлена у вигляді 3D-діаграми (рис. 1.15). 3D-діаграми можуть бути представлені як в декартовій системі, так і в полярних координатах.

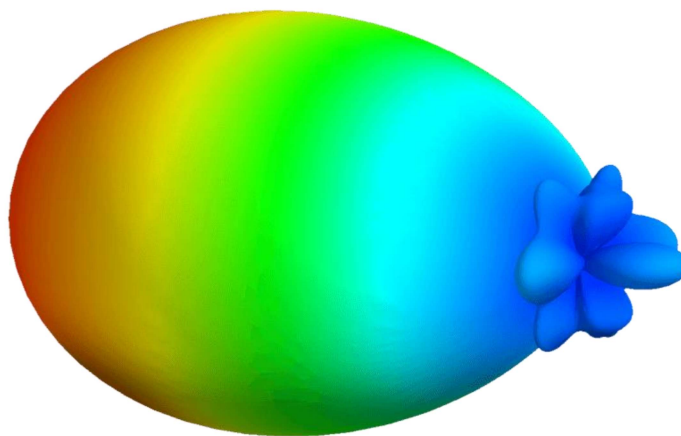


Рисунок 1.15 — Зображення діаграми спрямованості у вигляді 3D-діаграми

1.7.2 Діаграма спрямованості круглої площадки

Знаходження кута розходження та діаграми спрямованості променя достатньо добре описується за допомогою геометричної оптики. Однак користуватись ним можна не завжди. Адже в одних випадках це дає досить точні результати, а в інших — помилки.

В більшості випадків закони геометричної оптики не можна використовувати для безпосередніх розрахунків. Іноді їх використовують для наближених розрахунків частини діаграми. Але, в свою чергу, закони геометричної оптики дають можливість просто і достатньо точно знайти розподіл поля для променів. В такому випадку способи геометричної оптики надають достатнє наближення до точної теорії, якщо виконуються нерівності: $\lambda \ll l$; $\lambda \ll R_{\min}$, де l — лінійні розміри тіла, на яке потрапляє випромінювання [21].

Оскільки ми маємо ситуацію, коли відбувається формування променя об'єктивом, то розглянемо випромінювання для круглих площадок (рис. 1.16).

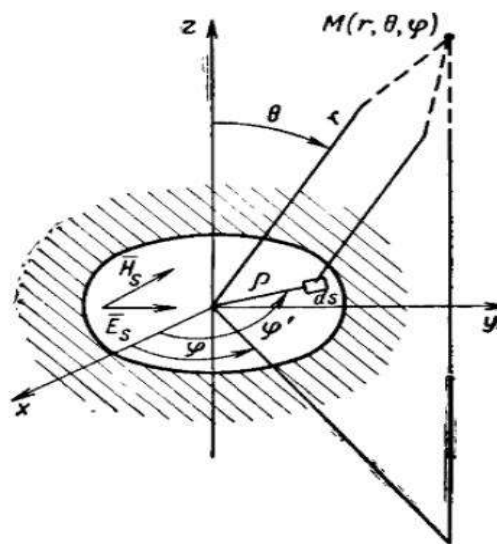


Рисунок 1.16 — Полярна система координат для аналізу поля випромінювання круглих площадок

Нехай електромагнітне поле в межах площадки будемо вважати лінійно поляризованим з електричним вектором E_s — паралельним осі y . Тоді вихідним виразом для розрахунку комплексних поля і його складових в дальній зоні будуть:

$$E = j \frac{1 + \cos \theta}{2\lambda} \frac{e^{-jkr}}{r} \int_S E_s e^{jkr'} \sin \theta \cos(\varphi - \varphi') dS, \quad (1.40)$$

$$E_\theta = j \frac{1 + \cos \theta}{2\lambda} \frac{e^{-jkr}}{r} \sin \varphi \int_S E_s e^{jkr'} \sin \theta \cos(\varphi - \varphi') dS, \quad (1.41)$$

$$E_\varphi = j \frac{1 + \cos \theta}{2\lambda} \frac{e^{-jkr}}{r} \cos \varphi \int_S E_s e^{jkr'} \sin \theta \cos(\varphi - \varphi') dS. \quad (1.42)$$

Крім того,

$$\vec{E} = E_\theta \vec{1}_\theta + E_\varphi \vec{1}_\varphi. \quad (1.43)$$

Для круглої площадки зручніше використовувати полярну систему координат ρ, φ' (рис. 1.13). В полярних координатах:

$$r' = \rho, dS = \rho d\varphi' d\rho. \quad (1.44)$$

Враховуючи (1.44), формулу 1.40 запишемо у вигляді:

$$E = \int_0^{2\pi} \int_0^a E_s(\rho, \varphi') e^{jk\rho \sin \theta \cos(\varphi - \varphi')} \rho d\varphi' d\rho. \quad (1.45)$$

Для зручності можна ввести наступні змінні:

$$R = \frac{\rho}{a}; u = ka \sin \theta = \frac{kd}{2} \sin \theta,$$

де $d = 2a$ — діаметр площадки.

Тоді вираз (1.45) прийматиме наступний вигляд:

$$E = Aa^2 \int_0^{2\pi} \int_0^1 E_s(R, \varphi') e^{juR \cos(\varphi - \varphi')} R d\varphi' dR. \quad (1.46)$$

Для поля в головних площинах (xOz і yOz) отримаємо наступні формули:

$$E_H = Aa^2 \int_0^{2\pi} \int_0^1 E_s(\rho, \varphi') e^{juR \cos \varphi'} R d\varphi' dR, \quad (1.47)$$

$$E_E = Aa^2 \int_0^{2\pi} \int_0^1 E_s(\rho, \varphi') e^{juR \sin \varphi'} R d\varphi' dR. \quad (1.48)$$

Формули (1.47) і (1.48) дозволяють знайти поле випромінювання при різному розподілі поля на площадках.

Випадок, коли амплітуда поля на площадці постійна $E_s = E_0 = \text{const}$. Такий рівноамплітудний розподіл поля в розкритті променю зустрічається рідко, тому

він зазвичай розглядається як ідеальний. В багатьох практичних випадках поле ближче до краю площадки зменшується, іноді до нуля. Однак аналіз такого ідеалізованого випадку разом з реальними, дозволяє краще оцінити вплив розподілу амплітуд на характеристики випромінювання.

Відповідно до формули (1.46) поле випромінювання буде:

$$E = Aa^2 E_0 \int_0^1 R dR \int_0^{2\pi} e^{juR \cos(\varphi - \varphi')} d\varphi = Aa^2 E_0 2\pi \int_0^1 R J_0(uR) dR = ASE_0 \frac{2J_1(u)}{u}. \quad (1.50)$$

Тут використовуються співвідношення:

$$J_0(z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{jz \cos \varphi} d\varphi, \quad (1.51)$$

$$zJ_1(z) = \int z J_0(z) dz, \quad (1.52)$$

де $J_n(z)$ — функція Бесселя n -го порядку від аргументу z .

В іншому ж випадку, коли амплітуда спадає ближче до країв площадки, закон спадання поля до краю круглого отвору може бути різним. Розглянемо випадок, коли поле змінюється по наступному закону:

$$E_s = E_0(1 - R^2)^n. \quad (1.53)$$

$R = \rho/a$; $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ Криві зміни амплітуди поля вздовж радіуса площадки для різних n показано на рисунку 1.17.

Такий випадок має найбільше практичне значення. Внаслідок осової симетрії:

$$E_H = E_E = E = AE_0 2\pi a^2 \int_0^1 (1 - R^2)^n J_0(uR) R dR = AE_0 S \Lambda_{n+1}(u) / (n + 1), \quad (1.54)$$

де

$$\Lambda_n(u) = \frac{n!}{(u/2)^n} J_n(u) \quad (1.55)$$

— табульована лямбда-функція.

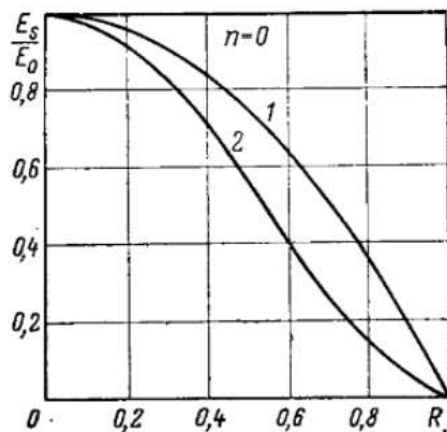


Рисунок 1.17 — Криві розподілу амплітуди напруги поля по радіусу круглої площадки для випадку, коли поле змінюється за законом $E_s = E_0(1 - R^2)^n$

Отримані вирази для поля випромінювання дозволяють проаналізувати направлені властивості площадки. Враховуючи значення множника A (1.56) і позначивши для скорочення

$$A = j \frac{1 + \cos \theta}{2\lambda} \frac{\exp(-jkr)}{r}, \quad (1.56)$$

$$u = \frac{kd}{2} \sin \theta \quad (1.57)$$

отримаємо наступний вираз для діаграм направленості:

а) $E_s = E_0 = \text{const}$:

$$F(\theta) = \frac{1 + \cos \theta}{2} \frac{2J_1(u)}{u}, \quad (1.58)$$

б) $E_s = E_0(1 - R^2)^n$:

$$F(\theta) = \frac{1 + \cos \theta}{2} \Lambda_{n+1}(u). \quad (1.59)$$

Всі приведені вище вирази складаються з двох множників. Перший множник представляє собою діаграму направленості елементарної площадки (джерело Гюйгенса), а другий — так званий “множник решітки”, що визначає направлені властивості системи випромінювачів (в даному випадку сукупності елементарних площадок), що розглядаються як ненаправлені. Таким чином, наведені вище формули ілюструють теорему про перемноження діаграм.

Змінами першого множника зазвичай можна знехтувати, тобто прирівняти його до одиниці (особливо в межах невеликих змін кута θ), оскільки він змінюється дуже повільно в порівнянні зі змінами другого множника. Це ілюструє рисунок 1.18.

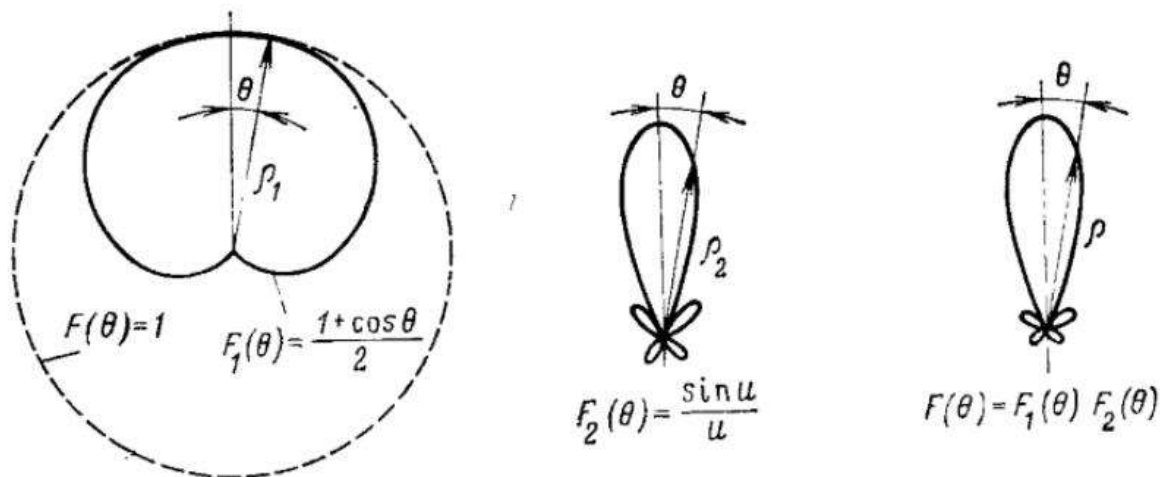


Рисунок 1.18 — Геометричне множення діаграм направленості. Результуюча діаграма $F(\theta) = \rho(\theta)$ отримується шляхом множення радіус-вектора ρ_1 і ρ_2 , для кожного значення θ

З приведених вище рисунків і формул випливає, що максимум випромінювання утворених синфазно площадок отримується в напрямку нормалі до них (тобто, при $u = 0$). Фізично це цілком очевидно. В напрямку нормалі довжина шляху від всіх елементів поверхні площадки до точки спостереження однакова (розуміємо, що точка спостереження M достатньо далеко). Відповідно, при синфазному збудженні площадки всі елементи її поверхні будуть створювати в точці спостереження елементарні поля, які співпадають по фазі. Результуюча напруженість буде дорівнювати арифметичній сумі всіх складників і досягне максимального значення. При відхиленні від нормалі з'явиться різниця ходу променів від окремих елементів поверхні площадки, внаслідок чого утворені ним поля не будуть синфазними і результуюча напруженість поля зменшиться.

На рисунку 1.19 наведена діаграма спрямованості круглої площадки з незмінним і спадаючим до країв розподілом амплітуд поля (синфазне збудження).

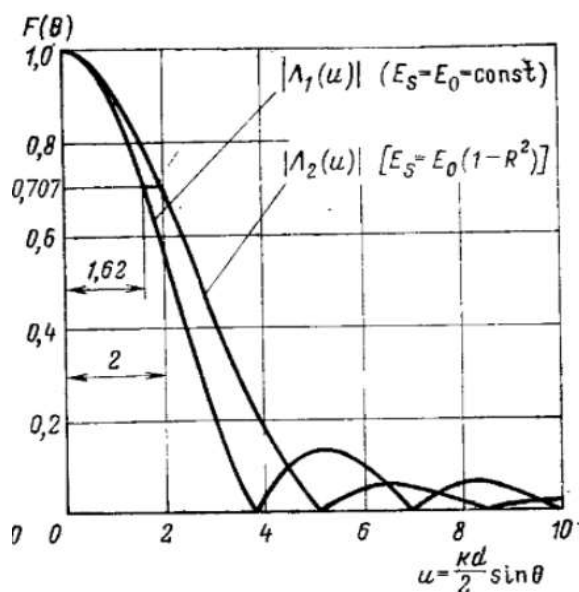


Рисунок 1.19 — Діаграма спрямованості круглої площадки з незмінним і спадаючим до країв розподілом амплітуд поля (синфазне збудження)

З рисунку 1.19 видно, що зменшення амплітуди поля до краю площадок призводить до зменшення рівня бокових пелюсток і до розширення головної пелюстки.

Визначимо ширину діаграми спрямованості по половинній потужності. Для цього по кривим, зображеним на рисунку 1.19 визначимо значення u , при яких $F(\theta) = 0,707$:

а) Для круглої площадки з $E_S = E_0 = \text{const}$ з графіка визначаємо, що $u = \frac{kd}{2} \sin \theta = 1,62$, звідки ширина діаграми спрямованості в градусах для обох площин Е і Н буде дорівнювати:

$$(2\theta_{0,5})^\circ = 60\lambda/d. \quad (1.60)$$

б) Для круглої площадки з $E_S = E_0(1 - R^2)^n$ ширина діаграми спрямованості залежить від показника степеню n :

В таблиці 1.2 наведено основні параметри, які характеризують

$$\text{при } n=1 \quad (2\theta_{0,5})^\circ = 73\lambda/d; \quad (1.61)$$

$$\text{при } n=2 \quad (2\theta_{0,5})^\circ = 84\lambda/d \quad (1.62)$$

направлені властивості для прямокутної і круглої площадок при різному розподілі поля на них, враховуючи, що $a \gg \lambda$ і $d \gg \lambda$.

Таблиця 1.2 — Основні параметри направлених властивостей для прямокутної і круглої площадок

Тип площадки	Розподіл поля на площадці	Ширина діаграми по половинній потужності (град)	Амплітуда 1-ї бокової пелюстки		Коефіцієнт використання площі розкриву ν
			%	дБ	
Прямокутна	$E_S = E_0 = \text{const}$	$51 \frac{\lambda}{a}$	21	-13,5	1,00
Прямокутна	$E_S = E_0 \cos \frac{\pi x'}{a}$	$68 \frac{\lambda}{a}$	7	-23,1	0,81
Кругла	$E_S = E_0 = \text{const}$	$60 \frac{\lambda}{d}$	13	-17,6	1,00
Кругла	$E_S = E_0(1 - R^2)$	$73 \frac{\lambda}{d}$	6	-24,6	0,75
Кругла	$E_S = E_0(1 - R^2)^2$	$84 \frac{\lambda}{d}$	3	-30,6	0,56

Для неперевних малопотужних лазерів поляризаційних характер випромінювання можна вимірювати, встановлюючи на шляху променю поляризатор (аналізатор), що обертається, і визначаючи залежність інтенсивності

від кута його повороту θ . Аналізатор пропускає тільки ту складову вектора поляризації лазерного випромінювання E_1 , яка паралельна його площині пропускання, тобто $E_2 = E_1 \cos(\theta)$. Інтенсивність пропорційна квадрату модуля світлового вектора ($I \sim E^2$), том інтенсивність світла після аналізатора

$$I_2 = I_1 \cos^2(\theta). \quad (1.63)$$

Різні дефекти активного середовища й особливості використовуваного оптичного резонатора можуть змінювати стан поляризації лазерного пучка.

В свою чергу, діаграма спрямованості залежить від співвідношення ширини променя до довжини хвилі. А зменшення амплітуди поля призводить до зменшення амплітуди бокових пелюстків і до розширення головного пелюстка.

Ширина діаграми спрямованості лазерного променя залежить від діаметру площадки та довжини хвилі (для ІЧ-випромінювання від 800 нм).

2 ОСНОВИ АКУСТИЧНОЇ РОЗВІДКИ

2.1 Основи захисту інформації

Інформація – будь-які відомості та/або дані, які можуть бути збережені на матеріальних носіях або відображені в електронному вигляді [22].

Відповідно до Закону України "Про інформацію", будь-яка інформація є відкритою, крім інформації з обмеженим доступом. Інформація з обмеженим доступом є конфіденційна, таємна та службова.

Конфіденційною є інформація про фізичну особу, а також інформація, доступ до якої обмежено фізичною або юридичною особою, крім суб'єктів владних повноважень. Конфіденційна інформація може поширюватися за бажанням (згодою) відповідної особи у визначеному нею порядку відповідно до передбачених нею умов, а також в інших випадках, визначених законом.

Відносини, пов'язані з правовим режимом конфіденційної інформації, регулюються законом [22].

Також існує визначений список основних загроз інформаційної безпеки [23]: несанкціоноване поширення відомостей (витік інформації) і несанкціонований цілеспрямований або випадковий вплив на інформацію або її носія.

Три можливі форми витоку інформації:

- 1) розповсюдження;
- 2) розвідка;
- 3) несанкціонований доступ до інформації.

Розвідка – цілеспрямована діяльність для отримання відомостей в інтересах інформаційного забезпечення військово-політичного керівництва іноземної держави або організації-конкурента (промисловий шпіонаж).

Розвідка може бути агентурною або технічною. Агентурна розвідка проводиться штатними (оперативними) співробітниками (особами, які знаходяться в штаті спецслужби іноземної держави або організації-конкурента) за допомогою агентів (осіб, конфіденційно співпрацюючих зі спецслужбою іноземної держави або конкуруючої організації). Технічна розвідка, в свою чергу, ведеться з використанням спеціальних технічних систем, засобів і апаратури розвідки, призначених для використання вразливостей безпеки об'єкта інформаційної діяльності (ОІД).

Сукупність вразливостей, апаратури розвідки, джерел інформації і середовища розповсюдження сигналу називається технічним каналом витоку інформації (ТКВІ).

Існують наступні форми представлення інформації, яка потребує захисту:

- документована інформація – інформація, що зафіксована на матеріальному носії шляхом документування інформації з реквізитами, які дозволяють віднести таку інформацію або в установлених законодавством України випадках її матеріальний носій;
- телекомунікаційна інформація – інформація, яка обробляється технічними засобами або передається по лініям (каналам) зв'язку;
- акустична (мовна) інформація – інформація, носіями якої є акустичні сигнали. В тому числі, якщо джерелом інформації є людська мова, акустична інформація називається мовною або усною.

Під узагальненим терміном "обробка інформації" розуміють сукупність операцій збору, накопичення, введення, виведення, прийому, передачі, запису, зберігання, реєстрації, знищення, перетворення і відображення інформації.

У випадку акустичної (мовної) інформації частоти акустичних коливань в межах 20 – 20 000 Гц називають звуковими (їх може сприймати людське вухо), нижче 20 Гц – інфразвуковими, а вище 20 000 Гц -ульตราзвуковими.

Джерелом акустичних коливань, в першу чергу, є механічні коливання систем, наприклад, органів голосу людини, а вторинні джерела – перетворювачі різного типу, наприклад, гучномовці.

В будь-якому випадку, незалежно від джерела утворення, акустичні коливання представляють собою поздовжні механічні хвилі, що випускаються джерелом (коливальним тілом) і розповсюджуються в різних середовищах (газах, рідинах, твердих тілах).

Форма акустичних коливань впливає на тип сигналу – простий (тональний) або складний. Тональний сигнал – сигнал, який створюється коливанням, що відбувається по синусоїдальному закону. Складний сигнал включає в себе цілий спектр гармонічних складників. Мовний сигнал являється складним акустичним сигналом.

Можна виділити три основні групи характеристик для того, щоб охарактеризувати мову [24,25]:

- семантична або смислова сторона мова – характеризує сенс тих понять, які передаються з її допомогою;
- фонетичні характеристики мови – дані, які характеризують мову з точки зору її звукового складу. Основною фонетичною характеристикою звукового складу є частота зустрічі в мовленні різних звуків і їх сполучень;
- фізичні характеристики – величини і залежності, які характеризують мову як акустичний сигнал.

При об'єднанні звуків мовлення в певні комбінації утворюються деякі смислові елементи, що відрізняються певними фізичними параметрами: потужністю, звуковим тиском, частотним спектром, часом звучання.

Простір, в якому відбувається розповсюдження акустичних коливань, називають акустичним полем, напрямком розповсюдження акустичних коливань – акустичним променем, а поверхня, яка поєднує всі суміжні точки поля з однаковою фазою коливань частинок середовища, – фронтом хвилі.

Теоретичний розрахунок рівня інтенсивності акустичних коливань від реальних джерел є досить складним, з урахуванням всіх параметрів і факторів, які впливають. Тому, набагато частіше рівень інтенсивності акустичних коливань вимірюються у певному напрямку і на певній відстані від джерела звуку, а лише потім розраховують цю інтенсивність для будь-якої відстані. При цьому необхідно враховувати послаблення сигналу при проходженні через конструкції приміщення, в якому розповсюджуються сигнал, тобто, коефіцієнт затухань.

2.2 Види акустичної розвідки

Акустична розвідка (АР) – отримання інформації шляхом прийому і аналізу акустичних сигналів інфразвукового, звукового, ультразвукового діапазонів, які розповсюджуються у повітряному середовищі від об'єктів розвідки [26].

Акустичні коливання, які використовуються (знімаються) при акустичній розвідці, утворюються тілами і механізмами, які утворюють коливання або вібрації. Наприклад, голосові зв'язки людини, рухомі елементи механізмів, телефони, звукопідсилюючі системи і т.д.

Встановлення додаткових засобів акустичної розвідки, а відповідно, і необхідність потрапляння на об'єкт інформаційної діяльності, залежить від техніки, яка використовується для проведення розвідки.

Випадки, коли необхідно проникнення на об'єкт для встановлення додаткових засобів розвідки [26]:

- перехват акустичної інформації за допомогою засобів радіопередачі. До таких засобів відноситься широка номенклатура радіозакладок (закладних пристроїв), призначенням яких є передача по радіоканалу акустичної інформації, яка отримується на об'єкті. При використанні таких закладних пристроїв необхідністю є наявність приймача, за допомогою якого здійснюється прийом

інформації від радіозакладки. Вони призначені для автоматичного запису інформації у випадку, якщо вона з'являється на об'єкті;

- перехват акустичної інформації за допомогою ІЧ-передавачів. Передача інформації може здійснюватись по ІЧ каналу. Такі закладні пристрої досить складно виявити, а строк роботи таких приладів – декілька днів. Хоча прослухати інформацію, яка передається такими закладними пристроями, можна прослухати лише за допомогою спеціального приймача і тільки при прямому візуальному контакті. Тому, вони зазвичай розміщуються біля вікон, вентиляційних отворів і т.і., що полегшує їх пошук і, відповідно, виявлення;

- закладки, які використовують в якості носія акустичної інформації мережу 220 В і телефонні лінії. Схожість цих закладок в тому, що вони використовують в своїй роботі принцип низькочастотного ущільнення каналу передачі інформації. Оскільки в "чистих" лініях (220 В) і в телефонних лініях присутні тільки сигнали на частотах 50 Гц і 300-3500 Гц відповідно, то передавачі таких закладок, транслюючи свою інформацію на частотах 100-250 кГц, не заважають роботі цих мереж. При підключення до цих ліній спеціальних приймачів, можна знімати інформацію, яка передається, на дальність до 500 м;

- диктофони – пристрої, які записують голосову інформацію на магнітний носій (стрічку, внутрішню мікросхему пам'яті). Сучасні цифрові диктофони записують інформацію у внутрішню пам'ять, що дозволяє записувати розмови тривалістю до декількох годин. Такі диктофони практично безшумні, мають можливість переміщення записаної інформації в пам'ять комп'ютера для її подальшої обробки (підвищення розбірливості мови, виділення корисних фонових сигналів і т.д.);

- проводні мікрофони встановлюються в приміщенні, в якому ведеться розвідки, і з'єднуються головною лінією з приймачем. Мікрофони встановлюються непомітно, або маскуються під предмети побуту, офісну техніку і т.д. Такі системи

забезпечуються передачу аудіосигналу на дальність до 20 м. При використанні активних мікрофонів – до 150 м.

Акустична розвідка поділяється на розвідку повітряними, вібраційними, акустоелектричними, гідроакустоелектричними, параметричними і оптико-електричними каналами витоку інформації. Така класифікація відбувається в залежності від фізичної природи виникнення таких сигналів, середовища розповсюдження коливань і можливих способів перехоплення такої інформації [26].

1) У повітряних технічних каналах витоку інформації, середовищем розповсюдження є повітря, а для їх перехвату використовуються мініатюрні високочутливі мікрофони і спеціальні направлені мікрофони. Мікрофони об'єднуються з портативними звукозаписуючими пристроями (диктофонами) або спеціальними мініатюрними передавачами.

2) У вібраційних (структурних) каналах витоку інформації середовищем розповсюдження акустичних сигналів є конструкції будівель (стіни, стелі, підлоги), труби водопостачання, опалення, каналізації та інші тверді тіла. Для перехоплення акустичних коливань в такому випадку використовуються контактні мікрофони.

3) Акустоелектричні технічні канали витоку інформації виникають за рахунок перетворень акустичних сигналів в електричні різними радіоелектронними пристроями.

4) Гідроакустичний канал утворюється у водному середовищі і дозволяє добувати акустичну інформацію з використанням сонарів.

5) Параметричні канали. У результаті дії акустичного поля змінюється тиск на всі елементи високочастотних генераторів технічних засобів передачі і обробки інформації, а також допоміжних технічних засобів. При цьому незначно змінюється взаємне положення елементів схем, проводів в катушках індуктивності, дросселів та інших елементів схем, що може призвести до змін

параметрів високочастотного сигналу, наприклад, до модуляції її інформаційним сигналом.

б) Оптико-електронний (лазерний) канал витоку інформації утворюється при опроміненні лазерним променем, вібруючих в акустичному полі тонких відбиваючих поверхонь (скла, вікон, картин, дзеркал і т.д.). Відображене лазерне випромінювання модулюється по амплітуді і фазі (по закону вібрації поверхні) і приймається приймачем оптичного випромінювання, при демодуляції якого виділяється мовна інформація. Лазер, що генерує лазерний промінь, і приймач оптичного випромінювання, утворюють лазерну систему акустичної розвідки (ЛСАР).

2.3 Технічні засоби акустичної розвідки

Ведення акустичної розвідки технічними засобами, що не потребують присутності на об'єкті, найбільш безпечний і перспективний напрямок ведення розвідувальної діяльності щодо акустичної інформації. Адже такі засоби дозволяються з максимальної відстані і, відповідно, з мінімальним ризиком, отримати необхідну інформацію. До таких засобів розвідки відносяться [26]:

1) технічні засоби, що використовуються так званій "мікрофонний ефект". Головним недоліком такого способу розвідки є те, що "мікрофонний ефект" мають старі моделі телефонних апаратів, які зараз рідко використовуються. Електронні телефонні апарати використовуються інші фізичні процеси у своїй роботі;

2) апаратура високочастотного (ВЧ) нав'язування. ВЧ коливання проходять через мікрофон або деталі телефону, які мають "мікрофонний ефект" і модулюються в акустичний сигнал з приміщення, де встановлено телефонний апарат. Промодульований сигнал, модулюється амплітудним детектором і після підсилення подається на реєструючий пристрій;

3) стетоскопи – пристрої, які перетворюють пружні механічні коливання твердих фізичних середовищ в акустичний сигнал. У сучасних стетоскопах в якості такого перетворювача використовується п'єзодатчик. Такі системи найчастіше використовуються для розвідки інформації з сусіднього приміщення. Наприклад, через стіни, стелю, підлогу, або навіть труби центрального опалення. Професійна апаратура цього класу компактна (поміщається в кейсі середніх розмірів), автономна, має можливість налаштування параметрів під конкретну робочу обстановку, здійснює запис отриманої інформації на диктофон;

4) направлені акустичні мікрофони (НАМ) призначені для прослуховування акустичної інформації з певного напрямку і з великих відстаней. Ширина головного променя діаграми направленості знаходиться в межах $5-30^\circ$, величина коефіцієнта підсилення $5-20$. За типом антен, які використовуються, системи НАМ бувають:

- дзеркальні (мікрофон НАМ знаходиться у фокусі параболічної антени). Відстань 500 метрів і більше, діаметр дзеркала до 1 м;

- мікрофон-трубка (зазвичай маскується під тростину або парасольку), при цьому дальність дії до 300 метрів. При підвищенні рівня шумів до 60 дБ дальність знижується до 100 метрів;

- направлені акустичні мікрофони органного типу (великі мобільні або стаціонарні установки, які використовуються в прикордонних військах для прослуховування акустичних сигналів з певної території і т.д.), дозволяються здійснювати розвідку на відстані до 10000 м;

- плоскі направлені акустичні мікрофони, які використовують і якості антени системи фазованих антенних решіток (ФАР), зазвичай маскуються під кейс, в кришку якого встановлюється ФАР;

- лазерні мікрофони – це пристрої, які дозволяються зчитувати лазерним променем вібрацію з поверхонь, який модулюється акустичним сигналом. Зазвичай акустична інформація знімається з вікон приміщення.

Сучасна технологія розвідки базується на часовому, спектральному і спетрально-часовому аналізі перехоплених сигналів і зводиться до наступного [26]:

- 1) перехоплення (реєстрація) сигналу;
- 2) попередня обробка (сортування і т.д.) перехоплених сигналів;
- 3) відновлення інформації, яка міститься в перехоплених сигналах, записаних в умовах високого рівня шумів;
- 4) безпосередньо аналіз перехопленої інформації.

2.4 Технічні канали витоку інформації

На теперішній час для несанкціонованого зняття інформації широко використовуються технічні канали витоку інформації (ТКВІ).

Технічний канал витоку інформації – це сукупність небезпечних фізичних сигналів, середі їх розповсюдження та зберігання, об'єкту технічної розвідки й способів і засобів технічної розвідки, що можуть бути застосовані для зняття інформації з об'єкту, що охороняється.

Небезпечний фізичний сигнал (небезпечний сигнал) – це сигнал, що містить інформацію, яку необхідно захищати [27]. В нашій країні прийнято поділяти ТКВІ за наступною класифікацією: – акустичні канали витоку інформації, куди входять також канали з акустично-електричними перетвореннями; – радіотехнічні канали витоку інформації, куди входять, по-перше, відкриті канали радіотехнічного зв'язку та, по-друге, канали, що утворюються за рахунок паразитних випромінювань та наводок; – оптичні канали витоку інформації; – речовий канал витоку інформації, який визначається людським фактором.

ТКВІ можуть бути природними та штучними, в тому числі створеними навмисно. Природні ТКВІ утворюються на базі фізичних властивостей джерел виникнення небезпечних сигналів, самих небезпечних сигналів та середовища їх

розповсюдження. Для навмисного створення ТКВІ можуть використовуватися зміни фізичних властивостей джерел та середовищ розповсюдження небезпечних сигналів, а також поданням спеціальних сигналів на окремі елементи приміщення. Це, за правило, робиться шляхом конструктивних змін джерел та конструкції об'єкту, де розповсюджуються небезпечні сигнали [9]. Але для зняття інформації з ТКВІ завжди використовується апаратура технічної розвідки. Крім того, сама апаратура технічної розвідки, розміщена на об'єкті, що охороняється, утворює навмисний канал витоку інформації. Узагальнена класифікація інформації у відповідності до Закону України "Про інформацію" подана на рис. 2.1.

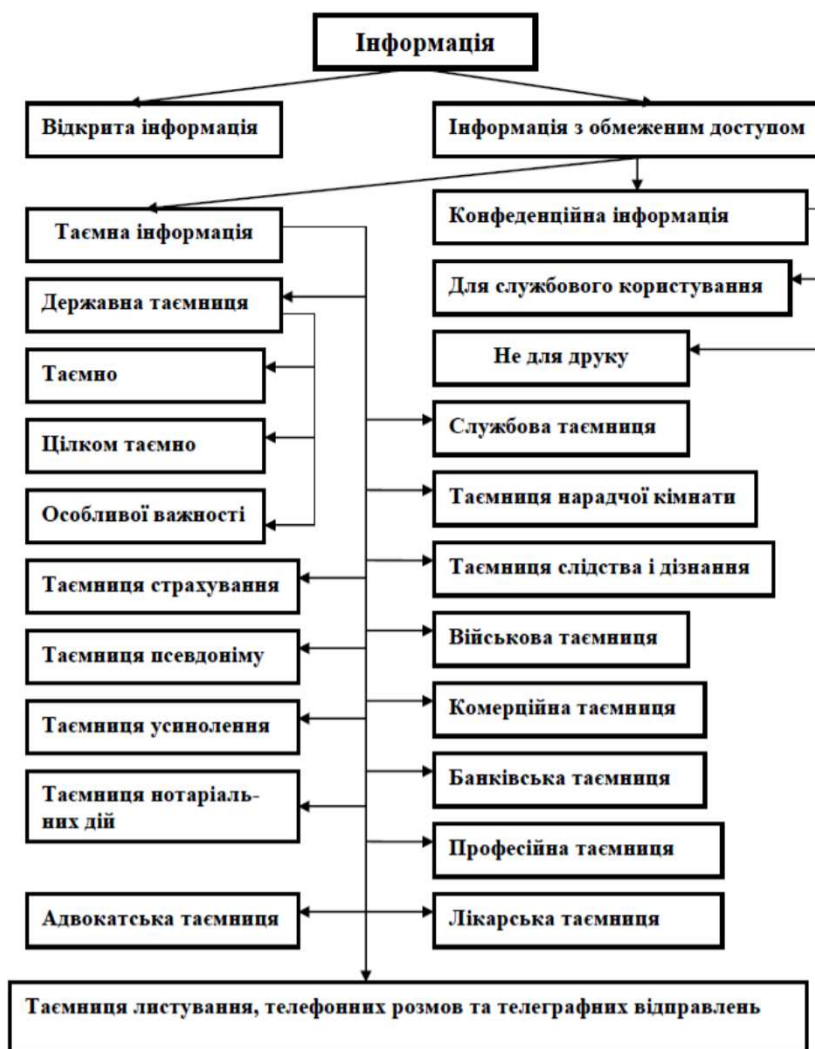


Рисунок 2.1 — Класифікація інформації у відповідності до Закону України "Про інформацію"

На рис. 2.2 показано загальну класифікацію видів інформації, яка може бути об'єктом злочинних посягань. Це оптична, акустична, електронна, електромагнітна та письмова (друкована) інформація. Відповідно, всі види інформації мають різну фізичну природу її походження, носіїв і каналів розповсюдження та зберігання, або різні параметри одного й того ж явища, яке може бути покладене в основу для її переносу чи зберігання.

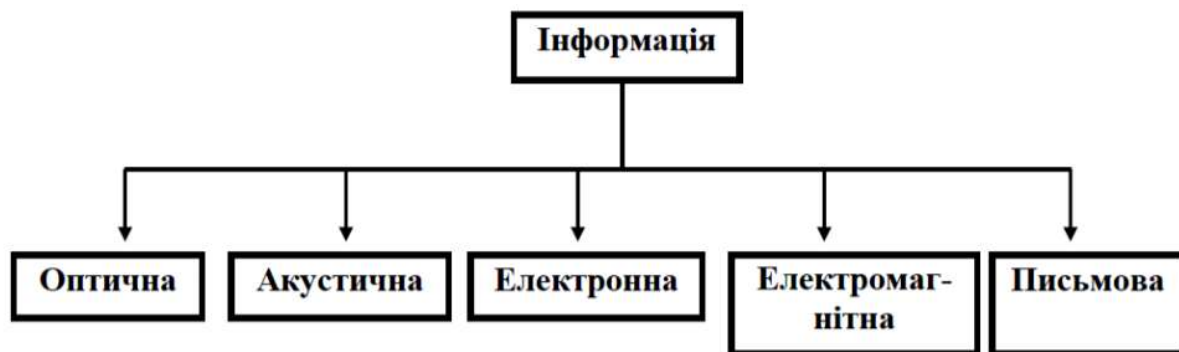


Рисунок 2.2 — Загальна класифікація видів інформації, що може бути об'єктом злочинних посягань

Зрозуміло, що проведення робіт з розробки, впровадженню та підтримки й перевірки працездатності системи ТЗІ на об'єкті, що охороняється, вимагає проведення певних організаційно-технічних заходів. Їх проведення призначено для забезпечення надійності захисту інформації на об'єкті. Одне з найважливіших завдань при цьому є виявлення та блокування всіх потенційних каналів витоку інформації з об'єкту. Друге завдання – це постійна перевірка працездатності та надійності функціонування системи технічного захисту. Саме в цих заходах полягає сутність ТЗІ [28]

Під технічними засобами прийому, обробки, зберігання та передачі інформації (ТЗПІ) розуміють технічні засоби, які безпосередньо обробляють конфіденційну інформацію. До таких засобів відносяться: електронно-обчислювальна техніка, системи оперативно-командної і голосно-що говорить зв'язку, системи звукопідсилення, звукового супроводу і звукозапису і т.д. При

виявленні технічних каналів витоку інформації ТЗПІ необхідно розглядати як систему, що включає основне (стаціонарне) обладнання, кінцеві пристрої, з'єднувальні лінії (сукупність проводів та кабелів, що прокладаються між окремими ТЗПІ і їх елементами), розподільні і комутаційні пристрої, системи електроживлення, системи заземлення. Окремі технічні засоби або група технічних засобів, призначених для обробки конфіденційної інформації, разом з приміщеннями, в яких вони розміщуються, складають об'єкт ТЗПІ. Під об'єктами ТЗПІ розуміють також виділені приміщення, призначені для проведення закритих заходів. Поряд з ТЗПІ в приміщеннях встановлюються технічні засоби і системи, безпосередньо не беруть участь в обробці конфіденційної інформації, але використовуються спільно з ТЗПІ і знаходяться в зоні електромагнітного поля, створюваного ними. Такі технічні засоби і системи називаються допоміжними технічними засобами і системами (ДТЗС). До них відносяться: технічні засоби відкритої телефонної, гучномовного зв'язку, системи пожежної та охоронної сигналізації, електрифікації, радіофікації, часифікації, електропобутові прилади і т.д.. Як канал витоку інформації найбільший інтерес представляють ДТЗС, що мають вихід за межі контрольованої зони (КЗ), тобто зони, в якій виключена поява осіб і транспортних засобів, що не мають постійних або тимчасових перепусток. Крім з'єднувальних ліній ТЗПІ і ДТЗС за межі контрольованої зони можуть виходити проводи та кабелі, до них не відносяться, але що проходять через приміщення, де встановлені технічні засоби, а також металеві труби систем опалення, водопостачання та інші струмопровідні металоконструкції. Такі дроти, кабелі і струмопровідні елементи називаються сторонніми провідниками. Залежно від фізичної природи виникнення інформаційних сигналів, а також середовища їх поширення і способів перехоплення, технічні канали витоку інформації можна розділити на електромагнітні, електричні і параметричний (рис. 2.3).

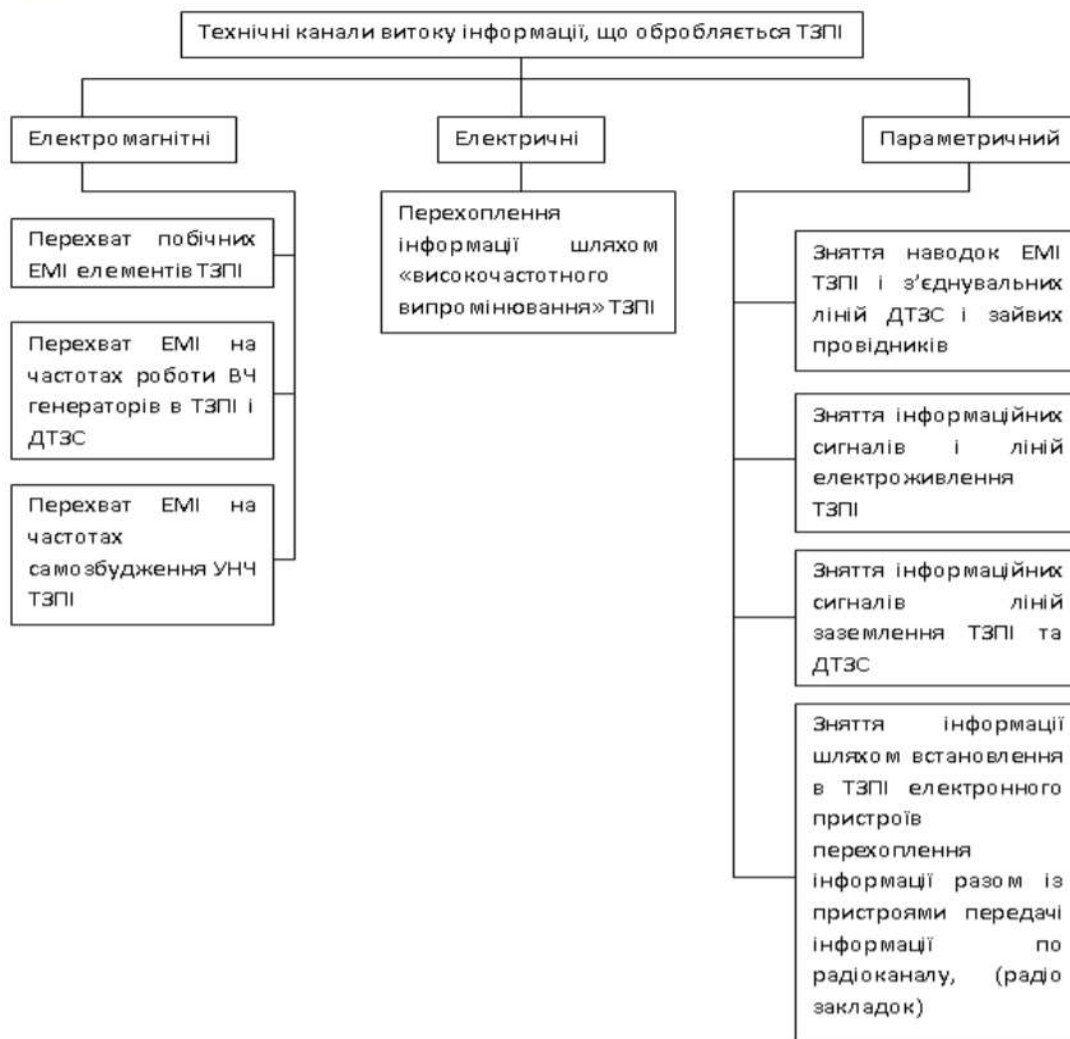


Рисунок 2.3 — Класифікація технічних каналів витоку інформації, яка обробляється в ТЗПІ

2.5 Оптико-електронний (лазерний) канал витоку інформації

Оптико-електронний (лазерний) канал витоку інформації широко використовується при промисловому шпіонажі, оскільки досить простий у використанні. Так відбувається тому, що у більшості випадків зняття інформації відбувається з вібруючого скла. А у майже у будь-якому приміщенні є необхідність вікон. Як з точки зору техніки безпеки, так і з точки зору зручності

працівників. До того ж, використання лазерного мікрофону не потребує потрапляння безпосередньо на об'єкт [25, 31].

Лазерний (оптико-електронний) канал витоку інформації утворюється у ситуації, коли скляна вібруюча поверхня опромінюється лазерним променем. В такому випадку, звукова хвиля, яка генерується джерелом і розповсюджуються в середовищі, зустрічає лінію поділу повітря-поверхня, породжує відхилення від початкового положення (вібрацію).

Амплітуда відхилення буде залежати від розташування точки відображення, пружності, питомої маси вібруючої поверхні, параметрів середовища, що впливають на поширення звукових коливань і лазерного випромінювання.

Вібруюче скло надає три види модуляції для відбитого лазерного випромінювання.

1) Кутова модуляція – напрямок відображення оптичного променя, створюваний переміщенням віконного скла під впливом акустичного сигналу. Зміна кута відбиття лазерного променя, тобто кутова модуляція, відбувається внаслідок викривлення поверхні скла при його коливанні. Відбитий промінь приймається оптичним приймачем, розташованим в точці прийому відбитого променя. Зміни напрямку відбитого променя при коливаннях скла викликають відповідні зміни положення плями світла на світлочутливому елементі (фотодіоді, фототранзистор) оптичного приймача. В результаті цього змінюється освітленість світлочутливого елемента приймача і амплітудна модуляція електричного сигналу на виході елемента. Сигнал після посилення прослуховується і записується на аудіомагнітофон. Налаштування положення світлочутливого елемента оптичного приймача проводиться за оцінкою оператором розбірливості мови.

2) Частотна модуляція. Створюється ефектом Доплера внаслідок коливальних рухів віконного скла під впливом акустичних сигналів. При цьому девіація частоти щодо центрального значення монохроматичного випромінювання лазера підсвічування має величину:

$$D_W = \frac{2p}{I_a V_n} \quad (2.1)$$

де $V_n = C_3 \sin q_3$ – швидкість розповсюдження "поверхневої" хвилі;

C_3 – швидкість звука в середовищі.

3) Фазова модуляція. Викликається наявністю у відбитому сигналі як дзеркально-відбитого, так і дифракційного компонента. Результат суперпозиції дифракційного компонента призводить до того, що якщо поперечні розміри падаючого оптичного пучка малі в порівнянні з довжиною «поверхневої» хвилі, то у відбитому сигналі буде домінувати дифракційну пучок нульового порядку. В цьому випадку виявиться, що фаза світлової хвилі буде промоделювати в часі з частотою звукового сигналу.

Властивості випромінювання та можливості модуляції лазерного променя дають можливість їх використання для реалізації засобів захисту від лазерних засобів акустичної розвідки. Наприклад, частотна модуляція, що відбувається за рахунок коливальних рухів вікна під впливом акустичних сигналів, дає змогу лазерним засобам акустичної розвідки з відбитим променем зняти акустичну інформацію. У випадку, коли до такого інформаційного променя додається ще один, що створюється за рахунок бокових пелюсток променю, які відбиваються від кутикового відбивача, його інформаційна складова, а відповідно і можливість зняття інформації, зменшується.

3 ЛАЗЕРНІ ЗАСОБИ АКУСТИЧНОЇ РОЗВІДКИ

Лазерний модуль складається з джерела випромінювання, який направляється на контрольований об'єкт, приймача випромінювання, джерела електроенергії. Типовий лазерний засіб акустичної розвідки представлено на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Типовий лазерний засіб акустичної розвідки

Для забезпечення високої механічної стійкості передавача і приймача, що вкрай необхідно для нормальної роботи системи, останні встановлюються на тринозі штативах. Передавач і приймач переносяться в звичайному портфелі-дипломаті. Як правило, в таких системах використовуються лазери, що працюють в ближньому ІЧ (0,8 ... 1,1 мкм), невидимому для ока діапазоні довжин хвиль, але на практиці можуть використовуватися і хвилі довжиною від 0,6 мкм. Використання їх не рекомендується через те, що пляма від лазерного променя, яке вони створюють, знаходиться у видимому спектрі, так що при направленні лазера на вікно процес розвідки лазерним мікрофоном буде швидко виявлено та вжито відповідних заходів.

Передавач опромінення зовнішнього віконного скла вузьким лазерним променем. Приймач приймає розсіяний відбите випромінювання, модульоване по амплітуді і фазі за законом зміни акустичного (мовного) сигналу, що виникає при веденні розмов в контрольованому приміщенні. Прийнятий сигнал демодулюється, посилюється і прослуховується на навушниках або записується на магнітофон.

Для поліпшення розбірливості мови в приймальнику використовується спеціальний пристрій для придушення шуму. Для наведення лазерного променя на ціль спільно з передавачем і приймачем використовуються візори.

Дані системи найбільш ефективні для прослуховування розмов в приміщеннях невеликого розміру, коли всі двері і вікна приміщення досить добре герметизовані.

Сучасні ЛЗАР дозволяють знімати інформацію не тільки за зовнішніми, а й внутрішніми вікнами, дзеркалами, скляних дверей і інших предметів. У ряді випадків вібруючу поверхню таємно обробляють спеціальним складом, що збільшує коефіцієнт відображення лазерного випромінювання, а отже, і дальність і ефективність розвідки.

Слід зазначити, що дальність успішної розвідки істотно залежить від умов навколишнього середовища, стану атмосфери, вібруючої поверхні, тощо

3.1 Схеми роботи ЛЗАР

Для прийому різних типів модуляції вібруючого скла застосовуються лазерні засоби акустичної розвідки (ЛЗАР) [32,33]. Найпростіша схема ЛЗАР зображена на рисунку 3.2.

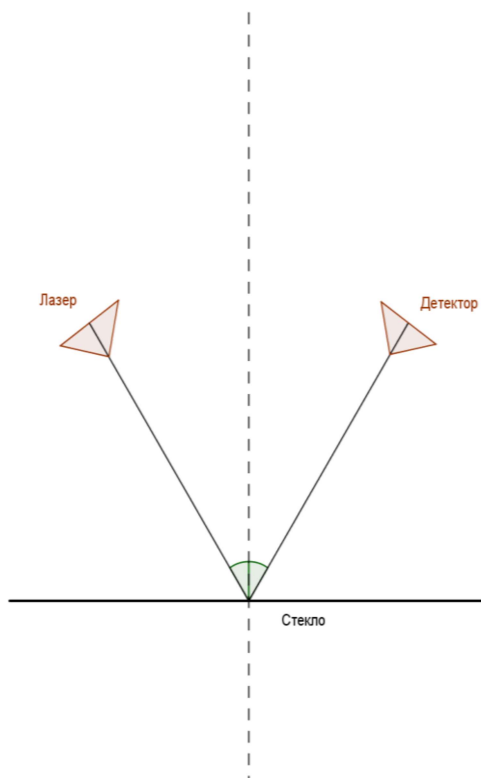


Рисунок 3.2 – Схема лазерного засобу акустичної розвідки

Будь-яка лазерна система акустичної розвідки має в своєму складі 3 основних компоненти:

- 1) джерело лазерного випромінювання;
- 2) вібруючу поверхню;
- 3) приймач промодельовати випромінювання.

Схема ЛЗАР, представлена на рисунку 3.2, використовує кутову модуляцію. Але такий вид модуляції для лазерної системи акустичної розвідки є досить складним в реалізації, адже вимагає точного встановлення лазера і приймальної апаратури, довгий в налаштуванні і не завжди можливий, адже не завжди зацікавлена сторона має можливість вільного розміщення в будівлі детектора лазерного випромінювання. При використанні кутової модуляції лазер падає на поверхню не по нормалі (тобто не під кутом 90°), а кут падіння α дорівнює куту відбиття β (таке явище не є постійним, адже поверхня може містити дефекти і різні нерівності, що впливають на кут відображення сигналу). На практиці це

означає, що приймач ЛЗАР буде знаходитися не в одному місці з лазером. Залежно від кута падіння відстань між приймачем і джерелом може становити сотні метрів. Очевидно, що така система вимагає ретельного налаштування, що ускладнюється ще й завдяки тому, що більшість лазерних систем акустичної розвідки працюють в невидимому для ока людини ближньому інфрачервоному діапазоні частот. З огляду на даний ряд недоліків системи такого типу досить складні у використанні.

Більш точна і технологічна схема, зображена на рисунку 3.3. Таке поєднання лазера і детектора дозволяє усунути дві суттєві проблеми, які мала перша схема. По-перше, для другої схеми відсутня необхідність пошуку окремого місця для розташування детектора, по-друге, немає необхідності довгого налаштування системи.

Однак, дана схема має свій вагомий недолік – необхідність розташування ЛЗАР таким чином, щоб лазерний промінь падав перпендикулярно вібруючою площині, інакше промінь не відіб'ється на фотодетектор, а розсіється в іншому напрямку.

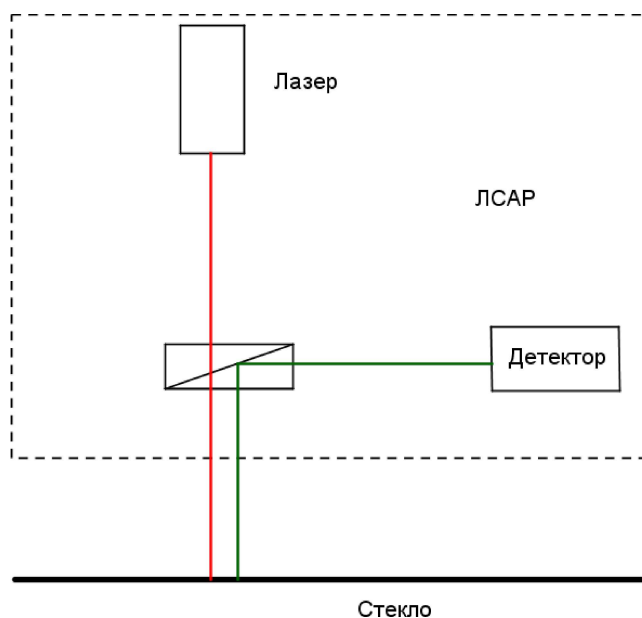


Рисунок 3.3 – Схема ЛЗАР з суміщеним лазером і детектором

Використовуючи інферетрометрію (рис. 3.4), можна отримати більш високу чутливість, ніж дає попередня схема.

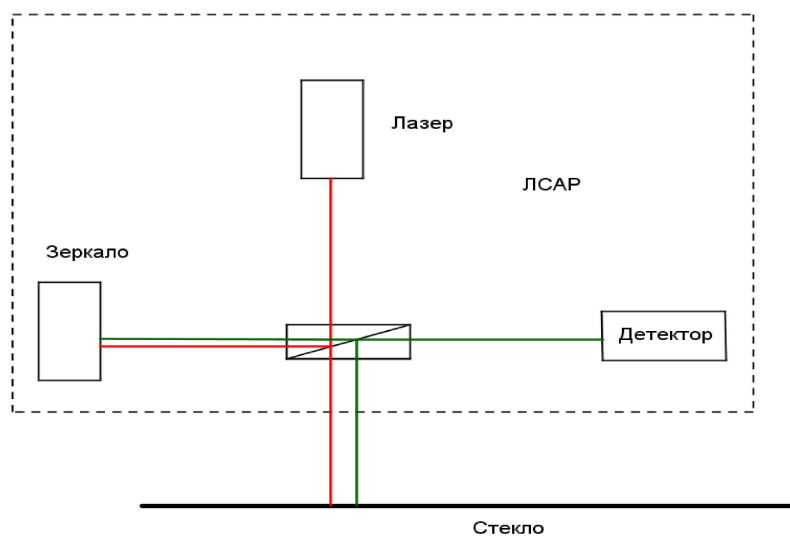


Рисунок 3.4 – Схема ЛЗАР з інтерферометром.

Принцип роботи схеми полягає в наступному: за допомогою дільника променю лазерне випромінювання поділяється на опорний та інформаційний промені. Інформаційний промінь засвічує поверхню віброуючого під дією акустичних коливань скла, модулюється і відбивається на фотодетектор, в якому інтерферує з опорним променем, створюючи інтерференційну картину на приймачі детектора. В оптичному приймачі створюється електричний сигнал з рівнем, відповідним різниці фаз опорного і відбитого променів або коливань скла вікна. Інтерферометр дозволяє проводити вимірювання різниці оптичної довжини відбитого променю.

Така система дуже складна в налаштуванні через велику різницю в довжині оптичних шляхів до вікна і до дзеркала. Відбиті промені повинні приходити когерентними по фазі, в іншому випадку когерентная картина замазується або взагалі відсутня, що призводить до зменшення чутливості.

Інтерферометр є ключовим в разі використання промодульованого за фазою сигналу в якості джерела інформації. Цей варіант забезпечує більш високу чутливість системи розвідки, але складний в реалізації.

Незважаючи на недоліки такої схеми, вона є основною для сучасних лазерних мікрофонів, адже забезпечує найбільшу точність ведення розвідки. Існує модифікація даної схеми, що дає більшу точність вимірювання, однак вимагає рівності відстаней між дільником і склом і дільником і дзеркалом, тому на практиці схема є дуже складною в реалізації і використовується не часто.

3.2 Принцип роботи ЛЗАР

Найбільш перспективним способом знімання інформації на великих відстанях є використання лазерних мікрофонів. Вони призначені для знімання акустичної інформації з плоских віброуючих під дією акустичних хвиль поверхонь. До таких поверхонь відносяться, перш за все, шибки закритих вікон.

Система лазерного перехоплення інформації складається з лазерного передавача в інфрачервоному діапазоні і оптичного приймача. Принцип роботи цих пристроїв, які отримали назву лазерні засоби акустичної розвідки (ЛЗАР), полягає в наступному. Лазерний промінь за допомогою оптичного прицілу направляє на вікно приміщення, в якому ведуться розмови, які цікавлять зловмисника. Генероване лазерним передавачем випромінювання (високочастотний сигнал) поширюється через атмосферу, відбивається від поверхні віконного скла, модулюється при цьому за законом акустичного сигналу, який також впливає на скло, повторно долає атмосферу і приймається фотоприймачем, що відновлює розвідувальний сигнал. При відбитті лазерного променя від віброуючої поверхні відбувається його частотна, кутова і фазова модуляція. Принцип роботи лазерного мікрофона схематично зображено на рисунку 3.5.

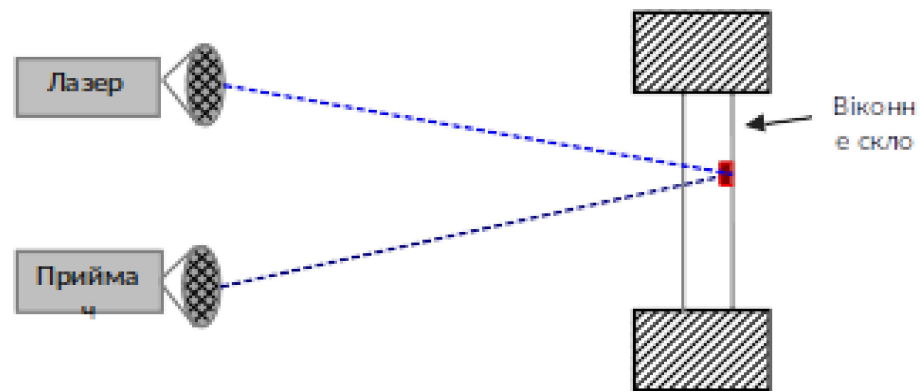


Рисунок 3.5 – Принцип роботи лазерного мікрофона

Сама модуляція зондувального сигналу на нелінійному елементі, в якості якого виступає віконне скло, досить складний фізичний процес, який спрощено може бути представлений в наступному вигляді:

а) звукова хвиля, що генерується джерелом акустичного сигналу, падаючи на межу поділу повітря-скло, викликає відхилення поверхні скла від початкового положення. Відхилення призводять до дифракції світла, що відбивається від цієї межі;

Дійсно, це помітно, наприклад, при падінні плоскої монохроматичної звукової хвилі на плоску межу поділу. Відхилення межі від стаціонарного стану є біжучою уздовж скла «поверхневою» хвилею з амплітудою, пропорційною амплітуді зсувів середовища в полі звукової хвилі, а довжина λ_n цієї поверхневої хвилі дорівнює:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_a}{\sin \theta_3}, \quad (3.1)$$

де θ_3 – кут падіння,

λ_a – довжина падаючої акустичної хвилі.

б) відбите від збуреної поверхні світло містить зсунуті по частоті дифракційні компоненти. Якщо поперечний розмір падаючого пучка лазерного випромінювання значно перевищують довжину «поверхневої» хвилі, то відбите

світло становить сукупність дифрагуючих пучків, що поширюються по дискретним напрямкам, що визначаються з рівності:

$$\lambda_a k_c (\sin \theta_0 - \sin \theta_m) = \pi, \quad (3.2)$$

де θ_0 – кут падіння вихідного світлового пучка,

$k_c = \frac{2\pi}{\lambda_c}$ – хвильове число,

λ_c – довжина світлової хвилі.

В результаті у відбитих пучках присутні три види модуляції оптичного випромінювання.

По-перше, частотна модуляція, викликана ефектом Доплера, внаслідок коливання віконного скла під впливом акустичних сигналів.

При цьому девіація частоти щодо центрального значення монохроматичного випромінювання лазера підсвічування має величину:

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{\lambda_a V_n}, \quad (3.3)$$

де $V_n = \frac{c_3}{\sin \theta_3}$ – швидкість розповсюдження «поверхневої» хвилі,

c_3 – швидкість звуку в середовищі.

Але цей вид модуляції через проблеми вимірювання змін частоти (довжини хвилі) для добування інформації практично не використовується.

По-друге, фазова модуляція, викликана наявністю у відбитому сигналі як дзеркально-відбитого, так і дифракційних компонентів.

Результат суперпозиції останніх призводить до того, що якщо поперечні розміри падаючого оптичного пучка малі в порівнянні з довжиною «поверхневої» хвилі, то у відбитому сигналі буде домінувати дифракційний пучок нульового порядку. В цьому випадку і виявиться, що фаза світлової хвилі буде промодульованою в часі з частотою звукового сигналу.

Інший варіант побудови системи лазерного підслуховування передбачає реалізацію в оптичному приймачі фазової демодуляції шляхом порівняння фаз опромінюючого і відбитого променів. З цією метою вихідний промінь за

допомогою напівпрозорого дзеркала розщеплюється на два промені. Одним з них опромінюється скло, інший направляється до приймача в якості опорного сигналу. В оптичному приймачі створюється електричний сигнал з рівнем, відповідним різниці фаз опорного і відбитого променів або коливань скла вікна. Цей варіант забезпечує більш високу чутливість системи підслуховування, але складний у реалізації [10].

3.3 Компоненти ЛЗАР та їх характеристики

Лазерний модуль складається з джерела випромінювання, який направляється на об'єкт, який контролюють, приймача випромінювання, джерела електроенергії. Частіше за все, таким джерелом є гелій-неоновий лазер.

Для забезпечення високої механічної стійкості передатчика і приймача, що є необхідним для нормальної роботи системи, останні встановлюються зазвичай на штативах. Передатчик та приймач переносяться в звичайному портфелі-дипломаті. Як правило, в таких системах використовуються лазери, які працюють в ближньому ІЧ (0.8...1.1 мкм), невидимому для ока людини діапазоні довжини хвиль, але на практиці можуть використовуватись і хвилі довжиною від 0,6 мкм. Їх використання не рекомендується через те, що пляма від лазерного променя, яку вони створюють, знаходиться у видимому спектрі, тому при направленні лазера на вікно процес розвідки лазерним мікрофоном буде швидко виявлено і будуть вжиті відповідні заходи.

Передатчик здійснює опромінення зовнішнього віконного скла вузьким лазерним променем. Приймач приймає розсіяне відображене випромінювання, модульоване амплітудою і фазою за законом зміни акустичного (мовного) сигналу, який виникає при веденні розмов у приміщенні. Прийнятий сигнал демодулюється, посилюється і прослуховується за допомогою навушників або записується на магнітофон.

Для покращення розбірливості мови у прийомнику використовується спеціальний пристрій для подавлення шуму. Для наведення лазерного променя на ціль сумісно з передатчиком і приймачем використовуються візори.

Дані системи найбільш ефективні для прослуховування розмов у приміщеннях невеликого розміру, коли всі двері та вікна приміщення достатньо добре загерметизовані.

Сучасні ЛЗАР дозволяють знімати інформацію не тільки по зовнішніх, але і по внутрішніх вікнах, дзеркалах, скляних дверях та інших предметах. У деяких випадках вібруючу поверхню таємно обробляють спеціальною речовиною, що збільшує коефіцієнт відображення лазерного випромінювання, а тому, і дальність і ефективність розвідки [34].

Варто відмітити, що дальність успішної розвідки залежить від умов навколишнього середовища, стану атмосфери, вібруючої поверхності і т.д.

3.4 Основні проблеми сучасних ЛЗАР

Лазерні засоби акустичної розвідки мають ряд вагомих недоліків, які сповільнюють їх повсякденне використання і впровадження у військовий, політичний і економічний сектор. Деякі індивідуальні недоліки для основних принципових схем ЛЗАР було розглянуто раніше при описі схем. Але, окрім індивідуальних, ЛЗАР мають і загальні майже для всіх систем вагомні недоліки.

Необхідно враховувати, що на якість прийнятої ЛЗАР інформації впливають такі фактори, які можуть істотно знизити якість отриманої звукової інформації, а прибрати ці фактори не завжди можливо.

До факторів, які впливають на якість роботи лазерної системи акустичної розвідки, відносяться:

- параметри використаного лазера (довжина хвилі, потужність і т.д.);

- параметри апаратури демодуляції (чутливість та вибірковість фотодетектора, вид обробки прийнятого сигналу і т.д.). Фотодетектори з поганою вибірковістю не зможуть відсіяти непотрібний шум, створюючи додаткові проблеми для виявлення інформативних коливань;
- параметри атмосфери (розсіювання, поглинання, рівень фонові засвітки і т.д.). Неприятливі атмосферні явища, дощ чи сніг, пил, наприклад, суттєво знижують дальність використання мікрофона;
- якість обробки зондованої поверхні. Шорсткості і нерівності, обумовлені як технологічними причинами, так і дією середовища, здатні змінити кут падіння лазерного променя на поверхню;
- рівень фонових акустичних шумів. При наявності додаткових джерел акустичних коливань поверхня, з якої відбувається зчитування, може сприймати додаткові акустичні коливання від сторонніх об'єктів, що значно ускладнює налаштування і сам процес ведення лазерної акустичної розвідки;
- рівень мовного сигналу. Слабкий сигнал не створює значних коливань поверхні об'єкту зондування. Це призводить до необхідності посилення сигналу зловмисником, що на практиці або досить таки важливо, або неможливо;
- взаємне розміщення лазера та фотодетектора;
- параметри поверхні, яка є ціллю для ЛЗАР.

Всі ці обставини накладають свій відбиток на якість перехопленої акустичної інформації, тому фактично характеристику дальності прийому сигналі, вказану в документації на компоненти лазерних систем акустичної розвідки, необхідно вважати реальною, а максимально можливою при майже ідеальних умовах, створених в умовах випробувань на полігоні.

Незважаючи на те, що ЛЗАР мають певні недоліки, вони є безумовно ефективним засобом акустичної розвідки. Також можливості сучасних технологій дають можливість для лазерних засобів акустичної розвідки розвиватись, удосконалюватись і, таким чином, покращувати свої можливості.

4 ЗАСОБИ ЗАХИСТУ ВІД ЛАЗЕРНИХ ЗАСОБІВ АКУСТИЧНОЇ РОЗВІДКИ

4.1 Методи захисту від витоку акустичної інформації

Для захисту мовної (акустичної) інформації від витоку по технічним каналам використовуються організаційні і технічні заходи, а також виявляють портативні електронні пристрої перехоплення інформації (закладні пристрої), що можуть бути встановлені у виділених приміщеннях [35].

Організаційні заходи – захід, спрямований на захист інформації від витоку технічними каналами, проведення якого не передбачає використання спеціально розроблених технічних засобів захисту.

До основних організаційних заходів захисту мовної (акустичної) інформації від витоку по ТКВІ відносяться:

- вибір відповідного приміщення для проведення конфіденційних розмов (виділених приміщень), які вже мають певний захист;
- категоріювання приміщення ОІД;
- використання в приміщенні сертифікованих допоміжних технічних засобів і систем;
- встановлення контрольованої зони навколо ОІД;
- демонтаж або невстановлення без необхідності технічних засобів, їх з'єднувальних ліній і сторонніх провідників, які не будуть задіяні;
- організація режиму доступу до об'єкту;
- відключення при ведення конфіденційних розмов незахищених технічних засобів.

Вибір приміщення для проведення переговорів та розмов, де циркулює конфіденційна інформація, необхідно проводити з урахуванням рівня

звукоізоляції такого приміщення. Також необхідно врахувати можливості розвідки по перехвату інформації будь-якими ТКВІ, у нашому випадку – лазерним.

При виборі приміщення також треба враховувати багато інших факторів. Наприклад, розміщення таких приміщень не на перших або останніх поверхах будівлі, відсутність спільних конструкцій з приміщеннями, які належать іншим організація, або з приміщеннями, до яких мають доступ сторонні особи. Також, при можливості, вікна виділених приміщень мають виходити на контрольовану територію, тобто, не на автомобільні парковки, прилеглі будівлі, з яких може проводитись розвідка за допомогою ЛЗАР.

Враховуючи те, що встановлення постійної контрольованої зони може створювати певні труднощі або бути неможливим, або частиною такої зони є огорожуючі конструкції (стіни, підлога, стеля) виділеного приміщення, то на період проведення конфіденційних розмов чи переговорів може бути встановлена тимчасова контрольована зона, яка виключить або хоча б суттєво зменшить можливість перехоплення мовної інформації [36].

У виділених приміщеннях мають використовуватись лише сертифіковані технічні засоби і системи, які пройшли спеціальні технічні перевірки на можливу наявність в них акустоелектричних каналів витоку інформації і мають сертифікати відповідності вимогам безпеки інформації відповідно до нормативних документів Держспецзв'язку України.

Доступ до таких приміщень має бути обмеженим (по списках) і контролюватись (облік відвідувань). При необхідності виділені приміщення можуть мати системи контролю і управління доступом. Такі організаційні заходи зменшують можливість розвідки і перехоплення інформації з обмеженим доступом. Наприклад, для протидії лазерній розвідці може бути нанесено спеціальне покриття на вікна і скляні поверхні.

Але у більшості випадків організаційні заходи безпеки не забезпечують повної безпеки для передачі конфіденційної інформації. Тому, в таких випадках використання технічних засобів захисту є скоріше необхідністю, ніж можливістю.

Технічні засоби захисту – заходи, спрямовані на захист конфіденційної інформації, шляхом використання спеціальних технічних засобів. При використанні технічних засобів захисту також можна говорити про системи технічного захисту, які реалізуються як технічне можливе вирішення ситуації. Всі ці заходи спрямовані на закриття каналів витоку інформації шляхом зменшення співвідношення сигнал/шум у місцях можливого витоку, розміщення портативних засобів акустичної розвідки або їх датчиків, до показника, який забезпечить неможливість виділення інформаційного сигналу засобами лазерної розвідки.

В залежності від того, які засоби використовуються, технічні засоби захисту поділяються на активні та пасивні.

4.2 Активні засоби захисту від витоку акустичної інформації

У випадках, коли застосування пасивних засобів захисту є технічно неможливим, або якщо такі засоби не можуть забезпечити необхідного результату, використовують активні засоби захисту акустичної інформації [37]:

- використання маскуючого і акустичного зашумлення таким чином, щоб співвідношення сигнал/шум не давало можливості виділення інформації з отриманих сигналів при проведенні акустичної розвідки;
- створення електромагнітних перешкод для маскування і зменшення співвідношення сигнал/шум, з метою запобігання проведення розвідувальної діяльності у можливих місцях розташування закладних пристроїв на з'єднувальних лініях;
- перешкоджання пристроям звукозапису (диктофонам) в режимі запису;

- створення перешкод закладним пристроям, які передають інформацію по радіоканалу;
- створення перешкод приймачам, які приймають і передають інформацію по електромережі 220 В.

З практичної точки зору найчастіше використовуються генератори шумових коливань, що також називають акустичним зашумленням. Принцип дії більшості таких пристроїв полягає в підсиленні коливань первинних джерел шуму. Зазвичай в якості джерел таких коливань використовуються електровакуумні, газорозрядні, напівпровідникові та інші електричні прибори і елементи. Тимчасовий випадковий процес схожий за своїми властивостями на той, який утворюють шумові коливання і може отримуватись за допомогою цифрових генераторів шуму, які формують псевдовипадкові послідовності двійкових символів.

Найчастіше для зашумлення використовують так званий "білий шум", інтенсивність якого вища, ніж інтенсивність голосу у всьому спектрі частот мовного діапазону.

Білий шум – постійний шум, спектральні складові якого рівномірно розподіляються по всьому діапазону частот. Головна ідея використання такого способу зашумлення полягає у можливості перекриття амплітуд всіх сигналів, які є в приміщенні, за допомогою білого шуму. Таким чином, білий шум буде створювати більший тиск на скло і, відповідно, модулювати коливання на поверхні скла. Принцип дії білого шуму зображено на рисунку 4.1.

З метою активного акустичного маскування, крім зашумлення, можливе використання, наприклад, "одночасної розмови декількох людей", хаотичних імпульсів і т.д.

Такі пристрої найчастіше – це малогабаритні широкополосні гучномовці, вібраційні випромінювачі (вібродатчики). Завдяки таким пристроям створюються електричні коливання в акустичних коливаннях мовного діапазону, або виконується перетворення електричних коливань у вібраційні. Гучномовці систем

зашумлення необхідно встановлювати у приміщенні, де найбільша ймовірність розміщення засобів акустичної розвідки, а вібродатчики кріпляться на рамах, склі, трубопроводах, стінах і т.д. Використання будь-якої з цих систем є досить ефективним, але не дуже зручним засобом захисту. Адже вони створюють вібрації або шуми, які перешкоджають прийому інформаційного сигналу і його відновлення засобами розвідки.

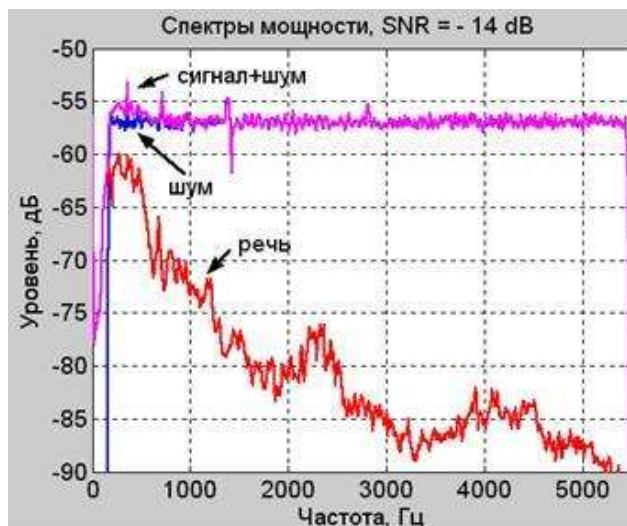


Рисунок 4.1 – Перекриття мовного сигналу білим шумом

Більш надійним є використання адаптивного шуму, іншими словами генерації шумів зі "зворотним зв'язком". Такий спосіб зашумлення полягає в аналізі корисного звукового сигналу в приміщенні за допомогою вбудованого мікрофону. Після цього генератор автоматично встановлює рівень шуму на тих чи інших частотах, що дозволяє автоматично знизити негативні моменти роботи людей у виділеному приміщенні.

Одним із способів використання адаптивного шуму є створення голосоподібного шуму. Він утворюється при багаторазовому накладанні розмови одна на одну з різним рівнем інтенсивності. Таким чином, використовуючи розмову, яка проходить в приміщенні, проводиться захист конфіденційної інформації. Також такі системи працюють лише тоді, коли в приміщенні

проводиться розмова, що не створює додаткового дискомфорту при встановленні захисту.

Для повного захисту вібрдатчики необхідно встановлювати на всіх огорожуючих конструкціях (стіни, стеля, підлога), склі, а також трубах, які проходять через приміщення. Необхідна кількість і місця встановлення визначаються залежно від площі, розташування приміщення, кількості вікон і труб, а також враховуючи ефективність вібрдатчиків, які буде встановлено. Наприклад, ефективний радіус дії таких датчиків на перекритті товщиною 0,25 м складає від 1,5 м до 5 м.

4.3 Методи пасивного захисту від ЛЗАР

Основна мета пасивного захисту – максимально послабити акустичний сигнал від джерела звуку. Пасивні методи захисту інформації направлені на [38]:

- послаблення акустичних і вібраційних сигналів до величин, які роблять неможливим виділення інформації засобами акустичної розвідки;
- послаблення інформаційних акустичних сигналів у лініях з'єднання допоміжних технічних засобів і систем;
- виключення (послаблення) проходження сигналів "високочастотного нав'язування", які мають у своєму складі електроакустичні перетворювачі (мікрофонний ефект);
- ослаблення радіосигналів, які передаються закладними пристроями;
- ослаблення сигналів, які передаються закладними пристроями по мережі 220 В.

Всі вищеприведені результати роботи пасивних засобів захисту, спрямовані на послаблення мовних (акустичних) сигналів, здійснюються шляхом звукоізоляції приміщень, що також направлено на локалізацію джерел акустичних сигнал всередині таких приміщень.

Для систем, які виходять за межі контрольованої зони, наприклад, труби газо-, водо-, теплопостачання і каналізації, використовуються спеціальні вставки і прокладки.

Також одним з засобів пасивного захисту є екранування приміщення. Такий спосіб зазвичай використовується для перекриття акустоелектричних каналів витоку інформації і каналів витоку, які створюються шляхом прихованого встановлення у приміщеннях закладних пристроїв з передачею інформації по радіоканалу.

Пасивні засоби захисту більш пріоритетні, оскільки вони забезпечують додаткових захист без використання додаткових енергетичних або часових затрат, не потребують налаштування і прості у використанні. Самі ці фактори дають поштовх до наступного удосконалення і розвитку таких засобів захисту.

З точки зору захисту від лазерних засобів акустичної розвідки, пасивні засоби захисту більш перспективні в плані розвитку і використання, адже вони не створюють зайвих незручностей в процесі обміну інформацією і не потребують постійних витрат енергії на їх проведення.

Заходи, які можуть бути проведені для ускладнення функціонування лазерного каналу витоку інформації:

- використання приміщень, у який вікна виходять на контрольовану територію;
- організаційні методи захисту;
- штори на вікнах;
- жалюзі;
- спеціальні плівки на вікнах;
- звукоізоляція приміщення з джерелом акустичних коливань.

Формування заходів пасивного захисту від ЛЗАР починається ще на етапі проектування будівлі. Очевидно, що приміщення, якому буде проводитись обробка акустичної інформації з обмеженим доступом, повинно мати мінімальну

кількість вікон. Цей пункт насправді досить складно реалізувати, враховуючи техніку безпеки та норми охорони праці, адже приміщення повинно мати певну кількість вікон, щоб забезпечити нормальне освітлення для працівників. Тому, також необхідно врахувати, що чим менша кількість вікон у приміщенні, тим більшого розміру має бути вікно. Більші розміри вікна мають більшу поверхню, яка коливається, і відповідно, дає більше можливостей для розвідки. А менші розміри, але більша кількість вікон, приводять до суттєвого збільшення затрат на захист цих вікон.

Ще один пункт, який стосується вікон і який необхідно врахувати – це орієнтація вікон. Ідеальною умовою бути вихід вікон на контрольовану територію і відсутність неконтрольованих будівель навпроти, що теж досить складно реалізувати.

Для надійного захисту від витоку інформації при використанні пасивних засобів захисту одним з важливих етапів є визначення фізичних характеристик скла. Скло має бути добре зафіксовано у віконній рамі, що забезпечить суттєвий захист від вібрацій, і відповідно, від коливань під впливом акустичних хвиль. Також склопакет має бути подвійним або потрійним, тоді кожне наступне скло зменшуватиме потужність лазерного променя, який потрапляє в приміщення, і зменшуватиме також інтенсивність коливань зовнішнього скла приміщення, у випадку, якщо інформація знімається з зовнішнього скла.

Також одним із пасивних засобів захисту є використання спеціальної плівки, яка покриває віконне скло. Такі плівки зменшують вібрацію, сприяють дифузному відображенню лазерного променя і виключають можливість спостереження за об'єктом захисту в кабінеті. До того ж, освітленість кабінету вони зменшують досить небагато, але дозволяють легко виявити вікна приміщень з підвищеними вимогами до безпеки інформації, що, відповідно, спрощує процес розвідки для зацікавленої сторони.

Ще один тип таких плівок використовує принцип накладання хвиль: товщина плівки підбирається таким чином, щоб вона дорівнювала чверті довжини хвилі. У такому випадку хвиля, яка відбилася від плівки, буде накладатись у протифазі на хвилю, яка відбилася від скла і забезпечить надійний захист від ЛЗАР. Головним недоліком такої плівки є необхідність знати сигнал, яким будуть опромінювати приміщення, що майже не можливо. В такому випадку захист буде лише від певного виду випромінювання, оскільки універсальної такої плівки для всіх можливих довжин хвиль не існує.

Окрім вищенаведених засобів пасивного захисту інформації, використовують ще звукоізоляцію та екранування

Враховуючи умови проведення нарад та конфіденційних розмов, можна сказати, що зменшення гучності мови буде недоречним, тому для захисту необхідно застосовувати інші засоби захисту, наприклад, звукоізоляцію, звукопоглинання або глушіння звуку. В такому випадку завдяки звукоізоляції буде локалізовано джерело акустичних сигналів в кімнаті, тобто, в замкнутому просторі. До такого методу захисту також висуваються певні вимоги. Наприклад, за межами кімнати співвідношення сигнал/шум не повинен перевищувати максимально допустимі значення, що виключають можливість отримання інформації зловмисниками.

У кожному приміщенні є двері та вікна, які є найбільш слабкими елементами. В будь-якому випадку вікнам необхідно приділити найбільше уваги, адже з техніки безпеки та з метою дотримання рівня освітленості приміщення, вікна займають досить велику площу огорожувальних конструкцій приміщень (стін). Тому, для реалізації звукоізоляції приміщення використовуються вікна з заскленням в роздільних рамах шириною повітряного проміжку більше 200 мм або з потрійним комбінованим склопакетом. Під дією акустичного поля буде так само відбуватись коливальний процес, але за рахунок проміжку між склом, внутрішнє скло не буде відчувати великих коливань внаслідок дії зовнішніх

джерел акустичних коливань, що ускладнює зняття інформації, але не робить його неможливим.

При розрахунку можливості витоку інформації по лазерному каналу, слід враховувати також поверхню скла, тип кріплення, хімічний склад скла, бруд тощо. Майже ідеальна поверхня пластикового склопакету спрощує зняття інформації зловмисником. Відповідно, ще одним способом захисту є навмисне погіршення рівності скла, тобто нанесення на нього нерівних, шорстких матеріалів, які будуть сприяти дифузному відхиленню лазерного променя апарату розвідки. З такими ж властивостями було створено і спеціальні гелі.

Лазерні мікрофони є небезпечними також і при присутності різних шаф, фоторамок, стендів, статуєток, сейфів і всього, що може вібрувати під дією акустичних коливань. В такому випадку всі предмети, які можуть стати каналом витоку інформації, приховують за межами видимості їх з вікна. Однак слід розуміти, що при забезпеченні надійного захисту віконного скла, можливість розвідки зводиться до мінімуму.

Важливим кроком також є вибір домішок до скла, адже вони змінюють властивості відображення скла. Використання 0,4% домішок заліза приводить до збільшення здатності відбивання скла майже в 2 рази. А для зменшення цієї властивості використовують домішки калію – більше 2%.

Всі вищеописані засоби захисту не завжди ефективні. Їх використання часто ускладнюється певними недоліками, які не завжди можна легко усунути. Наприклад, не завжди є можливість затонувати всі вікна поверху або всієї будівлі, або не можна змінити саме приміщення і, звісно, планування уже готової будівлі [39].

Перспективною з точки зору пасивного захисту є ідея створення комбінованої системи захисту від ЛЗАР на основі тригранних кутикових відбивачів.

Кутиковий відбивач – пристрій у вигляді прямокутного тетраедра (рис. 4.5), основною особливістю якого є відображення відбитого променя в напрямку падаючого променя. Така конструкція дозволить ефективно і досить направлено відобразити лазерний промінь, що падає на скло.

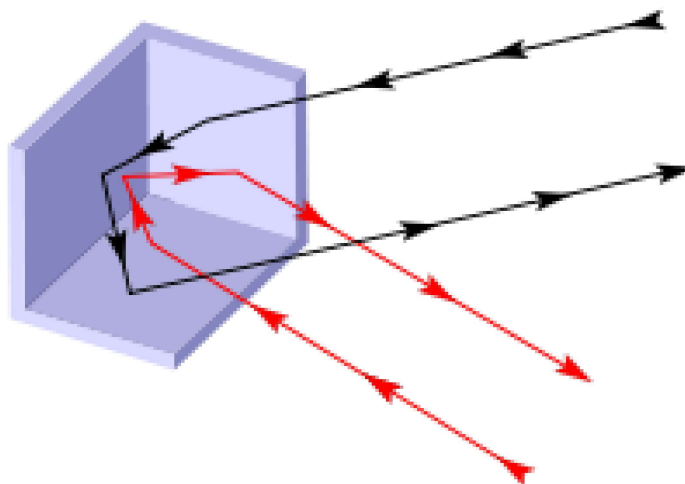


Рисунок 4.5 – Загальна модель тригранного кутикового відбивача

З точки зору ефективності захисту метод не є універсальним або більш простим, ніж, наприклад, п'єзоелемент на склі, однак він є новим, а, отже, має ще багато невивчених аспектів. Перш за все, слід визначитися, що дана система працює лише проти ЛЗАР з фазовою або частотною модуляцією, оскільки у випадках ЛЗАР з амплітудною модуляцією лазер і фотодетектор можуть бути дуже рознесені в просторі.

4.4 Рух променя в кутиковому відбивачі

Для оцінки можливості створення системи протидії ЛЗАР на основі кутикових відбивачів необхідно оцінити кількість лазерного випромінювання, яке теоретично може потрапити на поверхню кутикового відбивача і відбитися на

фотодетектор лазерного засобу акустичної розвідки. Для проведення даної оцінки необхідно побудувати математичну модель відбивача і проаналізувати траєкторії руху променя всередині простору кутикового відбивача в залежності від вхідних параметрів, таких як: кут падіння, кут повороту, і безпосередньо просторових координат на одній з граней відображає системи, в які падає промінь лазера. Це робиться з метою визначення таких точок відбивача, потрапляння променя в які призведе до модуляції сигналу на грані і подальшого відображення модульованого сигналу в напрямку падіння, тобто в точку розташування детектора ЛЗАР.

Для побудови математичної моделі необхідно визначити і попередньо оцінити всі можливі варіанти параметрів, які задають падаючий промінь на обраній площині.

Далі наведено загальний варіант, коли падаючий промінь не перпендикулярний жодній з площин. Нехай спрямований вектор падаючого променя має в системі координат, осі якої перпендикулярні площинам кутикового відбивача, координати (a, b, c) . Падаючий промінь відіб'ється послідовно від всіх трьох граней. Після першого відображення його вектор стане дорівнює $(-a, b, c)$, після другого $(-a, -b, c)$, після третього $(-a, -b, -c)$. Очевидно, що вектор $(-a, -b, -c)$ спрямований протилежно направляючої вектору вихідного променя.

4.4.1 Закони геометричної оптики

Геометрична оптика – розділ оптики, що вивчає закони поширення світла в прозорих середовищах, відбиття світла від дзеркальних поверхонь і принципи побудови зображень при проходженні світла в оптичних системах без урахування його хвильових властивостей.

Основне поняття геометричної оптики це світловий промінь. При цьому мається на увазі, що напрямок потоку променевої енергії (хід світлового променя) не залежить від поперечних розмірів пучка світла.

Закони геометричної оптики є особливими граничними випадками більш загальних законів хвильової оптики. Так як світло фізично є поширенням електромагнітної хвилі, відбуваються інтерференція, в результаті якої обмежений пучок світла поширюється не в якомусь одному напрямку, а має кінцевий кутовий розподіл, тобто спостерігається дифракція. Інтерференція і дифракція знаходяться поза предметом вивчення оптичних властивостей оптичних систем засобами геометричної оптики. Однак, в тих випадках, коли характерні поперечні розміри пучків світла досить великі в порівнянні з довжиною хвилі, можна знехтувати дифракційним розходженням пучка світла і вважати, що промені світла поширюються по прямих відрізках, до спотворення або відображення.

Геометрична оптика неповно описує оптичні явища, будучи спрощенням більш загальної хвильової оптичної теорії. Але широко використовується, наприклад, при розрахунку оптичних систем, так як її закони математично більш прості в порівнянні з узагальнюючими хвильовими законами, що істотно знижує математичні труднощі при аналізі і синтезі оптичних систем. Приблизна аналогія між геометричною і хвильовою оптиками – як між ньютонівською механікою і загальною теорією відносності.

Крім нехтування хвильовими ефектами в геометричній оптиці також нехтують квантовими явищами. У геометричній оптиці швидкість поширення світла вважається нескінченною (тому динамічна фізична задача перетворюється в чисто геометричну), однак облік кінцевої швидкості світла в рамках геометричної оптики (наприклад, в астрофізичних додатках) не представляє математичних труднощів. Крім того, як правило, не розглядаються ефекти, пов'язані з впливом проходження світла через оптичні середовища, наприклад, зміни показника заломлення середовища під впливом потужного випромінювання. У випадку, коли інтенсивність світлового пучка, що поширюється в даному середовищі, досить мала для того, щоб можна було знехтувати нелінійними ефектами, геометрична

оптика базується на загальному для всіх розділів оптики фундаментальному законі про незалежне поширення променів (принцип суперпозиції).

Згідно з цим принципом, промені світла в середовищі не взаємодіють. У геометричній оптиці немає таких понять як амплітуда, частота, фаза і вид поляризації світлового випромінювання, але і в хвильовій лінійній оптиці постулюють принцип суперпозиції. Іншими словами, і в хвильовій лінійній оптиці, і в геометричній оптиці приймається, що промені світла і оптичні хвилі не впливають один на одного і поширюються незалежно.

В основі всієї геометричній оптики лежать п'ять емпіричних законів, якими необхідно керуватися при створенні математичної і програмної моделі.

Закони геометричної оптики:

1) Закон прямолінійного розповсюдження світла – постулат, який наказував би променю світла рухатися з початкової точки в кінцеву точку по шляху, мінімізує час руху.

2) Закон незалежного поширення променів – закон стверджує, що світлові промені поширюються незалежно один від одного.

3) Закон відбиття світла – встановлює зміну напрямку ходу світлового променю в результаті зустрічі з дзеркальною поверхнею: падаючий і відбитий промені лежать в одній площині з нормаллю до поверхні, що відбиває в точці падіння, і ця нормаль ділить кут між променями на дві рівні частини.

4) Закон заломлення світла – описує заломлення світла на межі двох прозорих середовищ.

5) Закон оборотності світлового променю – згідно з цим законом, промінь світла, що поширився по певній траєкторії в одному напрямку, повторить свій хід в точності при поширенні і в зворотному напрямку.

Оскільки геометрична оптика не враховує хвильової природи світла, в ній діє постулат, згідно з яким якщо в якійсь точці сходяться дві (або більше) системи променів, то освітленості, створювані ними, складаються.

4.4.2 Проходження променю в загальному вигляді

Керуючись законами геометричної оптики, розрахунок шляху в кутиковому відбивачі, буде проводитися для одиничного променю. При попаданні на одну з поверхонь, що відбивають, промінь буде задаватися трьома параметрами:

- 1) координати x і y , точки в яку буде потрапляти промінь на поверхні, що відбиває – точка відображення променю від поверхні кутикового відбивача;
- 2) кутом падіння променю на площину відображення;
- 3) кутом повороту.

У загальному випадку при розрахунку шляху, пройденого променем в кутиковому відбивачі, не має значення, на яку з граней спочатку впаде промінь, тому що при попаданні на будь-яку грань і за умови потрібного відображення (віддзеркалення від всіх трьох взаємно перпендикулярних граней), промінь повернеться в зворотному напрямку. Оскільки в основі роботи системи лежить принцип зворотного відображення променю, випадки з подвійним і одинарним відображенням інтересу не представляють, проте є певні винятки.

Для розрахунку повного шляху, який пройде промінь, необхідно ввести точку початку і кінця звіту. У ситуації з тривимірним простором, і кутиковим відбивачем зокрема, цієї «точкою» буде площина – основа піраміди. Ця площина являє собою умовну, четверту сторону кутикового відбивача. Через неї світло і інші випромінювання потрапляють всередину кутикового відбивача. Підрахунок колії проводиться з того моменту, як промінь перетне цю площину і до того як перетне її знову на виході після третього відображення.

Загальний шлях, який пройде промінь при потрібному відображенні, буде складатися з суми відрізків шляху: відрізок від площини відліку до точки падіння променю, відрізок, пройдений променем від першого відображення до другого, відрізок від другого до третього відображення і від точки останнього

відображення до перетину променю з площиною відліку. Таким чином, повний шлях можна виразити як $S = DR + RK + KN + NT$ (рис. 4.6).

При попаданні на будь-яку площину відбивача, промінь задається трьома параметрами: координати точки падіння, кут падіння, кут повороту.

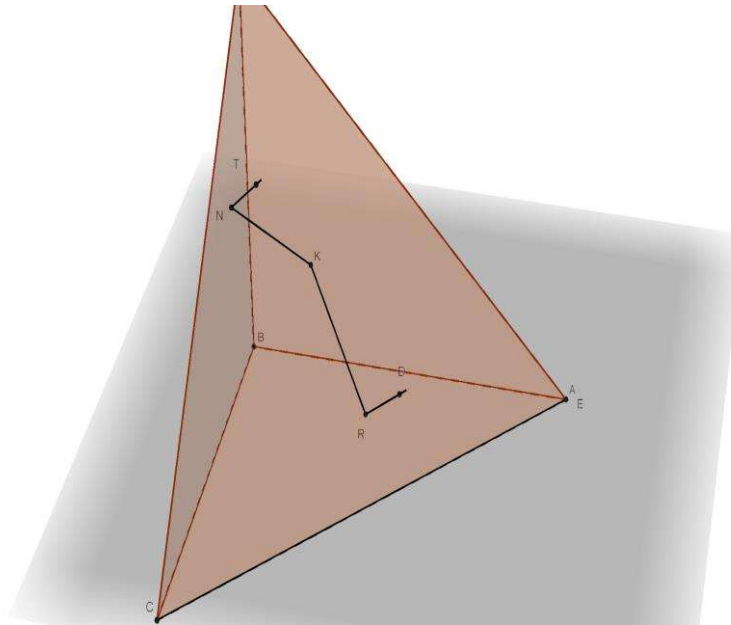


Рисунок 4.6 – Шлях повного відображення променю всередині відбивача

4.5 Світлові властивості тіл

Тривала дія навіть досить легких подразників на око людини викликає у ньому функціональні порушення. До таких подразників, які постійно знаходяться у полі зору людини, відносяться світлові і кольорові потоки, які відбиваються від стін і стель приміщень і обладнання.

Кількісний і якісний вплив таких подразників залежить від світлових властивостей тіл, які розташовані у полі зору людини, а також від світлових установок, які створюють освітлення. До світлових властивостей тіл відносяться такі властивості: відображення, поглинання, пропускання світла, яке на них потрапляє, перерозподілення відбитого світла або світла, яке пройшло через них,

зміна спектрального складу світлового потоку при його відображенні чи пропусканні.

Всі тіла, які нас оточують, незалежно від їх стану – твердого, рідкого чи газоподібного – поділяються на прозорі і непрозорі [43].

Прозорими називаються тіла, через які проходить більша частина світлових променів, наприклад, скло, вода, повітря і т.д.

Непрозорими називаються тіла, які не пропускають видимого світла. Звісно, строго розмежувати всі тіла на прозорі і непрозорі неможливо. Всі тіла у більшій або меншій мірі поглинають або пропускають світло. Є тіла, які займають проміжне місце. Вони пропускають світло, але ясно бачити предмети через них не можна. Такі тіла називаються просвічуюми. До них відносяться, наприклад, матове скло.

Коли світловий потік (світло) падає на прозоре тіло, частина його проходить крізь тіло ($\Phi_{\text{прох}}$), частина поглинається ним ($\Phi_{\text{погл}}$), а решта відбивається ($\Phi_{\text{відб}}$) від нього. Коли світловий потік падає на непрозоре тіло, має місце тільки поглинання і відбиття світла. В залежності від характеру просторового розподілення відбитого тілом світлового потоку розрізняють дзеркальне, дифузне (рівномірно дифузне) і змішане відображення.

Дзеркальне відображення отримується при відбитті світла дзеркальними поверхнями, розміри нерівностей кий дуже малі, в порівнянні з довжиною хвилі світла, яке на них падає, тобто добре полірованими поверхнями. Для дзеркального відображення справедливий закон рівності кута падіння куту відбивання, при чому падаючий і відбитий промені лежать в одній площині з перпендикуляром, поставленим у точці падіння світла, що наведено на рисунку 4.7а.

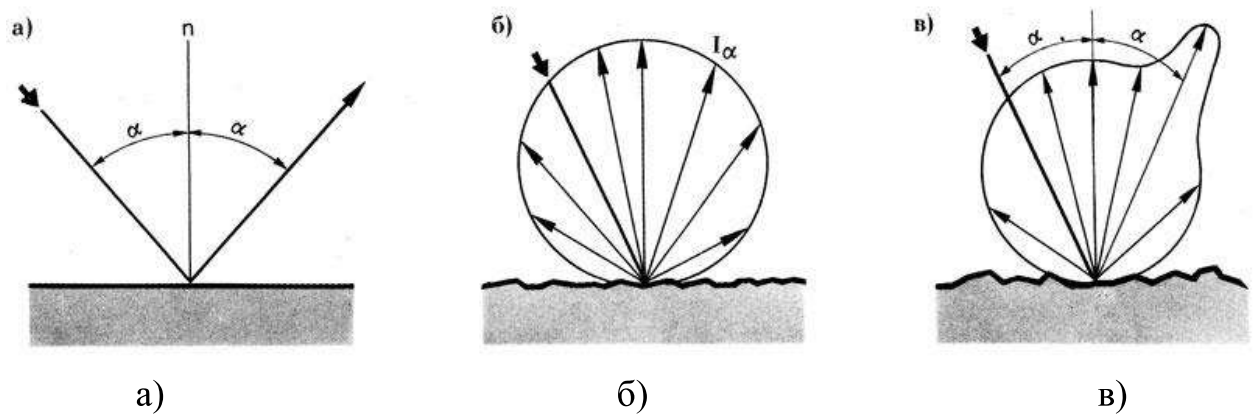


Рисунок 4.7 – Різні вигляди відображення світла: а – дзеркальне; б – дифузне; в – змішане

Яскравість зображення предмета у дзеркалі рівна яскравості предмета, помноженій на коефіцієнт відображення дзеркала. Тіла з цілковито гладкою поверхнею відображають світло в одному напрямку, з якого вони здаються дуже яскравими – блищать. З інших напрямків ці тіла здаються темними. Такі тіла називають блискучими. При наявності в полі зору поверхонь із дзеркальним відображенням необхідно вживати заходи щодо захисту очей від відображеного блиску.

Дифузне відображення характеризується тим, що кут, в якому знаходиться падаючий світловий потік, менше кута, в якому він розповсюджується після відображення. Тіла з шорсткою поверхнею відображають світло дифузно (у різних напрямках). Світло, яке падає на таке тіло в одному напрямку, падає на різні дуже малі площі його поверхні під різними кутами. Від кожної точки поверхні світло відбивається по тому ж закону, але оскільки кути падіння світла на різні ділянки поверхні тіла в даному випадку різні, то світло відбивається в різні сторони.

Поверхні, які дифузно відображають світло, з різних напрямків здаються однаково яскравими. Вони не мають відблисків, їх називають матовими. Окрім блискучих і матових, виділяють ще глянцеві поверхні, які займають проміжне

положення. Розрізняють два типи дифузного відображення – рівномірно-дифузне і направлено-дифузне.

Рівномірно-дифузне відображення характеризується розповсюдженням відбитого світлового потоку в куті, який дорівнює 2π , що розташовується з однієї сторони від поверхні, яка відбиває (рисунок 4.7б). Розподілення відбитої сили світла I_a від таких поверхонь має форму сфери з дотичною до поверхні в точці падіння променя. В такому випадку сила світла у точці дотику має найбільше значення I_{\max} , а у всіх інших випадках зменшується пропорційно косинусу кута α між напрямком найбільшої сили світла і силою світла в даному напрямку

$$I_a = I_{\max} \cos(\alpha). \quad (4.3)$$

Це співвідношення називається законом косинуса.

Розподілення відбитого потоку від рівномірно-дифузних поверхонь не залежить від напрямку потоку, який падає, що видно з рисунку 4.9б.

Яскравість рівномірно-дифузної поверхні однакова у всіх напрямках. Тіла, які мають однакову яскравість у всіх напрямках, а також для кожної ділянки поверхні тіла називаються рівно-яскравими випромінювачами.

Поверхні, які нерівномірно відбивають світло різних довжин хвиль і мають при освітленні білим світлом ту чи іншу фарбу, яка відповідає їх фізичним властивостям, називаються кольоровими.

Здатність тіла пропускати світловий потік характеризується коефіцієнтом пропускання

$$t = \Phi_{\text{пройш}} / \Phi_{\text{пад}}, \quad (4.4)$$

де $\Phi_{\text{пройш}}$ – світловий потік, який пройшов,

$\Phi_{\text{пад}}$ – світловий потік, який падає.

Здатність тіла поглинати падаючий на нього світловий потік характеризується коефіцієнтом поглинання a

$$a = \Phi_{\text{погл}} / \Phi_{\text{пад}}, \quad (4.5)$$

де $\Phi_{\text{погл}}$ – поглинутий тілом світловий потік.

В таблиці 4.2 наведено коефіцієнти відбиття, пропускання і поглинання деяких матеріалів.

Таблиця 4.2 – Коефіцієнти відбиття, пропускання і поглинання деяких матеріалів

Матеріал	Коефіцієнт, %		
	Відбиття	Поглинання	Пропускання
Опалове скло (товщина 2-3 мм)	30	10	60
Віконне скло (товщина 1-2 мм)	8	2	90
Матове скло (товщина 1-2 мм)	10	5	85
Необроблена поверхня – чавун	10	90	0
Чорне сукно	2	98	0
Чорний оксамит	0,5	99,5	0
Сніг	84	16	0
Трава	13	87	0
Асфальтована поверхня	7-10	93-90	0
Чорнозем	5-7	95-93	0

Коефіцієнти пропускання і поглинання зазвичай використовуються для середовища на одиницю довжини. Знаючи коефіцієнт пропускання на одиницю довжини, можна визначити коефіцієнт пропускання середовища для шару товщиною d .

Видимий колір фарбованого тіла, освітленого монохроматичним світлом і яке спостерігається в дифузно-відбитому світлі, залежить від здатності відбиття

поверхні і поглинання світлового потоку при проникненні світла всередину тіла через фарбовану плівку. Світло насправді проникає більш або менш глибоко всередину речовини, перш ніж повернутись в наше око. Для прикладу можна розглянути тонку скляну фарбовану пластину, поклавши її на лист білого паперу. Чим товще пофарбований шар тіла, в який проникає світло, або чим більше концентрація фарбуючої речовини, тим наочніше буде забарвлення, відбите світло стає все більш насиченим, а інтенсивність його стає все менше і менше. В такому випадку навіть довжина хвилі відбитого світла може змінитись.

4.7 Ефективна площа розсіювання

Ефективна площа розсіювання – характеристика відбиваючої здатності цілі, що визначається відношенням потужності оптичної енергії, що відбивається цілком в напрямку приймача, до поверхневої густини потоку енергії падаючої плоскої хвилі.

ЕПР є кількісною мірою властивості об'єкта розсіювати електромагнітну хвилю.

У загальному випадку для зондуєчої електромагнітної хвилі з негармонічною часовою залежністю (широкосмуговий в просторово-часовому сенсі зондуєчий сигнал) ефективна площа розсіювання — відношення енергії еквівалентного ізотропного джерела до густини потоку енергії (Дж/м²) зондуєчого радіовипромінювання в точці розташування розсіювача.

ЕПР має розмірність площі (м²), але не є геометричною площею, а являє собою енергетичну характеристику, тобто визначає величину потужності прийнятого сигналу.

Аналітично ЕПР можна розрахувати тільки для простих об'єктів.

ЕПР не залежить від інтенсивності випромінюваної хвилі. Будь-яке збільшення призводить до пропорційного збільшення і їх відношення у формулі

не змінюється. При зміні відстані, відношення змінюється обернено пропорційно і величина ЕПР при цьому залишається незмінною.

Досить велику ефективну площу розсіювання має кутиковий відбивач.

Кутиковий відбивач – три перпендикулярно розташованих площини. На відміну від пластин, кутиковий відбивач дає гарне відображення в широкому діапазоні кутів. Принцип дії КВ наведено на рисунку 4.10.

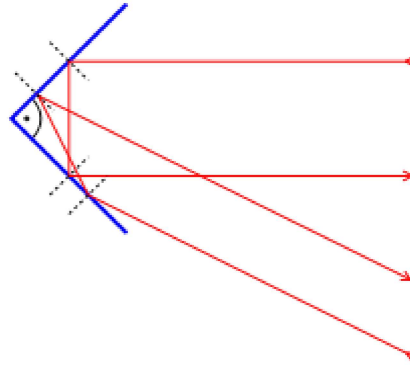


Рисунок 4.10 – Принцип дії кутикового відбивача

Якщо використовується кутовий відбивач з трикутними гранями, то ЕПР

$$\sigma = \frac{4\pi}{3\lambda^2} a^4 \quad (4.6)$$

де a – довжина ребра.

Якщо кутиковий відбивач складається з граней чотирикутної форми, то ЕПР

$$\sigma = \frac{4\pi}{3\lambda^2} 3a^4 \quad (4.7)$$

Використання кутикових відбивачів як засобі захисту від лазерних засобів акустичної розвідки може бути ґрунтоване з точки зору їх ефективності як засобу, який відбиває лазерний промінь. Саме завдяки досить великому значенню ефективної площі розсіювання кутиковий відбивач може відбити великий відсоток променю, який розсіюється.

5 ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ПЕРЕШКОДИ ЛЗАР

5.1 Основні поняття, що використовуються

Розглядаючи засоби акустичної розвідки, можна сказати, що одним з найпростіших і найнадійніших є лазерні мікрофони. Якщо зловмисник не має доступу до контрольованої території, але, наприклад, навпроти вікна приміщення, в якому проводиться важлива нарада, розміщена будівля, доступ до якої вільний, то можна використати двошпроменевий лазерний мікروفон. Розвідка в даному випадку проводиться з приміщення навпроти, за рахунок розміщення лазера перпендикулярно віконній шибці потрібного приміщення.

5.2 Аналітичне дослідження створення перешкоди ЛЗАР

На рисунку 5.1 показано кутиковий відбивач (КВ), розташований у приміщенні, що підлягає захисту від ЛЗАР. КВ має бути розташований в зоні середини шибки вікна приміщення.

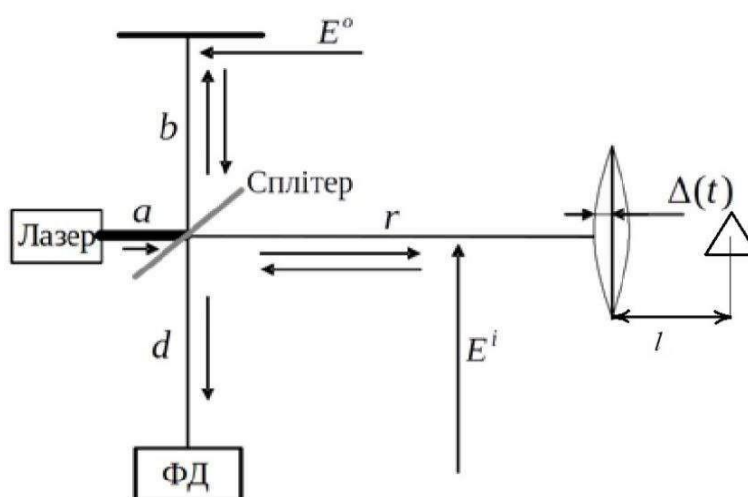


Рисунок 5.1 — Схема роботи лазерного мікрофону

В такому випадку використаємо наступні величини:

$K_{\text{под}}$ – коефіцієнт подавлення (мінімальне відношення перешкодовий сигнал/інформаційний сигнал при якому порушується працездатність ЛЗАР),

G_t – коефіцієнт підсилення світлового потоку головного променю,

$G_{\text{бок}}$ – коефіцієнт підсилення світлового потоку по боковим пелюсткам променю,

K_B – коефіцієнт відбиття світлового потоку від шибки вікна,

R – відстань від ЛЗАР до вікна,

$S_{\text{об}}$ – площа об'єктиву ЛЗАР.

Відповідно,

$$\Phi_C = \frac{\Phi_t G_t K_B}{4\pi(2R)^2} S \quad (5.1)$$

– рівень небезпечного сигналу головного променю, відбитого від шибки, що сприймається об'єктивом ЛЗАР;

$$\Phi_{\text{бок}} = \frac{\Phi_t G_{\text{бок}}}{4\pi R^2} \times \frac{\sigma}{4\pi R^2} \times S \quad (5.2)$$

– рівень сигналу перешкоди бокових пелюсток променю від ЛЗАР, що відбиваються кутиковим відбивачем і потрапляють на об'єктив ЛЗАР;

$$\frac{\Phi_{\text{бок}}}{\Phi_C} = \frac{\Phi_t G_{\text{бок}} \sigma S}{(4\pi R^2)^2} \times \frac{4\pi(2R)^2}{\Phi_t G_t K_B S} = \frac{\sigma}{\pi R^2} \times \frac{G_{\text{бок}}}{G_t K_B} \quad (5.3)$$

– відношення рівнів небезпечного і перешкодового сигналів лазера на об'єктиві ЛЗАР.

Умова забезпечення подавлення небезпечного сигналу перешкодовим:

$$\frac{\Phi_{\text{бок}}}{\Phi_C} \geq K_{\text{под}} \quad (5.4)$$

Після підстановки (5.4) в (5.3) і перетворення можна знайти вираз для мінімального значення σ , яке дозволить забезпечити захист від ЛЗАР:

$$\frac{G_{\text{бок}}}{G_t} \times \frac{\sigma}{\pi R^2} \times \frac{1}{K_B} \geq K_{\text{под}} \quad (5.5)$$

$$\sigma \geq \frac{K_{\text{под}} K_B G_t \pi R^2}{G_{\text{бок}}} \quad (5.6)$$

$\frac{G_{\text{бок}}}{G_t}$ – відносний рівень бокових випромінювань променю ЛЗАР, який знаходимо по аналогії з формуванням пелюсток випромінювання променю, за формулою 1.61.

σ – ефективна площа розсіювання кутикового відбивача, м^2 ,

$K_{\text{под}}$ – коефіцієнт подавлення (мінімальне відношення перешкодовий сигнал/інформаційний сигнал при якому порушується працездатність ЛЗАР),

G_t – коефіцієнт підсилення світлового потоку головного променю,

$G_{\text{бок}}$ – коефіцієнт підсилення світлового потоку по боковим пелюсткам променю,

K_v – коефіцієнт відбиття світлового потоку від шибки вікна,

R – відстань від ЛЗАР до вікна,

$S_{\text{об}}$ – площа об'єктиву ЛЗАР,

a – розмір грані кутикового відбивача.

5.3 Оцінка фізичної реалізації способу захисту від ЛЗАР

Використовуючи наведені вище формули, проведемо розрахунки для значень, близьких до реальних.

$$\frac{4\pi}{3\lambda^2} a^4 \geq \frac{K_{\text{под}} K_v G_t \pi R^2}{G_{\text{бок}}}, \quad (5.7)$$

$$a^4 \geq \frac{3\lambda^2 K_{\text{под}} K_v G_t \pi R^2}{4\pi G_{\text{бок}}}, \quad (5.8)$$

$$a \geq \sqrt[4]{\frac{3\lambda^2 K_{\text{под}} K_v G_t \pi R^2}{4\pi G_{\text{бок}}}}. \quad (5.9)$$

Відносний рівень бокових випромінювань променю ЛЗАР знаходимо по аналогії зі способом знаходження кута розходження і формування бокових пелюсток променю, $\frac{G_{\text{бок}}}{G_t} = \frac{73\lambda}{d}$.

$K_{\text{под}}$ – коефіцієнт подавлення, що має досить мале значення інтерференції, коли перевищення перешкоди над сигналом буде, наприклад, 0,01.

$K_{\text{в}}$ – коефіцієнт відбиття показує як шибка відбиває промінь (доля відбитого сигналу 0,05-0,1).

Нехай відстань від ЛЗАР до вікна $R = 200$ м, довжина хвилі інфрачервоного випромінювання $\lambda = 800$ нм.

Тоді,

$$a \geq \sqrt[4]{\frac{3\lambda K_{\text{под}} K_{\text{в}} R^2 d}{73 \cdot 4}}, \quad (5.10)$$

$$a \geq \sqrt[4]{\frac{3 \cdot 0,1 \cdot 0,01 \cdot 200^2 \cdot 800 \cdot 10^{-9}}{73 \cdot 4}}, \quad (5.11)$$

$$a \geq \sqrt[4]{\frac{3 \cdot 0,1 \cdot 0,01 \cdot 200^2 \cdot 800 \cdot 10^{-9}}{73 \cdot 4}}, \quad (5.12)$$

$$a \geq 0,01347 \text{ м}, \quad (5.13)$$

$$a \geq 1,347 \text{ см}. \quad (5.14)$$

Для реалізації засобу захисту від ЛЗАР, довжина ребра кутикового відбивача має бути не менше, ніж 1,347 см. Таких кутикових відбивачів має бути декілька для того, щоб хоч на один з них потрапив боковий промінь лазера.

Таким чином, після відбиття бокових пелюсток променю від кутикового відбивача, він буде накладатись на інформаційний промінь і його амплітуда буде збільшуватись, за рахунок явища зменшення контрасту.

ВИСНОВКИ

Лазерні засоби акустичної розвідки займають важливе місце серед засобів прихованого отримання інформації. Аналіз існуючих засобів лазерної акустичної розвідки дозволив виявити високий ступінь залежності ефективності їх роботи від факторів зовнішнього середовища і їх власних параметрів. При виконанні роботи було виявлено, що більшість сучасних ЛЗАР працюють в ближньому інфрачервоному спектрі частот, а можливість отримання інформації залежить також від амплітуди вібрації скла віконної шибки, розташування ЛЗАР та перешкод.

У ході роботи було проаналізовано сучасні засоби лазерної акустичної розвідки, а саме лазерний мікрофон, а також існуючі засоби захисту. Активні засоби захисту потребують постійних затрат енергії, працюють за принципом перекриття, тобто створюють перешкоди, які за інтенсивністю були б вищі, ніж акустичні коливання голосу людини. В свою чергу пасивні засоби захисту засновані на використанні фізичних явищ, наприклад, інтерференції монохроматичних когерентних хвиль.

Також було запропоновано спосіб створення перешкоди ЛЗАР за допомогою кутикового відбивача і властивостей лазерного променя і проведено оцінку його можливостей. Показано, що за рахунок розходження лазерного променя можна створювати потужні перешкоди ЛЗАР за рахунок явища зменшення контрасту шляхом збільшення амплітуди не модульованого сигналу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Лазерні технології: навч. посіб. Ч. 1 / Я. В. Бобицький, Г. Л. Матвіїшин ; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львів. політехніка». — Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2015. — 316 с. : іл. — Бібліогр. в кінці розділів. — ISBN 978-617-607-789-3
2. Звелто О. Принципи лазерів. – Санкт-Петербург, Видавництво «Лань», 2008 р. – 720 с.
3. Харанжевский Е. В., Кривилёв М. Д. Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество. Учебное пособие. Под общей редакцией П. К. Галенко. – Ижевск: Изд-во “Удмуртский университет”, 2011. – 187 с.
4. Глосарій термінів з хімії // Й. Опейда, О. Швайка. Ін-т фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка НАН України, Донецький національний університет. — Донецьк : Вебер, 2008. — 758 с. — ISBN 978-966-335-206-0
5. Физическая энциклопедия. Т.3. Гл.ред. А. М. Прохоров. М.:Сов.энциклопедия. 1988.
6. "Air Force Research Lab's high power CO₂ laser". Defense Tech Briefs. Archived from the original on – Режим доступу: <https://web.archive.org/web/20070607101250/http://www.afrlhorizons.com/Briefs/Feb04/ML0315.html> -01.12.2020.
7. Liew, S. C. Electromagnetic Waves. Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing. – Режим доступу: <https://crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/em.htm> - 01.12.2020.

8. Інфрачервоне проміння // Українська радянська енциклопедія : у 12 т. / гол. ред. М. П. Бажан ; редкол.: О. К. Антонов та ін. — 2-ге вид. — К. : Головна редакція УРЕ, 1974—1985.
9. Инфракрасное излучение // Большая советская энциклопедия : в 30 т. / главн. ред. А. М. Прохоров. — 3-е изд. — М. : «Советская энциклопедия», 1969—1978.
10. Прохоров П. М., Т.2, 1990, с. 182
11. Яворський Б. М. Довідник з фізики: для інженерів та студентів вищих навч. закладів / Б. М. Яворський, А. А. Детлаф, А. К. Лебедев. — Т. : Навчальна книга-Богдан, 2005. — 1034 с. — ISBN 966-692-818-3.
12. Мейер А., Зейтц Э. Ультрафиолетовое излучение, пер. с нем., М., 1952.
13. ISO 21348 Process for Determining Solar Irradiances. Архів оригіналу за 2012-06-23. – Режим доступу: https://spacewx.com/ISO_solar_standard.html - 22.11.2020
14. Міхєєнко Л.А. Хвильові вимірювання. Навчальний посібник з дисципліни “Оптичні вимірювання”, частина III. – Київ, 2011. – 64 с.
15. Динаміка атомів і молекул в когерентних лазерних полях: монографія / А. М. Негрійко, В. І. Романенко, Л. П. Яценко ; відп. ред. М. С. Бродин; Нац. акад. наук України, Ін-т фізики. – К.: Наукова думка, 2008. – 239 с. – (Проект "Наукова книга").
16. Носов Ю.Р. Оптоелектроніка. – М.: Радянське радіо, 1977. -232 с.
17. Воронцов М.А. Принципи адаптивної оптики./М.А.Воронцов, В.І.Шмальгаузен. – М. : Наука, 1985. – 336 с.
18. Тараненко В.Г. Адаптивна оптика. / В.Г.Тараненко, О.И. Шанин. – М. : Радио и связь, 1990. – 105 с.
19. Antenna Radiation Pattern – Режим доступу: <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/Antenna%20Pattern.en.html> – 11.11.2020

20. Antenna Patterns in the meaning – Режим доступу: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-antennas-accessories/prod_white_paper0900aecd806a1a3e.pdf - 28.11.2020
21. Антенно-фидерные устройства Драбкин Зузенко Кислов 1974 (или другую) стр. 255 – 260
22. Закон України «Про інформацію» - Режим доступу: rada.gov.ua – 02.12.2020
23. Черевко О. В. Теоретические основы понятия информационной безопасности и классификация угроз информационной защиты [Электронный ресурс] / Эффективная экономика. – Режим доступа: <http://www.economy.nauka.com.ua/?op=1&z=3304> – 15.11.2020.
24. Хореев А. А. Оценка эффективности защиты информации от утечки по техническим каналам // Специальная техника. 2006, № 6, с. 53-61.
25. Покровский Н. Б. Расчет и измерение разборчивости речи. — М.: Гос. изд-во литературы по вопросам связи и радио, 1962. — 392 с.
26. Зайцев А.П. Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов / А.А. Шелупанов, Р.В. Мещеряков и др.; под ред. А.П. Зайцева и А.А. Шелупанова. – М.: ООО «Издательство Машиностроение», 2009 – 508 с.
27. Наказ МВС України № 059 від 14.06.98 р. “Про організацію та виконання робіт з технічного захисту інформації з обмеженим доступом в системі МВС України”
28. Хорошко В.О. Основи інформаційної безпеки /Хорошко В.О., Чередниченко В.С., Шелест М.Є./ За ред. проф. В.О. Хорошка. – К.: ДУІКТ, 2008. – 186 с.
29. Рибальский О.В., Хахановський В.Г., Кудінов В.А. Основи інформаційної безпеки та технічного захисту інформації / Посібник для курсантів ВНЗ МВС України, Київ 2012

30. Термінологічний довідник з питань технічного захисту інформації / Коженевський С.Р., Кузнецов Г.В., Хорошко В.О., Чирков Д.В. / За ред. проф. В.О. Хорошка. – К.: ДУІКТ, 2007. – 365 с.

31. Классификация акустических каналов утечки информации [Електронний ресурс] / Справочник по безопасности. – Режим доступа: <http://www.warning.dp.ua/tel25.htm> – 19.11.2020.

32. Лазерные микрофоны-универсальное средство разведки или очередное поветрие моды? [Електронний ресурс] / Инженерно-производственное предприятие "НЕРА-С". – Режим доступа: <http://www.nera-s.com/publication/301/> — 7.12.2020.

33. Лазерный микрофон. Полный обзор [Електронний ресурс] / Alt-sector. — Режим доступа: <http://alt-sector.net/3786-lazernyy-mikrofon-polnyy-obzor.html> — 23.11.2020.

34. Горбенко І. Оцінка характеристик лазерного каналу витoku мовної інформації з урахуванням багатомодового випромінювання лазера / Іван Горбенко, Юрій Ковальчук // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. – 2008. – № 2. – С. 83–88.

35. Торокин А.А. Инженерно-техническая защита информации. – М. : Гелиос АРВ, 2005. – 960 с.

36. Заболотный В.И. Модель отражающей поверхности лазерного канала разведки информации/ В.И.Заболотный, Ю.А.Ковальчук // Прикладная радиоэлектроника. -2007. -Т. 6, No3. С. 432-434.

37. Черевко О. В. Теоретичні основи поняття інформаційної безпеки і класифікація загроз інформаційного захисту [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=3304> - 05.12.2020.

38. Каторин Ю.Ф. Защита информации техническими средствами: Учебное пособие / А.В. Разумовский, А.И. Спивак; под редакцией Ю.Ф. Каторина. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 416 с

39. Каргашин В.Л. Некоторые особенности реализации пассивных мер защиты в вибро-акустических каналах утечки речевой информации/Специальная техника, 2002, № 4, 5
40. Звукоизоляция окон: способы решения, особенности монтажа, секреты реализации [Электронный ресурс] / RMNT.RU. Строительство, ремонт дом и дача. – Режим доступа: <http://www.rmnt.ru/story/windows/783654.htm> — 8.5.2016.
41. Стекла, поглощающие инфракрасную часть спектра [Электронный ресурс] / ОКНА.ua. – Режим доступа: <http://okna.ua/library/art-stekla-pogloschauschie-infrakrasnuu> — 29.11.2020.
42. Ярив А. Оптические волны в кристаллах [Текст]: навчальний посібник для ВУЗів / П. Юх. — Москва: Мир, 1987. – 616с.
43. Ландсберг Г. С. Оптика. — М.: Наука, 1976. — 928 с.
44. Шаповал З.В., Заболотний В.І. Аналіз ефективності існуючих засобів захисту від лазерних засобів акустичної розвідки: Тези доповідей восьмої міжнародної науково-технічної конференції Проблеми інформатизації – Черкаси, Харків, Баку, Бельсько-Бяла. - 2020