УДК 621.391.63

ПЕРЕДАЧА ДАНИХ У ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІЙ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ ОПТИЧНОЇ ЧАСТОТНОЇ ГРЕБІНКИ ОДНОГО ЛАЗЕРА

Коломійцев О.В., д.т.н., проф.[1]; Бєлоус Н.М., м.н.с.[2];
Панченко В.І. к.т.н.[3]; Пустоваров Д.В.[4]
[1,3,4]Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;
[2]Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба
[1,2,3,4]Україна, Харків
[1]ORCID 0000-0001-8228-8404; [2]ORCID 0009-0002-5596-4889;
[3]ORCID 0000-0003-3364-3398

Анотація. *Розглянуто особливості створення волоконно-оптичних ліній зв'язку на основі багаточастотного лазерного випромінювання із синхронізацією поздовжніх мод. Запропоновано метод передачі даних з одним лазером-передавачем, що збільшує пропускну здатність лінії без прокладання додаткового волокна. Проаналізовано методи модуляції та розділення несучих частот.*
Ключові слова: *волоконно-оптична лінія зв'язку; передача даних; багаточастотне лазерне випромінювання; синхронізація поздовжніх мод; оптична частотна гребінка.*

Вступ. Сучасні волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ) на основі лазерного випромінювання (ЛВ) забезпечують найвищу швидкість і надійність передачі даних (ПД) та становлять основу глобального інтернету, центрів обробки даних (ЦОД) і хмарних технологій. Водночас лавиноподібне зростання обсягів трафіку (відео 4K/8K, хмарні обчислення, штучний інтелект, Інтернет речей, мережі 5G/6G) вичерпує пропускну здатність відомих одночастотних ВОЛЗ.

Основним способом нарощування ємності магістральних ліній нині є спектральне ущільнення каналів (Wavelength Division Multiplexing, WDM; Dense WDM, DWDM), за якого в одне волокно вводять ЛВ багатьох лазерів із різними довжинами хвиль. Недоліком такого підходу є потреба в масиві з десятків окремих лазерів, кожен з яких налаштований на власну несучу частоту та потребує окремої системи стабілізації й охолодження. Такі лазери мають незалежний фазовий шум, що унеможливлює спільну когерентну обробку каналів, а між сусідніми каналами необхідно залишати захисні частотні інтервали. Альтернативою є застосування одного лазера-передавача із синхронізацією поздовжніх мод, який формує набір рівновіддалених несучих частот – оптичну частотну гребінку (Optical Frequency Comb, OFC). Методи ПД на основі ЛВ у кабельних ВОЛЗ розглянуто в роботах [1–4], проте питання створення ВОЛЗ саме на основі багаточастотного ЛВ потребують подальшого опрацювання.

Метою роботи є розкриття особливостей створення ВОЛЗ ПД на основі багаточастотного ЛВ із синхронізацією поздовжніх мод, обґрунтування методу передачі даних із єдиним лазером-передавачем та аналіз методів модуляції й розділення несучих частот.

Основна частина. Властивості оптичного волокна та ЛВ забезпечують ВОЛЗ швидкості порядку терабіт за секунду, передавання на десятки й сотні кілометрів без регенерації сигналу, стійкість до електромагнітних завад, високий рівень безпеки даних (будь-яке фізичне втручання змінює затухання ЛВ і фіксується обладнанням) та мінімальну затримку, оскільки швидкість поширення світла у волокні становить близько 200 000 км/с. Системи DWDM дозволяють передавати сотні світлових хвиль в одному волокні (до сотень терабіт за

секунду, Тбіт/с). У таких системах застосовують також ербієві оптичні підсилювачі (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA).

У ЦОД на багатомодових волокнах масштабування також досягається збільшенням кількості лазерів: один VCSEL (850 нм) у трансиверах 10G/25G; чотири лазери по чотирьох волокнах у паралельній оптиці (стандарт 100G-SR4, 4×25 Гбіт/с); кілька лазерів з довжинами хвиль 850, 880, 910 і 940 нм в одному волокні в системах Shortwavelength Division Multiplexing (SWDM). Отже, у відомих рішеннях ємність лінії зростає завдяки збільшенню кількості незалежних джерел, а не завдяки багаточастотним властивостям одного лазера. Ущільнення вже прокладених волокон дешевше за будівництво нових ліній і дозволяє нарощувати місткість «на льоту».

Формування OFC у лазері ґрунтується на синхронізації поздовжніх мод, яку реалізують трьома основними методами. Активна синхронізація передбачає введення в резонатор електрооптичного або акустооптичного модулятора, що змінює втрати чи фазу з частотою, рівною вільному спектральному діапазону (Free Spectral Range, FSR). Вона забезпечує стабільну тактову частоту (FSR 1–10 ГГц), але потребує складного налаштування й дає вузький спектр (0,1–5 нм). Пасивна синхронізація використовує нелінійні елементи – напівпровідникове дзеркало з насичуваним поглинанням (SESAM) або нелінійне обертання площини поляризації. Вона забезпечує ширший спектр (понад 10 нм) та імпульси тривалістю від десятків фемтосекунд до пікосекунди, проте тактова частота менш стабільна (відносна нестабільність 10^{-13}–10^{-12}). Гібридна синхронізація поєднує обидва підходи. Для застосування у ВОЛЗ найперспективнішими є інтегровані лазери із синхронізацією мод на основі напівпровідникових гетероструктур (Mode-Locked Laser Diode, MLLD), у яких підсилювач, поглинач і резонатор розміщено в єдиному мікрочипі розміром кілька міліметрів. Вони мають FSR від 10 до 500 ГГц, що відповідає стандартним сіткам DWDM, спектральну ширину 2–15 нм, найнижчу складність реалізації.

Оптична частотна гребінка є набором спектральних ліній, рівномірно розподілених у частотній області, частоти яких описуються виразом

$$\nu_n = \nu_0 + n \cdot f_{\text{rep}}, \quad n = 0, \pm1, \pm2, \ldots \tag{1}$$

де ν_0 – частота несучої; f_{rep} – частота повторення (відповідає FSR у MLLD); n – номер лінії. Два параметри, ν_0 і f_{rep}, повністю описують гребінку та можуть контролюватися з субгерцовою точністю, що дозволяє використовувати OFC як надстабільне джерело множини когерентних несучих для WDM-систем. На відміну від WDM із незалежними DFB-лазерами, у OFC усі несучі походять від одного джерела й взаємно когерентні, тому флуктуації ν_0 однаково впливають на всі лінії та можуть бути скомпенсовані диференційною обробкою. Першим використанням OFC для WDM-зв'язку є робота дослідників Технологічного інституту Карлсруе (2014), в якій з єдиної мікрорезонаторної гребінки отримано 179 каналів із сумарною пропускною здатністю 1,44 Тбіт/с; у поєднанні з просторовим мультиплексуванням можливе досягнення понад 50 Тбіт/с на одне волокно. Мікрорезонаторні (керрівські) гребінки потребують накачування потужним лазером (понад 100 мВт), тоді як MLLD – компактні джерела з вбудованим підсилювальним середовищем, простіші в інтеграції у ВОЛЗ. Саме MLLD обрано апаратною основою запропонованого методу.

Суть запропонованого методу [3, 5, 6] полягає у відмові від багатьох окремих лазерів на користь одного лазера-передавача, який завдяки синхронізації поздовжніх мод генерує стабільну гребінку частот. Метод реалізується в чотири етапи: 1) генерація багаточастотного спектра – між поздовжніми модами резонатора встановлюється жорсткий фазовий зв'язок, і

лазер випромінює структурований набір рівновіддалених мод; 2) формування та селекція несучих — пристроєм формування каналів ПД зі спектра виділяється N окремих мод (наприклад, $N \geq 10$), що виконують роль незалежних несучих; 3) використання частот міжмодових биттів – дані можна кодувати й на комбінаціях мод, що створює додатковий частотний ресурс у тій самій лінії; 4) модуляція – на кожну несучу або комбінацію частот накладається електричний сигнал із застосуванням амплітудної, частотної, фазової, поляризаційної модуляції чи їх комбінацій.

Порівняно з класичним WDM метод забезпечує стабільну відстань між каналами, оскільки всі несучі народжуються в одному резонаторі й не «пливуть» зі зміною температури, що дозволяє щільніше розміщувати канали (Ultra-DWDM, Flex-grid); спрощення й здешевлення архітектури (один лазер замість 10–40 з окремою стабілізацією); зменшення габаритів та енергоспоживання; можливість отримання пікосекундних імпульсів для часового мультиплексування; масштабованість – нарощування каналів «активацією» ліній гребінки без монтажу нового обладнання.

Оскільки всі несучі генеруються одним лазером і жорстко синхронізовані, можна застосовувати як відомі методи модуляції, так і сучасні технології розділення частот; кожна лінія спектра модулюється окремим потоком даних. Когерентне детектування з багатопозиційною модуляцією – квадратурною фазовою (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) та квадратурною амплітудною (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) – дозволяє одночасно використовувати амплітуду й фазу несучої. QPSK кодує 2 біти на символ і є стійкою до шумів, а формати 16-QAM, 64-QAM та 256-QAM передають 4, 6 і 8 бітів на символ та забезпечують максимальну спектральну ефективність, проте потребують високого співвідношення сигнал/шум. Оптичне ортогональне частотне мультиплексування (Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing, O-OFDM) ділить потік на ортогональні піднесучі, які розміщуються впритул з перекриттям без захисних інтервалів; розрізняють когерентний CO-OFDM (наддалекі магістралі) та DD-O-OFDM з прямим детектуванням (метро-мережі, ЦОД). Найпростішим і найекономічнішим є метод модуляції інтенсивності з прямим детектуванням (Intensity Modulation / Direct Detection, IM-DD) із форматами NRZ/OOK (Non-Return-to-Zero / On-Off Keying; до 10–25 Гбіт/с) та PAM4 (Pulse Amplitude Modulation 4-Level; 2 біти на символ).

На приймальному кінці багаточастотний потік розділяється на окремі канали ПД. Для цього застосовують оптичні демультиплексори на масивах хвилеводів (Arrayed Waveguide Grating, AWG), зокрема атермальні, які працюють без підігріву та споживання електроенергії й придатні для польових умов. Коли на приймальній стороні використано аналогічну гребінку як масив локальних гетеродинів, відносні нестабільності частот передавача й приймача взаємно компенсуються, а потрібну частоту виділяє цифровий сигнальний процесор (Digital Signal Processor, DSP) після фотодетектора; такий когерентний підхід відкриває шлях до суперканалів із сумарною швидкістю в десятки й сотні Тбіт/с по одному волокну. Селективними фільтрами слугують також інтерферометри Фабрі–Перо (ІФП; тонкоплівкові фільтри, Thin-Film Filters, TFF) та волоконні решітки Брегга (Fiber Bragg Gratings, FBG) – однорідні, чірповані, аподизовані й довгоперіодні.

Одночасне введення у волокно десятків жорстко зв’язаних за фазою несучих із високою сумарною потужністю посилює нелінійні ефекти третього порядку. Найважливішим для гребінки з рівномірним кроком є чотирихвильове змішування (Four-Wave Mixing, FWM), що породжує «фантомні» частоти, які накладаються на корисні канали; його послаблюють застосуванням волокон із ненульовою зміщеною дисперсією (Non-Zero Dispersion-Shifted

Fiber, NZDSF), де хроматична дисперсія руйнує умови фазового синхронізму. Самофазову (SPM) та крос-фазову (XPM) модуляції зменшують обмеженням потужності на канал і цифровою компенсацією нелінійності на приймачі. Куполоподібний спектр гребінки вирівнюють оптичним еквалайзером перед модуляцією.

Висновки. Розкрито особливості створення ВОЛЗ ПД на основі багаточастотного ЛВ. Показано, що використання одного лазера-передавача із синхронізацією поздовжніх мод замість масиву окремих лазерів дозволяє збільшити пропускну здатність лінії без прокладання додаткового волокна та спростити архітектуру передавача й систему температурної стабілізації. Проаналізовано методи синхронізації поздовжніх мод; апаратною основою обрано інтегровані лазери MLLD. Запропоновано метод ПД, у якому кожна несуча або комбінація мод (частоти міжмодових биттів) модулюється окремим потоком даних. Розглянуто методи модуляції (QPSK/QAM, O-OFDM, IM-DD), розділення несучих (AWG, когерентне приймання, ІФП, FBG) та подолання нелінійних ефектів.

Використання інструментів ШІ. Під час підготовки тез інструменти ШІ не використовувались. Відповідальність за зміст тез несуть автори.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Коломійцев, О. В., Любченко, О. В., Третяк, В. Ф., Філіппенков, О. В., & Катунін, А. М. (2025). Метод передачі даних у кабельній волоконно-оптичній лінії зв’язку для технології FTTx на основі лазерного випромінювання. У *Technical, agricultural and mathematical sciences: scientific trends, problems and ways of their development* (с. 129–162). International Science Group. https://doi.org/10.46299/ISG.2025.MONO.TECH.2.4.1

[2] Коломійцев, О. В., & Любченко, О. В. (2025). Удосконалений метод передачі даних у кабельній волоконно-оптичній лінії зв’язку для технології FTTx. *Системи озброєння і військова техніка*, (82), 69–77. https://doi.org/10.30748/soivt.2025.82.20

[3] Коломійцев, О. В., Комаров, В. О., Пашнєв, А. А., Пустоваров, В. В., Запара, Д. О., Бєлоус, М. В., … Любченко, О. В. (2024). Метод передачі даних у технології остання миля на основі одномодового багаточастотного з синхронізацією подовжніх мод лазерного випромінювання. *Scientific Collection «InterConf+»*, 46(205), 517–530. https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.06.2024.049

[4] Коломійцев, О. В., & Любченко, О. В. (2025). Спосіб для передачі великих об’ємів даних по каналах мережевого зв’язку на основі лазерного випромінювання. *Грааль науки*, (51), 606–616. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.18.04.2025.081

[5] Коломійцев, О. В., Любченко, О. В., Любченко, Н. Ю., & Подорожняк, А. О. (2026). *Пристрій формування каналів передачі даних з використанням комбінацій поздовжніх мод* (Патент України на корисну модель № 162672). https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1915409/

[6] Коломійцев, О. В., Любченко, О. В., Любченко, Н. Ю., & Подорожняк, А. О. (2026). *Пристрій формування каналів передачі даних* (Патент України на корисну модель № 163016). https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1922321/

Kolomiitsev O.V., Bielous N.M., Panchenko V.I., Pustovarov D.V.

Data transmission in a fiber-optic communication line based on an optical frequency comb of a single laser

Abstract. *The features of designing fiber-optic communication lines (FOCLs) based on multi-frequency laser radiation with longitudinal mode locking are considered. A data transmission method with a single transmitter laser is proposed; it increases the bandwidth of the line without laying additional optical fiber. Modulation and carrier separation methods are analyzed.*

Keywords: *fiber-optic communication line; data transmission; multi-frequency laser radiation; longitudinal mode locking; optical frequency comb.*