

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Проектування системи з відкритим атмосферним каналом передачі даних

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи РРм-61
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

	 (підпис)	<u>Галенда Б.В.</u> (прізвище та ініціали)
Керівник	 (підпис)	<u>Яворський Б.І.</u> (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	 (підпис)	<u>Хвостівська Л.В.</u> (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	 (підпис)	<u>Дунець В.Л.</u> (прізвище та ініціали)
Рецензент	 (підпис)	<u>Дедів Л.Є.</u> (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра радіотехнічних систем

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



(підпис)

Дунець В.Л.

(прізвище та ініціали)

« 1 » грудня

2023 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня магістр

(назва освітнього ступеня)

на спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

студенту Галенді Богдану Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проектування системи з відкритим атмосферним каналом передачі даних

Керівник роботи Яворський Богдан Іванович, д.т.н., проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 01 » грудня 2023 року № 4/7-1135

2. Термін подання студентом завершеної роботи 11 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи Технічне завдання, система з відкритим атмосферним каналом передачі даних

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітична частина

2. Основна частина

3. Науково-дослідна частина

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

системи з відкритим атмосферним каналом, вплив атмосфери на оптичне випромінювання, функціонування системи з відкритим атмосферним каналом.

АНОТАЦІЯ

Проектування системи з відкритим атмосферним каналом передачі даних // Кваліфікаційна робота магістра // Галенда Богдан Володимирович // ТНТУ ім. І.Пулюя, ФПТ // Тернопіль, 2023 // с. - 84, рис. - 17, дод. - 1, бібл. - 11.

Ключові слова: ОПТИЧНИЙ КАНАЛ, АТМОСФЕРНІ ВПЛИВИ, КОЕФІЦІЄНТ ПРОЗОРОСТІ.

В роботі проведено проектування системи з відкритим атмосферним каналом передачі даних. Проаналізовано типову структуру оптичної лінії зв'язку. Розглянуто вплив атмосфери на поширення в ній лазерного, зокрема інфрачервоного випромінювання. Детально проаналізовано можливий склад атмосферного каналу обміну даними та його вплив на загасання оптичного сигналу при поширенні його в різних погодних умовах. показано доцільність застосування оптичного передавача на основі CO₂-лазера. Проаналізовано особливості роботи такого лазера, для якого можливою є реалізація електронної або механічної перебудови довжини хвилі для забезпечення можливості високоякісного обміну даними в змінних погодних умовах. запропоновано функціональну схему системи зв'язку з відкритим каналом обміну даними на основ використання CO₂ лазера та наведено особливості вибору стандартів передачі даних. Проведено розрахунок лінії зв'язку із врахуванням атмосферних впливів.

ANNOTATION

Designing a system with an open atmospheric data transmission channel // Master's qualification work // Galenda B.V. // TNTU, FPT // Ternopil, 2023 // p. - 84, tabl. - 3, appl. - 17, bibl. - 11.

Key words: OPTICAL CHANNEL, ATMOSPHERIC EFFECTS, TRANSPARENCY FACTOR.

In the master's thesis, the design of the system with an open atmospheric data transmission channel was carried out. The typical structure of an optical communication line is analyzed. The influence of the atmosphere on the propagation of laser, in particular, infrared radiation in it is considered. The possible composition of the atmospheric data exchange channel and its influence on the attenuation of the optical signal during its propagation in different weather conditions are analyzed in detail. The expediency of using an optical transmitter based on a CO₂ laser is shown. The peculiarities of the operation of such a laser are analyzed, for which it is possible to implement electronic or mechanical adjustment of the wavelength to ensure the possibility of high-quality data exchange in variable weather conditions. a functional diagram of a communication system with an open data exchange channel based on the use of a CO₂ laser is proposed and features of the choice of data transmission standards are given. The communication line was calculated taking into account atmospheric influences.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	10
1.1 Загальні поняття систем з відкритим каналом передачі даних.....	10
1.2 Робота систем атмосферних ліній зв'язку.....	10
1.3 Структурна схема АОЛЗ.....	11
1.4 Стандартні системи АЛЗ.....	15
1.5 Застосування лазерів у космічних СЗ.....	15
1.6 Висновки до розділу 1.....	19
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	21
2.1 Вплив атмосфери на поширення ІЧ випромінювання.....	21
2.2 Вибір та обґрунтування довжини хвилі.....	23
2.3 Оптичний передавач на основі CO ₂ -лазера.....	26
2.4 Модуляція випромінювання.....	34
2.5 Перебудова довжини хвилі випромінювання.....	36
2.6 Ослаблення випромінювання CO ₂ -лазера в атмосфері.....	39
2.7 Деполяризація лазерного випромінювання у атмосфері.....	45
2.8 Висновки до розділу 2.....	46
РОЗДІЛ 3. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	48
3.1 Структура локальної обчислювальної мережі із застосуванням атмосферних оптичних ліній зв'язку.....	48
3.2 Структура системи передачі з відкритим атмосферним каналом.....	51
3.3 Аналіз проблем, що виникають при використанні систем з відкритим атмосферним каналом передачі даних для віддаленого доступу.....	53
3.4 Особливості функціонування FSO системи.....	56
3.5 Вибір основних функціональних блоків.....	58

	7
3.6 Вибір стандарту зв'язку.....	62
3.7 Енергетичний розрахунок лінії зв'язку.....	63
3.8 Взаємонаведення оптичних передавача та приймача. Алгоритм наведення.....	68
3.9 Розрахунок середньої кількості кроків та тривалості процедури наведення.....	72
3.10 Висновки до розділу 3.....	73
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	75
4.1 Охорона праці.....	75
4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	77
4.3 Висновки до розділу 4.....	80
ВИСНОВКИ.....	81
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	83
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Актуальність. З кінця минулого століття спостерігається помітний прогрес елементної бази пристроїв оптичного діапазону. Як наслідок, почали швидко розвиватися і деякі технічні програми. Насамперед це стосується атмосферних оптичних ліній зв'язку (АОЛЗ), як систем з відкритим каналом обміну даними. Такі незаперечні переваги АОЛЗ, як велика інформаційна ємність, малі габарити та вага апаратури, відсутність взаємних перешкод та необхідності отримувати дозвіл на використання радіочастот, можливість організації зв'язку на території, де недоступний або не виправданий радіо- та оптоволоконний зв'язок, відносно низька вартість, швидкість розгортання зв'язку, простота обслуговування, призвели до того, що АОЛЗ зайняли гідне місце між іншими системами передачі інформації. Питання безпеки для радіосистем, де перехоплення не становить проблеми, вирішується шляхом застосування різних методів шифрування даних. Для оптичних систем навіть саме перехоплення та виділення інформації є дуже складним завданням. Насправді, далеко не завжди можна ввести у канал зв'язку напівпрозоре дзеркало непомітно від користувача. Окрім цього, отримані відомості потрібно ще розшифрувати. Однак, системи оптичного зв'язку в цьому плані є перспективнішими в порівнянні із іншими типами каналів передачі даних. Такі системи реалізуються у вигляді складних радіо оптичних систем шляхом поєднання оптики, електроніки та радіофізики. Формування та загальний розвиток радіооптики багато в чому визначається інформаційними завданнями - завданнями спостереження та вимірювання, завданнями передачі, прийому та обробки великих масивів інформації при забезпеченні високої швидкодії. Клас інформаційних радіооптичних систем поєднує різноманітні та численні лазерні системи, особливістю яких є використання оптичного випромінювання як носія інформації.

В дослідженнях проводиться проектування системи обміну даними, в якій каналом передачі є відкритий простір, а в якості джерела оптичного випромінювання використовується CO₂-лазер. При цьому можливим стає реалізація методу електронної перебудови довжини хвилі CO₂-лазера для підвищення надійності та достовірності передавання даних у відкритому каналі та адаптації самого процесу обміну даними до атмосферних впливів шляхом корекції довжини хвилі випромінювання.

Мета. Проектування системи з відкритим атмосферним каналом передачі даних. **Задачі:**

- аналіз роботи систем з відкритим каналом передачі даних;
- аналіз атмосферних впливів на якість обміну даними в системі з відкритим каналом;
- розробка структури системи з відкритим атмосферним каналом;
- розрахунки проектованої системи обміну даними з відкритим атмосферним каналом.

Об'єкт дослідження: процес обміну даними з відкритим атмосферним каналом.

Предмет дослідження: спосіб обміну даними з відкритим атмосферним каналом.

Наукова новизна. Зостосування CO₂ лазера як джерела оптичного випромінювання в системі з відкритим атмосферним каналом з можливістю перебудови частоти випромінювання для підвищення ефективності та достовірності обміну даними.

Практичне значення. Можливість створення високоефективних та достовірних систем обміну даними з відкритим атмосферним каналом.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Загальні поняття систем з відкритим каналом передачі даних

З кінця минулого століття спостерігається помітний прогрес елементної бази пристроїв оптичного діапазону. Як наслідок, у ньому почали швидко розвиватися і деякі технічні програми. Насамперед це стосується атмосферних оптичних ліній зв'язку (АОЛЗ).

Такі незаперечні переваги АОЛЗ, як велика інформаційна ємність, малі габарити та вага апаратури, відсутність взаємних перешкод та необхідності отримувати дозвіл на використання частот, можливість організації зв'язку на території, де недоступний або не виправданий радіо- та оптоволоконний зв'язок, відносно низька вартість, швидкість розгортання зв'язку, простота обслуговування, призвели до того, що атмосферні лінії зв'язку зайняли певне місце серед інших систем передачі інформації.

Області застосування АОЛЗ - розподілені кампусні та корпоративні мережі (LAN), міські мультисервісні високошвидкісні мережі (MAN), телефонні мережі загального польовання.

1.2 Робота систем атмосферних ліній зв'язку

Атмосферна лінія зв'язку (АЛЗ) складається з двох ідентичних станцій, що встановлюються навпроти одна одної в межах прямої видимості - на дахах або стінах будинків або інших високих основах. У разі встановлення станцій для успішної роботи необхідно враховувати наступні рекомендації:

- на шляху променя не повинно бути перешкод, причому з урахуванням

сезонних змін;

- не слід встановлювати блоки АЛЗ на ліфтових шахтах біля витяжних вентиляторів, що обслуговують будівлі машин, коливання яких можуть викликати відхилення променя;

- не слід монтувати блоки АЛЗ на консольних конструкціях, металевих надбудовах та інших спорудах, які можуть згинатися під дією теплових та вітрових навантажень;

- не слід розташовувати блоки АЛЗ поблизу локальних джерел тепла;

- при орієнтації системи за напрямом захід - схід необхідно враховувати можливі порушення у роботі АЛЗ внаслідок засвічення приймача при сході чи заході сонця;

- слід уникати установки систем АЛЗ у безпосередній близькості від місць скупчення птахів, які можуть створювати перешкоди для зв'язку;

- необхідно враховувати сильний вплив туману на надійність АЛЗ і прокладати лінію на більшій висоті, де густина туману є меншою.

1.3 Структурна схема АОЛЗ

Структура оптичної лінії зв'язку подана на рис. 1.1. Як видно із схеми, структурний склад елементів за своїм функціональним призначенням майже аналогічний структурному складу класичної системи радіозв'язку.

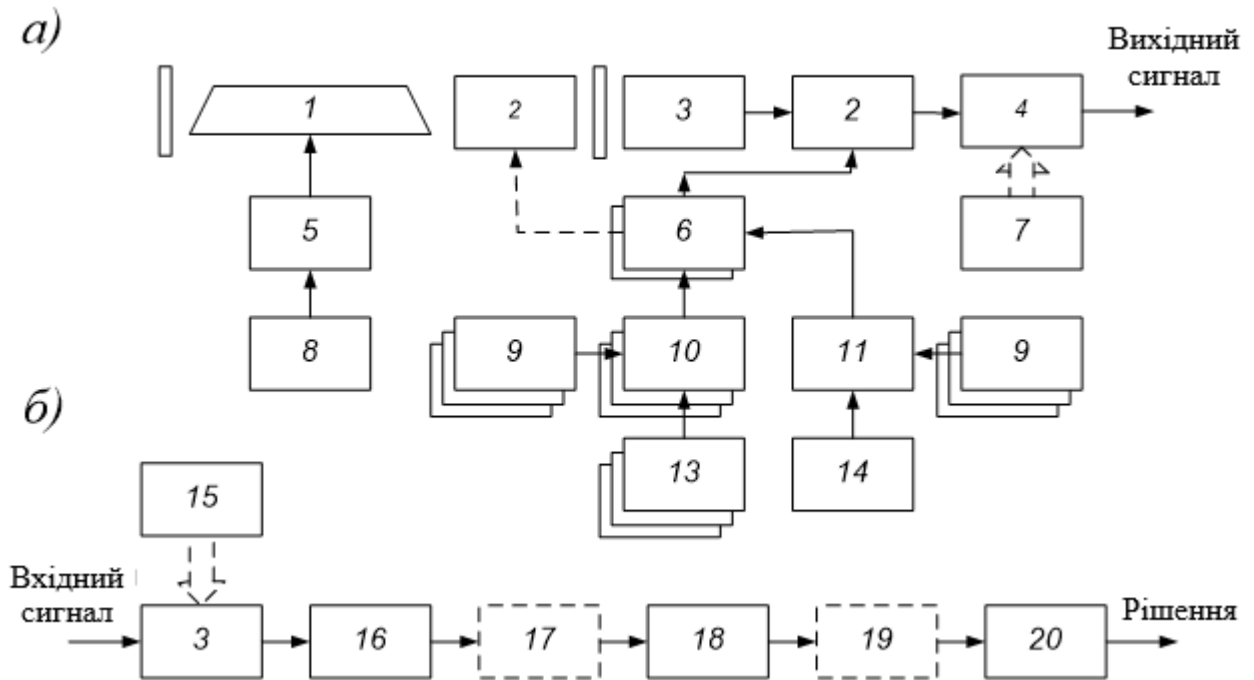


Рис. 1.1. Структура ОЛЗ: а) передавальний пристрій; б) приймальний пристрій. 1- лазер; 2 – оптичний фільтр; 3 - напівхвильова пластина; 4 - оптична антенна система; 5 - генератор накачування; 6 - підмодулятор; 7 – система програмного керування; 8 - джерело живлення; 9 – джерела аналогової інформації; 10 – електричні модулятори; 11 - кодуючий пристрій; 12 - джерело цифрової інформації; 13 - генератор піднесучої частоти; 14 – генератор коду; 15 - система пошуку та автосупроводу; 16 - оптичний фільтр; 17 - оптичний квантовий підсилювач; 18 - оптичний приймач; 19 – радіоприймач; 20 - декодуєчий пристрій.

До складу ОЛЗ входять: - джерела інформації; оптичний передавач, що складається з лазера та оптичного модулятора; оптичні антени передавача та приймача; оптичний вузькосмуговий фільтр; оптичний приймач; декодуєчий пристрій, структура якого визначається методом прийому (при посимвольному прийомі це - пороговий пристрій і схема прийняття рішення, прийому в цілому - набір кореляторів чи узгоджених фільтрів і схеми прийняття рішення), та інші

елементи, призначення яких впливає з їх найменувань. Окремі елементи схеми, показані пунктиром, є обов'язковими і можуть бути опущені залежно від призначення ОЛС, методу прийому, числа переданих каналів тощо.

Розглянемо докладніше структуру оптичного приймача. В даний час у практиці проектування, як правило, використовуються дві основні схеми оптичних приймачів: прямого детектування та супергетеродина.

Оптичний приймач прямого детектування складається з оптичного смугового фільтра, призначеного для ослаблення фонового випромінювання, фотодетектора (ФД) та електричного фільтра. В принципі, «відгук» ФД у робочому діапазоні спектра не залежить від частоти, фази та поляризації несучої. Тому приймач прямого детектування приймає сигнали тільки з модуляцією по амплітуді (АМ) або інтенсивності (ІМ). Для прийому сигналів з іншими видами модуляції перед приймачем прямого детектування встановлюється перетворювач модуляції, який перетворює будь-який вид модуляції в амплітуду модуляцію або інтенсивності оптичного сигналу.

Однією з найважливіших особливостей оптичного діапазону хвиль і те, що в дуже слабких оптичних полях, які діють АОЛЗ, ФД працює у режимі рахунку числа фотонів (фотоелектронів). Ця особливість практично виявляється при $s \leq 3$, де s - середня кількість фотоелектронів, що залишають фотокатод протягом часу дозволу ФД:

$$\tau = \frac{1}{\Delta f_{\text{ФД}}},$$

де $\Delta f_{\text{ФД}}$ - смуга пропускання ФД.

Оптичний гетеродинний приймач складається з смугового оптичного фільтра, напівпрозорого дзеркала, призначеного для просторового комбінування сигналів оптичної несучої та оптичного гетеродина, частота якого відрізняється

від несучої на необхідне значення проміжної частоти, ФД змішувача та електричного смугового фільтра, налаштованого на проміжну частоту. Отриманий після фільтра сигнал проміжної частоти обробляється надалі звичайними радіотехнічними пристроями. Гетеродинний приймач забезпечує високу чутливість і дозволяє приймати сигнали з амплітудною, частотною та фазовою модуляцією.

Вибір типу оптичного приймача в основному визначається видом модуляції сигналу, що передається, характером і рівнем перешкод, що діють на ОЛЗ, призначенням, умовами роботи і конкретними вимогами, що пред'являються до ОЛЗ.

Аналіз перешкодостійкості при різних способах передачі та прийому сигналів дозволить порівняти АОЛЗ між собою, а також порівняти реальні системи або субоптимальні з оптимальними з метою їх подальшого вдосконалення.

За допомогою зовнішнього або внутрішнього модулятора здійснюється модуляція лазерного випромінювання по амплітуді, інтенсивності, частоті, фазі або поляризації. Модульований лазерний промінь колімується оптичною антеною передавача. За допомогою оптичної приймальної антени сигнал фокусується на оптичний приймач. Вихідним сигналом оптичного приймача є електричний сигнал. Наступні електричні кола утворюють радіоприймач; у ньому здійснюються операції з виділення інформаційного сигналу. У гетеродинній системі зв'язку і в системі зв'язку на під несучій частоті, в радіоприймачі повинне здійснюватися також окреме перетворення або «перенесення» сигналу в низькочастотну область.

Співвідношення між переданою та прийнятою енергією сигналу описується рівнянням дальності дії системи зв'язку. Це рівняння характеризує поширення випромінювання в каналі зв'язку, втрати за рахунок природного розходження променя у вільному космічному просторі та ослаблення сигналу

при проходженні в окремих трактах та компонентах (складових елементах) системи зв'язку.

Втрати енергії несучої в модуляторі та оптичній антені передавача характеризуються коефіцієнтом передачі передаючої системи:

$$\tau_t = \frac{P_A}{P_L},$$

де P_L – потужність лазера P_A - потужність на виході передавальної системи. Таке визначення коефіцієнта характеризує будь-які втрати енергії променя в модуляторі або в антені передавача.

1.4 Стандартні системи АЛЗ

Системи АЛЗ можуть використовуватися не тільки на "останній милі" каналів зв'язку, але також і на окремих важко прохідних ділянках; для зв'язку в гірських умовах, в аеропортах, між окремими будинками однієї організації (органи управління, торгові центри, промислові підприємства, університетські містечка, лікарняні комплекси, будмайданчики тощо); під час створення рознесених у просторі локальних комп'ютерних мереж; при організації зв'язку між центрами комутації та базовими станціями стільникових мереж; для оперативного прокладання лінії за обмеженого часу на монтаж.

1.5 Застосування лазерів у космічних СЗ

Застосування для зв'язку з космічним апаратом лазерів забезпечить високу спрямованість випромінювання при прийнятних габаритах оптичних пристроїв (антен). Крім того, використання лазера дозволить застосувати когерентний

прийом оптичних сигналів.

З точки зору зменшення ваги оптичних систем з доцільною дифракцією розкриття антени дорівнює:

$$d = 1.22 \frac{\lambda}{\vartheta} \quad (1.1)$$

де λ - довжина хвилі;

ϑ - кутова ширина променя лазера.

Однак найбільша швидкість передачі інформації електромагнітною хвилею при певній смузі пропускання системи після детектора, при наявності некорельованого (білого) адитивного шуму і при необмеженій середній потужності прийнятого сигналу P_{M_s} дуже швидко зменшується, якщо несуча частота ν починає перевищувати величину P_s/hB_0 , де h - постійна Планка. Тому частоту лінії зв'язку $\nu = c/h$, де c - швидкість світла, не можна вибирати нескінченно велику без погіршення характеристик системи.

Згадані вище середня потужність сигналу, що приймається P_s та адитивний шум розглядаються на вході детектора. Щоб отримати на вході детектора сигнал потужністю P_s необхідна середня вихідна потужність передавача, рівна

$$P_L = \frac{1}{\tau_r \tau_t \tau_a} P_s \left(\frac{RQ_t}{d_r} \right)^2 \quad (1.2)$$

де, τ_r - коефіцієнт пропускання оптичної системи приймача;

τ_t - коефіцієнт пропускання оптичної системи передавача;

τ_a - коефіцієнт пропускання атмосфери;

Q_t - кутова ширина оптичного променя передавальної антени; K - дальність передачі;

d_r - діаметр розкриття приймальної антени.

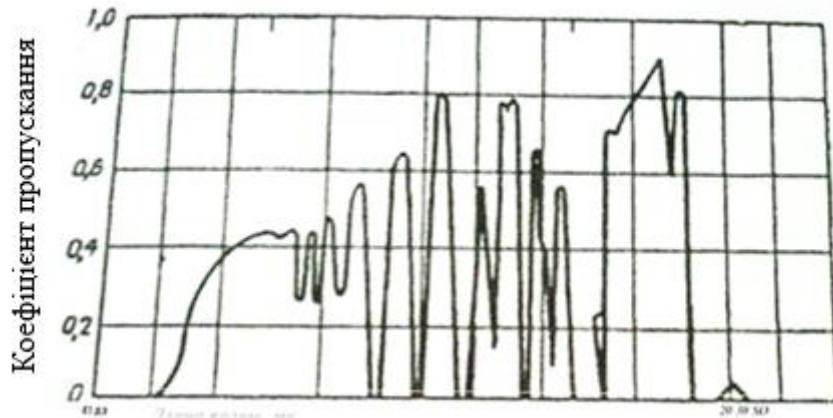


Рис. 1.2. Зміна пропускання сигналів атмосферою при різних довжинах хвилі

Коефіцієнти пропускання оптичних систем приймача та передавача можна вважати постійними.

Середня потужність сигналу P_s для даної постійної швидкості передачі I залежить від несучої частоти. Вибір частоти ґрунтуватиметься на припущенні, що схема модуляції може бути обрана таким чином, щоб використовувалась деяка певна частина інформаційної ємності каналу (наприклад, $a=0,1$). Залежність здатності різних приймачів оптичного діапазону отримувати інформацію з сигналу, що знімається, від довжини хвилі при середній потужності прийнятого сигналу 10^{-11} Вт, в смузі пропускання приймача 10^9 Гц і абсолютна температура 290°K . Інформаційна ємність каналу дорівнює добутку здатності детектора отримувати інформацію $y(X)$ з інформаційної ємності C_w електромагнітної хвилі. Із збільшенням довжини хвилі характеристики системи зв'язку покращуються, проте при цьому збільшується вага і зростає складність

апаратури.

Для ліній зв'язку земля-космос необхідне ретельне врахування коефіцієнта пропускання атмосфери. Мала величина цього коефіцієнта визначає велике значення необхідної потужності випромінювання передавача.

Однак збільшення потужності сигналу з зростанням частоти відбувається значно швидше, ніж зменшення інформаційної ємності електромагнітної хвилі, пов'язане зі зростанням здатності детектора витягувати інформацію $u(A)$.

Розрахунки показують, що квантова ефективність ідеального детектора дорівнює одиниці. Квантова ефективність реальних детекторів, що мають максимальну чутливість на довжинах хвиль більше 1 мк, близька до одиниці, але їх недоліком є обмежена смуга пропускання. Детектори з прийнятною шириною смуги пропускання мають нижчу квантову ефективність, ніж вказувалося вище.

Більш детальний аналіз системи зв'язку повинен включати врахування цього функціонального співвідношення, тобто при виборі робочої частоти необхідно враховувати і взаємозалежність смуги пропускання та квантової ефективності. Нарешті, при виборі частоти слід враховувати вихідну потужність лазера. Остання величина з урахуванням коефіцієнта корисної дії при оцінці системи зв'язку може бути переведена в еквівалентну вагу джерел живлення та системи охолодження.

Таким чином, при виборі робочої частоти системи зв'язку "земля-космос" необхідно враховувати такі обставини:

- При використанні когерентного режиму необхідно працювати на довгих хвилях. Для ліній зв'язку "земля - космос" цей висновок, однак, не є цілком обґрунтованим, оскільки турбулентність атмосфери порушує стабільність фазового фронту.

- Існуючі лазери працюють переважно на хвилях коротше 10 мк.
- Обмеженість смуги пропускання детекторів на довгих хвилях призводить до необхідності працювати на частотах, близьких до максимуму характеристики

спектральної чутливості фотопомножувача.

- З метою зменшення розмірів і ваги антени доцільно працювати на більш високих частотах, проте недоцільно збільшувати несучу частоту безмежно, оскільки при дуже вузьких променях утруднюється їх наведення на приймач і точне стеження за об'єктом, що рухається. Крім того, за рахунок флуктуації в атмосфері промінь викривляється, що при дуже малій ширині променя не дозволить здійснити стійкий зв'язок.

- Властивості атмосфери сприяють застосуванню некогерентного випромінювання, оскільки можна використовувати антени більшого розміру. Застосування гетеродинного режиму дозволяє звузити смугу пропускання проміжною частотою, що важливо з точки зору фільтрації фону в денний час і для режиму роботи, в якому обмежуючим фактором є фонове випромінювання.

Таким чином, з теоретичної точки зору краще працювати в нижній частині оптичного спектра частот із застосуванням прийомного пристрою гетеродинного методу детектування. Для ефективного використання потенційних можливостей когерентних лазерних систем необхідний розвиток як лазерної техніки, і техніки детектування оптичних сигналів, що застосовується у поєднанні з когерентними пристроями. В області максимуму квантової ефективності фотокатода характеристики детектора практично постійні, тому необхідно використовувати лазер з робочою частотою, по можливості найближчої до зазначеної області. Слід зазначити, що при установці приймального пристрою на штучному супутнику вигіднішим може виявитися когерентне випромінювання в інфрачервоному діапазоні.

1.6 Висновки до розділу 1

В розділі проаналізовано загальні поняття систем з відкритим каналом передачі даних, зокрема атмосферних оптичних ліній зв'язку. Проаналізовано

типову структуру оптичної лінії зв'язку, призначення її основних елементів. Розглянуто типові структури стандартних відкритих оптичної ліній зв'язку та зовнішні і внутрішні фактори, що впливають на їх роботу. З проведеного аналізу встановлено, що в якості джерела випромінювання доцільно використовувати спеціальні типи джерел лазерного випромінювання.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Вплив атмосфери на поширення ІЧ випромінювання

Атмосфера Землі складається в основному з азоту, кисню, водяної пари, вуглекислого газу (двоокису вуглецю), метану, окису азоту, окису вуглецю та озону. У механічній суміші цих газів знаходяться тверді та рідкі включення – найдрібніші частинки у зваженому стані. Частинки розподілені випадково і мають різний хімічний склад, а розміри їх коливаються від 10^{-7} до 10^{-1} см. Ці включення в атмосфері є частинками диму, водяними краплями, пилом землі, частинками вуглецю, кристали льоду, частинками солей, а також бактеріями, пилком рослин і т.д. Сукупність водяних крапель та твердих частинок викликає значне послаблення випромінювання.

Відсотковий склад основних газів атмосфери залишається майже незмінним до висот 25...30 км. Однак в атмосфері, що містить водяну пару, відсотковий вміст газів змінюється в залежності від його кількості. У діапазоні висот до 12 км основну роль в поглинанні випромінювання грають молекули вуглекислого газу та водяної пари. Концентрація водяної пари в залежності від температури та вологості повітря в атмосфері коливається в межах 10^{-3} ... 10^{-4} % (за обсягом). Концентрація водяної пари залежить також від географічного розташування, висоти, пори року та місцевих метеорологічних умов. Зі збільшенням висоти відсотковий вміст водяної пари різко зменшується через вплив низьких температур і процесів конденсації, а також внаслідок видалення поверхні, з якої відбувається випаровування.

Концентрація вуглекислого газу змінюється від 003 до 005%. Причому менша межа відповідає незабрудненому сільському повітрі, а верхня – атмосфері

над містами. Цей газ, як продукт життєдіяльності органічної природи, має більш високу концентрацію над масивами, покритими рослинністю, ніж, наприклад, над океаном. На висотах (до 25...30 км) концентрація більш рівномірна внаслідок більш повного вертикального перемішування атмосфери.

Концентрація метану в атмосфері коливається від 10^{-6} до $2 \cdot 10^{-4}$ % і поступово змінюється зі зміною висоти. Закис азоту (N_2O) має концентрацію $3 \cdot 10^{-5}$... $4 \cdot 10^{-5}$ %, окис вуглецю - $2 \cdot 10^{-5}$ %. Ці дві складові атмосфери впливають на поглинання випромінювання на великих відстанях. Концентрація озону (O_3) на висоті близько 30 км. 10^{-3} %, у нижніх шарах атмосфери - від 10^{-6} до 10^{-5} %, але на висоті 65 ... 70 км озон майже відсутній.

Тверді та рідкі включення замутиють атмосферу і беруть участь в утворенні хмар та туману, будучи ядрами конденсації водяної пари. На великих висотах головною причиною помутніння атмосфери є наземний пил, дим, бактерії, солі та гідрометеори. У відносно прозорому сільському повітрі міститься до 0,00025 пилу в 1 см^3 . У суху ясну погоду в 1 см^3 повітря міститься до 130 000 порошинок, після дощу їх кількість зменшується до 32 000 ... 30 000, а над водною поверхнею ще більше, досягаючи 1200 ... 800 на відстанях 19 ... 20 км від берега. У містах пил та дим промислових підприємств сильніше замутиють атмосферу.

Присутність в атмосфері пилових частинок, гідрометеорів та водяної пари значно послаблюють інтенсивність випромінювання у приземному шарі. Причиною утворення гідрометеорів є наявність у повітрі гігроскопічних домішок – ядер конденсації. Ядра конденсації складаються із скупчень солей та оксидів, а також частково із твердих включень. Скупчення солей або оксидів дуже гігроскопічні та інтенсивно сприяють початковому утворенню крапель. Подальше зростання крапель залежить від цілого ряду факторів, наприклад: швидкості висхідних потоків повітря, його температури та швидкості зміни температури з висотою, коефіцієнта перетворення тепла на поверхні краплі,

швидкості дифузії молекул розчиненої речовини при безперервній конденсації тощо. Відомо, що у водних туманах трапляються краплі розміром від 0,1 до 50 – 60 мкм. Більшість крапель мають розмір 7 – 15 мкм при позитивних температурах та 2 – 5 мкм при негативних. Число крапель в 1 см³ повітря дорівнює приблизно 50-100 для слабого туману і 50-600 для сильного. Краплі у хмарах мають розміри 2 – 30 мкм, а концентрація їх може змінюватися від 50 до 1500 на 1 см³. У серпанку (дуже слабкому тумані) розмір крапель менше 1 мкм, які число досягають 10 - 40 на 1 см³. Пропускання туману подібно до пропускання хмар, зокрема, від туманів і хмар добре відбивається сонячне світло. Туман і хмари мають вибіркоче поглинання.

Таблиця 2.1

Загасання оптичного сигналу при поширенні в різних погодних умовах

Погодні умови	Загасання, дБ/км
Ясна погода	0 - 3
Слабкий дощ	3 - 6
Сильний дощ	6 - 17
Сніг	6 - 26
Легкий туман	20 - 30
Густий туман	50 - 100

2.2 Вибір та обґрунтування довжини хвилі

Існує кілька "вікон прозорості" (мають поглинання менше 0.2 дБ/км) в діапазоні 700-10000 нм. Ці ділянки хвиль включають певні довжини хвиль, на яких працює переважна більшість FSO-систем: 780-850 нм і 1520-1600 нм:

- 850 Нм. Ці довжини хвиль підходять для роботи FSO-систем і цілий ряд виробників пропонує потужні лазери, що працюють у цьому діапазоні довжин

хвиль. На довжині хвилі 780 нм працюють лазери, що використовуються в CD-приводах, проте при проектуванні систем необхідно враховувати термін служби даних лазерів (наприклад, робота лазерів на потужності, значно меншій максимально допустимій дозволяє істотно збільшити термін їхньої служби). У районі 850 нм широко поширені високошвидкісні приймальні та передавальні компоненти, що зазвичай використовуються в мережах та передавальному устаткуванні. У цьому діапазоні можуть бути використані високочутливі кремнієві лавинні фотодіоди (APD) та лазери з вертикальною випромінюючою поверхнею (VCSEL). Можливим недоліком є можливість перехоплення випромінювання за допомогою приладів нічного бачення, проте демодуляція сигналу за допомогою цієї техніки неможлива.

- 1600 Нм. Ці довжини хвиль добре підходять для FSO-застосувань і до теперішнього часу доступні високоякісні компоненти для прийому та передачі випромінювання. Поєднання малого згасання та високої якості електронних компонентів для даного діапазону дозволяє створювати FSO-системи з хвильовим мультиплексуванням (WDM). Однак, зазначені компоненти коштують дорожче, приймачі мають меншу чутливість малими розмірами приймального майданчика в порівнянні з кремнієвими приймачами ЛФД, що працюють на 850 нм. Як вже було сказано, цей діапазон довжин хвиль застосовується у волоконно-оптичних системах при роботі на великі відстані та багато компаній працює над зниженням вартості та збільшенням швидкості компонентів в області 1200-1600 нм. Крім того, на цих довжинах хвиль працюють ербієві підсилювачі (EDFA), що дуже важливо для створення потужних (>500 мВт) та високошвидкісних (>2.5 Гбіт/с) систем. У діапазоні 1520-1600 нм порівняно з діапазоном 780-850 нм може бути передано в 50-65 разів більше потужності для того ж класу лазерної безпеки, зважаючи на менше поглинання людським оком випромінювання для цих довжин хвиль.

- 10 мкм. Цей діапазон довжин хвиль відносно новий для комерційних FSO-

систем і планується до застосування внаслідок меншого поглинання даного випромінювання димними середовищами. Зараз широко обговорюється ефективність цього явища, оскільки воно дуже залежить від виду диму та його протяжності. На ринку є компоненти для побудови систем на 10 мкм, але вони зазвичай не використовуються в телекомунікаційному обладнанні. Крім того випромінювання 10 мкм не проходить через скло і тому неможливе встановлення даного обладнання всередині приміщень. З іншого боку, слабке пропускання склом означає неможливість його концентрації оптичними приладами (наприклад, біноклями), що дозволяє працювати з великими потужностями без обмежень безпеки. Далі слід розглянути швидкість роботи FSO-систем з погляду атмосферного поширення випромінювання різних довжин хвиль в умовах сильного задимлення. Донедавна вважалося, що із збільшенням довжини хвилі збільшується і дальність зв'язку. Однак, недавні дослідження показали, що понад 780-1600 нм поглинання за рахунок сильного задимлення майже завжди і, фактично, немає ніяких переваг до міліметрового спектру. У той же час, величезна кількість досліджень показує, що випромінювання 10 мкм поширюється краще за умов туману та сильного диму. Однак ці умови зазвичай не складають проблем для якісно спроектованих передавачів FSO-систем на дистанціях, типових для їх комерційного застосування. Отже, реальне поліпшення залежить від типу диму та його протяжності. Стандартні моделі атмосферного розсіювання, що використовують теорію Мі або різні розрахункові засоби, такі як MODTRAN, не показують поліпшення роботи на 10 мкм. Навіть коли центр розподілу радіусів частинок диму менше 5 мкм, вклад верхньої частини розподілу (коли розсіювання пропорційно квадрату радіусу частинок) не показує будь-якої переваги на даній довжині хвилі.

Аналізуючи умови технічного завдання, де потрібно спроектувати АОЛЗ зі швидкістю передачі 1Гбіт на дистанцію 500м при доступності 99% в проєктованому модулі буде використовуватися довжина хвилі 850нм. Даний

вибір заснований на тому, що в даному діапазоні розвинена елементна база, яка має нижчу вартість, ніж для діапазону 1550нм та більш високу надійність. Також перевагою даної довжини хвилі є те, що в цьому діапазоні працюють високочутливі кремнієві лавинні фотодіоди і лазери з вертикальною випромінюючою поверхнею (VCSEL). Перевагами VCSEL є:

1. Технологічність виробництва випромінювача;
2. Зниження ціни в порівнянні з іншими лазерними діодами;
3. Вузконаправлений та інтенсивний спектр оптичного випромінювання.

Довжина хвилі 10мкм не розглядається через те, що дані системи, на даний момент, переважно експериментальні, мають велику вартість і не дають значного поліпшення якості зв'язку в умовах поганої видимості, в порівнянні з іншими діапазонами хвиль.

2.3 Оптичний передавач на основі CO₂-лазера

Газовий лазер - лазер з активним середовищем у вигляді газів, парів або їх сумішей. Як і будь-який лазер, газовий лазер містить активне середовище, що має підсилення на одній або декількох лініях в оптичному діапазоні спектру, і оптичний резонатор (у найпростішому випадку складається з двох дзеркал, між якими поміщено активне середовище).

Особливості газового лазера визначаються властивостями активного середовища, щільність якого змінюється в широких межах (тиск від 10^{-3} мм рт. ст. до десятків атмосфер), проте воно значно менше, ніж у конденсованих середовищах. З цієї причини газове активне середовище в більшості випадків прозоре в широкій області спектру і має вузькі лінії поглинання та випромінювання. Газові лазери можуть генерувати вузькі лінії випромінювання, що лежать у широкій області спектру, в т. ч. і далекій короткохвильовій (де немає прозорих конденсованих середовищ). Газові лазери дозволяють отримувати

гранично вузькі та стабільні лінії генерації. Мала щільність активного середовища визначає температурні зміни показника заломлення. Це дозволяє порівняно легко отримувати із газовим лазером гранично малу (дифракційну) розбіжність випромінювання. Різноманітність фізичних процесів, що призводять до утворення інверсії заселення, створює велику різноманітність типів, характеристик та режимів роботи газового лазера. Можливість швидкого прокачування газового активного середовища через оптичний резонатор дозволила в газовому лазері досягти рекордно великих середніх потужностей випромінювання.

Газові лазери можуть працювати в неперервному/імпульсному режимах та істотно різняться як конструктивно, так і за характеристиками. Для безперервної генерації потрібно, щоб механізм накачування забезпечував стаціонарну в часі інверсію заселення рівнів робочого переходу. Для цього необхідне ефективне збудження верхнього та можливо швидкий розпад (спустошення) нижнього рівнів. В імпульсному режимі можна забезпечити високу швидкість накачування та легше уникнути перегріву активного середовища.

За механізмами утворення інверсії заселеностей виділяють газові лазери з збудженням електронним ударом, з передачею збудження від частинок допоміжних газів, рекомбінаційні, лазери з прямим оптичним збудженням, фотодисоціаційні газові лазери та ін. У ряді випадків реалізуються комбіноване збудження. З газового лазера отримано генерацію на більш ніж 6000 окремих лініях у дуже широкій області спектру від вакуумного УФ до субміліметрових хвиль. Газовому лазеру присвячується приблизно половина наукових публікацій з лазерів, понад 60% - газорозрядним лазерам. Конструктивні особливості, потужність генерації, ккд та інші характеристики газового лазера змінюються в дуже широких межах. Величезна кількість газових лазерів різних типів випускається серійно.

Лазерним джерелом випромінювання, який легко можна виготовити у

вигляді, придатному для використання в оптичному зв'язку, є чотирирівневий газовий лазер на вуглекислому газі, що працює на довжині хвилі 106 мкм. Як і більшості газових лазерів, верхній лазерний рівень заселяється прямо чи опосередковано з допомогою електронного збудження у газовому розряді. При низьких тисках, скажімо, приблизно 1/10 атмосфери може використовуватися або розряд, що збудження постійним струмом, або радіочастотний тліючий розряд. Найважливіше полягає в тому, щоб отримати однорідний та безперервний розряд у всьому обсязі активного середовища. Для отримання дуже коротких лазерних імпульсів (менше 1 нс) були розроблені складні методи накачування, пов'язані з використанням розрядів високої потужності, а для отримання дуже високої потужності в безперервному режимі (понад 100 кВт) - методи безперервного накачування газового потоку. Як джерело випромінювання для цілей зв'язку найбільш підходящим виявився компактний відпаяний пристрій, здатний давати від декількох ватів до декількох десятків ват потужності в безперервному режимі випромінювання в формі, що легко модулюється. Для цього спеціально розроблено конкретний тип хвилеводного лазера. Перед розглядом деяких особливостей цієї конструкції зупинимося на фізичних основах роботи лазера на вуглекислому газі.

У більшості лазерів на CO_2 використовується суміш вуглекислого газу, азоту та гелію в пропорції приблизно 1:2:3 відповідно. Істотну роль, яку відіграє азот у ефективному збудженні верхнього лазерного рівня, можна побачити на спрощеній діаграмі електронних енергетичних рівнів. Коливальні рівні азоту є метастабільними, в результаті чого найбільш вірогідний спосіб зняття збудження полягає в резонансній передачі при зіткненні з молекулою CO_2 , що перебуває в основному стані, яка, таким чином, збуджується до рівня $00^{\circ} 1$. З кожним коливальним рівнем пов'язана велика кількість близько розташованих високоенергетичних обертальних станів. В результаті можуть збуджуватися багато лазерних переходів в області 10,6 і 9,6 мкм, а також на прилеглих

довжинах хвиль. Близькість лазерного енергетичного рівня до основного поряд з високою ймовірністю збудження рівня $00 \text{ } ^\circ \text{ } 1$ роблять CO_2 -лазер дуже ефективним, причому цілком досяжний загальний ККД понад 10%. Однак це є причиною обмеження вихідної потужності, так як при нагріванні газу рівень 0101 стає термічно заселеним, що запобігає зняттю збудження з нижнього лазерного рівня. Тут кращим є гелій, так як за рахунок гарної теплопровідності він сприяє охолодженню розряду, а завдяки зняттю збудження в результаті зіткнення молекул заселеність нижнього лазерного рівня зменшується швидше. Перевагою гелію є ще й те, що шляхом зміни його тиску можна здійснювати деяке керування розподілом енергії електронів у розряді, а це може використовуватись для отримання максимальної швидкості збудження на енергетичний рівень.

Напруга, що прикладається до модулятора, змінює площину поляризації випромінювання в резонаторі, а отже, і пропорційну частину виведеної за допомогою дифракційної решітки вихідної потужності. Більш ефективно використовувати внутрішньорезонаторну, а не зовнішню модуляцію, яка вимагає менших модулюючих напруг.

Принцип генерації когерентних оптичних коливань квантовими генераторами заснований на явищі вимушеного або індукованого випромінювання. Саме «вимушеність» випромінювання обумовлює високий ступінь когерентності коливань, що генеруються, спрямованість і велику спектральну щільність потужності. Механізм вимушеного випромінювання квантовими системами можна пояснити з позицій квантової електродинаміки. Спрощене пояснення ґрунтується на методі визначення коефіцієнтів вимушеного та спонтанного випромінювання, розробленому вперше Альбертом Ейнштейном. Нижче з урахуванням останнього методу виводяться співвідношення інверсної заселеності, і навіть умови самозбудження і генерації оптичного квантового генератора (ОКГ).

Розглянемо систему частинок (атомів, молекул чи іонів), що перебувають

у стані термодинамічної рівноваги. Позначимо загальну кількість частинок, що становлять систему, через N_0 . Нехай система характеризується, серед інших, двома енергетичними рівнями E_1 та E_2 . Заселеність цих енергетичних рівнів позначимо через N_1 і N_2 (заселеність енергетичного рівня дорівнює числу частинок із даною енергією в одиниці об'єму). Відповідно до закону Больцмана заселеності цих енергетичних рівнів при термодинамічній рівновазі виражаються як

$$N_i = N_0 \cdot e^{-E_i / kT},$$

де T - абсолютна температура, К; k – постійна Больцмана.

Ці формули не враховують ступеня виродження рівнів. Співвідношення заселення має вигляд:

$$\frac{N_1}{N_2} = e^{-(E_1 - E_2) / kT},$$

де $h\nu = E_2 - E_1$.

Температура, виражена через відношення заселення рівнів, визначається:

$$T = \frac{h\nu}{k \cdot \ln(N_1/N_2)}.$$

Відповідно до цього співвідношення, на вищому енергетичному рівні (наприклад, E_2) при термодинамічній рівновазі завжди знаходиться менше частинок (тобто $N_2 < N_1$). Такий стан характеризується позитивною температурою $T > 0\text{К}$. Якщо система частинок зазнала зовнішнього впливу і частки

перерозподілилися отже на верхньому енергетичному рівні їх кількість стала більшою, ніж на нижньому, тобто $N_2 > N_1$ стан системи характеризується «негативною» температурою $T < 0\text{K}$.

Зрозуміло, у природі негативних температур немає, і таке визначення є суто умовним. Стан системи частинок із умовно негативною температурою є станом з інверсною (звотною) заселеністю.

Особливості квантових переходів частинок між енергетичними рівнями найлегше розглянути на прикладі найпростішої дворівневої системи, поміщеної в резонансну порожнину.

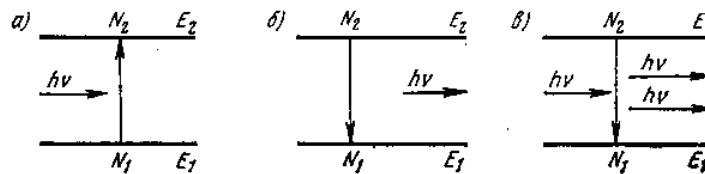


Рис. 2.2. Типи квантових переходів: а) резонансне поглинання; б) спонтанне випромінювання; в) вимушене випромінювання.

При переході частинки на більш високий енергетичний рівень її енергія зростає; відповідно на таку ж величину зменшується енергія зовнішнього поля. Цей квантовий перехід називається переходом із резонансним поглинанням.

Інтенсивність резонансних переходів, очевидно, повинна залежати від щільності енергії зовнішнього поля, числа частинок на нижньому рівні та специфічних властивостей частинок, які задіюються у переходах. Тоді число переходів із стану E_1 у стан E_2 за час dt становитиме:

$$dz_{12} = B_{12} \rho_\nu N_1 dt$$

Тут ρ_ν - спектральна густина енергії в порожнині, B_{12} - коефіцієнт

Ейнштейна вимушеного (резонансного) поглинання для окремої частки.

Без зовнішнього поля частинки можуть переходити з більш високого рівня на нижчий спонтанно. При цьому генерується спонтанне випромінювання. Число спонтанних переходів за час dt визначається виразом:

$$dz_{21}' = A_{21} \cdot N_2 dt,$$

де A_{21} - коефіцієнт Ейнштейна (ймовірність спонтанного переходу $2 \rightarrow 1$ за одиницю часу для окремої частинки). Середній час життя збудженої частинки обернено пропорційний ймовірності переходу:

$$\tau_{21} = \frac{1}{A_{21}}$$

Спонтанне випромінювання є некогерентним.

Зовнішнє електромагнітне поле індукує переходи частинок з найвищого енергетичного рівня на нижчий. Ці вимушені переходи супроводжуються випусканням квантів. Особливістю вимушених переходів є те, що зовнішнє поле «нав'язує» квантам свою частоту, напрямок поширення і поляризацію. У свою чергу, кванти, що випускаються, «підтримують» (підсилюють) зовнішнє поле. Цей взаємопов'язаний процес зумовлює створення когерентного випромінювання. Число вимушених переходів протягом часу dt також залежить від густини зовнішнього поля, кількості частинок верхнього рівня та коефіцієнта Ейнштейна вимушеного випромінювання кванта:

$$dz_{21}'' = B_{21} \cdot \rho_\nu \cdot N_2 dt$$

Повна кількість випромінювальних переходів становить:

$$dz_{21} = dz_{21}' + dz_{21}''$$

Через дію зовнішнього електромагнітного поля генерується випромінювання, що складається із спонтанного та вимушеного випромінювань; останнє є когерентним. У рівноважному стані системи інтенсивності переход

«вверх» і «вниз» ($1 \leftarrow 2$) рівні: $dz_{21} = dz_{12}$, тому:

$$(A_{21} + B_{21} \cdot \rho_\nu) \cdot N_2 = B_{12} \cdot \rho_\nu \cdot N_1.$$

Звідки отримаємо

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{B_{12} \cdot \rho_\nu}{A_{21} + B_{21} \cdot \rho_\nu}$$

Порівнюючи останній вираз із співвідношенням заселення за законом Больцмана, отримуємо вираз для щільності енергії:

$$\rho_\nu = \frac{A_{21}}{B_{12} e^{h\nu/kT} - B_{21}}$$

З фізичних міркувань випливає, що за $T \rightarrow \infty$ $\rho_\nu \rightarrow \infty$. Тоді, вважаючи знаменник останнього виразу рівним нулю, знаходимо $B_{12} = B_{21}$.

При статистичній рівновазі випромінювання всередині порожнини характеризується спектральною щільністю енергії ρ_ν , яка визначається формулою Планка:

$$\rho_\nu = \frac{8\pi \cdot h \cdot \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

де T – температура стінок порожнини.

Порівнюючи вирази для щільностей енергії, отримуємо:

$$B_{21} = \frac{c^3}{8\pi \cdot h \cdot \nu^3} \cdot A_{21}$$

Коефіцієнт Ейнштейна A_{21} для конкретних речовин можна визначити експериментально. Залежність між коефіцієнтами вимушених та спонтанних переходів B_{21} та A_{21} дає кількісне співвідношення інтенсивностей вимушеного та спонтанного випромінювань та є основою теорії когерентної генерації оптичних квантових генераторів.

2.4 Модуляція випромінювання

Процес модуляції полягає у зміні амплітуди, інтенсивності, частоти, фази або поляризації коливання несучої частоти відповідно до інформаційного сигналу.

Методи модуляції коливань оптичних частот відрізняються від відповідних методів для коливань частот радіодіапазону, перш за все, через характеристики та обмеження пристроїв, що використовуються для здійснення процесу модуляції. Багато модуляторів оптичного діапазону здійснюють модуляцію оптичної несучої по інтенсивності (квадрат амплітуди електричного поля). Далі, так як оптичні детектори реагують на інтенсивність оптичного коливання, аналогова амплітудна модуляція знаходить обмежене застосування внаслідок істотної нелінійної залежності між модулюючим сигналом і вихідним сигналом. Існують фазові модулятори, однак їх застосування сильно обмежується можливостями демодуляції, остання обставина обумовлена частотними

нестабільностями як передавального пристрою, так і місцевого гетеродинного генератора приймача.

У таблиці 2.2 класифіковані способи модуляції лазерного випромінювання (аналоговий, імпульсний та цифровий). В аналогових модуляційних системах амплітуда, частота, фаза, інтенсивність або поляризація коливання несучої частоти безперервно змінюються відповідно до аналогового інформаційного сигналу $M(t)$. В імпульсних модуляційних системах тривалість сигналу несучої або момент її появи змінюються відповідно до інформації, що передається. У більшості імпульсних модуляційних систем інформаційний сигнал квантується за часом та зберігається однозначна відповідність між відліками інформаційного сигналу та імпульсами коливання несучої частоти. Якщо найвища частота інформаційного сигналу дорівнює B_0 , то згідно з теоремою відліків сигнал $M(t)$ може бути відновлений за значеннями відліків $M(t_n)$, що віддаляються в часі на інтервал $1/2 B_0$ сек. Насправді багато джерел сигналів немає чіткого обмеження по смузі, тому квантування за часом має здійснюватися, наскільки можна, на найвищій частоті з метою зменшення помилок при відновленні інформаційного сигналу. Амплітуди інформаційних відліків часто обмежені певною групою рівнів при квантуванні за амплітудою, що дозволяє ефективно використовувати цифрові пристрої пам'яті та обробки. Квантування по амплітуді потрібне для всіх цифрових видів модуляції. У цифрових системах модуляції кожному квантованому відліку зіставляється дискретна група символів або код. Зазвичай кодовий набір складається з послідовності «одиниць» та «нулів»; таке кодування інформації називається кодово-імпульсною модуляцією (КИМ).

Класифікація методів модуляції лазерного випромінювання

Тип модуляції	Аналогова	Імпульсна	Цифрова
Інформаційний сигнал	Неперервний у часі	Неперервний чи дискретний у часі	Дискретний у часі
Параметр коливання несучої частоти (амплітуда, інтенсивність, частота, фаза або поляризація)	Неперервний	Неперервний чи квантований	Квантований і кодований

У системі аналогової модуляції за інтенсивністю (ІМ), інтенсивність лазерного променя прямо пропорційна інформаційному сигналу, що безперервно змінюється в часі. Для квантованої імпульсної модуляції інтенсивності (ІМІ) характерно те, що інтенсивність несучої пропорційна квантованому значенню амплітуди інформаційного сигналу протягом фіксованого інтервалу часу.

2.5 Перебудова довжини хвилі випромінювання

Електронна перебудова довжини хвилі випромінювання CO₂-лазера [4].

Лазери з довжиною хвилі випромінювання, що перебудовується, мають як наукове, так і прикладне значення. Відомі їх застосування при контролі та вимірюванні товщини шарів в інтегральних схемах, багатохвильовій еліпсометрії, в системах аналізу газових сумішей методами лінійної лазерної оптико-акустичної спектроскопії, а також нелінійної спектроскопії з використанням комбінаційного розсіювання. Існує кілька способів перебудови частоти випромінювання газових лазерів, наприклад шляхом механічного повороту дисперсійного елемента, введення рухомої маски або дзеркала, що

перебудовується.

Пошук нових способів швидкої перебудови частоти випромінювання CO_2 -лазера додатково стимулюється появою спеціальних завадостійких алгоритмів газоаналізу, що забезпечують підвищення швидкості та точності розпізнавання газової суміші, якщо сканування за спектром проводити не послідовно від однієї лінії до сусідньої, а за спеціальним законом, що адаптивно формується комп'ютером у процесі газоаналізу та передбачає переходи між деякими характерними спектральними лініями в діапазоні перебудови. Таким вимогам задовольняє CO_2 -лазер із внутрішньорезонаторною електронною перебудовою частоти.

При створенні лазера з немеханічною зміною частоти випромінювання як базова конструкція використовується випромінювач лазера. Перебудова здійснюється електронним способом усередині оптичного резонатора. На рис. 2.2 зображено схему оптичного резонатора лазера, а на рис. 2.3 - поперечний переріз його робочого газорозрядного зазору, в обсязі якого формуються канали генерації індукованого випромінювання.

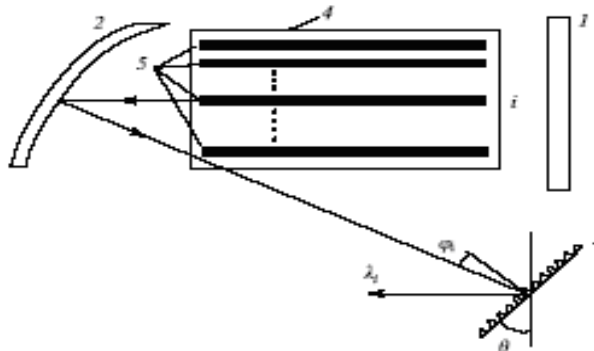


Рис. 2.2. Оптичний резонатор лазера, що перебудовується: 1 - плоске дзеркало, 2 - сферичне дзеркало, 3 - ешелет, 4 - щілинний зазор, 5 – генеруючі канали

Оптичний резонатор побудований за модифікаційною схемою Якобі і

містить плоске дзеркало 1, а також сферичне дзеркало 2, в фокальній площині якого розташований нерухомо закріплений ешелет 3.

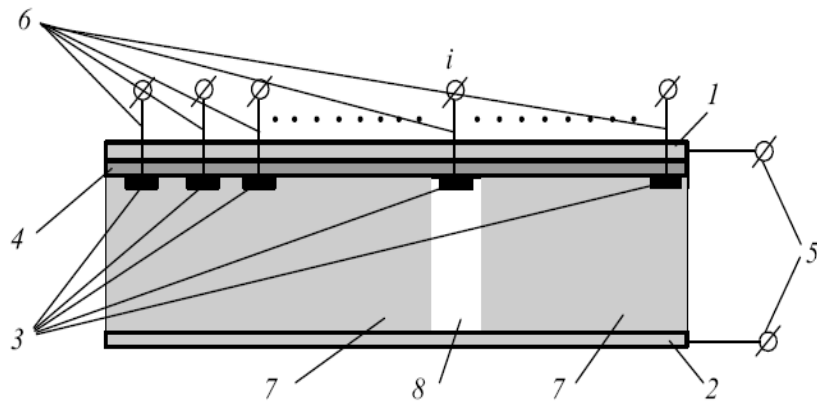


Рис. 2.3. Поперечний переріз робочого каналу лазера, що перебудовується: 1,2 - ВЧ електроди, 3 - додаткові електроди, 4 - діелектрик, 5,6 - клеми, 7 - плазмовий об'єм, 8 - поздовжній канал по довжині електрода

Робочий зазор лазера утворений широкими ВЧ електродми 1,2, п додаткових електродів 3 у вигляді вузьких поздовжніх металевих смуг, ізольованих від ВЧ електрода діелектриком 4. Перебудова частоти лазера заснована на керованому придушенні ВЧ розряду (напруга накачування підводиться до клем 5) одним з додаткових смужкових електродів, наприклад електродом i , до якого з допомогою клем 6 підводиться негативна відносно ВЧ електродів постійна електрична напруга. Потужний потенціал вибирається достатнім для зменшення швидкості іонізації в області, що оточує смужковий електрод i , нижче критичної. Завдяки цьому в широкому плазмовому об'ємі 7 по довжині смужкового електрода «випалюється» вузький поздовжній канал 8. При підведенні напруги гасіння до всіх додаткових електродів, крім електрода i , ВЧ розряд (активне середовище) існує тільки в об'ємі вузького каналу 8.

Подібний режим є робочим для однохвильової генерації, що перебудовується, з будь-яким (регулярним або нерегулярним) порядком

чергування спектральних ліній. Конкретній хвилі λ_i відповідає кут φ_i падіння випромінювання на ешелеті, що однозначно визначає положення смужкового електрода і в щілинному зазорі 4 (рис. 2.3). З цієї причини набору хвиль λ_m ($m = 1, 2, \dots, n$) відповідає система n додаткових електродів, розташованих усередині робочого зазору відповідно до вищеописаного правила. Склад набору хвиль може бути змінений переустановкою ешелету під новим кутом θ .

Працюючи на довжині хвилі від 9 до 11 мкм і потрапляючи при цьому в певне вікно прозорості атмосфери і маючи лазер з робочою довжиною хвилі, що перебудовується, ми можемо зберігати стійкий зв'язок як при випадковій перешкоді (дим від рядом розташованих заводів, котелень) так і при невідповідній - спеціальній перешкоді (розпорошення аерозолі та інших засобів), перебудовуючись з однієї несучої на іншу за заданою програмою, випадковому закону, відомому на передавальній та приймальній стороні відповідно (здійснивши синхронізацію передавача та приймача).

2.6 Ослаблення випромінювання CO₂-лазера в атмосфері

Атмосферне згасання. Згасання випромінювання в атмосфері може бути описане експоненціальним законом. Коефіцієнт пропускання атмосфери дорівнює:

$$\tau_a = \exp(-\alpha_a \cdot L),$$

де L - довжина середовища, в якому поширюється випромінювання; α_a - коефіцієнт ослаблення середовища, що дорівнює сумі коефіцієнтів поглинання α_b і розсіювання α_s .

Таким чином, коефіцієнт пропускання атмосфери може бути

представлений у вигляді добутку:

$$\tau_a = \tau_b \cdot \tau_s,$$

де τ_b - коефіцієнт пропускання атмосфери, що враховує лише поглинання;
 τ_s - коефіцієнт пропускання атмосфери, що враховує лише розсіювання.

Поглинання в атмосфері обумовлено в основному наявністю молекул водяної пари, двоокису вуглецю та озону. На малюнку наведено графіки коефіцієнтів пропускання цих компонентів. Криві були зняті із відносно низькою спектральною роздільною здатністю. Насправді поглинання в атмосфері різко змінюється при зміні довжини хвилі, оскільки молекулярне поглинання має лінійний спектр, а не смуговий.

На основі цих графіків можна правильно вибрати частоту несучої лазера, і зробити висновок про необхідність її стабілізації в областях з мінімальним поглинанням. Грубі оцінки поглинання в атмосфері можуть бути отримані шляхом підрахунку кількості молекул поглинаючих речовин і врахуванням шляхів проходження лазерного променя. Отримати такі оцінки важко, оскільки концентрація молекул в атмосфері визначається температурою та тиском, що змінюються з географічною широтою, висотою та є залежними від стану погоди.

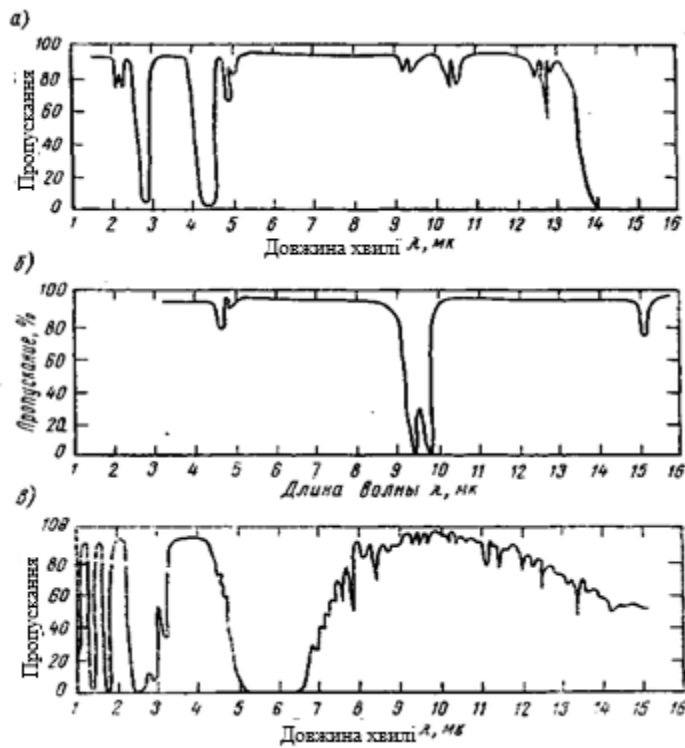


Рис. 2.4. Криві пропускання компонентами атмосфери: а) поглинання двоокисом вуглецю; б) поглинання озonom; в) поглинання вологою

Атмосферне розсіювання, що відбувається на частинках, розміри яких можна порівняти з розмірами молекул, називається релєївським розсіюванням; атмосферне розсіювання на частинках, розміри яких великі в порівнянні з довжиною хвилі, називається Мі-розсіюванням (цей вид розсіювання спостерігається в тумані та димах).

Коефіцієнт ослаблення α_{SR} при релєївському розсіювання визначається виразом:

$$\alpha_{SR} = 0.827N \cdot A_p^3 \cdot \lambda_c^{-4},$$

де N – число частинок, що припадають на одиницю об'єму траси розповсюдження; A_p - площа поперечного перерізу розсіюючої частинки.

Площу частинки та довжину хвилі у формулі необхідно брати в сантиметрах. Оскільки коефіцієнт релєївського розсіювання обернено пропорційний λ^{-4} , випромінювання коротких довжин хвиль розсіюється сильніше, ніж випромінювання довших хвиль. Цим, наприклад, пояснюється блакитний колір неба. Компоненти сонячного світла менших довжин хвиль розсіюються на шляху до землі більше, ніж компоненти довших хвиль. Найчастіше релєївське розсіяння в багато разів менше, ніж Мі-розсіювання, і ним практично можна знехтувати. Мі-розсіювання описується за допомогою наступного емпіричного співвідношення:

$$\alpha_{SM} = \frac{3.91}{\gamma} \left[\frac{\lambda_c}{0.55} \right]^{-0.585\gamma^{\frac{1}{3}}},$$

де α_{SM} - коефіцієнт Мі-розсіювання; γ - метеорологічна дальність видимості в кілометрах (довжина хвилі та дальність шляху виражаються відповідно в мікронах та в кілометрах).

Значення метеорологічної дальності видимості багатьох районів щодня повідомляються бюро погоди метеорологічної служби. Як приклад використання формули при Мі-розсіянні зробимо розрахунок ослаблення лазерного випромінювання з λ_c , що проходить шлях в атмосфері протяжністю 1 км, при дальності видимості, що дорівнює 5 км.

Коефіцієнти Мі-розсіювання та коефіцієнти пропускання атмосфери для деяких довжин хвиль наведені в таблиці.

Коефіцієнти Мі-розсіювання та коефіцієнти пропускання атмосфери для деяких довжин хвиль

λ_c , МКМ	α_{SM} , КМ ⁻¹	τ_S
0,5	0,860	0,42
1,0	0,430	0,65
2,0	0,215	0,81
5,0	0,086	0,92
10,0	0,043	0,96

На рис. 2.5 показано зміну пропускання атмосфери для різних значень довжин хвилі (враховувалося поглинання та розсіювання). Зменшення коефіцієнта пропускання в діапазоні нижче двох мікронів пояснюється переважно впливом розсіювання. Різкі зміни коефіцієнта пропускання (провали) пояснюються селективним характером поглинання на інфрачервоних частотах. У діапазоні довжин хвиль є вісім областей з високими значеннями коефіцієнта пропускання. Ці області називаються атмосферними вікнами (вікна прозорості).

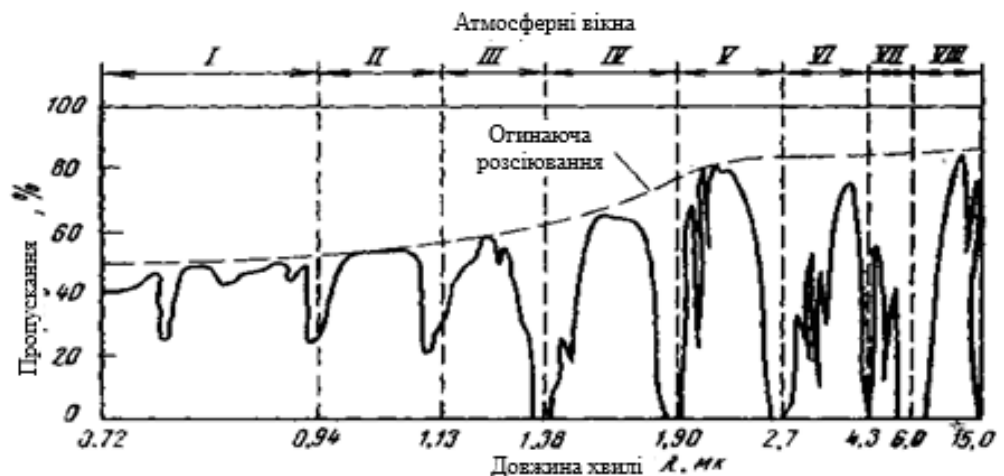


Рис. 2.5. Залежність пропускання атмосфери від значень довжин хвиль

Турбулентність атмосфери [2].

Частина сонячної енергії, що падає на земну поверхню, поглинається, викликаючи нагрівання повітряного шару над поверхнею землі. Цей шар нагрітого повітря, менш щільним, піднімається, турбулентно змішуючись з навколишнім холодним повітрям. Завдяки цьому температура повітря змінюється від точки до точки в атмосфері за випадковим законом. Температурні флуктуації є функцією висоти та швидкості вітру.

Показник заломлення повітря залежить від температури. Коли світловий промінь проходить шар повітря, в якому є перепад температур, він частково або повністю відхиляється. Ступінь відхилення залежить від відносних розмірів променя та температурної неоднорідності. Взаємодія лазерного променя з турбулентним середовищем призводить до випадкових змін амплітуди та фази коливання. Нижче наводяться можливі впливи атмосферної турбулентності на якість лазерного зв'язку.

Зміна траєкторії променя (флуктуації кутів приходу) - кутове відхилення променя від лінії прямої видимості, що призводить до проходження променя повз приймач.

Тремтіння зображення - зміна кута приходу променя, що викликає рух точки фокусу в площині зображення.

Розширення (розмиття) променя - невеликі кутові відхилення, що збільшують кутове розходження лазерного променя і призводять до зменшення просторової густини потужності на вході приймача.

Сцинтиляція променя - маломасштабні інтерференційні явища в межах поперечного перерізу променя, що викликають зміни просторової густини потужності на вході приймача.

Погіршення просторової когерентності - порушення фазової когерентності у перерізі фазового фронту пучка, що призводить до зменшення ефективності супергетеродинного методу прийому.

Поляризаційні флуктуації – варіації стану поляризації променя.

Практично зручно представляти турбулентне середовище, що складається з окремих однорідних об'ємів, що відрізняються коефіцієнтом заломлення. Розмір неоднорідності, пов'язаний із кожним об'ємом, позначимо через l . Максимальне і мінімальне значення неоднорідностей позначимо відповідно L_0 і l_0 .

Ступінь впливу турбулентності атмосфери залежить від відносних розмірів діаметра пучка d_B та розміру неоднорідності l . Якщо $d_B/l \ll 1$, то основна дія турбулентності зводиться до відхилення пучка загалом. В результаті цього на великих дальностях промінь переміщується за випадковим законом у двох напрямках у площині прийому. При $d_B/l \approx 1$ неоднорідності діють як лінзи, тобто фокусують або розсіюють весь промінь або його частину; при цьому поперечний переріз променя набуває зернистої структури. Якщо $d_B/l \gg 1$, невеликі області променя дифрагують незалежно одна від одної, спотворюючи фазовий фронт променя.

2.7 Деполяризація лазерного випромінювання у атмосфері

Методика визначення ступеня деполяризації еліптично поляризованого випромінювання заснована на виділенні з нього слабкої компоненти в лінійно поляризовану та її усунення за допомогою поляризатора.

Представимо еліптично поляризоване випромінювання, що поширюється вздовж осі z , у вигляді суперпозиції лінійно поляризованих хвиль:

$$E(t, z) = (e_x \cdot A_x + e_y \cdot A_y) \exp[i(\omega t - kz)],$$

де e_j - одиничний вектор, спрямований уздовж осі j ($j = x, y$); A_j -

комплексна амплітуда. Статистичний стан поляризації описується за допомогою матриці когерентності:

$$J = \begin{pmatrix} B_{XX} & B_{XY} \\ B_{YX} & B_{YY} \end{pmatrix},$$

де $B_{XY} = \langle A_X A_Y^* \rangle$ - взаємна кореляційна функція.

Ступінь поляризації випромінювання визначається співвідношенням:

$$P = \frac{I_P}{I_{tot}} = \sqrt{1 - 4 \frac{\det \hat{J}}{(Sp \hat{J})^2}},$$

де I_{tot} - повна інтенсивність випромінювання; I_P - інтенсивність поляризованої компоненти випромінювання; $\det \hat{J}$ і $Sp \hat{J}$ - визначник та слід матриці \hat{J} . Вочевидь, що ступінь деполіризації випромінювання $D = 1 - P$.

При вимірюванні ступеня деполіризації еліптично поляризованого випромінювання з анізотропним розподілом флуктуацій, що притаманно для лазерів з анізотропним резонатором, виникає систематична похибка, що залежить від типу поляризації аналізованого випромінювання.

2.8 Висновки до розділу 2

В розділі проаналізовано вплив атмосфери на поширення в ній лазерного, зокрема інфрачервоного випромінювання. Зокрема детально проаналізовано можливий склад атмосферного каналу обміну даними та його вплив на загасання оптичного сигналу при поширенні його в різних погодних умовах. Означено поняття вікон прозорості, як ділянок спектру випромінювання з мінімальним

ослабленням при проходженні в атмосфері. Виходячи з цього показано доцільність застосування оптичного передавача на основі CO₂-лазера.

Проаналізовано особливості роботи такого лазера, для якого можливою є реалізація електронної або механічної перебудови довжини хвилі для забезпечення можливості високоякісного обміну даними в змінних погодних умовах.

РОЗДІЛ 3

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1 Структура локальної обчислювальної мережі із застосуванням атмосферних оптичних ліній зв'язку

FSO (free-space optics - оптика вільного простору) - вид оптичного зв'язку, що використовує ЕМ оптичного діапазону (як правило, інфрачервоні), що передаються через атмосферу.

Загальна структура мережі із застосуванням FSO ґрунтується на функціях FSO-пристроїв. Вона включає такі елементи:

- а) дві підмережі, які необхідно з'єднати в єдину мережу бездротовим двонаправленим каналом передачі даних;
- б) зовнішній інтерфейс, що з'єднує систему бездротової передачі з відповідною підмережею;
- в) інтерфейсний модуль (ІМ), що узгоджує інтерфейс мереж, що з'єднуються з внутрішнім інтерфейсом передачі даних системи. У ІМ може бути шифратор-дешифратор у разі застосування криптографічного захисту;
- г) приймально-передавальний модуль FSO системи.

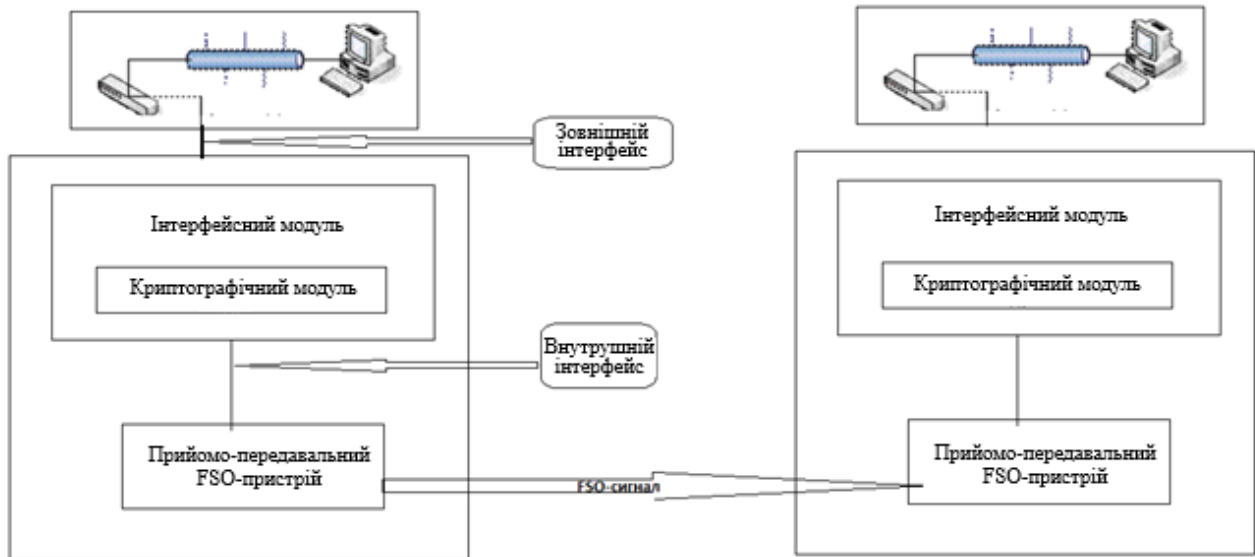


Рис. 3.1. Структура мережі із застосуванням FSO

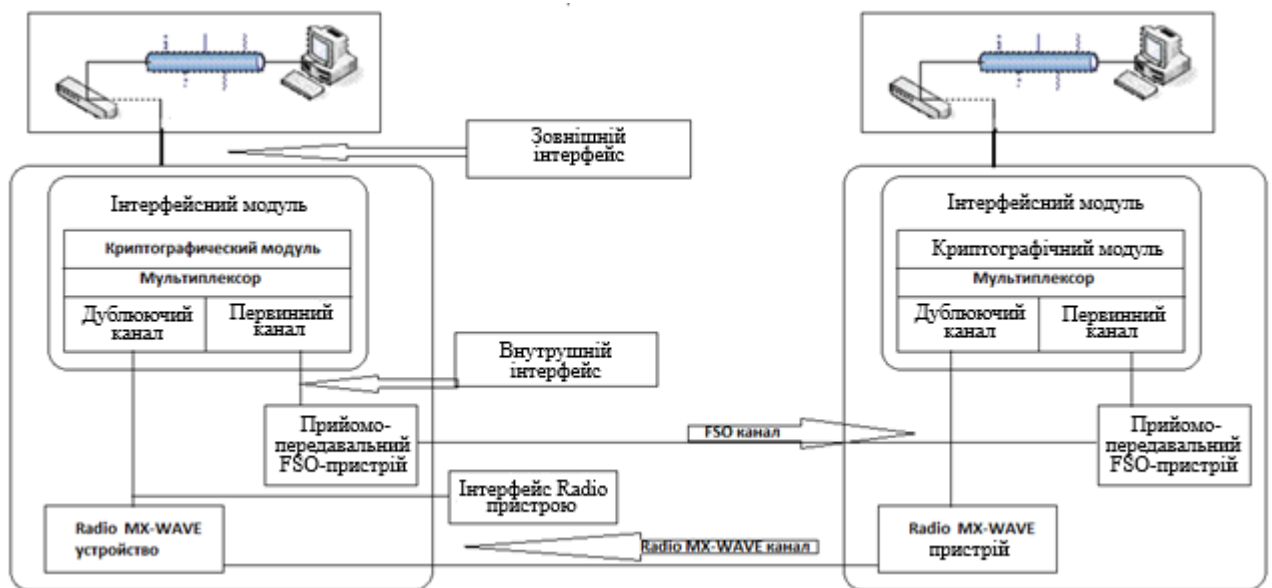


Рис. 3.2. Структура мережі з використанням технології резервування

Загальна структура мережі із застосуванням FSO наведена на рис. 3.2.

Система з використанням резервуючого каналу є економічно не вигідною для застосування на масовому ринку кінцевих клієнтів, оскільки модуль обробки інформації не тільки ускладнюється за рахунок появи каналного мультиплексора, але й унеможливорює спрощення в модулі за рахунок оптимізації

його структури, наприклад, скасуванням функції перетворення зовнішнього мережевого інтерфейсу у внутрішній інтерфейс передачі даних, неможливого з появою другого зовнішнього інтерфейсу (радіо-інтерфейсу), що видно на рис. 3.2.

Застосування FSO систем дещо специфічне, оскільки необхідна пряма видимість між двома приймальними установками. І тому часто потрібно "виносити" прийомо-передавачі на протилежну зовнішню стіну будівлі, або ж на її дах, що дозволяє частину обладнання у разі потреби розташовувати всередині в доступному або навпаки захищеному від зовнішніх впливів місці, наприклад, інтерфейсний модуль (модуль обробки інформації). Це збільшує надійність функціонування, стійкість до фізичного пошкодження дорогого обладнання, спроб зламати шифруючий модуль і тим чи іншим способом отримати доступ до інформації, що передається, на приймачі. При спробі фізичного перехоплення збої в передачі, що виникають, дозволяють автоматично зафіксувати даний факт засобами відеоспостереження з метою аналізу та усунення можливості повторних спроб злому. Широкий канал дозволяє проводити завадозахищене кодування з великим коефіцієнтом надмірності. Низька охопленість ринку дешевих систем кінцевих клієнтів дозволяє поставити за мету дослідити можливі варіанти розробки та впровадження системи АОЛЗ, здатної максимально задовольнити потребу даного сектора ринку.

Вимоги до цієї системи дуже широкі, багато хто відштовхується від низької ціни кінцевого виробу. Їх можна приблизно формалізувати таким чином:

- а) низька вартість;
- б) відсутність складної системи позиціонування;
- в) моноблоковість конструкції;
- г) наявність моделей без використання алгоритмів шифрування, і так само здешевлених моделей і без криптозахисту та без використання завадозахищеного кодування;

д) апаратна реалізація обробки даних, що передаються (завадозахищеного кодування та шифрування);

е) націленість кожної моделі апаратури лише на одні з поширених мережевих інтерфейсів (наприклад Fast Ethernet).

Запропонована до розробки система за умови дотримання більшості висунутих вимог має суттєві переваги, що дають можливість максимально охопити масовий ринок:

- а) простота встановлення,
- б) легкість обслуговування та використання;
- в) дешевизна та одноразовий характер витрат на інсталяцію каналу;
- г) прозорість для програмних засобів, що забезпечується апаратною реалізацією шифрування та кодування;
- д) платформна незалежність.

3.2 Структура системи передачі з відкритим атмосферним каналом

Термінальний пристрій може бути як єдиним фізичним пристроєм, так і являти собою окремі модулі, що з'єднуються інтерфейсами передачі даних. Необхідність інсталяції двох і більше частин однієї системи ускладнюють її встановлення та первинне налаштування. Загальна схема FSO термінального пристрою, що допускає наявність резервного каналу, представлена рис. 3.3.



Рис. 3.3. Загальна схема FSO термінального пристрою.

Структурно термінальний пристрій може бути поділено на наступні модулі, частина з яких може вноситися в окремий фізичний модуль, так і фізично поєднуватися з іншими структурними модулями, наприклад, в межах однієї мікросхеми:

- а) інтерфейсний модуль перетворює модульований сигнал мережевого інтерфейсу в цифровий сигнал внутрішнього інтерфейсу;
- б) пристрій управління, доступний для конфігурування та контролю через мережевий інтерфейс, та опціональний - для контролю за зовнішніми датчиками пристрою;
- в) модуль обробки здійснює всі необхідні перетворення цифрових даних як перед модулюванням та послідовно їх в ефір, так і після демодулювання та послідовно в мережевий інтерфейс;
- г) модулятор та демодулятор;
- д) приймач та передавач;
- е) можливий резервний пристрій зв'язку, тоді модуль обробки повинен забезпечувати сумісність з ним, і перемикати потік даних на нього за сигналом модуля керування.

Дана структура є досить універсальною, що дозволяє її деталізувати щодо пропонуваного до розробки FSO пристрою для аналізу варіантів вирішення тих чи інших завдань та вирішення проблем при обміні даних.

Функціонально термінальний пристрій складається з модуля підключення до зовнішнього мережевого інтерфейсу, опціонального модуля підключення до резервного мережевого інтерфейсу (радіо-каналу), зовнішнього опціонального модуля контролю стану, модуля оптичного приймача-передавача, і модуля, що координує роботу чотирьох вищеперерахованих модулів обмін даними між даними модулями.

3.3 Аналіз проблем, що виникають при використанні систем з відкритим атмосферним каналом передачі даних для віддаленого доступу

Пристрої передачі даних можуть бути охарактеризовані якісно та кількісно за такими критеріями:

- а) надійність передачі;
- б) приховування даних від несанкціонованого доступу до них;
- в) стійкість до зовнішніх впливів (параметрів навколишнього середовища, фізичного впливу, спроб перервати або перехопити передачу);
- г) передбачуваність поведінки у разі неможливості забезпечити на належному рівні одну з перерахованих вище вимог.

Для забезпечення високої надійності каналу та стійкості до несприятливих умов навколишнього середовища в сучасних системах застосовується резервний канал (наприклад, радіоканал), але його використання суттєво збільшує ціну, і часто в такій надмірній надійності немає необхідності. В даному випадку при розробці простою та масової системи можна відмовитися від такого способу підвищення надійності на користь зменшення ціни системи.

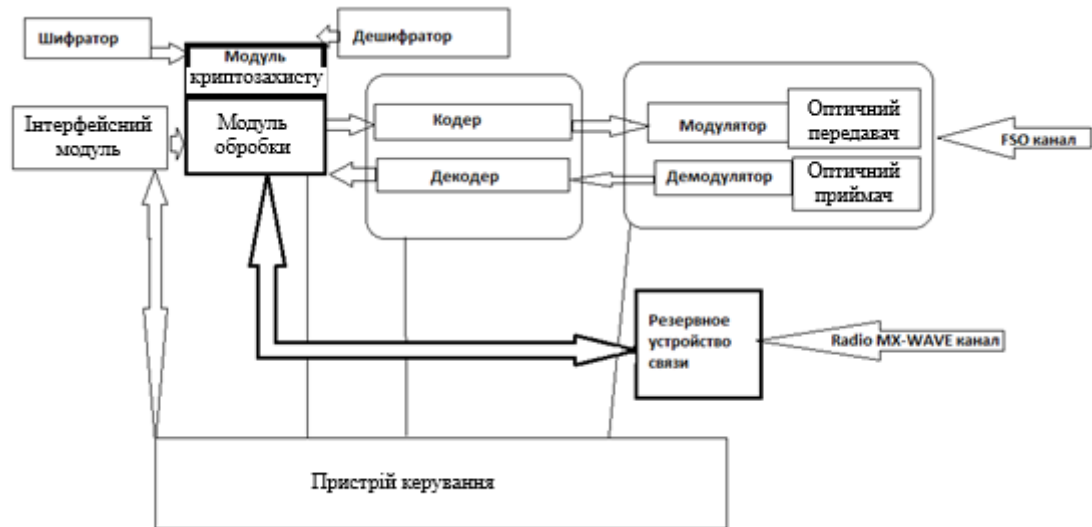


Рис. 3.4. Приклад деталізованої структури термінального пристрою

З іншого боку, для забезпечення більшої надійності передачі FSO термінальний пристрій може здійснювати завадостійке кодування з великим коефіцієнтом надмірності, що дозволяє забезпечити високу граничну швидкість обміну даними та великий запас пропускної здатності. Дана функція корисна, хоча теж необов'язкова, оскільки цілком можна покладатися на програмні протоколи зв'язку, проте це виключає апаратне детектування множинних помилок зв'язку, при цьому кодер і декодер вироджуються у формувачі та підсилювачі імпульсів.

За відсутності жорстких вимог до захисту відмова від використання криптозахисту даних сильно здешевить систему, за відсутності високих швидкостей передачі можливе використання програмного шифрування на рівні додатків.

Процеси криптографічного перетворення і завадостійкого кодування повинні йти паралельно, тому можлива реалізація відповідних модулів у вигляді двох незалежних пристроїв, або ж навпаки, суміщення в одному. До цих пристроїв ставляться набагато менш жорсткі вимоги щодо надійності зв'язку, зайва функціональність небажана через нижчу платоспроможність замовника

такого обладнання. Складність просування в даній ніші ринку зобов'язує виробляти максимально конкурентоспроможний товар, легкий в установці, налаштуванні та експлуатації, не обтяжений зайвими продуктами, що подорожчають, функціями, сумісний з найпоширенішим мережевим інтерфейсом.

Якщо на корпоративному ринку та ринку операторів зв'язку сам покупець може ініціювати створення та фінансувати розробку необхідного йому обладнання безпроводного обміну даними, то на ринку рішень віддаленого доступу спостерігається зовсім інша картина. Продукт повинен мати доступну ціну і мати функціональність, здатну задовольнити основну масу покупців.

При проектуванні таких систем етапи попередньої оцінки та дослідження повинні бути різноплановими, щоб знайти всі прийнятні шляхи вирішення даного завдання, та виділити серед них найефективніші.

Відомо, що будь-які додаткові з'єднання з іншими сегментами породжують нові проблеми, у тому числі й системи безпеки, що стосуються безпеки в цілому. І навіть якщо всередині двох підмереж, що використовуються, використовуються методи обмеження фізичного та комп'ютерного доступу до каналів інформації, всі зусилля можуть бути марними, якщо не робити цього на бездротовій ділянці мережі, що служить "мостом" між підмережами.

Існує велика кількість симетричних та асиметричних шифруючих алгоритмів. Їхній вибір залежить від необхідної стійкості алгоритму та доступної апаратної бази, орієнтація на останній фактор може значно підвищити максимальну швидкість шифрування.

При реалізації криптографічного модуля з використанням мікропроцесора чи мікроконтролера доцільним є застосування програмних шифрів, тобто. таких систем шифрування, які використовують операції над комп'ютерними словами і враховують специфіку обробки даних у процесорній системі криптомодуля.

Існують такі різновиди шифрів, як блокові, потокові та комбіновані.

Адитивні потокові шифри є малоприматними для даної задачі, оскільки така криптосистема може бути використана тільки при доповненні її спеціальною підсистемою генерації унікальних ключів шифрування для кожного окремого блоку даних через неприпустимість повторного використання однакових ділянок ключового потоку.

Найбільш підходящими до застосування у комп'ютерних системах є блокові шифри. На процес синтезу алгоритмів блочного шифрування істотно впливають параметри швидкості роботи алгоритму та складності реалізації алгоритму. Вирішення проблеми вибору алгоритму має стати результатом ґрунтовних досліджень як стійкості, так і складності реалізації різних криптографічних систем.

3.4 Особливості функціонування FSO системи

Метод модуляції світлового сигналу вибирається в кожному конкретному випадку в залежності від виду інформації, що передається, і вимог, що пред'являються до інтенсивності світлового потоку, потужності модулюючого сигналу, коефіцієнту модуляції, імпульсного або неперервного режиму роботи і т.д. До оптичних модуляторів пред'являються такі основні вимоги: широкосмуговість, лінійність модуляційної характеристики, великий динамічний діапазон, відсутність нелінійних спотворень та економічність споживання енергії.

Методи модуляції випромінювання оптичних квантових генераторів поділяються на два класи: методи внутрішньої модуляції та методи зовнішньої модуляції. Під внутрішньою модуляцією мається на увазі вплив на когерентний сигнал у процесі його генерування, тобто, внутрішня модуляція впливає на сигнал несучої частоти у самому генераторі. При зовнішній модуляції випромінюване світло піддається впливу поза лазером. Найчастіше сигнали, що

несуть інформацію, впливають тим чи іншим чином на речовину, через яку проходить лазерний промінь.

Методи модуляції зазвичай класифікуються за змінним параметром сигналу, що модулюється. В оптичних системах можливі амплітудна, частотна, фазова та поляризаційна модуляції. Модуляція інтенсивності випромінювання може розглядатися як окремий випадок амплітудної. В оптичних засобах обміну даними застосовуються два режими модуляції: без піднесучої і з піднесучою. У першому режимі несуча (власне випромінювання лазера) модулюється безпосередньо інформаційним сигналом. У другому режимі інформаційним сигналом модулюється НВЧ піднесуча, а потім остання модулює оптичну несучу.

В оптичному діапазоні хвиль, як і радіодіапазоні, широко використовуються аналогова, імпульсна і цифрова модуляції. Зазначені методи модуляції реалізуються з урахуванням різних фізичних принципів. Для модуляції інтенсивності та амплітуди випромінювання використовуються електрооптичний, п'єзоелектричний та акустооптичний ефекти, а також ефект фотопружності. Крім того, варіації поглинання в середовищах та зміни потужності накачування лазерів (особливо напівпровідникових) також призводять до модуляції інтенсивності оптичного випромінювання. Частотну модуляцію оптичного коливання можна отримати за допомогою ефектів Зеємана та Штарка, при варіаціях довжини резонатора лазера, а також за допомогою п'єзоелектричного, акустооптичного, магнітооптичного та електрооптичного ефектів. Для реалізації фазової та поляризаційної модуляцій використовують магнітооптичний та електрооптичний ефекти.

Певними перевагами володіє внутрішня модуляція лазерів, при якій модулюючий елемент поміщається всередину резонатора лазера. При цьому змінюються оптична довжина резонатора або його втрати, що призводить до частотної або амплітудної модуляції світла лазера, що генерується. При збігу частот модуляції та міжмодовою биття генеруються або короткі імпульси, або

частотно-модульований сигнал з великою девіацією частоти.

На рис. 3.5 показана типова конфігурація оптичної антени передавача, яка формує в просторі колімований пучок кругового перерізу. Внаслідок явища дифракції розбіжність променя в дальній зоні обернено пропорційна діаметру апертури оптичної антени передавача. На великих відстанях від передавача діаметр перерізу ідеально колімованого променя нехтовно малий порівняно з розміром перерізу дифрагованого променя.

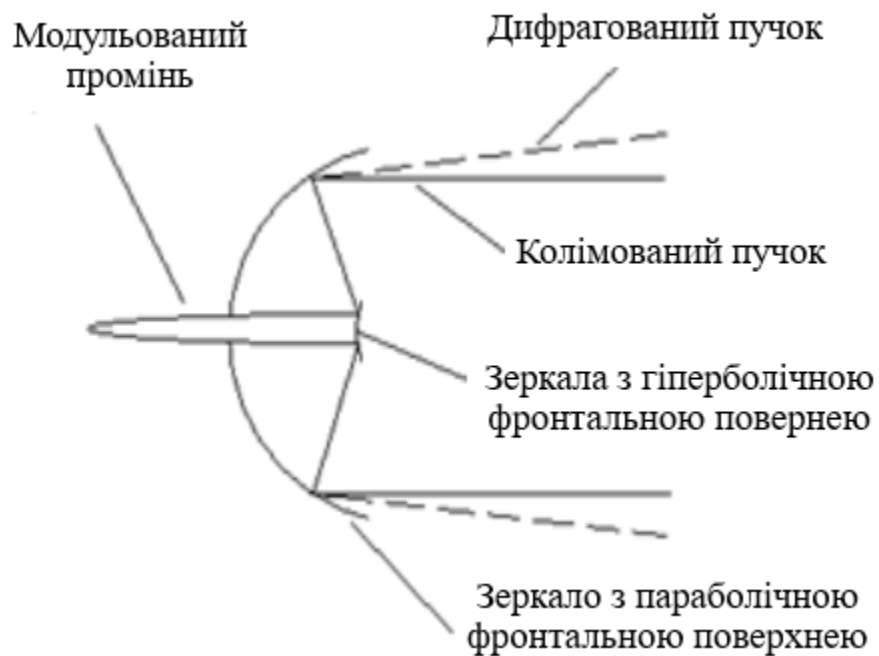


Рис. 3.5. Схематичне зображення типкової оптичної антени

Взаємонаведення систем зв'язку може здійснюватися як вручну (юстування, встановлення приймально-передавальних блоків співвісно один одному), так і автоматично (автоматизована система наведення).

3.5 Вибір основних функціональних блоків

Функціональна схема складається з певних основних блоків (рис. 4.2).

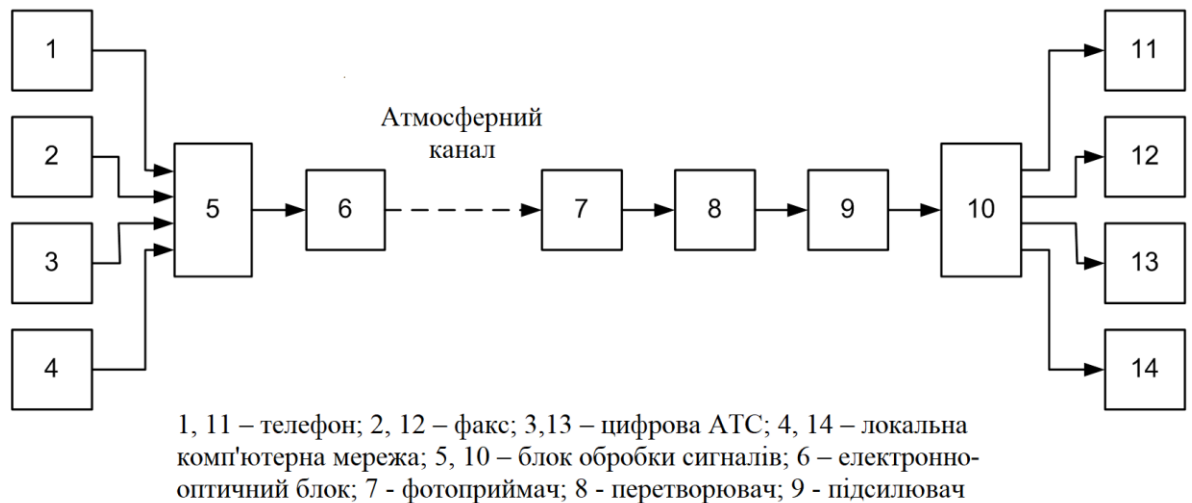


Рис. 3.6. Функціональна схема системи зв'язку

Після встановлення прийомопередаючих блоків необхідно підключити їх до кабельних мереж в обох будинках. Існує безліч моделей пристроїв з найрізноманітнішими інтерфейсами, однак, на відміну від постачальників обладнання для радіозв'язку, виробники систем бездротової оптики дотримуються наступної загальної ідеології підключення: лінія лазерного зв'язку є емуляцією відрізка кабелю (дві виті пари або дві жили оптичного кабелю). Таким чином, для всіх пристроїв, що використовуються в кабельній мережі зв'язуваних будівель, цю лінію не видно; вона не накладає будь-яких обмежень на обладнання, не вимагає додаткових протоколів зв'язку або змін/доповнень до таких протоколів. Передача сигналів бездротового оптичного з'єднання здійснюється так само, як по оптичному волокну. Розрізняються лише середовища, у яких поширюється промінь.

Зв'язані за допомогою бездротової оптики локальні мережі функціонують так, ніби їх з'єднали виділеним кабелем. Деякі моделі лазерних модемів мають суміщені інтерфейси до мережі Ethernet та потоків E1. В результаті одна атмосферна лінія зв'язку може з'єднати LAN та телефонні мережі будівель без використання мультиплектора.

Найважливіша властивість бездротового оптичного зв'язку - високий

рівень захищеності каналу від несанкціонованого доступу. Це є наслідком самої природи лазерної передачі сигналу, що не забезпечується будь-якими спеціальними методами. Здійснити перехоплення каналу технічно дуже важко - з гострої спрямованості променя та застосування унікального для кожної моделі методу кодування інформації імпульсами випромінювання. Проте для виявлення спроб несанкціонованого доступу розроблено низку заходів, заснованих на різноманітних принципах - звернення хвильового фронту, аналізу зміни прийнятого сигналу та інших, що ще більше підвищує захищеність каналу зв'язку.

Робоча довжина хвилі, швидкість передачі інформації та інші особливості роботи системи обміну даними визначають природу функціональних залежностей між головними параметрами системи і витратами на компоненти системи. Насправді ці залежності моделюються статичними рядами, що полегшує обчислення.

Антенна передавача. Вага та вартість виготовлення оптичної антени системи передавача залежать від діаметра антени. Зазвичай антенна передавача проектується так, щоб розбіжність променя визначалася дифракційною межею. Цим досягається максимальна просторова щільність потужності на приймачі. Для малих передаючих антен вага їх пропорційна площі і, отже, пропорційна квадрату діаметра. Для великих антен, якщо останні оснащені обладнанням, що забезпечує необхідну жорсткість конструкції для роботи на дифракційній межі, вага пропорційна об'єму.

Приймальна антенна. Вага та вартість виготовлення оптичної системи приймача залежать від діаметра антени. Оскільки приймальна антенна не завжди проектується для умов роботи на дифракційній межі, її конструкція і точність механічної структури не так жорстко пов'язані, як для передавальної антени.

Система націлювання антени передавача. Типова система націлювання складається з блоку підвісу, на який монтується антенна передавача, та відповідної

системи управління, яка націлює антену у бік приймача. Вага системи націлювання антени передавача слабо залежить від точності націлювання; її вага співрозмірна з вагою антени передавача. Вартість виготовлення обладнання націлювання обернено пропорційна помилці націлювання передавача. Помилка націлювання зазвичай визначається у відсотках від ширини променя передавача. Так як антена передавача виготовляється виходячи з умов роботи на дифракційній межі, вартість виготовлення обладнання націлювання пропорційна діаметру апертури передавача. Необхідна електрична потужність системи націлювання антени передавача в основному залежить від ваги антени.

Система націлювання антени приймача. Вага системи націлювання приймача слабо залежить від точності націлювання приймача; її вага пропорційна вазі антени приймача, яка залежить від діаметра приймальної антени. Вартість виготовлення обладнання націлювання приймача обернено пропорційна величині помилки націлювання приймача. Остання визначається у відсотках поля зору приймача. Розмір потужності, необхідної для забезпечення функціонування системи націлювання приймача, переважно залежить від ваги приймальної антени.

Передавач. Для даної довжини хвилі випромінювання (у певних межах) вага та вартість лазерного передавача залежать від потужності передавача. Необхідна електрична вхідна потужність прямопропорційна вихідній потужності передавача.

Система енергозабезпечення передавача. Вартість виготовлення та вага системи електричного енергозабезпечення та апаратури перетворення енергії в передавачі залежать від споживаної електричної потужності системи націлювання антени, передавача та модулятора.

Аналіз каналу зв'язку. Вплив фонового випромінювання. Рівень фонового випромінювання характеризується спектральною щільністю потужності, що припадає на одиницю частоти та одиницю тілесного кута. Потужність фонового

випромінювання на вході оптичного приймача знаходиться інтегруванням спектральної фонові опроміненості по смузі вхідного фільтра і по полю зору приймача.

Вплив атмосфери. При поширенні оптичних сигналів в атмосфері спостерігаються втрати, зумовлені поглинанням та розсіюванням випромінювання частинками атмосфери. Ці втрати кількісно характеризуються коефіцієнтом пропускання атмосфери та значення якого залежить від робочої довжини хвилі. У разі використання гетеродинного або гомодинного оптичного приймача, необхідно пам'ятати, що турбулентність атмосфери накладає обмеження на розмір приймальної апертури.

Оцінка системи зв'язку. Ймовірність хибного прийому. Для кожного типу приймача ймовірність помилкового прийому може бути виражена в залежності від потужності лазерного передавача, діаметра антени передавача, діаметра антени приймача, поля зору приймача, параметрів приймача, рівня фонового випромінювання, температури приймача, смуги пропускання приймача, характеристик траси каналу, робочої довжини хвилі та дальності зв'язку.

3.6 Вибір стандарту зв'язку

При виборі стандарту зв'язку в якому функціонуватиме система АОЗ на основі CO_2 -лазера необхідно враховувати той факт, що система використовуватиметься для зв'язку комп'ютерів, створення локальних мереж тощо.

На даний момент розроблені цілі серії протоколів канального рівня, призначені для бездротових засобів зв'язку та здатні автоматично відновлювати канал після короткочасного обриву. А безперервність потоків даних забезпечується протоколами вищого рівня (наприклад, TCP/IP).

Швидкість передачі. При виборі швидкості передачі необхідно враховувати

наступне - які швидкості передачі вже використовуються у подібних системах і яке значення швидкості задовольнить користувача задля забезпечення тієї чи іншої пропускної спроможності каналу зв'язку. Грунтуючись на тому, що в комп'ютерних мережах використовують як провідну лінію лінії типу «витої пари», швидкість передачі даних в якій 10/100 Мбіт/с, задамося швидкістю передачі інформації рівною 100 Мбіт/с.

Максимально допустима помилка. При виборі значення максимально допустимої помилки зв'язку враховуватимемо той факт, що для різних способів зв'язку (радіорелейний, волоконнооптичний, атмосферний і т.д.) ця величина матиме різні значення.

Задамося значенням максимально допустимої помилки $K_{ном} = 10^{-6}$.

3.7 Енергетичний розрахунок лінії зв'язку

Прямий розрахунок енергетичного потенціалу

Для прямого розрахунку енергетичного потенціалу (від передавача до приймача) необхідно, задавшись певною потужністю передавача та величиною загасання випромінювання при його поширенні у відповідних погодних умовах, знайти потужність сигналу, яка надходитиме на вхід приймача. При цьому також слід пам'ятати про мінімальне (порогове) значення потужності сигналу, яке приймач здатний прийняти на фоні шумів, а також про динамічний діапазон приймача, можливість перевантаження вхідного каскаду приймача через надмірну величину сигналу.

Згасання випромінювання в атмосфері описується за допомогою формули:

$$\tau_a = \exp(-\alpha_a \cdot L),$$

де L - довжина середовища, в якому поширюється випромінювання; α_a - коефіцієнт ослаблення середовища, що дорівнює сумі коефіцієнтів поглинання α_b і розсіювання α_s , а коефіцієнт пропускання атмосфери може бути поданий у вигляді:

$$\tau_a = \tau_b \cdot \tau_s$$

З урахуванням вище викладеного та, взявши передавач з вихідною потужністю 35 Вт, отримаємо:

$$35 \cdot e^{-\alpha \cdot L} \cdot e^{-\alpha \cdot l} = 35 \cdot e^{-2.5} \cdot e^{-10 \cdot 0.1} = 0.58 \cdot 10^{-3} \text{ Вт},$$

де L - довжина траси якою здійснюється зв'язок, l - ділянка на трасі з великим загасанням, викликаним можливою перешкодою (димом від недалеко розташованих підприємств і т.п.)

Зворотній розрахунок енергетичного потенціалу. Для спрощення розрахунків врахуємо наступне:

Розрахунок ведеться для систем передачі інформації атмосферним каналом з використанням лазера;

Релеївським розсіюванням можна знехтувати;

Нелінійними ефектами можна знехтувати;

Мультиплікативними перешкодами розсіювання вперед можна знехтувати;

Згасання сигналу на похилій трасі для висот до 10 км завжди менше, ніж на горизонтальній трасі тієї ж довжини на висоті 0 км над рівнем землі;

Максимальне відхилення променя через турбулентність атмосфери - 1 мрад;

У вибраному вікні прозорості відсутні сильні смуги молекулярного

поглинання.

Врахування впливу погодних умов.

Для оцінки ослаблення оптичного сигналу в атмосфері, введено таке поняття, як видимість, це така відстань V (в км), на якій видиме випромінювання джерела світла зменшується в 50 разів по відношенню до початкової величини. З достатньою точністю для інженерних розрахунків можна використовувати формулу:

$$S = \frac{17}{V},$$

де S - згасання дБ/км; V - дальність видимості.

Прийmemo для розрахунку загасання -6 дБ/км, що відповідає сильному дощу.

Врахування фонового випромінювання.

Шум на фотоприймачі складається з трьох складових: атмосферні оптичні перешкоди, дробові шуми, власні шуми фотоелемента та підсилювача.

Для розрахунку рівня оптичних перешкод, прийmemo, що фонові завади вдень не більше 10^{-2} Вт/см².ср.мкм, фонові перешкоди вночі не більше 10^{-6} Вт/см².пор.мкм. В даному випадку основний шум буде вноситися фоновим випромінюванням, усіма іншими шумами можна знехтувати:

$$P_n = 10^{-2} \cdot S_p \cdot \angle\alpha \cdot \Delta\lambda,$$

де S_p - площа приймача (см²), $\angle\alpha$ - кут бачення приймача (ср), $\Delta\lambda$ - діапазон довжин хвиль, що приймається фотоприймачем (мкм).

Залежно від використовуваного способу модуляції оптичного сигналу змінюється і мінімально допустиме відношення сигнал/шум, коли інформація

буде прийнята правильно.

Таким чином, мінімальна потужність оптичного сигналу буде:

$$P_s = N_{MMIN} \cdot P_n$$

де N_{MMIN} - мінімально можливе відношення сигнал/шум для вибраного виду модуляції оптичного сигналу.

Оптична система.

Для оцінки втрат потужності можна використовувати вираз:

$$P_{Lost} = 10 \lg \left(\frac{\angle \lambda \cdot l}{D} \right)^2 ,$$

де $\angle \lambda$ - кут розбіжності променя; l - відстань до приймача, м; D - діаметр приймача, м

Також необхідно врахувати, що оптична система також вносить загасання оптичного сигналу, прийmemo величину пропускання лінзи 0,95 (дві лінзи, одна в приймачі, інша в передавачі), тоді потужність оптичного сигналу необхідно буде збільшити ще на 0,5 дБ.

Розрахуємо потужність оптичних шумів за формулою:

$$P_n = 10^{-2} \cdot 1 \cdot 0.17 \cdot 0.05 = 8.5 \cdot 10^{-5} .$$

Потужність оптичних шумів складає $8.5 \cdot 10^{-5}$ Вт.

Розрахуємо втрати за рахунок погодних умов для заданої дальності:

$$P_w = P_{SPR} \cdot L_{SV} ,$$

$$P_W = 6 \cdot 5 = 30$$

Втрати при густому тумані на трасі 5000 метрів становитимуть 30 дБ.

Розрахуємо втрати оптичного сигналу за рахунок розходження променя:

$$P_{Lost} = 101g\left(\frac{0.0002 \cdot 5000}{0.08}\right)^2 = 22$$

Втрати за рахунок розходження променя становлять 22 дБ.

Знайдемо величину сигнал/шум (в дБ), врахувавши при цьому всі втрати:

$$P_{S-n} = P_{S_min} + P_W + P_{Lost} + P_{opt}$$

$$P_{S-n} = 3 + 30 + 22 + 0.5 = 55,5$$

Значення мінімального відношення сигнал/шум буде 55,5 дБ.

Мінімальна потужність оптичного сигналу розраховуватиметься за формулою:

$$P_S = 10^{\frac{P_{S-n}}{10}} \cdot P_n$$

$$P_S = 10^{\frac{55,5}{10}} \cdot 8,5 \cdot 10^{-5} = 30,2$$

Мінімальна випромінювана потужність оптичного сигналу становить 30,2 Вт.

Надійність роботи лазерної лінії зв'язку. Працюючи на довжині хвилі від 9 до 11 мкм і потрапляючи при цьому в одне з вікон прозорості атмосфери і маючи лазер з робочою довжиною хвилі, що перебудовується, ми можемо зберігати

стійкий зв'язок як при випадковій заваді (дим від поруч розташованих заводів, котелень) так і при невідповідній - спеціальній заваді (розпорошення аерозолі та інших засобів), перебудовуючись з однієї несучої в іншу за заданою програмою, випадковим законом, що відомий на передавальній та приймальній стороні відповідно.

Тому з використанням лазера з довжиною хвилі, що перебудовується, підвищується надійність роботи системи.

3.8 Взаємонаведення оптичних передавача та приймача. Алгоритм наведення

У системах лазерного зв'язку у вільному просторі застосовуються дуже вузькі пучки вихідного випромінювання, кутова величина яких вимірюється десятками і навіть одиницями секунд. При такій малій розбіжності лазерні пучки навіть на значному віддаленні елементів лінії зв'язку один від одного мають у поперечному перерізі пляму малої площі. Наприклад, лазер із розбіжністю випромінювання 10 засвічує на відстані 10 км пляму діаметром близько 5 см. У таких умовах взаємний пошук та наведення елементів перетворюється на складне завдання, а процедура «входження» у зв'язок може трактуватися як марківський стохастичний процес. Елементи А та В нерухомі та випромінюють сигнал неперервно протягом усього часу взаємонаведення; пункти А та В симетричні за технічними параметрами апаратури; оптичні антени приймача та передавача однакові.

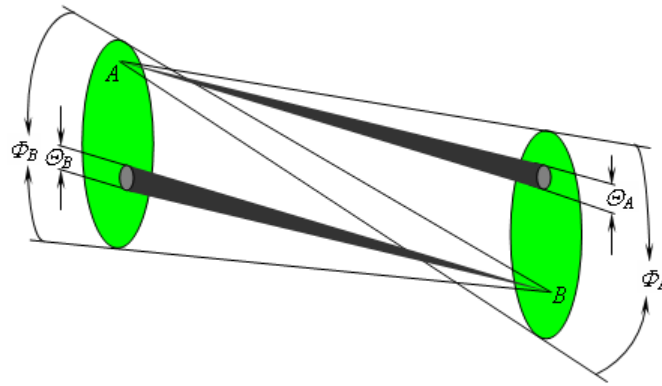


Рис. 3.7. Модель системи наведення: Θ_A, Θ_B - кути розбіжності випромінювання в Пунктах А та В; Φ_A, Φ_B - кутовий розмір секторів огляду з пунктів А та В

Імовірнісний марківський процес взаємного націлювання А та В ілюструється наступною діаграмою станів та переходів (рис. 3.8).

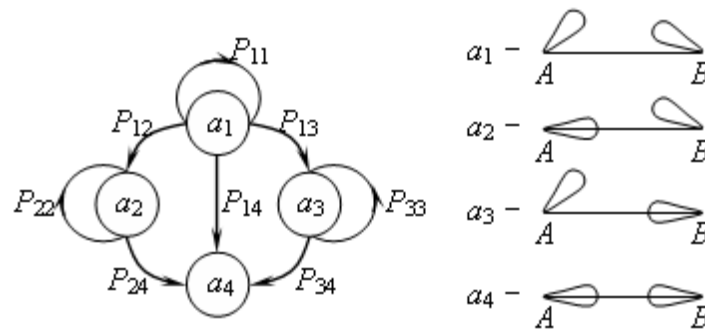


Рис. 3.8. Імовірнісний марківський процес взаємного націлювання А та В

На рис. 3.8 позначено: a_1 - непоглинаючий стан (найчастіше вихідний), коли жодна з антен (А або В) не орієнтована у правильному напрямку; a_2, a_3 - непоглинаючі стани, у яких або антена А, або антена В орієнтовані правильно (на протилежний елемент); a_4 - поглинаючий (кінцевий) стан, коли антени А і В орієнтовані одна на одну; P_{ij} - можливість переходу системи зв'язку з і-го стану в j-ий.

Збільшення дальності дії лазерних систем зв'язку при збереженні

необхідної достовірності передачі повідомлень є одним з першочергових завдань. Основним чинником, що визначає збільшення дальності дії за постійної потужності передавача, є звуження діаграми направленості антенних пристроїв.

Для отримання кута розкриття променя близько одного градуса у НВЧ діапазоні необхідний діаметр антени більше 10 м. У той же час в оптичних системах зв'язку при дуже малих габаритах антен можна сформувати у просторі дещо вузькі ДН (до кількох десятків кутових секунд).

Використання вузьких ДН лазера дозволить забезпечити необхідну достовірність передачі при малих потужностях передавальних пристроїв. Однак однією з складностей, пов'язаних з використанням лазерів у системах зв'язку, є проблема націлювання вузького променя лазера та утримання його у необхідному напрямку. При використанні систем на рухомих об'єктах ця проблема зростає через необхідність стабілізації об'єктів з високою точністю.

При скануванні вузького променя в межах фіксованого кутового конуса (зони невизначеності положення об'єкта) виникає завдання оцінки часу, що витрачається на пошук заданої точки (об'єкта) у просторі, або оцінки часу, що витрачається на пошук один одного двома об'єктами, забезпеченими системами сканування. Цікавими є також питання вибору методу сканування (випадковий або регулярний пошук) та порівняння різних методів сканування.

При скануванні тонких діаграм приймачів процес «входження» у зв'язок, тобто точне націлювання діаграм одна на одну та взаємне виявлення сигналів може трактуватися як Марківський стохастичний процес. Такий підхід зумовлений тим, що подія входження у зв'язок залежить від ймовірності орієнтування діаграм двох об'єктів у необхідному напрямку (націлювання) та від ймовірності взаємного виявлення сигналів у шумах, коли збігаються діаграми. Отже, час входження у зв'язок є випадковою величиною, яка має математичним очікуванням, дисперсією тощо. Очевидно, для знаходження цієї величини необхідно користуватися ймовірнісними методами.

Марківський ланцюг характеризується станами, між якими існує можливість переходу. Якщо утворити матрицю ймовірностей переходу між станами даного марківського ланцюга, то, користуючись методами алгебри дослідження марківських ланцюгів, можна визначити середню кількість кроків, що витрачається на перехід з одного стану в будь-який інший. Помноживши середнє число кроків на час тривалості одного кроку, отримаємо середній час, що витрачається на перехід з одного стану в будь-який інший, і, зокрема, кінцевий стан, що відповідає повному встановленню зв'язку двох об'єктів.

Для НВЧ діапазону надвузькі ДН проєктують у відносно рідкісних спеціальних випадках. У системах оптичного діапазону, як правило, надвузькі діаграми будуть мати більшість систем. Тому розглядається завдання оцінки середнього часу входження у зв'язок двох об'єктів, забезпечених системами сканування вузьких променів ОКГ та відповідними приймачами. Однак у типових випадках застосування ОКГ на граничних дальностях число фотонів у сигналі може бути невеликим, тому використання відношення сигнал/шум є недостатнім для характеристики системи з точки зору виявлення корисного сигналу і придушення шумів. Необхідно вводити такі характеристики якості системи, як можливість виявлення сигналу, можливість пропуску сигналу, можливість помилкової тривоги. Ці характеристики добре пов'язуються з дальністю дії системи та потужністю передавальних пристроїв. Тому середній час входження у зв'язок для різних варіантів систем доцільно знаходити в залежності від ймовірності виявлення сигналу, від дальності дії системи при різних ймовірностях несправжньої тривоги (характеризується рівнем шуму) і потужності передавачів. З цього погляду проводиться подальший розгляд.

В даний час найбільшого поширення набули системи регулярного та випадкового пошуку. У свою чергу системи регулярного пошуку за характером пошуку можна також розділити на системи:

- без сканування,

- зі скануванням на одному об'єкті,
- із скануванням на обох об'єктах.

3.9 Розрахунок середньої кількості кроків та тривалості процедури наведення

Середня кількість сигнальних фотоелектронів розраховується за такою формулою:

$$S_c = W \lambda \tau T_0 \varepsilon \xi \pi (-\mu_\alpha P_T) \eta / hc,$$

Число шумових фотоелектронів, що надходять у приймач за секунду, знайдемо за формулою:

$$n_{ш} = Q \lambda \Delta \lambda \pi T_0 \eta \Theta^2 \Delta^2 [\rho \cdot \varepsilon \xi \pi \{-\mu_\alpha P_T\} + \mu_\Sigma (1 - \varepsilon \xi \pi \{-\mu_\alpha P_T\} / 4 \mu_\alpha)] / 16 hc + i_T / q \cdot g,$$

Імовірність виявлення сигналу обчислюється за такою формулою:

$$P_{обн} = \sum_{n=n_0}^{\infty} [(S_c)^n \cdot \exp\{-S_c\} / n!].$$

Імовірність помилкової тривоги або ймовірність перевищення порога n_0 протягом будь-якого інтервалу буде розрахована за формулою:

$$P_{лт} = \sum_{v=v_0}^{\infty} [((v_{ш} \tau)^v \varepsilon \xi \pi \{-v_{ш} \tau\}) / v!].$$

Число кроків при випадковому пошуку без урахування помилкової тривоги

знайдемо за формулою:

$$t_1 = [1 + 2(\theta/\Phi)^2(1 - p_a)] / [(\theta/\Phi)^4(2p_a - p_a^2)],$$

де p_a - ймовірність виявлення сигналу в шумах приймачем А.

Число кроків при випадковому пошуку з урахуванням помилкової тривоги обчислимо за такою формулою:

$$t_{1(n)} \approx [1 + 2p_a(1 - p_a) + 2n \cdot p'_{12}] [p_A^2 p_a (2 - p_a - 2(1 - p_a)(1 - p_A p_a))^n],$$

де p'_{12} - ймовірність помилкової тривоги;

p_A - ймовірність того, що промінь об'єкта А направлений у необхідному напрямку (В).

Число кроків при регулярному пошуку без урахування помилкової тривоги розрахуємо за формулою:

$$t_1 = [2m^2 + (m^2 - 4m - 1)p_a^2 + (-2m^2 + 4m + 2)p_a] / [2(2p_a - p_a^2)] = (\Phi/\theta)^2 = 1/p_A.$$

3.10 Висновки до розділу 3

В розділі проаналізовано типові структури локальної обчислювальної мережі із застосуванням атмосферних оптичних ліній зв'язку. Проведено аналіз проблем, що виникають при використанні систем з відкритим атмосферним каналом передачі даних для віддаленого доступу. На основі цього запропоновано функціональну схему системи зв'язку з відкритим каналом обміну даними на основ використання CO₂ лазера та наведено особливості вибору стандартів

передачі даних.

Проведено енергетичний розрахунок лінії зв'язку із врахуванням атмосферних впливів. Також розглянуто задачу взаємонаведення оптичних передавача та приймача для якісного прийому/передачі даних. При цьому застосовано модель наведення у вигляді Марківського випадкового процесу.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці

Планування заходів з охорони праці. Види планування та контролю стану охорони праці. Виявлення, оцінка та зменшення ризиків небезпечних подій.

Метою планування заходів з охорони праці є визначення необхідних вкладень у заходи з охорони праці для ефективного впливу на стан охорони праці.

Система планів з охорони праці окремого підприємства може включати:

- перспективне планування (на період, більший одного року) ;
- поточне планування (на рік) ;
- оперативне планування (детальні плани, спрямовані на вирішення конкретних питань працезахоронної діяльності на підприємстві в короткостроковому, до одного року, періоді).

Планування в охороні праці може включати:

- визначення цілей діяльності з охорони праці на підприємстві та засобів їх досягнення;
- вибір методів і базових показників, за допомогою яких може здійснюватися оцінка необхідних вкладень в охорону праці;
- розрахунок суми вкладень у заходи з охорони праці та раціональний розподіл цієї суми за напрямками діяльності;
- забезпечення організації контролю виконання плану (при необхідності здійснення коригування запланованих показників) ;
- здійснення постійного контролю умов і безпеки праці на підприємстві та оперативне реагування на відхилення від нормативних вимог.

Перспективне планування вміщує найбільш важливі, трудомісткі і довгострокові за терміном виконання заходи з охорони праці, виконання яких, як

правило, вимагає сумісної роботи кількох підрозділів підприємства. Можливість виконання заходів перспективного плану повинна бути підтверджена обґрунтованим розрахунком необхідного матеріально-технічного забезпечення і фінансових витрат з зазначенням джерел фінансування.

До перспективних планів належить комплексний план покращення умов праці і санітарно-оздоровчих заходів, що передбачає створення, відповідно до нормативних актів з охорони праці, умов праці, пов'язаних з перспективними змінами підприємства. Таке планування, як правило, розраховане на термін від 2 до 5 років. Реалізація цих планів забезпечується через річні плани номенклатурних заходів з охорони праці, які вносяться до угоди, що є невід'ємною частиною колективного договору.

Поточне планування здійснюється у межах календарного року через розроблення відповідних заходів у розділі «Охорона праці» колективного договору.

Поточні плани передбачають реалізацію заходів із покращення умов праці, створення кращих побутових і соціальних умов на виробництві. Ці плани обов'язково забезпечуються фінансуванням згідно з розробленими кошторисами.

Питання охорони праці можуть віддзеркалюватися в інших поточних планах, які підприємства та організації можуть скласти на вимогу трудових колективів:

- план соціального розвитку колективу;
- наукової організації праці;
- механізації важких і ручних робіт;
- охорони праці жінок;
- підготовки підприємства до робіт в осінньо-зимовий період;
- підвищення культури виробництва та ін.

Оперативне планування роботи з охорони праці здійснюється за підсумками контролю стану охорони праці в структурних підрозділах і на

підприємстві в цілому.

Оперативні плани складаються для швидкого виправлення виявлених в процесі державного, відомчого і громадського контролю недоліків в стані охорони праці, а також для ліквідації наслідків аварій або стихійного лиха.

Оперативні заходи щодо усунення виявлених недоліків зазначаються безпосередньо у наказі власника підприємства, який видається за підсумками контролю, або у плані заходів, як додатку до наказу.

Організаційно-методичну роботу щодо складання перспективних, поточних та оперативних планів здійснює служба (спеціаліст) охорони праці.

4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Здійснення заходів щодо зниження дії радіоактивних випромінювань на радіоелектронну апаратуру зв'язку, радіомовлення і телебачення [2]

Оцінка уразливості лабораторного блока живлення від радіоактивного забруднення і проникаючої радіації починається з визначення максимальних очікуваних значень рівня радіації і дози проникаючої радіації. За показник стійкості об'єкта приймається допустима доза радіації, яку можуть одержати люди за час робочої зміни.

Для характеристики радіоактивного забруднення застосовують ступінь (щільність) забруднення, який характеризується поверхневою щільністю забруднення радіонуклідами і вимірюється активністю радіонукліда на одиницю площі (об'єму). Основною дозиметричною величиною, за допомогою якої оцінюється дія радіації, є доза випромінювання - кількість енергії, яка поглинута одиницею маси опроміненого середовища. Експозиційна доза визначається тільки для повітря при гама і рентгенівському випромінюванні. Поглинута доза визначається для речовин. Місцевість, що забруднюється внаслідок радіаційної аварії, за щільністю забруднення радіонуклідами умовно поділяють на зони: зону

відчуження, зону безумовного (обов'язкового) відселення, зону гарантованого (добровільного) відселення і зону підвищеного радіоекологічного контролю.[1]

За дозами опромінення зону забруднення поділяють на наступні зони: надзвичайно-небезпечного забруднення, небезпечного забруднення, сильного забруднення, помірного забруднення, і зону радіаційної безпеки.

Також радіоактивне забруднення буде безпосередньо впливати лабораторного блока живлення, але і на його конструкцію, оскільки, до його складу входять метічні провідники з ізоляційним покриттям, металічний корпус, пласмасові роз'єми і самі радіоелементи (резистори, транзистори, мікросхема, конденсатори, діод).

Органічні речовини вельми чутливі до радіації. Вплив радіації призводить до перетворення молекул, що супроводжується хімічними реакціями, що викликають незворотні зміни природи речовини і її механічних властивостей.

Перетворення супроводжується виділенням газів, які в поєднанні з вологою утворюють кислоти, які здійснюють шкідливий вплив на ізоляційні матеріали. Більшість пластмас отримує механічне пошкодження навіть при малих дозах радіації.

Фенолформальдегід і метилметакрилат стають крихкими і деформуються. Поліетилен і полістирол - спочатку збільшується опір розриву і твердість, а потім вони стають крихкими. Більшість пластмас темніє і знебарвлюється. Просочення і ізоляційні масла псуються, як і оргматеріали. Синтетичний каучук і кремнійорганічна гума твердіють

Зміна електричних властивостей органічних речовин (провідність, діелектрична проникність, кут втрат) має оборотний характер. Час відновлення залежить від природи матеріалу та умов опромінення.

На неорганічні речовини (матеріали) радіація впливає менше, ніж на органічні. При опроміненні нейтронами можливо об'ємне розширення. Кварц і скло втрачають прозорість при великих дозах.

Вплив радіації на напівпровідниковий діод залежить від того, який ефект використаний в основі його роботи, виду матеріалу, питомого опору його, а також конструктивних особливостей діода. Оскільки в підсилювачі використані лише кремнієві діоди то розглянемо лише їхню реакцію. [1]

Під впливом нейтронної радіації провідність точково-контактних діодів зменшується в прямому і зворотному напрямках; у площинних діодів провідність у прямому напрямку також зменшується. Пошкодження діодів обумовлюється зміною характеристик провідності в прямому напрямку. Вплив γ -опромінення викликає оборотні зміни зворотного струму.

Характеристика впливу радіоактивного забруднення на транзистор. Вплив опромінення викликає порушення кристалічної решітки матеріалу (основний ефект) і іонізацію (вторинний ефект). Внаслідок цього змінюються параметри напівпровідникових матеріалів – час життя основних носіїв, питома провідність, швидкість поверхневої рекомбінації дірок з електронами. Внаслідок зміни вищевказаних параметрів зменшується коефіцієнт підсилення по струму, збільшується зворотний струм колектора, зростають шуми транзистора.

Іонізація, створювана радіацією, інjektується надлишок носіїв у транзистор, внаслідок чого виникають значні шуми. Зміна коефіцієнта посилення є незворотнім, а зміни зворотного струму можуть бути оборотними і необоротними. Як бачимо змінюється основний із електричних параметрів підсилювача – коефіцієнт підсилення, а отже вихідна потужність.

Потрібно зазначити, що більшу радіаційну стійкість мають германієві транзистори в порівнянні з кремнієвими.

До основних методів захисту радіоелектронної апаратури відносять такі конструктивні рішення:

- правильно підбирати і розташовувати елементи;
- ширше використовувати керамічні ізолятори в частинах перемикачів, роз'ємах, гніздах і т.д.;

- застосовувати склотканина та інші неорганічні матеріали для манжет, кабельної ізоляції тощо;
- застосування елементів з неорганічних матеріалів, слюдяних і керамічних конденсаторів;
- застосовувати плівкові і металлопленочні опору;
- ретельно продумувати схему розташування, для зменшення струмів витоку і пробую;
- екранувати найбільш чутливі елементи;
- правильно вибирати матеріали деталей конструкції;
- правильно вибирати напівпровідникові прилади (надавати перевагу германієвим).
- Для захисту від γ - променів добре екранують, захищають - свинець, вісмут, вольфрам, золото, платина, ртуть і деякі інші важкі матеріали. [1]

4.3 Висновки до розділу

В розділі «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» розглянуто планування заходів з охорони праці. Види планування та контролю стану охорони праці. Виявлення, оцінка та зменшення ризиків небезпечних подій. Також описано заходи щодо зниження дії радіоактивних випромінювань

ВИСНОВКИ

Проаналізовано загальні поняття систем з відкритим каналом передачі даних, зокрема атмосферних оптичних ліній зв'язку. Проаналізовано типову структуру оптичної лінії зв'язку, призначення її основних елементів. Розглянуто типові структури стандартних відкритих оптичної ліній зв'язку та зовнішні і внутрішні фактори, що впливають на їх роботу. З проведеного аналізу встановлено, що в якості джерела випромінювання доцільно використовувати спеціальні типи джерел лазерного випромінювання.

Розглянуто вплив атмосфери на поширення в ній лазерного, зокрема інфрачервоного випромінювання. Зокрема детально проаналізовано можливий склад атмосферного каналу обміну даними та його вплив на загасання оптичного сигналу при поширенні його в різних погодних умовах. Означено поняття вікон прозорості, як ділянок спектру випромінювання з мінімальним ослабленням при проходженні в атмосфері. Виходячи з цього показано доцільність застосування оптичного передавача на основі CO_2 -лазера. Проаналізовано особливості роботи такого лазера, для якого можливою є реалізація електронної або механічної перебудови довжини хвилі для забезпечення можливості високоякісного обміну даними в змінних погодних умовах.

Розглянуто типові структури локальної обчислювальної мережі із застосуванням атмосферних оптичних ліній зв'язку. Проведено аналіз проблем, що виникають при використанні систем з відкритим атмосферним каналом передачі даних для віддаленого доступу. На основі цього запропоновано функціональну схему системи зв'язку з відкритим каналом обміну даними на основ використання CO_2 лазера та наведено особливості вибору стандартів передачі даних.

Проведено енергетичний розрахунок лінії зв'язку із врахуванням

атмосферних впливів. Також розглянуто задачу взаємонаведення оптичних передавача та приймача для якісного прийому/передачі даних. При цьому застосовано модель наведення у вигляді Марківського випадкового процесу.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гаджиев М.М. Аналіз, синтез і оптимізація мереж зв'язку // Математичні основи оптимізації телекомунікаційних систем: підручник [для студ. вищ. техн. навч. закл.] 443 / [М.В. Захарченко, М.М. Гаджиев, С.М. Горохов та ін.]; під ред. М.В. Захарченко. – Одеса, ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2010. – Разд. 8 – С. 94-144.
2. Драганов А.В., Гринь А.А. Ефективність систем зі зворотним зв'язком при таймерному кодуванні // Системы и средства передачи и обработки информации: Тр. VI Междунар. науч.–практич. конф. 3–8 сентября 2002 г. – Одесса, 2002. – С. 79–80.
3. Захарченко М.В. Порівняння синдромних методів для коригуючих блокових позиційних і таймерних кодів / М.В. Захарченко, М.М. Гаджиев, Б.К. Радзімовський, Ю.С. Горохов, Д. О. Шпак // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 2/9(68). – С. 4–8, 67.
4. Дозорський В.Г., Дозорська О.Ф., Дедів Л.Є., Дедів І.Ю., Паньків І. М., Яворська Є.Б. Структура системи відбору біосигналів для задачі відновлення комунікативної функції людини. Вісник Хмельницького національного університету: технічні науки. – Хмельницький: редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету". – 2019. - №2(271) – с. 183-186.
5. Хвостівська Л.В., Осухівська Г.М., Хвостівський М.О., Шадріна Г.М., Дедів, І. Ю. Розвиток методів та алгоритмів обчислення періоду стохастичних біомедичних сигналів для медичних комп'ютерно-діагностичних систем. Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. /Категорія В/ 2019. Вип. 79. С. 78-84. doi: 10.20535/RADAR.2019.79.78-84.
6. Дозорська О.Ф., Яворська Є.Б., Дозорський В.Г., Дедів Л.Є. і Дедів І.Ю. Метод виявлення ознак основного тону в структурі електроміографічних

сигналів для задачі компенсації порушеної комунікативної функції людини», Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування, (81), с. 56-64. doi: 10.20535/RADAP.2020.81.56-64.

7. Дедів І.Ю. Структурний синтез вібромасажної апаратури / О.В. Гевко, В.Г. Дозорський, Л.Є. Дедів, І.Ю. Дедів, О.Ф. Дозорська // Перспективні технології та прилади, № 20, Луцьк, 2022. – с. 23-31.

8. Mathematical and Algorithmic Support of Detection Useful Radiosignals in Telecommunication Networks. L. Khvostivska, M. Khvostivskyu, V. Dunets, I. Dediv. CEUR Workshop Proceedings. 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, ITTAP 2022 Ternopil 22- 24 November 2022. Том 3309, с. 314-318.

9. Дедів І.Ю., Сверстюк А.С., Дедів Л.Є., Дозорський В.Г., Хвостівський М.О. Математичне моделювання, методи та програмне забезпечення опрацювання дихальних шумів у комп'ютерних аускультативних діагностичних системах: наукова монографія. Львів: Видавництво «Магнолія - 2006», 2021. 126 с. ISBN 978-617-574-219-8.

10. Дедів Л.Є., Сверстюк А.С., Дедів І.Ю., Хвостівський М.О., Дозорський В.Г., Яворська Є.Б. Математичне та комп'ютерне моделювання електрокардіосигналів у системах голтерівського моніторингу: наукова монографія. Львів: Видавництво «Магнолія - 2006», 2021. 120 с. ISBN 978-617-574-218-1.

11. Khvostivska L., Khvostivskyi M., Dunets V., Dediv I. (2023) Matematychnе, alhorytmichne ta prohramne zabezpechennia synfaznoho vyivlennia radiosyhnaliv v elektronnykh komunikatsiinykh merezhakh iz zavadamy [Mathematical, algorithmic and software support of synphase detection of radio signals in electronic communication networks with noises]. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol. 111, no 3, pp. 48-57 [in Ukrainian].

12. Dozorskyi V., Dediv I., Sverstiuk S., Nykytyuk V., Karnaukhov A. The Method of Commands Identification to Voice Control of the Electric Wheelchair. Proceedings of the 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). CEUR Workshop Proceedings. Ternopil, Ukraine, June 14-16, 2023. P.233-240. ISSN 1613-0073. CEUR Workshop Proceedings. Ternopil, Ukraine.

13. Liliya Khvostivska, Iryna Dediv, Mykola Khvostivsky, Leonid Dediv. Computer Tool for generating of Test Radio Signals for verification of the Radio Computer Systems Software. ADVANCED APPLIED ENERGY and INFORMATION TECHNOLOGIES 2021. Proceedings of the International Conference (Ternopil, 15-17 of December 2021.) / Ministry of Education and Science of Ukraine, Ternopil Ivan Puluj National Technical Universtiy [and other.]. – Ternopil : TNTU, Zhytomyr : «Publishing house “Book-Druk”» LLC, 2021. – P.200-205.

14. Захарченко М.В. Алгебраїчний алгоритм декодування бінарних сигналів з енергетичною віддаллю менше Найквістової / М.В. Захарченко, С.В. Хомич, Ю.В. Белова, К.О. Осадчук // Матеріали II міжн. наук.-практ. конф. [“Фізикотехнологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки”], (Чернівці, 25–27 жовтня 2012 р.) – Чернівці, 2012. – С. 86.

15. Захарченко М.В. Вплив корельованих завад на пропускну здатність каналу та швидкість передачі інформації при обмеженій якості / М.В. Захарченко, В.Й. Кільдішев, С.В. Хомич, Ю.В. Белова // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – Вип. 33. – С. – 62–88.

16. Коханов О.Б. Оптимальное синхронное линейное детектирование РАМ сигналов с компенсацией фазового сдвига / Коханов О.Б., Захарченко Н.В., Перекрестов И.С. // Зб. наукових праць ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2006. – № 1. – С. 18 – 22.

17. Мандзій Б.А., Желяк Р.І. Основи теорії сигналів: навч. посіб. для студентів вищих технічних закладів України / Б.А. Мандзій, Р.І. Желяк; за ред. д.т.н., проф. Мазія Б.А. – Львів: НВП “НОВИЙ ТЕЗАУРУС”, 2001. – 152 с.
18. Мережі та системи телекомунікацій: у 4 т. / [М.В. Захарченко, Г.С. Гайворонська, А.І. Єщенко]; за ред. М.В. Захарченка. –Т.1: Інформаційні мережі. Стандарти та рекомендації. ЄНМЗУ. Аналогові та комп’ютерні мережі.– К.: Техніка, 2000 р. – 2000 р. – 304 с
19. Методи підвищення ефективності використання каналів зв’язку / [Захарченко В.М., Гайдар В.П., Улєєв О.П., Липчпнський О.І.]. – К.: Техніка, 1998. – 248 с.
20. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека». Навчальний посібник / В.С. Стручок, – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2022. – 150 с.
21. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної бо та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.

ДОДАТКИ

УДК 621.39: 535

Б.В. Галенда, М.М. Кузнецов, Л.Є. Дедів, к.т.н., доц.

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

ЗАДАЧА РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ОБМІНУ ДАНИМИ З ВІДКРИТИМ КАНАЛОМ

B.V. Galenda, M.M. Kuznetsov, L.E. Dediv, Ph.D., Assoc. Prof.

THE TASK OF DEVELOPING DATA EXCHANGE SYSTEM WITH OPEN CHANNEL

З кінця минулого століття спостерігається помітний прогрес елементної бази пристроїв оптичного діапазону. Як наслідок, почали швидко розвиватися і деякі технічні програми. Насамперед це стосується атмосферних оптичних ліній зв'язку (АОЛЗ), як систем з відкритим каналом обміну даними. Такі незаперечні переваги АОЛЗ, як велика інформаційна ємність, малі габарити та вага апаратури, відсутність взаємних перешкод та необхідності отримувати дозвіл на використання радіочастот, можливість організації зв'язку на території, де недоступний або не виправданий радіо- та оптоволоконний зв'язок, відносно низька вартість, швидкість розгортання зв'язку, простота обслуговування, призвели до того, що АОЛЗ зайняли певне місце серед інших систем передачі інформації.

Питання безпеки для радіосистем, де перехоплення не становить проблеми, вирішується шляхом застосування різних методів шифрування даних. Для оптичних систем навіть саме перехоплення та виділення інформації є дуже складним завданням. Насправді, далеко не завжди можна ввести у канал зв'язку напівпрозоре дзеркало непомітно від користувача. Окрім цього, отримані відомості потрібно ще розшифрувати. Абсолютного захисту від несанкціонованого доступу не існує - теоретично можна перехопити та "виділити" інформацію, передану будь-яким із відомих на сьогоднішній день способом. Однак, системи оптичного зв'язку в цьому плані є перспективнішими в порівнянні із іншими типами каналів передачі даних. В цьому плані такі системи реалізуються у вигляді складних радіо оптичних систем шляхом поєднання оптики, електроніки та радіофізики.

Формування та загальний розвиток радіооптики багато в чому визначається інформаційними завданнями - завданнями спостереження та вимірювання, завданнями передачі, прийому та обробки великих масивів інформації при забезпеченні високої швидкодії. Клас інформаційних радіооптичних систем поєднує різноманітні та численні лазерні системи, особливістю яких є використання оптичного випромінювання як носія інформації. Прикладами подібних систем є системи лазерної локації та навігації, системи оптичного зв'язку, лазерної далекометрії, лазерного зондування, лазерні вимірювальні системи та сенсорні системи, лазерні системи бачення, системи лазерної та волоконно-оптичної гіроскопії, лазерної інтерферометрії, лазерної спектроскопії, лазерної голографії та багато інших.

В дослідженнях проводиться проектування системи обміну даними, в якій каналом передачі є відкритий простір, а в якості джерела оптичного випромінювання використовується CO₂-лазер. При цьому можливим стає реалізація методу електронної перебудови довжини хвилі випромінювання CO₂-лазера для підвищення надійності та достовірності передавання даних у відкритому каналі та адаптації самого процесу обміну даними до атмосферних впливів шляхом корекції довжини хвилі випромінювання.