

С.М. КУХТІН, канд. фіз.-мат. наук, Є.П. ФЕДОРЕНКО

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ СИСТЕМ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ ВІДКРИТИМИ ОПТИЧНИМИ ТРАСАМИ

Вступ

На сьогодні більшість бездротових систем і мереж передавання даних працюють, як правило, в радіохвильовому діапазоні. Однак історія розвитку телекомунікаційних технологій демонструє поступовий перехід до більш високих несівних частот, зокрема, від кілогерц – з часів упровадження радіозв'язку до терагерцового діапазону сучасних ВОЛЗ-систем. Досягнення у галузі волоконно-оптичних ліній зв'язку і супутні переваги використання оптичного діапазону сприяють значному інтересу щодо дослідження можливостей застосування оптичного діапазону для передавання інформаційних сигналів у відкритому просторі. Це, насамперед, продиктовано обсягом даних, які можуть бути передані, зважаючи на збільшення пропорційно несійної частоти. Враховуючи, що більшість систем і методів у радіодіапазоні вже досягли теоретичної межі, перехід до оптичної області спектру стає абсолютно неминучим. Особливості оптичного діапазону і лазерних джерел випромінювання, що активно застосовуються у цій сфері, відкривають низку унікальних можливостей, серед яких підвищена безпека передавання даних, можливість передавання пакетів оптичних сигналів на великі відстані, впровадження квантової криптографії тощо.

Галузі, в яких можуть застосовуватись системи передавання даних відкритими оптичними трасами, є досить різноманітними. До них, насамперед, можна віднести міські і локальні телекомунікаційні мережі, допоміжні канали передавання даних для наявної телекомунікаційної інфраструктури, швидке впровадження широкопasmового зв'язку у разі надзвичайних подій або у випадку, коли звичайні оптоволоконні мережі не можуть бути застосовані, передавання відеосигналів високої роздільної здатності, телемедицину, широкопasmовий супутниковий зв'язок тощо.

Незважаючи на переваги та широкі перспективи систем передавання даних відкритими оптичними трасами, існує ціла низка труднощів, які стримують їхній розвиток. До них, перш за все, слід віднести вплив атмосфери та погодних умов на спотворення сигналу, а також високі вимоги щодо юстування оптичних елементів і необхідності застосування трекінгових систем. Однак у даний час активно ведуться дослідження з метою подолання цих обмежень.

У цій статті опрацьовано стан сучасних систем передавання даних відкритими оптичними трасами, історію їхнього розвитку, структуру побудови мереж та приймально-передавального обладнання. Проведено аналіз впливу атмосферних умов на передавання оптичних сигналів, розглянуто різноманітні методи підвищення ефективності передавання даних за допомогою цих систем.

Оптичні комунікації відкритими оптичними трасами. Історія розвитку

Використання оптичного випромінювання для передавання інформації не є новою ідеєю, і застосовується в тому чи іншому вигляді досить давно. Насамперед, можна навести приклад сигнальних вогнів, геліографів, оптичних телеграфів як примітивних систем передавання оптичних сигналів відкритими оптичними трасами. У 1880 р. Гремом Белом було винайдено фотофон, який використовував голосову модуляцію відбитого сонячного випромінювання, зі зворотнім перетворенням приймачем сигналу [1]. Ідеї, сформовані Гремом Белом, обмежено застосовувались у військових розробках протягом 30–40 років із використанням ламп розжарювання як джерел випромінювання. Поява лазерних джерел і світлодіодів сприяла поштовху для більш активного розвитку систем передавання інформації оптичним випромінюванням. Так, уже в 1960 р. було продемонстровано на практиці передавання телевізійного сигналу за допомогою рубінового лазера на відстань понад 25 миль [2]. У 1962 р.

дослідниками з лабораторії Лінкольна МІТ було передано телевізійний сигнал на відстань близько 48 км із використанням *GaAs* світлодіода [3]. Протягом декади було проведено низку досліджень з використанням різноманітних лазерних джерел, які показали на той час досить сумнівну цінність комерційного використання. Більш детальний огляд цих систем можна знайти в роботі [3]. Тут можна виділити передавання даних групою Хьюга у 1962 р. за допомогою *He-Ne* лазера на відстань 30 км. У 1963 р. було продемонстровано передавання акустично-модульованого сигналу на відстань 190 км Electro-optic Systems, а також телевізійного сигналу з полосами 1,7 і 5 МГц. У 1970 р. Nippon Electric Company продемонструвала дуплексну комерційну лінію зв'язку на відстані 14 км за допомогою *He-Ne* лазера 632,8 нм [4]. З появою та впровадженням ВОЛЗ інтерес до систем із відкритими оптичними трасами значно зменшився, обмежуючись, насамперед, військовим і космічним застосуванням. Враховуючи гостру необхідність щодо розроблення надійних високошвидкісних систем передавання даних у космосі, за останні десятиріччя дослідники досягли досить суттєвого прогресу в цій сфері. Національне управління з авіації та досліджень космічного простору продемонструвало оптичну систему передавання даних у своїй програмі Mars Laser Communication Demonstration [5]. Європейське космічне агентство реалізувало експеримент з міжсупутникового зв'язку з використанням напівпровідникового лазера [6]. Починаючи з 1990 р. дослідження в галузі оптичного атмосферного і космічного зв'язку значно зросли з появою комерційно доступних платформ. Тут можна навести приклади передавання зображень під час олімпійських ігор 2020 р. у Сіднеї, запуск супутника Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite компанії JAXA у 2015 р., а також супутника Terra SAR-X з модулем LCT у 2007 р., що продемонстрував практичні швидкості передавання даних понад 5,5 Гбіт/с [7]. Останні роки також ознаменувались появою комерційних зразків обладнання для передавання даних у видимому діапазоні [8, 9]. Слід також згадати дослідження, пов'язані із забезпеченням оптичним зв'язком наносупутників [10], а також наявність наземних систем із швидкостями передавання даних понад 100 Гбіт/с [11].

Застосування систем з відкритими оптичними трасами та їхні переваги

Фактично передавання інформації відкритими оптичними трасами може реалізовуватись для більшості сфер залежно від відстані й умов застосування, починаючи від з'єднань оптики вільного простору в інтегральних схемах, побудови локальних інформаційних мереж, закінчуючи супутниковим зв'язком. Тут можна виділити окремі категорії:

- 1) оптичні з'єднання надкороткої дії, наприклад, оптичні зв'язки між елементами або схемами оптичних і гібридних обчислювальних систем [12];
- 2) оптичні з'єднання малого і середнього радіусу дії, а саме – побудова локальних бездротових оптичних мереж, а також забезпечення зв'язку між транспортними засобами [13 – 15];
- 3) оптичні з'єднання дальньої дії, для впровадження муніципальних інформаційних мереж;
- 4) оптичні з'єднання надвеликої дії, наприклад, забезпечення міжсупутникового зв'язку, дальніх інформаційних з'єднань у космосі [16].

У цій статті більш детально розглянуто особливості застосування оптичних інформаційних мереж середньої і дальньої дії в атмосфері, зважаючи на значний інтерес з комерційної точки зору і чималі труднощі практичної реалізації. Такі системи, здебільшого, застосовують відкриті атмосферні оптичні траси значної довжини, що перевищує декілька кілометрів, для забезпечення високошвидкісного передавання даних. У порівнянні з системами радіозв'язку вони характеризуються наявністю широкого каналу передавання даних. На сьогодні комерційно доступні системи, що забезпечують швидкісне передавання понад 100 Гбіт/с, експериментальні системи наближаються за швидкістю передавання даних до волоконно-оптичних ліній зв'язку, в тому числі із застосуванням мультимплексування з поділом довжин хвиль [17]. Загалом системи з відкритими оптичними трасами будуються з використанням лазерних

джерел. Характерні параметри лазерного випромінювання дають низку переваг, серед яких високий показник захищеності каналу передавання даних, невразливість до електромагнітних завад, можливість мультиплексування інформаційних сигналів. Наявність чималої кількості лазерних джерел та оптоелектронних компонентів ВОЛЗ значно розширюють можливість впровадження таких систем. Крім того, враховуючи наявну компонентну базу, системи з відкритими оптичними трасами можуть використовуватись як доповнення до наявних ВОЛЗ мереж, у разі, коли оптоволоконний кабель не може бути прокладений до кінцевого абонента.

Серед ключових напрямків застосування систем з відкритими оптичними трасами можна виділити такі:

- побудова високошвидкісних локальних мереж. У даний час міська офісна чи житлова забудова значної щільності потребує широкого каналу передавання даних, до того ж у деяких випадках існує необхідність забезпечення значного трафіку передавання даних між окремими будівлями (багатопверхові офісні будівлі);

- відеоспостереження. Відеоспостереження все частіше використовується для забезпечення громадської безпеки, контролю дорожнього руху тощо. Відеосигнал генерує значний потік інформації, особливо якщо мова йде про відеосигнал високої роздільної здатності. В умовах, коли фізично об'єднати камери в дротовій мережі неможливо і бездротовий зв'язок не забезпечує необхідної швидкості передавання даних, системи з відкритими оптичними трасами можуть стати чудовою альтернативою;

- забезпечення додаткових каналів передавання даних між вишками мобільного зв'язку. Як правило, інфраструктура мобільного зв'язку має додаткові канали, як дротові, так і бездротові, для забезпечення надійного функціонування мережі. Зростаюча кількість абонентів і високі швидкості інтернет-трафіку потребують збільшення каналу передавання даних між окремими базовими станціями. Враховуючи, що існуючі технології мають обмеження, системи з відкритими оптичними трасами можуть забезпечити потреби у збільшенні інформаційного трафіку таких мереж;

- упровадження міжсупутникового зв'язку. Сучасні супутникові мережі обмежені пропускнуною спроможністю радіоканалу. Передавання даних оптичним каналом може суттєво розширити можливості супутникових систем. Крім того, оптичний канал також може бути реалізований між супутниками і приймально-передавальними станціями на Землі;

- швидке впровадження інформаційних мереж. Під час надзвичайних ситуацій та катастроф наявні інформаційні мережі можуть бути пошкоджені, причому їхнє відновлення та ремонт можуть бути неможливі чи потребувати значного часу. Системи передавання даних відкритими оптичними каналами, навпаки, можуть бути встановлені швидко, забезпечуючи високошвидкісний зв'язок в екстремальних умовах;

- упровадження новітніх методів захисту інформації. Ґрунтуючись на законах квантової механіки, квантова криптографія пропонує радикально інше рішення для шифрування та сприяє безпрецедентній безпеці передавання даних. Насамперед, розглядаються системи квантової криптографії, що функціонують у поєднанні з діючою волоконно-оптичною інфраструктурою;

- забезпечення мереж у важкодоступних районах. У деяких ландшафтах дуже складно забезпечити розгортання інформаційних мереж. Це можуть бути як гірські райони, так і райони з агресивним кліматом або райони морських акваторій. Використання супутникового зв'язку має обмеження з точки зору доступного інформаційного каналу та вартості наданих послуг. У цьому випадку впровадження систем із відкритими оптичними трасами стає єдиною логічною альтернативою.

Основи передавання інформації відкритими оптичними трасами

Типова схема передавання містить передавач модульованого оптичного сигналу через атмосферний канал і приймач, що забезпечує збір і трансформацію оптичного сигналу на

електричний. Схема типового приймально-передавального обладнання представлена на рис. 1. Сучасні системи передавання оптичних сигналів працюють, здебільшого, в ближньому ІЧ-діапазоні 800–1600 нм. Вибір цього діапазону продиктовано оптичною прозорістю в атмосфері, за виключенням поглинання деякими молекулярними газами [18]. Так, на полосах 850, 1060, 1250, 1550 нм типове згасання складає лише близько 02 дБ/км. Існують також експериментальні системи в УФ і середньому ІЧ-діапазонах (10 мкм), що демонструють менші помилки, що пов'язані з блокуванням сигналу, впливом сонячного випромінювання та кращими характеристиками передавання даних у тумані [19, 20].

Передавач складається з джерела оптичного випромінювання, оптичного модулятора, оптичного підсилювача (опціонально), пристрою для кодування оптичного сигналу, оптичних елементів для формування оптичного променя. Спершу інформаційний сигнал кодується, потім проводиться модуляція оптичного сигналу. Як джерела випромінювання найбільшого використання набули лазерні діоди, в деяких випадках застосовують звичайні світло-випромінювальні діоди. Так, VCSEL лазерні діоди є найбільш популярними джерелами на 850 нм, а на 1550 нм – Фабрі-Перо та DFB лазерні діоди. Враховуючи доступність останніх як розповсюджених джерел ВОЛЗ, їхню температурну стабільність, а також відносну безпеку для здоров'я людини, саме DFB лазерні діоди вважаються найбільш перспективними джерелами для передавання оптичних інформаційних сигналів на значні відстані.

У системах з відкритими оптичними трасами для приймального обладнання застосовують дві розповсюджені схеми, зокрема, некогерентну та когерентну. Некогерентні схеми ґрунтуються на прямому детектуванні амплітудної модуляції оптичного сигналу. Когерентні схеми є більш складними, в яких разом із амплітудою враховується частота та фаза оптичного сигналу. В самому приймачеві використовується окреме джерело оптичного сигналу для змішування з сигналом, який приймається, перед детектуванням. Когерентні системи демонструють значно кращі характеристики з огляду на вплив фонових шумів, врахування згасання сигналу, викликаного турбулентністю повітряних мас, і кращої чутливості приймача [21].

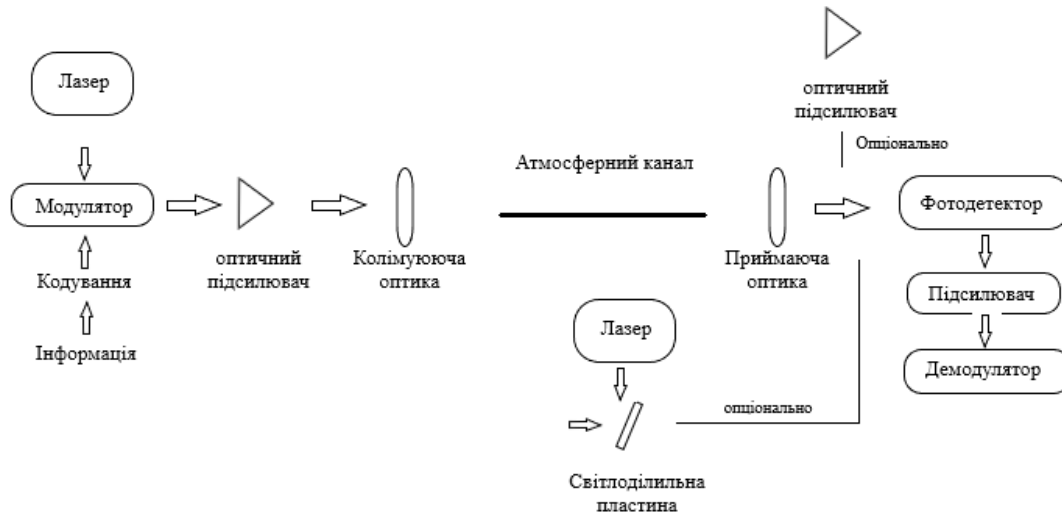


Рис. 1. Схема приймально-передавального обладнання

Некогерентні системи є більш розповсюдженими, зважаючи на більш просту конструкцію та нижчу вартість. Приймальна апаратура некогерентних систем містить оптичний фільтр, фокусувальну оптику та фотодетектор. Струм з фотоприймача підсилюється операційним підсилювачем з низьким шумом, а також використовується низькочастотний фільтр для обмеження рівнів теплового і фонових шумів. В якості фотоприймачів найбільшого розповсюдження набули Si, InGaAs, Ge фотодіоди, завдяки високій квантовій ефективності та високій швидкості спрацювання. Вибір матеріалу фотодіодів залежить від спектрального діапазону, на 850 нм використовують Si фотодіоди, що мають найбільшу чутливість, водночас на 1550 нм застосовують InGaAs діоди. З огляду на тип фотодіодів перевага надається

P-i-N, а також лавинним фотодіодам. Перший тип фотодіодів прийнятний для побудови систем обмеженої дальності (декілька км). Такі обмеження зумовлені рівнями теплового шуму. Для систем зі значною дальністю передавання даних пріоритетним стає використання лавинних фотодіодів завдяки високій чутливості. Недоліком таких фотодіодів є значні показники шуму, котрі доцільно враховувати під час проєктування електричних схем підсилення та оптимізації відношення сигнал/шум.

У деяких роботах для підвищення чутливості систем на 1550 нм пропонувалось застосування оптичних підсилювачів, зокрема, на основі ербієвих волокон і напівпровідникових оптичних підсилювачів [22, 23]. Слід зазначити, що використання таких пристроїв значно ускладнює приймальну систему. Крім того, додатково виникають проблеми, пов'язані із юстуванням оптичних елементів з оптичним волокном, а також наявністю додаткового шуму спонтанної емісії, що може значно погіршити показники приймача. Втім, якщо показники системи переважно обмежені електронним шумом, використання оптичних підсилювачів може бути доцільним.

Вплив на канал передавання даних

Передавання оптичного сигналу в атмосфері пов'язано з впливом низки чинників, здебільшого, втратами, що спричинені геометрією променя, юстуванням оптичних елементів, атмосферним поглинанням, впливом турбулентних потоків на згасання, зовнішніми шумами.

1. Втрати, пов'язані з юстуванням оптики та механічними впливами.

Суттєвий вплив на оптичну потужність, що реєструється, чинить розходження оптичного променя. Водночас на хід оптичного променя можуть суттєво впливати атмосферні вихори, особливо на значних відстанях передавання даних [24]. Під час застосування в міській забудові вібрації можуть позначатися на юстуванні оптичних елементів, враховуючи досить малу діаграму спрямованості, а також вузьке поле зору оптики для приймання. Для простих систем, які працюють на малих відстанях і не устатковані системами трекінгу, простим рішенням є збільшення діаграми спрямованості передавача. Крім того, для компенсації цих впливів було запропоновано використання просторових частково когерентних Гаусових променів, геометричної оптимізації променя, а також використання джерел з перебудовою довжини хвилі, насамперед квантово-каскадних лазерів [25 – 27]. Однак системи, що застосовуються для передавання даних на значні відстані, повинні бути устатковані системою трекінгу та корекції для їхньої ефективного функціонування. В декількох роботах було проведено дослідження впливу помилок юстування на роботу таких систем, отримано аналітичні вирази для бітових помилок, а також вплив цих чинників на системи, що застосовують кодування сигналу [28 – 30].

2. Згасання оптичного сигналу в атмосферному каналі.

Існує три основні чинники, що впливають на згасання оптичного сигналу в атмосфері: поглинання, розсіювання і вплив атмосферної турбулентності на розповсюдження оптичного сигналу.

Поглинання оптичного випромінювання можна описати законом Бугера–Ламберта:

$$I = I_0 e^{-\alpha CL}, \quad (1)$$

де I – інтенсивність, яка реєструється; I_0 – інтенсивність на виході; α – коефіцієнт поглинання; C – концентрація; L – довжина оптичної траси.

Атмосферне поглинання, перш за все, спричинено наявністю деяких газів, присутніх в атмосфері, насамперед, водяної пари, метану, оксиду азоту, кисню, азоту, двооксиду вуглецю. Спектр поглинання для цих компонентів показано на рис. 2 [31].

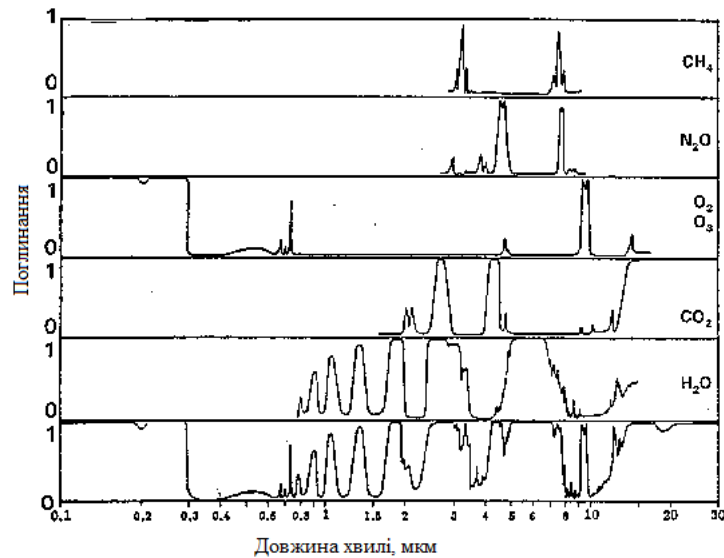


Рис. 2. Спектр поглинання атмосферних газів

Ці гази мають сильні лінії поглинання в ІЧ-області спектру та видимій області спектру зі значно меншою інтенсивністю [18]. Наприклад, метан має сильні лінії поглинання в ближній ІЧ-області на смугах з центрами 890 нм, 1650 нм, 2,3 мкм, 3,36 мкм. Зважаючи на це, іноді може бути важливим вибір лазерного джерела (робочої довжини хвилі), особливо на наддовгих оптичних трасах, де навіть незначні концентрації можуть значно впливати на згасання оптичного сигналу. У цілому, на найбільш розповсюджених довжинах хвиль, які застосовуються в системах з відкритими оптичними трасами, а саме 850 і 1550 нм, оптичний атмосферний канал можна вважати оптично прозорим [32].

Значно більший вплив на оптичний сигнал чинить розсіювання. Для оцінки розсіювання можна враховувати параметр характеристичного розміру:

$$x_0 = 2\pi r / \lambda, \quad (2)$$

де r – радіус частки; λ – довжина хвилі випромінювання.

Зазвичай цей параметр у ближній ІЧ-області перевищує одиницю. Так, для $x_0 = 1$ можна використати теорію Мі і неселективне розсіювання в залежності від розмірів розсіювальних часточок [32, 33]:

$$\beta_{mi} = \frac{3,91}{V} \left(\frac{0,55 \text{ мкм}}{\lambda} \right)^a, \text{ дБ/км}, \quad (3)$$

де V – відстань; λ – довжина хвилі випромінювання; a – розмір частки;

$$\beta_{несел.} = \pi a^2 N_a Q_{розс.} (a/\lambda) \quad (4)$$

де a – розмір частки; λ – довжина хвилі випромінювання; N_a – розподіл розсіювальних часток (см^{-3}); $Q_{розс.}$ – коефіцієнт розсіяння (як правило, дорівнює ~ 2).

Переважаючий вклад у розсіювання вносять краплі води в повітрі. З практичної точки зору під час дощу і легкого снігу вплив на оптичний сигнал не дуже великий і зрідка перевищує згасання 3 дБ/км [34]. Коефіцієнт розсіювання значно зростає, коли розмір крапель стає співставним з довжиною хвилі, як у випадку туману. Експериментально встановлено, що саме туман є домінуючим чинником згасання оптичного сигналу, що може становити до 90 % втрат на відстанях вже 50м. Вплив цього чинника майже не залежить від довжини хвилі в

ближній ПЧ-області спектру. Іншим чинником, залежним від довжини хвилі зі значно меншим впливом, є розсіювання на частках смогу [35]. З огляду на це, в місцях з частими опадами і туманами може бути доцільним впровадження систем, які функціонують у видимому діапазоні.

3. Вплив турбулентності.

В ясний день, коли ефекти поглинання і розсіювання майже не мають впливу на оптичний сигнал, присутній інший вагомий чинник – згасання оптичного сигналу внаслідок турбулентності оптичних мас. Неоднорідності температури і тиску уздовж оптичної траси, що викликані нагрівом від сонячного світла і вітром, впливають на показник заломлення. Ці неоднорідності (турбулентності) викликають випадкові флуктуації амплітуди і фази оптичного сигналу. Це може суттєво впливати на роботу систем передавання даних з відкритими оптичними трасами, особливо на великих відстанях передавання.

Однак серед цих видів спотворень власне спотворення інтенсивності є найбільш значним. Воно відоме як сцинтиляційний вплив. Вплив атмосферної турбулентності стає найбільш показовим опівдні або опівночі через максимальну різницю температур, створювану в цей час, хоча ефект турбулентності погіршує якість оптичного сигналу протягом усього дня. Втрата атмосферної турбулентності, викликана сцинтиляцією, згідно з [32]:

$$\rho(L) = 2 \times \sqrt{23,17 \times k^{7/6} \times C_n^2 \times L^{11/6}}, \text{ дБ}, \quad (5)$$

де k – хвильове число; L – довжина оптичної траси; C_n^2 – структурний параметр заломлення.

Структурний параметр заломлення є досить складним показником, який залежить від географічного місцезнаходження, висоти над рівнем моря, часу дня і в середньому становить 10^{-17} – $10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$ [36].

Загалом врахування турбулентностей на передавання оптичного сигналу і моделювання цього процесу є доволі складною і нетривіальною задачею. Більш детально ознайомитись з цією тематикою можна в роботах [37 – 39].

Слід також відмітити дослідження впливу форми пучка на якість передавання сигналу за умов турбулентності. Встановлено, що для значних відстаней передавання даних добре себе рекомендує кільцевий розподіл, водночас, за малих відстаней найкраща робота спостерігається для косинусоїдально-гаусівського розподілу інтенсивності [40, 41].

Методи покращення характеристик оптичних систем передавання даних

Найбільшою проблемою під час реалізації передавання даних відкритою оптичною трасою є згасання сигналу внаслідок атмосферних турбуленцій. У теперішній час існує низка методик, які застосовуються для компенсації цього чинника. Серед них, насамперед, можна виділити просторове розділення, розділення передавання сигналів, використання систем з декількома виходами/входами.

Просторове розділення може бути впроваджене шляхом використання декількох діафрагм приймача, використання декількох променів для передавання сигналу, або поєднання обох методів.

Найпростіше рішення для мінімізації впливу турбулентного згасання – використання великої діафрагми приймальної оптики. Цей метод називається апертурним усередненням, він є ефективним, якщо діафрагма приймальної оптики є більшою за кореляційну довжину згасання $\sqrt{\lambda L}$, де λ і L – довжина хвилі і довжина оптичної траси [42]. Метод усереднення за апертурою досить добре вивчений і широко застосовується у системах із відкритими оптичними трасами. Він показує значне зниження рівня впливу сцинтиляції при середніх і великих довжинах оптичних трас. Також зниження згасання може бути досягнуто при використанні декількох малих діафрагм. Кожна приймальна діафрагма матиме менше апертурне усереднення, але поєднаний сигнал з декількох діафрагм матиме деякий ступень просторово-

го розділення. Загалом системи з декількома діафрагмами показують значно ліпші результати роботи, ніж з однією, при однаковому ефективному розмірі діафрагми. Системи з однією великою діафрагмою набули більшого розповсюдження внаслідок простоти реалізації, водночас, системи з декількома використовуються в умовах значних турбулентностей повітря. Ще одним недоліком систем з декількома діафрагмами є необхідність використання фотодиода з великою активною областю і пов'язану з цим понижену швидкість передавання даних.

Простішим методом реалізації розділення сигналу є тривіальна передача одного і того сигналу декількома окремими променями. Цей метод також показує досить непогану ефективність і дозволяє, наприклад, за типових умов, отримати підвищення рівня сигнал/шум під час використання двох і трьох променів на 5 і 7,5 дБ порівняно з системами, що використовують лише один промінь [43]. Також можливе застосування декількох джерел випромінювання, що працюють на різних довжинах хвиль.

Окрім методів розділення, ефект впливу турбулентності може бути мінімізований з використанням адаптивної оптики [44]. Цей метод включає використання сенсорів хвильового фронту і деформованих дзеркал для компенсації впливу турбулентностей. Слід відзначити, що використання цього методу на сьогодні досить ускладнене, а ефективне застосування можливе на невеликих оптичних трасах.

Висновки

Розроблення і впровадження новітніх систем оптичного передавання даних відкритими трасами є досить складною і нетривіальною задачею. Проте впровадження таких систем відкриває широкі перспективи для побудови інформаційних мереж наступного покоління, що задовольнятимуть широке коло сучасних телекомунікаційних потреб. Оптичні технології в майбутньому зможуть замінити деякі технології бездротового передавання даних, і, в деяких випадках, стати їхнім доповненням. На теперішній час широко застосовуються системи з швидкостями передавання даних понад 10 Гбіт/с, і наявна тенденція до їхнього збільшення. Переваги оптичного каналу можуть також дати сильний поштовх для розгортання високошвидкісних мереж у місцях де ВОЛЗ і безпроводні мережі радіозв'язку побудувати проблематично. Інший перспективний напрямок розширення каналів передавання даних між супутниками в космосі і приймальною апаратурою на землі. Також характерною особливістю є відсутність інтерференції між інформаційними каналами, що притаманна радіозв'язку. Таким чином, впровадження таких систем є перспективним для побудови локальних мереж високої щільності, а також забезпечення передавання даних між транспортними засобами.

Для систем із відкритими оптичними трасами обмежувальним чинником, насамперед, є вплив турбулентних потоків повітря на розповсюдження оптичного сигналу. На даний момент ведуться активні роботи з вивчення, моделювання та розроблення методів мінімізації цього чинника. Тут треба відмітити роботи щодо вивчення форми пучка і досить успішних методик просторового розділення, використання багатоканальних систем і методів адаптивної оптики.

Список літератури:

1. D. Phillipson. Alexander Graham Bell | The Canadian Encyclopedia // Thecanadianencyclopedia.ca, Jul. 28, 2010. <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/en/article/alexander-graham-bell>
2. H. Henniger. An introduction to free-space optical communications // Journal of Radio Engineering. 2010. Vol. 19, no. 2. P. 203–212.
3. D. L. Begley. Free-space laser communications: a historical perspective // The 15th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society. Glasgow, UK, 2002. Vol.2. P. 391–392. doi: 10.1109/LEOS.2002.1159343.
4. W. S. Rabinovich et al. Free-space optical communications research and demonstrations at the US Naval Research Laboratory. 2015. Vol. 54, no. 31. P. F189–F189. doi: <https://doi.org/10.1364/ao.54.00f189>.
5. A. Biswas and W. H. Farr. Detectors for ground based reception of laser communication from Mars. Lasers and electro-optics society // The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society. 2004. Vol. 1. P. 74–75. 7-11 November 2004.
6. T. Jono et al. Demonstrations of ARTEMIS-OICETS Inter-Satellite Laser Communications // 24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, Jun. 2006, doi: <https://doi.org/10.2514/6.2006-5461>.

7. R. Lange and B. Smutny. Homodyne BPSK-based optical inter-satellite communication links // Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering/Proceedings of SPIE, Feb. 2007. doi: <https://doi.org/10.1117/12.698646>.
8. H. Le Minh, D. C. O'Brien, G. Faulkner, M. Wolf, L. Grobe, J. Lui, and O. Bouchet. A 1.25 Gbit/s indoor optical wireless demonstrator // IEEE Photonics Technology Letters. 2010. Vol. 22, no. 21. P. 1598–1600.
9. H. Elgala, R. Mesleh, and H. Haas, "Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art // IEEE Communications Magazine. Sep. 2011. Vol. 49, no. 9. P. 56–62. doi: <https://doi.org/10.1109/mcom.2011.6011734>.
10. N. Barnwell, T. Ritz, S. Parry, M. Clark, P. Serra, and J. W. Conklin. The Miniature Optical Communication Transceiver—A Compact, Power-Efficient Lasercom System for Deep Space Nanosatellites // Aerospace. Dec. 2018. Vol. 6, no. 1. P. 2. doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace6010002>.
11. S. M. Walsh et al. Demonstration of 100 Gbps coherent free-space optical communications at LEO tracking rates // Scientific Reports. Oct. 2022. Vol. 12, no. 1. P. 18345. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22027-0>.
12. Jürgen Jahns, Sing H. Lee. Optical Computing Hardware // Elsevier eBooks, Jan. 1994. doi: <https://doi.org/10.1016/c2013-0-07396-3>.
13. F. R. Gfeller and U. Bapst. Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation // Proceedings of the IEEE. Nov. 1979. Vol. 67. P. 1474–1486.
14. J. M. Kahn and J. R. Barry. Wireless infrared communications // Proceedings of the IEEE. Feb. 1997. Vol. 85, no. 2. P. 265–298. <https://doi.org/10.1109/5.554222>
15. M. Sichitiu and M. Kihl. Inter-vehicle communication systems: a survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2008. Vol. 10, no. 2. P. 88–105. doi: <https://doi.org/10.1109/comst.2008.4564481>.
16. Vincent. Optical satellite networks // Journal of Lightwave Technology. 2003. Vol. 21, no. 11. P. 2811–2827. doi: <https://doi.org/10.1109/jlt.2003.819534>.
17. E. Ciaramella, Y. Arimoto, G. Contestabile, M. Presi, A. D'Errico, A. Guarino, and M. Matsumoto. 1.28-Tb/s (32x40 Gb/s) free-space optical WDM transmission system // IEEE Photonics Technology Letters. Aug. 2009. Vol. 21, no. 16. P. 1121–1123.
18. [HITRANonline, www.hitran.org. https://www.hitran.org/ \(accessed Jun. 22, 2024\).](https://www.hitran.org/)
19. S. Bloom, E. Korevaar, J. Schuster, and H. Willebrand. Understanding the performance of free-space optics // Journal of Optical Networking. June 2003. Vol. 2, no. 6. P. 178–200.
20. Zhengyuan Xu and B. M. Sadler. Ultraviolet Communications: Potential and State-Of-The-Art // IEEE Communications Magazine. May 2008. Vol. 46, no. 5. P. 67–73. doi: <https://doi.org/10.1109/mcom.2008.4511651>.
21. G. Li. Recent advances in coherent optical communication // Advances in Optics and Photonics. Feb. 2009. Vol. 1, no. 2. P. 279. doi: <https://doi.org/10.1364/aop.1.000279>.
22. M. Razavi and J. H. Shapiro. Wireless optical communications via diversity reception and optical preamplification // IEEE Transactions on Wireless Communications. May 2005. Vol. 4, no. 3. P. 975–983. doi: <https://doi.org/10.1109/twc.2005.847102>.
23. A. O. Aladeloba, A. J. Phillips, and M. S. Woolfson. Improved bit error rate evaluation for optically pre-amplified free-space optical communication systems in turbulent atmosphere // IET Optoelectronics. 2012. Vol. 6, no. 1. P. 26. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-opt.2010.0100>.
24. F. Dios, Juan Antonio Rubio, A. Rodríguez, and A. Comerón. Scintillation and beam-wander analysis in an optical ground station-satellite uplink // Applied optics. Jul. 2004. Vol. 43, no. 19. P. 3866–3866. doi: <https://doi.org/10.1364/ao.43.003866>.
25. I. E. Lee, Z. Ghassemlooy, W. P. Ng, and M.-A. Khalighi. Joint optimization of a partially coherent Gaussian beam for free-space optical communication over turbulent channels with pointing errors // Optics Letters. Jan. 2013. Vol. 38, no. 3. P. 350. doi: <https://doi.org/10.1364/ol.38.000350>.
26. H. Sandalidis. Optimization Models for Misalignment Fading Mitigation in Optical Wireless Links // IEEE Communications Letters. May 2008. Vol. 12, no. 5. P. 395–397. doi: <https://doi.org/10.1109/lcomm.2008.071788>.
27. X. Liu. Free-space optics optimization models for building sway and atmospheric interference using variable wavelength // IEEE Transactions on Communications. Feb. 2009. Vol. 57, no. 2. P. 492–498. doi: <https://doi.org/10.1109/tcomm.2009.02.070089>.
28. S. Arnon. Effects of atmospheric turbulence and building sway on optical wireless-communication systems // Optics Letters. Jan. 2003. Vol. 28, no. 2. P. 129. doi: <https://doi.org/10.1364/ol.28.000129>.
29. H. G. Sandalidis, T. A. Tsiftsis, and G. K. Karagiannidis. Optical Wireless Communications With Heterodyne Detection Over Turbulence Channels With Pointing Errors // Journal of Lightwave Technology. Oct. 2009. Vol. 27, no. 20. P. 4440–4445. doi: <https://doi.org/10.1109/jlt.2009.2024169>.
30. H. G. Sandalidis. Coded Free-Space Optical Links over Strong Turbulence and Misalignment Fading Channels // IEEE Transactions on Communications. Mar. 2011. Vol. 59, no. 3. P. 669–674. doi: <https://doi.org/10.1109/tcomm.2011.121410.090318>.
31. R. M. Goody and G. D. Robinson. Radiation in the troposphere and lower stratosphere // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. Apr. 1951. Vol. 77, no. 332. P. 151–187. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.49707733203>.

32. J. Mohale, M. R. Handura, T. O. Olwal, and C. N. Nyirenda. Feasibility study of free-space optical communication for South Africa // *Optical Engineering*. May 2016. Vol. 55, no. 5. P. 056108. doi: <https://doi.org/10.1117/1.oe.55.5.056108>.
33. H. A. Fadhil et al. Optimization of free space optics parameters // An optimum solution for bad weather conditions. Oct. 2013. Vol. 124, no. 19. P. 3969–3973. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2012.11.059>.
34. S. S. Muhammad. Characterization of fog attenuation in terrestrial free space optical links // *Optical Engineering*. Jun. 2007. Vol. 46, no. 6. P. 066001. doi: <https://doi.org/10.1117/1.2749502>.
35. Heinz Willebrand and B. S. Ghuman. Free space optics : enabling optical connectivity in today's networks. Indianapolis, Ind. : Sams, 2002.
36. L. C. Andrews, R. L. Phillips, and C. Y. Hopen. Aperture averaging of optical scintillations: power fluctuations and the temporal spectrum // *Waves in Random Media*. Jan. 2000 Jan. 2000. Vol. 10, no. 1. P. 53–70. doi: <https://doi.org/10.1088/0959-7174/10/1/305>.
37. Tatarskii V. I. Wave propagation in a turbulent medium. Mineola, New York : Dover Publications, Inc, 2017.
38. X. M. Zhu and J. M. Kahn. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels // *IEEE Transactions on Communications*. Aug. 2002. Vol. 50, no. 8. P. 1293–1300.
39. N. D. Chatzidiamantis, H. G. Sandalidis, G. K. Karagiannidis, S. A. Kotsopoulos, and Michail Matthaiou. New results on turbulence modeling for free-space optical systems // *CiteSeer X (The Pennsylvania State University)*, Apr. 2010, doi: <https://doi.org/10.1109/ictel.2010.5478872>.
40. S. A. Arpali, H. T. Eyyuboğlu, and Y. Baykal. Bit error rates for general beams // *Applied Optics*. Nov. 2008. Vol. 47, no. 32. P. 5971. doi: <https://doi.org/10.1364/ao.47.005971>.
41. Hamza Gerçekcioğlu, Yahya Baykal, and Cem Nakiboğlu. Annular beam scintillations in strong turbulence // *Journal of the Optical Society of America*. Jul. 2010. Vol. 27, no. 8. P. 1834–1834. doi: <https://doi.org/10.1364/josaa.27.001834>.
42. Frida Strömqvist Vetelino, C. Young, L. Andrews, and Jaume Recolons. Aperture averaging effects on the probability density of irradiance fluctuations in moderate-to-strong turbulence // *Applied optics*. Mar. 2007. Vol. 46, no 11. P. 2099–2099. doi: <https://doi.org/10.1364/ao.46.002099>.
43. S. Navidpour, M. Uysal, and M. Kavehrad. BER Performance of Free-Space Optical Transmission with Spatial Diversity // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. Aug. 2007. Vol. 6, no. 8. P. 2813–2819. doi: <https://doi.org/10.1109/twc.2007.06109>.
44. R. K. Tyson. Bit-error rate for free-space adaptive optics laser communications // *Journal of the Optical Society of America A*. Apr. 2002. Vol. 19, no. 4. P. 753. doi: <https://doi.org/10.1364/josaa.19.000753>.

Надійшла до редколегії 22. 01.2025

Відомості про авторів:

Кухтін Сергій Михайлович – канд. фіз.-мат. наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, ст. викладач кафедри фізичних основ електронної техніки; Україна; e-mail: serhii.kukhtin@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8335-5373>

Євгенія Петрівна Федоренко – Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри фізичних основ електронної техніки; Україна; e-mail: yevheniia.fedorenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6394-0216>