

О. В. Любченко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У АТМОСФЕРНО-ОПТИЧНІЙ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ОДНОМОДОВОГО БАГАТОЧАСТОТНОГО З СИНХРОНІЗАЦІЄЮ ПОЗДОВЖНИХ МОД ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Анотація. Об'єктом дослідження даної роботи є атмосферно-оптичні лінії зв'язку з організацією передачі даних на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод лазерного випромінювання. **Мета** даної роботи полягає у представленні результатів оцінки ефективності передачі даних у атмосферно-оптичній лінії зв'язку на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод лазерного випромінювання за різними показниками. Запропоновано атмосферно-оптичну лінію зв'язку, до основних функцій якої відносяться наступні: виділення несучих частот зі спектру одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод лазерного випромінювання за допомогою пристрою формування каналів, що дозволяє використовувати окремі поздовжні моди; перетворення електричних інформаційних сигналів до формату, придатного для модуляції з несучими частотами, з подальшою їх модуляцією за амплітудою, інтенсивністю, частотою, фазою або поляризацією; оптична обробка та передача групового комбінованого оптичного інформаційного сигналу через бездротову лінію зв'язку до приймача, де відбувається фокусування, перетворення в електричний інформаційний сигнал та подальша обробка для виділення даних і їх передача до споживачів. Отримані результати математичного моделювання дозволяють здійснити оцінювання можливостей передавача лазерного випромінювання за різними показниками та свідчать про те, що запропоновану атмосферно-оптичну лінію зв'язку з організацією передачі даних на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод лазерного випромінювання корисно використовувати.

Ключові слова: передача даних, атмосферно-оптична лінія зв'язку, канал зв'язку, одномодове багаточастотне лазерне випромінювання, синхронізація поздовжніх мод, несуча частота, електричний інформаційний сигнал.

Вступ

Постановка проблеми. Сучасні атмосферні оптичні лінії зв'язку (АОЛЗ, або Free Space Optics, FSO), дозволяють як відмовитися від кабелів (їх монтаж, будівництво мереж, обслуговування кабелів тощо), так і забезпечити у стислі терміни створення недорогих надійних відкритих ліній зв'язку високої якості між віддаленими об'єктами та вирішити проблему «останньої милі». Передача даних (інформації) за допомогою лазерного випромінювання (ЛВ) є одним з найперспективніших методів для АОЛЗ. Така АОЛЗ нечутлива до перешкод радіодіапазону, що дозволяє їх використовувати у місцях з великою насиченістю радіотехнічних систем [1–6]. Імпульс ЛВ під час проходження у атмосфері не зазнає дисперсійних спотворень фронтів, що характерно для волоконних оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ). Така передача імпульсу дає змогу передавати потік даних зі швидкостями до терабіт за секунду. До основних переваг такого способу передачі даних можливо віднести наступні: висока швидкість передачі даних, простота інсталяції, а також відсутність необхідності плати за використання частотного діапазону.

АОЛЗ забезпечує передачу даних до 10 Гбіт/с, що дає змогу: вирішувати проблему «останньої милі» за високої захищеності каналу зв'язку (КЗ); розвивати міські мережі передачі даних та голосу (Metropolitan Area Network, MAN); розвивати рішення WDM (хвильове мультиплексування) для мереж SONET/SDH.

WDM (хвильове мультиплексування) – дає змогу значно збільшити пропускну спроможність мереж SONET/SDH завдяки передаванню декількох сигналів на різних довжинах хвиль по одному оптичному волокну ВОЛЗ. Це досягається за рахунок поділу спектра оптичного волокна на окремі канали, кожен з яких займає свою довжину хвилі. Таким чином, замість однієї

«дороги» (довжини хвилі) у SONET/SDH, WDM надає безліч «доріг» (довжин хвиль), даючи змогу передавати більше даних одночасно.

АОЛЗ, що ґрунтуються на використанні одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ мають велику пропускну здатність, яка обумовлена високим значенням несучих частот, що забезпечує передачу даних (інформації) як великих об'ємів, так і з великою швидкістю [7].

При цьому, мала кутова розбіжність ЛВ забезпечує високі як просторову прихованість, так і енергетичну стійкість передачі даних по відкритому каналу зв'язку при малих габаритах приймально-передавальної апаратури.

Завдяки синхронізації поздовжніх мод можливо як досягти високих вихідних характеристик ЛВ, так і сформувати декілька каналів передачі даних (інформації) на несучих частотах.

Таким чином, оцінка ефективності передачі даних у АОЛЗ на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ за різними показниками є актуальним науковим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [1] здійснено постановку задачі структурного синтезу атмосферно-оптичної системи та досліджено методи визначення їх критеріїв ефективності. Проведено аналіз методів оцінювання впливу радіоактивного випромінювання на АОЛЗ. У [2] проведено аналіз шляху розвитку технології LTE. Досліджено технологію OFDM та визначено властивості, які дозволяють забезпечити вимоги для систем доступу на базі LTE. Встановлено, що в системах зв'язку, де особливо жорсткі вимоги до завадостійкості передачі інформації, найефективнішим є використання багатопозиційних сигналів з амплітудно-фазовою модуляцією. У [3] розкрито багаторівневу архітектуру та теорію побудови сучасних і перспективних

телекомунікаційних систем та мереж. Однак, розглянути публікації не враховують особливості спектру ЛВ з боку синхронізації поздовжніх мод та можливість передачі даних на несучих частотах.

Мета статті – провести оцінку ефективності передачі даних у АОЛЗ на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ за різними показниками, що є актуальним науковим завданням.

Основна частина

Сучасні АОЛЗ дозволяють створювати надійні канали зв'язку на відстанях від метрів до десятків кілометрів в умовах атмосфери. До основних переваг АОЛЗ можливо віднести такі:

1. АОЛЗ не використовують радіодіапазон та не створюють перешкод у радіочастотному спектрі.

Обладнання АОЛЗ не потрапляє під дію Закону, який регламентує роботу з радіозасобами, що працюють у діапазоні до 400 ГГц. Реальні частоти оптичних передавачів у тисячі разів вищі за встановлену межу. Оптичні передавачі не призводять до порушення роботи радіосистем та обладнання.

2. АОЛЗ не потребує дозволів на розгортання та відповідних регулювальних органів.

У містах (мегаполісах) доступні частоти настільки сильно «заселені», що дана перевага відіграє домінуючу роль. Час, необхідний на підготовку та отримання документів для експлуатації радіосистем, становить близько півроку, якщо взагалі вільний діапазон є у наявності. Підготовчий етап для розгортання АОЛЗ може складати декілька годин.

3. Простота встановлення елементів АОЛЗ та під'єднання до мережі.

Оптичне обладнання АОЛЗ потребує мінімальних потужностей для роботи, швидко під'єднується до портів мережевого (телекомунікаційного) обладнання та не потребує багато місця для розміщення.

4. Малий час на розгортання АОЛЗ.

Прямий наслідок попередньої переваги АОЛЗ. У деяких випадках необхідне швидке розгортання зв'язку. Інфрачервону (ІЧ) систему пара фахівців може встановити за 1-2 год для великих відстаней (понад 1 км) та за 15-20 хв – для коротких.

5. У АОЛЗ немає річної орендної плати.

Робота обладнання АОЛЗ не пов'язана з регулярними платежами за користування середовищем передачі даних на відміну від радіо систем.

6. У АОЛЗ швидке повернення інвестицій.

Швидке встановлення обладнання АОЛЗ дає змогу оператору отримувати дохід від експлуатації лінії зв'язку без затримок. У звичайному випадку, за час, витрачений на розгортання дротових комунікацій або радіо систем, оператор має тільки витрати.

7. АОЛЗ не чутливі до радіоперешкод.

Встановлення бездротових оптичних прийомо-передавачів АОЛЗ можливо у зонах з високими перешкодами від радіоблабднання (промислового) обладнання, де використання радіосистем проблематичне.

8. У АОЛЗ повна пропускна здатність КЗ.

Пропускна здатність каналу зв'язку АОЛЗ використовується повністю, без витрат на організацію

з'єднання та підтримання його у активному стані.

9. Прозорий механізм передачі даних у АОЛЗ.

Прозорість технології передачі даних призводить до того, що, насправді, ІЧ-системи є усього лише конверторами середовища передачі та еквівалентні звичайному оптичному кабелю, для якого немає особливої різниці у протоколах передачі даних тощо.

10. У АОЛЗ відсутня затримка у каналі зв'язку.

Відсутність складних перетворень сигналу призводить до того, що затримка у каналі передачі даних, що вноситься оптичною системою, незначна. Відсутнє обмеження на швидкість передачі даних, що є однією з ключових технічних переваг оптичних систем зв'язку, яка викликала бурхливе зростання інтересу до технології серед виробників і потенційних замовників.

11. АОЛЗ стійкі до температурних та кліматичних змін.

АОЛЗ працюють як у районах крайньої півночі, так і в умовах тропічної спеки.

12. У АОЛЗ висока закритість каналу зв'язку.

Жодна бездротова технологія передачі даних не може запропонувати таку конфіденційність зв'язку, як АОЛЗ. Перехопити сигнал можливо тільки встановивши сканери приймачі безпосередньо у ЛВ від передавачів. Перехоплення даних практично неможливо. Наявність ЛВ не можливо визначити за допомогою різних сканерів.

Раніше фахівці виділяли два основних недоліка у АОЛЗ – це малий час на напрацювання на відмову (показник Mean Time Between Failures, MTBF) випромінювального елемента (лазерного діода або світлодіода) та залежність відстані передачі сигналу від погодних умов. Перший недолік виробники лазерних діодів вирішили – діоди з потужністю до 100 мВт здатні забезпечити MTBF, що дорівнює 150 тис. годин (15 років роботи у штатному режимі). У АОЛЗ застосовуються схеми Adaptive Power Control (APC), що керують потужністю ЛВ залежно від атмосферних умов. Наприклад, у ясну погоду потужність ЛВ мінімальна. Такі схеми дають змогу продовжити термін життя лазерних пристроїв та підвищити їх надійність. Другий недолік, який пов'язаний із зниженням доступності каналу зв'язку при зменшенні метеорологічної дальності видимості (МДВ) до 100-200 м частково вирішується попаданням ЛВ у вікна прозорості атмосфери тощо.

Основний «винуватець» перебоїв у зв'язку АОЛЗ є туман. При МДВ менше 100 м загасання ЛВ у тумані досягає 170 дБ/км для 780 нм (ближній ІЧ спектр) та 320 дБ/км для 555 нм (зелений спектр). Сучасні АОЛЗ мають енергетичний запас 60 дБ. У дощову погоду АОЛЗ працюють краще, ніж радіорелейні лінії зв'язку (РРЛЗ), що використовують радіодіапазон 18-64 ГГц. «Сильна злива» (рівень опадів 75 мм/год) не заважає ЛВ передавати дані на відстані до 1.5 км та зі швидкістю до 1 Гбіт/с, тоді як у каналах зв'язку на основі РРЛЗ швидкість передачі даних може впасти до кількох мегабіт за секунду.

Таким чином, технологія, за якою розроблено АОЛЗ, заснована на передачі даних у оптичному діапазоні через атмосферу. Верхня межа радіоспектра, на яку необхідно отримувати дозвіл на його використання, – 400 ГГц. Частоти, використовувані у АОЛЗ,

на три порядки вищі. Тому, використання обладнання АОЛЗ не потребує жодних проектних, узгоджувальних, дозвільних заходів, зокрема й оплати використання радіочастотного спектра. Таке використання обладнання є одним із найважливіших чинників на користь застосування АОЛЗ та обладнання у телекомунікаційних системах.

Запропоновано метод передачі даних у АОЛЗ, сутність роботи якого полягає у наступному [4-7].

АОЛЗ основана на використанні ЛВ з синхронізацією поздовжніх мод та організується за з'єднанням типу «точка-точка» за парою ідентичних лазерних приймально-передавачів (ЛПП). ЛПП розташовані у межах прямої видимості відносно один одного. ЛПП містить: на передавальному боці: лазер з накачкою та синхронізацією поздовжніх мод, пристрій формування каналів (ПФК) передачі даних, модулюючий пристрій (змішувач, ЗМ) та оптичну систему (формуєчу оптику); на прийомному боці: оптичну систему (формуєчу оптику), фотодетектор (ФТД), ширококутовий підсилювач та резонансні підсилювачі, що налаштовані на несучі частоти, і формуючі канали передачі даних до споживачів.

До складу АОЛЗ входять ЛПП та пристрої, що відповідають за живлення, моніторинг, налаштування та підключення ЛПП до каналотворювального обладнання – приймально-передавального модуля (ППМ) тощо. В основі технології лежить передача даних модульованим ЛВ з синхронізацією поздовжніх мод через атмосферу. У якості передавача використано твердотілий (напівпровідниковий) лазер з одномодовим багаточастотним з синхронізацією поздовжніх мод спектром. ЛВ поступає у ПФК, що виділяє необхідні несучі частоти. На вхід ЛПП надходить електричний інформаційний сигнал, який кодується та модулюється з несучими частотами ЛВ. Формується груповий оптичний сигнал, який відповідає каналам передачі даних (одна несуча частота – один канал). Груповий сигнал фокусується оптичною системою передавача у вузьке ЛВ та передається через атмосферу до споживача. Використання ЛВ з синхронізацією поздовжніх мод у АОЛЗ вимагає накладення на несучу частоту електричного інформаційного сигналу, який містить дані. Модуляція ЛВ – це зміна одного або декількох параметрів випромінювання за заданим законом у просторі та/або у часі. Закон зміни модульованого параметра відповідає даним, що передаються (інформації). Введення даних у ЛВ можливе різними способами. Можливо модулювати сигналом даних (інформаційним) інтенсивність ЛВ, частоту, фазу та поляризацію. Найбільше застосування має амплітудна модуляція через простоту конструкції відповідних пристроїв. Таким чином, формується вихідний груповий комбінований інформаційний оптичний сигнал із заданими параметрами модуляції та вихідною потужністю.

На приймальній стороні оптична система ЛПП фокусує оптичний сигнал на ФТД (високочутливий фотодіод або лавинний діод), який перетворює ЛВ у електричний інформаційний сигнал. При цьому, чим ширша електрична смуга сигналу, тим більша швидкість передачі інформації. Прийнятий інформаційний

сигнал демодулюється та перетворюється на сигнали вихідного інтерфейсу, які надходять на ППМ.

При зовнішньому розміщенні ЛПП можуть встановлюватися на поверхні дахів будівель або стін. ЛПП монтується на спеціальній жорсткій опорі (металевій), що кріпиться до стіни будівлі. Опора забезпечує можливість регулювання кута нахилу та азимута ЛВ. Оскільки ЛВ передається між пунктами зв'язку у атмосфері, то його поширення сильно залежить від метеорологічних умов, від наявності диму, пилу та інших забруднень повітря. Крім того, у атмосфері спостерігаються турбулентні явища, які призводять до флуктуацій показника заломлення середовища, коливань ЛВ та спотворень прийнятого сигналу. Однак, незважаючи на зазначені проблеми, атмосферний лазерний зв'язок виявився цілком надійним на відстані від декількох кілометрів до кількох десятків кілометрів за дотриманням певних умов.

За умови використання одномодового багаточастотного з синхронізацією поздовжніх мод ЛВ та пристрою формування каналів передачі даних у АОЛЗ необхідно визначити дальність дії такої лінії зв'язку від передавача до приймача, який можливо розглядати як дифузно відбивний об'єкт.

Тоді, дальність дії можливо визначити як

$$R = \sqrt[4]{\frac{E_L \cdot S_{об} \cdot d_{np}^2 \cdot \rho_{об} \cdot \tau_{вип} \cdot \tau_{np} \cdot \tau_{nc}}{\pi \cdot \gamma^2 \cdot q \cdot E_{пор}}} \quad (1)$$

де E_L – енергія ЛВ лазера-передавача; $S_{об}$ – площа розсіювання приймача, як дифузно відбивного об'єкту; d_{np} – діаметр об'єктива приймальної оптичної системи; $\rho_{об}$ – коефіцієнт відбиття поверхні приймача; $\tau_{вип}$, τ_{np} – коефіцієнти пропускання випромінюючого та прийомного оптичних трактів лінії передачі даних відповідно; τ_{nc} – коефіцієнт пропускання повітряного середовища у зоні охорони; γ – плоский кут розбіжності ЛВ; q – відношення сигнал/шум; $E_{пор}$ – порогова енергія прийнятого інформаційного сигналу, що реєструється фотодетектором (ФТД).

За умови, коли діаметр ЛВ дорівнює (менше) площі ФТД приймача (1), то дальність дії лінії зв'язку можливо визначити за такою формулою:

$$R = \sqrt{\frac{E_L \cdot d_{np}^2 \cdot \rho_{об} \cdot \tau_{вип} \cdot \tau_{np} \cdot \tau_{nc}}{4 \cdot q \cdot E_{пор}}} \quad (2)$$

За результатами математичного моделювання (1) та (2) отримано відповідні графіки залежностей, що наведено на рис. 1–3. При цьому, припускається, що енергія ЛВ рівномірно розподілена усередині лінії передачі даних та проекція приймача на площину поперечного перерізу має форму кола. Також, необхідно враховувати той факт, що сукупний вплив взаємодії ЛВ з повітряним середовищем при передачі даних по АОЛЗ, яке одночасно є поглинаючим, розсіюючим та випадково неоднорідним середовищем.

Коефіцієнт пропускання повітряного середовища τ_{nc} є функцією дальності R до приймача, який можливо визначити за такою формулою:

$$\tau_{nc} = \exp(-2\varepsilon \cdot R), \quad (3)$$

де ε – коефіцієнт ослаблення ЛВ у атмосфері, який можливо визначити за емпіричним виразом:

$$\varepsilon = \frac{3,91}{S_M} \cdot \left(\frac{0,55}{\lambda} \right)^{0,585 \sqrt{S_M}}, \quad (4)$$

де λ – довжина хвилі зондувального ЛВ; S_M – метеорологічна дальність бачення від передавача до приймача.

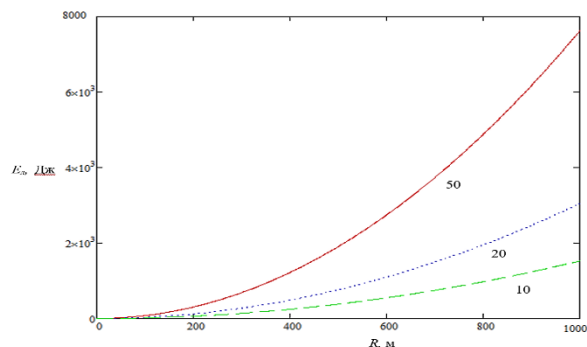


Рис. 1. Графік залежності необхідної енергії ЛВ $E_{\text{л}}$, що зондує, від дальності R до приймача при різних значеннях параметру сигнал/шум q : 10, 20, 50 для значення діаметра об'єкта приймальної оптичної системи $d_{\text{пр}} = 0,2$ м

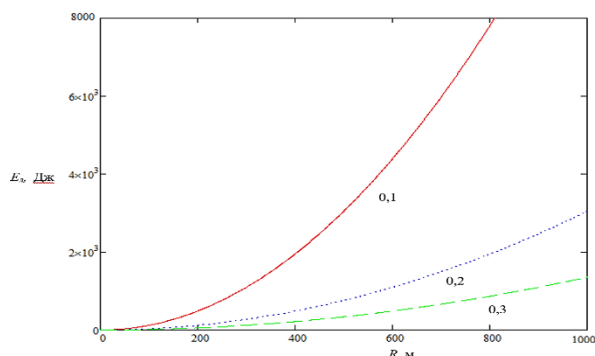


Рис. 2. Графік залежності необхідної енергії ЛВ $E_{\text{л}}$, що зондує, від дальності R до приймача при різних значеннях діаметра об'єкта приймальної оптичної системи $d_{\text{пр}}$: 0,1; 0,2; 0,3 при значенні параметру сигнал/шум $q = 20$ та об'єкта приймальної оптичної системи $d_{\text{пр}} = 0,2$ м

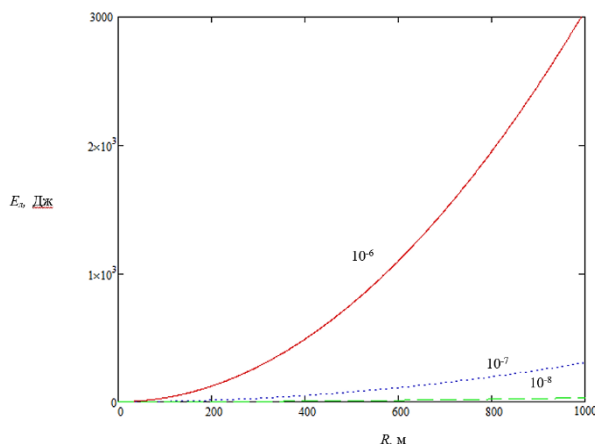


Рис. 3. Графік залежності необхідної енергії ЛВ $E_{\text{л}}$, що зондує, від дальності R до приймача при різних значеннях порогової енергії, що реєструється ФТД: 10^{-8} , 10^{-7} , 10^{-6} Дж при значенні параметру сигнал/шум $q = 20$ та об'єкта приймальної оптичної системи $d_{\text{пр}} = 0,2$ м

Таким чином, у загальному вигляді дальність R до приймача може бути отримана лише методом чисельного рішення локаційного рівняння. Значення S_M для різних умов застосування передавача з пристроєм формування каналів передачі даних наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Значення метеорологічної дальності бачення для різних умов

Погодні умови	Значення S_M , км
Сильний туман, густий сніг	0,05 – 0,5
Слабкий туман, сильна димка, помірний сніг	0,5 – 2
Слабкий сніг, помірний дощ, слабка димка	2 – 10
Слабкий дощ	10 – 20

На основі виразу (4) розраховані залежності коефіцієнту ослаблення ЛВ для різних погодних умов та довжини хвилі ЛВ, рис. 4.

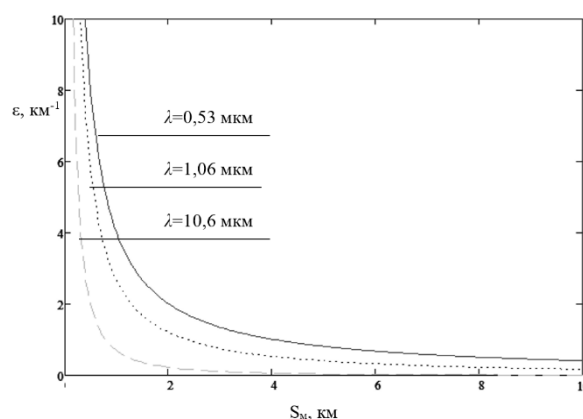


Рис. 4. Графік залежності ослаблення ЛВ у повітряному просторі від метеорологічної дальності бачення

За результатами отриманих залежностей можливо зробити наступні основні висновки: погодні умови можуть вплинути на ослаблення ЛВ у атмосфері; в умовах туману, снігу та димки значення коефіцієнту ослаблення ЛВ значні та складають $\varepsilon > 2$ км; в умовах слабого дощу ослаблення ЛВ незначне та значення коефіцієнту його ослаблення відповідає $\varepsilon \leq 0,4$ км⁻¹; із зростанням довжини хвилі значення коефіцієнту ε зменшуються для однакових погодних умов, на підставі чого можуть формуватися рекомендації щодо передавачів ЛВ, тобто – доцільно використання лазерів-передавачів із максимально можливою довжиною хвилі.

В свою чергу на основі (3) можливо здійснити оцінювання необхідної енергії ЛВ, що зондує, від дальності до приймача для різних погодних умов (туман, сніг тощо), яким відповідають значення τ_{nc} : 0,7; 0,5; 0,3 (для довжини хвилі ЛВ, яка складає $\lambda = 0,53$ мкм), рис. 5 ($q = 20$, $d_{\text{пр}} = 0,2$ м).

Висновки

До основних переваг використання АОЛЗ можливо віднести наступне:

- швидка організація каналу зв'язку;
- відсутність необхідності отримання дозволів на частоти, які використовуються;

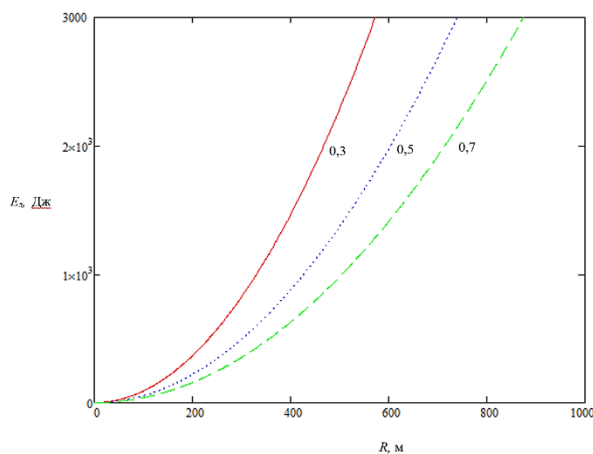


Рис. 5. Графік залежності енергії ЛВ E_L , що зондує, від дальності до приймача для різних погодних умов (туман, сніг тощо), яким відповідають значення τ_{nc} : 0,7; 0,5; 0,3 (для довжини хвилі ЛВ, яка складає $\lambda = 0,53$ мкм)

відсутність впливів сусідніх каналів та електромагнітного шуму;

- відсутність орендної плати за канал;
- високий ступінь безпеки.

Таким чином, отримані результати математичного моделювання дозволяють здійснити оцінювання можливостей передавача ЛВ за різними показниками. При цьому, враховано, наступне:

- втрати ЛВ у оптичній системі передавача становлять 10 %, тобто – $\tau_{вип}, \tau_{пр} = 0,9$;
- коефіцієнт відбиття приймача – $\rho_{об} = 0,9$;
- діаметр об'єктива приймача при існуючих конструкційних обмеженнях – $d_{пр} = 0,2$ м;
- порогова енергія прийнятого інформаційного сигналу, що реєструється ФТД приймачем, $E_{пор} = 10^{-6}$ Дж (відповідає серійно виготовленим ФТД);
- значення відношення сигнал/шум $q = 20$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Блаженний Н.В. Постановка задачі структурного синтезу атмосферно-оптичної системи. / Кирпач Л.А., Блаженний Н.В., Голубенко О.І. / Науково-практичний журнал «Зв'язок». К.: ДУТ, 2021. № 3 (2021). С. 22 – 26. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2021.032226>.
2. Толубко В.Б. Підвищення показників якості системи управління послугами мережами майбутнього / В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, Л. П. Крючкова, А. Ю. Ткачов // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. - 2018. - № 3. - С. 5-11. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nzundiz_2018_3_3.
3. Малик Б. О., Токарева О. В., Малик-Заморій С. Б. Підвищення працездатності оптоволоконних структур в умовах високих рівнів потужності іонізуючого випромінювання. Вопросы атомной науки и техники. 2018. № 2. С. 13-18. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2018_2/article_2018_2_13r.pdf
4. Сайко В.Г., Казіміренко В.Я., Літвінов Ю.М. Мережі бездротового широкопasmового доступу. - К.: ДУТ, 2015 – 196 с.
5. Mehmet Toy. Cable Networks, Services, and Management. - John Wiley & Sons, 2015. - 376 с. https://duikt.edu.ua/uploads/l_881_80314158.pdf
6. Розорінов Г. М Соловійов Д.О., Яковенко Л. В. Мережі передавання даних: Напрямні системи оптичного зв'язку. Навчальний посібник. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. - 128 с.
7. Коломійцев О.В. Метод передачі даних у атмосферно-оптичній лінії зв'язку для технології остання миля / О.В. Коломійцев, В.Ф. Третяк, А.М. Катунін, О.В. Філіппенков, В.В. Посохов, О.В. Любченко // Grail of Science. - 2025. - Iss. 51. - С. 606-616. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.18.04.2025.081>.

Received (Надійшла) 21.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.08.2023

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Любченко Олексій Вікторович – аспірант, кафедра комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Oleksii Liubchenko – PhD student, Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Oleksii_Liubchenko@khipt.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-3077-0316>.

Evaluation of data transmission efficiency in an atmospheric-optical communication line based on single-mode multifrequency laser radiation with synchronization of longitudinal modes

Oleksii Liubchenko

Abstract. The object of study of this paper is atmospheric-optical communication lines with the organization of data transmission based on single-mode multifrequency synchronized longitudinal laser radiation modes. The aim of this work is to present the results of evaluating the efficiency of data transmission in an atmospheric-optical communication line based on single-mode multifrequency synchronized longitudinal laser radiation modes by various indicators. An atmospheric-optical communication line is proposed, the main elements of which include separation of carrier frequencies from the spectrum of single-mode multi-frequency laser radiation with synchronization of longitudinal modes by means of a channel shaping device that allows the use of separate longitudinal modes; conversion of electrical information signals into a form suitable for modulation with carrier frequencies, followed by their modulation by amplitude, intensity, frequency, phase, or polarization; optical processing and transmission of the group combined optical signal through the communication line to the receiver, where it is focused, converted into an electrical information signal and further processed to extract data and transmitted to consumers. The obtained results of mathematical modeling make it possible to evaluate the capabilities of the laser radiation transmitter by various indicators and indicate that the proposed atmospheric-optical communication line with the organization of data transmission based on single-mode multifrequency with pulse synchronization.

Keywords: data transmission, atmospheric-optical communication line, communication channel, single-mode multifrequency laser radiation, synchronization of longitudinal modes, carrier frequency, electrical information signal.