

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-12>

УДК 621.391

ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ Микола

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-6586-2563>

e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

БОЛДИРЕВА Ольга

Вінницький національний технічний університет

e-mail: rtt13bpoludenko@gmail.com

КЛИМЧУК Богдан

Вінницький національний технічний університет

e-mail: turtleparachutist@gmail.com

ГОВОРУН Володимир

Вінницький національний технічний університет

e-mail: hovorun.volodymyr@gmail.com

ОПТИМАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ДОСТУПУ

Здійснено дослідження технологій побудови оптичних транспортних систем та архітектури мереж доступу. Розглянуто домінуючі оптичні транспортні технології для середовища доступу, зокрема телекомунікаційні цифрові тракти доступу на основі модуляції інтенсивності та прямого детектування (IM-DD). Визначені характеристики та обмеження розглянутих телекомунікаційних технологій важливі для розуміння рушійних сил для впровадження когерентної оптики в мережі доступу як довгострокової технологічної стратегії.

В статті розглянуто схеми та принцип роботи цифрових систем оптичного зв'язку IM-DD з різними форматами модуляції високого порядку. Також досліджено принципи генерації, детектування та відновлення сигналів PAM-4, CAP і DMT. Розглянуто цифрову обробку сигналів (DSP), яка відіграє значну роль у сучасних системах доступу.

Ключові слова: цифрове оброблення сигналів, аналого-цифровий перетворювач, технологія когерентної оптики, волоконно-оптична телекомунікаційна система, цифро-аналоговий перетворювач.

VASYLKIVSKYI Mikola, BOLDYREVA Olha,

KLYMCHUK Bohdan, HOVORUN Volodymyr

Vinnitsia National Technical University

OPTIMAL TECHNOLOGIES FOR BUILDING FIBER-OPTIC ACCESS SYSTEMS

A study of technologies for the construction of optical transport networks and the architecture of access networks was carried out. The dominant optical transport technologies for the access environment are considered, in particular telecommunication digital access paths based on intensity modulation and direct detection (IM-DD). The identified characteristics and limitations of the considered telecommunication technologies are important for understanding the driving forces for the implementation of coherent optics in the access network as a long-term technological strategy.

The article discusses the schemes and principle of operation of IM-DD digital optical communication systems with various high-order modulation formats. The principles of generation, detection and recovery of PAM-4, CAP and DMT signals are also investigated. Digital signal processing (DSP), which plays a significant role in modern access systems, is considered.

The study presents digital optical transmission paths using IM-DD technology, including the direction of improvement of access systems using different high-order modulation formats and DSP means. A study of the principles of generation, detection and recovery of PAM-4, CAP and DMT signals for high-speed telecommunication access systems was carried out. In a high-speed IM-DD system, the DSP process becomes more and more important because the high-order modulation formats involved suffer from linear and non-linear channel distortions. Analysis and comparison of the complexity, performance and cost of optimal modulation formats was carried out. It has been determined that PAM signals exhibit lower complexity, simple implementation, and low power consumption when using DSP tools. Therefore, PAM-4 technology is widely used and standardized in various optical telecommunication systems. It is also determined that the transmission of information streams of 200G, 400G and more per channel becomes a rather difficult task for IM-DD systems, even with the use of the proposed high-order modulation formats. Thus, coherent optics technology will play a significant role in future high-speed optical access networks.

Keywords: digital signal processing, analog-to-digital converter, coherent optics technology, fiber-optic telecommunication system, digital-to-analog converter.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

З початку впровадження інтернет технологій волоконно-оптичні лінії передавання даних вже відповідали вимогам до пропускної здатності системи та швидкості передачі даних. Зокрема, використання оптичних волокон з низькими втратами та сучасних оптичних передавачів і приймачів підвищило практичність та зручність розгортання телекомунікаційної мережі великої пропускної здатності [1].

В магістральних лінійних трактах сучасних телекомунікаційних мереж переважно використовують технологію когерентної оптики, яка останнім часом впроваджується в метро-мережі. Враховуючи

трансформацію технологій передавання інформаційних даних в телекомунікаційних мережах, необхідно дослідити особливості впровадження технології когерентної оптики на наступному рівні мережевого середовища оптичного доступу. При цьому, основними проблемами є процес зміни проектних рішень та оптимізація продуктивності мережі із використанням зменшених довжин лінійних трактів «точка-точка» та «точка-багатоточок» (P2MP) систем доступу, які за рахунок підвищеного енергетичного потенціалу характеризуються підвищеною гнучкістю топології та спрощеними вимогами до характеристик продуктивності станційних пристроїв і систем [2].

Завдяки тісному партнерству постачальників інформаційних послуг (телекомунікаційних провайдерів) із виробниками телекомунікаційного обладнання сформовано цінну інформацію про еволюцію мережевих архітектур, широкі знання про типи послуг, доступність ресурсів для сценаріїв розгортання та попит на пропускну здатність каналів доступу. Багаторічний послужний список авторів також ставить їх в авангард розробки передових оптичних і широкосмугових технологій доступу та мережевих архітектур [3-5].

Напрямок досліджень є дуже своєчасним, оскільки отримані результати забезпечать полегшений майбутній перехід провайдерів оптичного транспортування інформаційних даних до використання високопродуктивного телекомунікаційного обладнання на основі когерентної оптики. В результаті, масштаб економічного впливу в мережах доступу буде набагато більшим ніж у оптичних магістральних транспортних мережах та метро-мережах.

Ключовою вимогою для розробників телекомунікаційної інфраструктури у мережах доступу є мінімізація витрат на впровадження, яка не зустрічається в магістральних мережах, метро-мережах та навіть в центрах обробки даних. Тому, доцільно використовувати наскрізний підхід до економічного аналізу процесу проектування сучасної телекомунікаційної мережі доступу, який дає розуміння загальної вартості володіння такою перспективною мережевою технологією.

Оскільки, розгортання когерентної оптики в оптичних транспортних технологіях для транспортних магістралей, метро та мереж доступу зумовило впровадження технології щільного мультиплексування за довжиною хвилі (DWDM) в мультисервісних телекомунікаційних мережах, тому важливо проаналізувати та дослідити роботу мережі на основі фундаментальної вимоги щодо надання всіх видів інформаційних послуг. Запропонована мультисервісна телекомунікаційна мережа в ідеалі відповідатиме вимогам до продуктивності для підтримки всіх високошвидкісних, із малою затримкою та високонадійних послуг за низькою ціною. Розвиток мобільних мереж передачі даних у напрямку технології 5G вимагатиме дуже високої пропускну здатності та щільної оптичної розподільчої мережі для забезпечення широкого розмаїття варіантів використання. Технології оптичного доступу зможуть забезпечити перспективну платформу для об'єднання конвергентних оптичних і бездротових мереж доступу [6].

Впровадження технології Coherent PON забезпечить значне збільшення охоплення, ємності та коефіцієнта розподілу в когерентній пасивній оптичній мережі доступу (CPON). Такі мережі доступу мають бути масштабованими із зростанням можливостей, передбачаючи експоненційне зростання пропускну здатності каналів доступу. Запровадження когерентної оптики в середовищі доступу також може вирішити проблеми з пропускну здатністю, що виникають через обмежений термін служби застарілих технологій.

Дослідження мережі доступу дає цінну інформацію про вирішення майбутніх проблем пропускну здатності мережі за допомогою когерентної оптики, а також запровадження інших передових технологій і передових мережевих архітектур. Сучасна когерентна оптична технологія зосереджена головним чином на двох напрямках розвитку: програмовані когерентні приймачі високого класу, що здатні обробляти інформаційні потоки зі швидкістю передачі даних 100–800G на одну довжину хвилі і зниження енергоспоживання для задоволення вимог до розміру та собівартості доступу [7].

Технологія програмованого когерентного приймання високого класу підвищує спектральну ефективність і смугу сигналу, що дозволяє максимізувати пропускну здатність однієї довжини хвилі. При цьому, використовуються формати модуляції підвищеної складності та підвищена енергоефективність передачі з прямим виправленням помилок. За рахунок зниження вимог до енергетичного потенціалу тракту передавання, собівартості когерентної технології для телекомунікаційного обладнання, забезпечуються високі вимоги до пропускну здатності когерентних оптичних каналів довжиною від 10 до 120 км, які використовуються для багатьох прикладних сценаріїв, таких як з'єднання «маршрутизатор-маршрутизатор» із доступом до метро телекомунікаційних мереж, з'єднання центрів обробки даних «точка-точка» (P2P), мобільні та обладнання агрегації ліній передавання [8].

Постійний розвиток мережі доступу зумовлює зміну їх функціональних характеристик, архітектури та типів інформаційних послуг для користувачів. Зокрема, мережі доступу до телефонії складаються не лише із волоконно-оптичного тракту (ВОЛТ) на базі технологій FTТх та xPON, але й великої кількості типів мультиплексорів доступу до віддаленої цифрової абонентської лінії (DSLAM), обладнання для високошвидкісної цифрової абонентської лінії (VDSL) і телекомунікаційного обладнання із використанням технології G.fast значної ємності. Впровадження технологій 5G в сучасних мобільних мережах зумовлюють підвищення швидкості та використання глибших і щільніших волоконно-оптичних мереж із використанням

архітектури розподіленого доступу, яка наближає оптичні технології до абонентів. Сучасним телекомунікаційним мережам характерний перехід до підвищеної пропускної здатності для абонентського доступу за рахунок використання оптичного абонентського телекомунікаційного обладнання і надання всіх типів інформаційних послуг. При цьому, технологія когерентної оптики є дуже придатною для забезпечення довготривалого розвитку оптичних мереж доступу [9].

Технологія когерентного приймання забезпечує чудову чутливість приймача в мережах доступу, що забезпечує розширений бюджет потужності у ВОЛТ. Висока спектральна ефективність технології когерентної оптики дозволяє максимально продуктивно використовувати існуючу волоконно-оптичну телекомунікаційну інфраструктуру та забезпечувати перспективні оновлення телекомунікаційної мережі доступу. Зокрема, при передачі інформаційних потоків на великі відстані використання оптимізованих дискретних оптичних компонентів і найкращих у своєму класі алгоритмів обробки цифрових сигналів завжди було критично важливим аспектом для отримання конкурентної переваги при розгортанні телекомунікаційного обладнання на основі когерентної оптики. При цьому, необхідно враховувати особливості застосування технології когерентної оптики на рівні мережі доступу через високу технологічність, високу собівартість та енергоємність даного телекомунікаційного обладнання. Оскільки телекомунікаційна мережа доступу відрізняється за функціональними параметрами від міжміських та метро мереж, зменшені вимоги до бюджету зв'язку дозволяють створювати набагато спрощену когерентну конструкцію трансивера з низьким енергоспоживанням. При цьому, для спрощення розгортання телекомунікаційних мереж раціонально використовувати сумісні на оптичному транспортному рівні когерентні приймачі за умови їх отримання від різних постачальників телекомунікаційного обладнання. Враховуючи значний прогрес стандартизації когерентних міжсистемних з'єднань, який в кінцевому підсумку призведе до покращеної сумісності та передбачуваної продуктивності, що є ключем до забезпечення недорогого проектного рішення з використанням когерентної оптики [1].

Запланований напрямок досліджень передбачає розглянути інноваційні розробки в області когерентної оптики для телекомунікаційного обладнання мереж доступу, які підтримуватимуть сценарії використання агрегації P2P і ВОЛТ типу точка-багато точок (P2MP) до пасивної оптичної мережі користувача. Зокрема, дослідження присвячено технології когерентної оптики та тому, як її оптимально адаптувати до середовища доступу таким чином, щоб вирішувати основні проблеми з витратами, наприклад спрощену конструкцію трансивера та фотонну інтеграцію [2]. Аналізуючи випадки використання P2P і P2MP надається економічне моделювання для випадку агрегації з порівнянням рішення 10G IM-DD DWDM. Вимоги до реалізації, унікальні для середовища доступу, також надаються при впровадженні когерентної оптики в сценарії доступу, включаючи двонаправлену ВОЛЗ, співіснування з існуючими службами та виклики безпеки. Прогрес у розробці останніх специфікацій розглядається для багатьох галузевих організацій, які зосереджуються на сумісності когерентної оптики на короткій відстані. Дослідження призначені для забезпечення оптимального застосування когерентної оптичної технології у телекомунікаційних мережах доступу із врахуванням тенденцій оптичної промисловості та розвитку стандартизації щодо розвитку технології когерентної оптики.

Аналіз досліджень та публікацій

З перших днів існування Інтернету мережі передачі даних стрімко розширились та технологічно вдосконалились. Найперші мережі доступу до Інтернету склалися з мережі підключених серверів в навчальних і промислових місцях, до яких користувачі мали доступ, підключаючись безпосередньо до сервера на місці або опосередковано через віддалені термінали телефонного доступу. Експоненціальне розширення покриття телекомунікаційних мереж дозволило понад 3 мільярдам користувачів у всьому світі отримати доступ до Інтернету через стаціонарні та бездротові мережі [1]. Переважним способом доступу користувачів до Інтернету є мережа доступу постачальника телекомунікаційних послуг.

В провідних мережах доступу для абонентських ліній передавання використовують симетричні лінії передавання, коаксіальні лінії передавання, ВОЛЗ та лінії електропередач. Бездротові мережі доступу забезпечують доступ до Інтернету через інфраструктуру стільникового мобільного зв'язку, бездротові точки доступу за допомогою WiFi, стаціонарні мережі, які використовують статичні бездротові з'єднання «точка-точка», і супутникове з'єднання. Екстраполюючи закон Нільсена про пропускну здатність Інтернету, очікується, що швидкість широкосмугового доступу продовжить збільшуватись від 10 Гбіт/с в 2023 році до 100 Гбіт/с до 2029 року [2].

Для оптимізації витрат на підключення до Інтернету через мережі доступу, значну частину їх інфраструктури було адаптовано за допомогою впровадження волоконно-оптичних каналів передавання, що забезпечило задоволення зростаючого попиту на пропускну здатність. Волоконно-оптичні транспортні мережі використовують для забезпечення надання послуг телефонії, кабельного телебачення та мобільного зв'язку підприємствам, формуючи міські та регіональні мережі агрегації [3].

За останні роки вимоги до пропускної здатності в транспортних мережах, мережах метро та оптичних мережах доступу надзвичайно зросли через стрімке поширення мобільного Інтернету, хмарних

сервісів та послуг потокового відео [3, 4]. З огляду на вартість і складність, модуляція інтенсивності та пряме детектування (IM-DD) зіграли значну роль у формуванні архітектури оптичних мереж із короткими лінійними трактами передавання, включаючи оптичні мережі доступу, внутрішньо- та міжцентрові з'єднувальні тракти [3–8]. Використання швидкості передачі даних 25, 50 Гбіт/с в мережах оптичного доступу на одній носійній хвилі зумовило впровадження технології передачі даних 100G, 400G із використанням компактних та недорогих приймачів-передавачів для центрів обробки даних та мереж метро [7, 8], тоді як для мережі доступу IEEE 802.3 SA перспективним напрямком розвитку є використання наступного покоління пасивної оптичної мережі 25/50G Ethernet (EPON) в O-діапазоні [9].

Практичними і ефективними способами підвищення швидкості передачі даних у сучасних системах доступу є пряме детектування з форматами модуляції високого порядку [3–5], для яких були запропоновані різні методи, засновані на прямому детектуванні, такі як дуобінарна, імпульсна амплітудна модуляція (PAM) [6], дискретне багатотональне мультиплексування (DMT) або мультиплексування з ортогональним частотним поділом (OFDM) [7], амплітудно-фазова модуляція без несучої (CAP) [8] і квадратурна амплітудна модуляція (QAM) та модуляції піднесучої (SCM) [9].

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: дослідження прогресивних технологій оброблення цифрових сигналів із використанням оптимальних форматів модуляції високого рівня та ефективного коригування апаратного забезпечення трактів передавання для модернізації архітектури телекомунікаційних систем доступу.

Виклад основного матеріалу

Технології передавання потоків відеоданих вимагають найбільшої пропускної здатності, а програми захоплення відео, що використовують віртуальну реальність/доповнену реальність (VR/AR) є найбільш вимогливими з усіх мультимедійних додатків. Сучасні додатки віртуальної реальності перевершують технологічність 360° відео/панорами. Низькоякісне відео 360° вимагає з'єднання принаймні 30 Мбіт/с, потоки якості HD легко перевищують 100 Мбіт/с, а потоки якості Retina (4k+) наближаються до значення Гбіт/с. Стрімкий розвиток ефектного відео контенту супроводжується створенням прототипів голографічних дисплеїв або дисплеїв зі світловим полем, які відтворюють оригінальні світлові поля генеруючи оригінальні електромагнітні хвилі, що дозволяє глядачеві рухатися та змінювати кути огляду та сприймати природні зміни зображення, наприклад бачити об'єкти позаду переднього плану, що з'являються зі зміною кута огляду. Дисплеї зі світловим полем забезпечують справжнє 3D і захоплююче візуальне представлення без гарнітур. При цьому, дисплей комерційного розміру вимагатиме пропускної здатності близько 1,5 Гбіт/с [1]. Але існує ще багато передумов, які стримують використання технології голографічного відео, окрім демонстраційних залів і перевірки концепцій, найбільш значимою проблемою є пропускна здатність мережі.

Використання інтелектуальних електронних пристроїв — фізичних об'єктів із функціями сприйняття, аналізу й запису даних, а також можливість віддаленого зв'язку зумовило створення «Інтернету речей» (IoT). Очевидно, що недостатня пропускна здатність телекомунікаційних мереж доступу може перешкодити стрімкому розширенню використання інтелектуальних пристроїв. Хоча більшість пристроїв, які входять до складу мережі IoT використовують безпроводні технології передавання даних із використанням фізичної дротової мережі між точками бездротового доступу. Мережі з високою пропускною здатністю, низькою затримкою та високою надійністю потрібні для програм відеоаналітики в громадській безпеці та для підтримки самокерованих автомобілів [2].

Використання технологій масивного MIMO, агрегації несучих, підтримки багатодіапазонного зв'язку та ущільнення радіостільникового зв'язку зумовлює підвищені вимоги до пропускної здатності, а вплив співіснування макро-, мікро-, піко- та малих стільників у централізованому/віртуалізованому середовищі обробки вимагає вимог до гнучкості сучасних телекомунікаційних мобільних мереж 5G. При цьому, волоконно-оптичні та оптичні технології доступу відіграють важливу роль при забезпеченні доступу до телекомунікаційних послуг із одночасним підвищенням продуктивності мобільних мереж 5G [3].

Основними напрямками розвитку мереж доступу для задоволення постійно зростаючого попиту на пропускну здатність є: підвищення ефективності за рахунок використання оптичного тракту передавання із підвищеною пропускною здатністю; сегментація телекомунікаційної мережі на менші зони обслуговування та менші бездротові комірки, щоб виділити ту саму цільову ємність меншій кількості кінцевих пристроїв і бути ближчими до абонентів для кращої транспортної продуктивності; розширення робочого спектру частот; застосування просторового мультиплексування для волоконно-оптичних трактів із використанням нових типів оптичного волокна [4].

Частотні ресурси волоконно-оптичних ліній передавання традиційно поділяються на низхідну та висхідну частини. У Північній Америці для висхідного каналу зазвичай виділяється смуга частот від 50 МГц до 750 МГц, 870 МГц, 1 ГГц або навіть 1,2 ГГц, залежно від можливостей волоконно-оптичного вузла та розгорнутих підсилювачів. Висхідний потік охоплює діапазон від 5 до 42 МГц, хоча також підтримуються поділи на високі частоти. У Європі низхідні канали мають ширину 8 МГц, і також відрізняються частоти

передачі вгору/вниз. Гранична частота низхідного потоку становить 85 МГц, а гранична частота смуги висхідного потоку становить 65 МГц [5].

У волоконно-оптичній мережі доступу довжина ВОЛТ від концентратора до вузла становить менше 40 км для приблизно 90% ВОЛЗ. При цьому, переважна більшість таких волоконно-оптичних систем доступу не потребують додаткових оптичних підсилювачів потужності сигналів. Волоконно-оптичні підсилювачі (EDFA) традиційно використовуються у ВОЛТ довжиною понад 100 км [6].

Зростаюча популярність високошвидкісного доступу до телекомунікаційних послуг спричинила дефіцит волоконно-оптичних каналів передавання, що в результаті, зумовило застосування технології мультиплексування за довжиною хвилі (WDM) у сегментах мережі доступу із високою інтенсивністю інформаційного трафіку. При цьому, мультиплексори з розділенням по довжині хвилі в оптичних канал доступу можуть охоплювати лише частину С-діапазону і не формувати плоску спектральну характеристику, яку використовують мультиплексори в магістральних телекомунікаційних мережах.

Окрім підключення концентраторів до вузлів за допомогою оптичних волокон, кабельні оператори також розгорнули мережі доступу на основі технології FTTH (волокно до будинку), які здебільшого розгортаються за сценаріями «зеленого поля». Цей підхід називається RF over Glass або RFoG, у якому ВОЛП від концентратора розділяється для підключення 32 або 64 абонентів. Однією з проблем при застосуванні технології RFoG у висхідному каналі є те, що оптичні інформаційні потоки можуть мати близьку носійну довжину хвилі з мінімальною різницею між сусідніми довжинами хвиль, що створюватиме оптичні перешкоди для оптичних приймачів. Усунення даного недоліку можливе за допомогою застосування засобів контролю довжини хвилі, що зумовить небажане ускладнення абонентських пристроїв мережі доступу.

Формати модуляції сигналів в телекомунікаційних системах доступу відрізняються за технологічністю, продуктивністю, процесами налаштування та обробки в трактах передавання [3]. Одними з найпривабливіших форматів модуляції сигналів для коротких ВОЛТ з точки зору простоти генерації та обробки сигналів є PAM, зокрема PAM-4, оскільки стандартизований як формат модуляції для ВОЛТ, включаючи 200GBASE-SR4/DR4 у 802.3cd та 400GBASE-DR4/FR8/LR8 у IEEE802.3bs.

Сигнали PAM можна сформувати шляхом мультиплексування або цифро-аналогового перетворення (DAC). Сигнал PAM-4 із чотирма електричними рівнями може бути згенерований шляхом мультиплексування двох незалежних сигналів без повернення до нуля (NRZ) із послабленням одного з них на 6 дБ [4]. Сигнали PAM збільшеної розрядності PAM-8 і PAM-16 також можуть бути згенеровані трьома або чотирма потоками незалежних сигналів NRZ [5]. Зокрема, чотирирівневий сигнал PAM-4 зі швидкістю 120 Гбіт/с формується електричним об'єднувачем з двох сигналів NRZ 120 Гбіт/с, і один із сигналів NRZ спочатку зменшується до половини амплітуди за допомогою атенуатора на 6 дБ.

Враховуючи стан розвитку високошвидкісних технологій АЦП/ЦАП сигнали PAM можуть бути просто згенеровані за допомогою ЦАП із використанням процесу DSP для покращення якості сигналу передавача, оскільки ЦАП забезпечує більш гнучкий спосіб генерації будь-якого рівня сигналу PAM з довільним формуванням імпульсу та попередньою компенсацією в передавачі сигналів [6–9]. При формуванні сигналів PAM зі швидкістю 100 Гбіт/с за допомогою вбудованих або розділених джерел оптичних сигналів та модуляторів визначено, що у порівнянні із зовнішньою модуляцією на основі MZM [6, 7], відносно простими у реалізації схемами IM-DD, тобто PAM-4, і недорогими передавачами з низьким форм-фактором, такими як електроабсорбційні модульовані лазери [7] або DML [8], будуть перспективними технологіями для систем передавання між центрами обробки даних. В передавачах систем доступу із підвищеним споживанням електроенергії для збільшення вихідної потужності можна використовувати напівпровідникові оптичні підсилювачі (SOA) [9]. Швидкодія широкосмугових модуляторів прямої модуляції PAM-4 із використанням кремній-органічного гібридного модулятора досягла 200G на одній носійній довжині хвилі [2].

На стороні приймача позитивно-власно-негативний (PIN) фотодіод і лавинний фотодіод (APD) широко використовуються в оптичній системі прямого виявлення для перетворення оптичних даних в електричну форму. Загалом лавинний фотодіод (APD) має вищий рівень чутливості порівняно з PIN-фотодіодом, який можна використовувати для довших ВОЛТ та бюджетних волоконно-оптичних каналів з підвищеним енергетичним потенціалом. Лавинний ефект в APD значно збільшує коефіцієнт перетворення діода в багато разів, досягаючи підвищення чутливості оптичного приймача сигналів [3]. Однак для забезпечення необхідного режиму роботи APD потрібна більш висока робоча напруга зміщення. У системах доступу із прямим детектуванням для попереднього підсилення використовуються підсилювачі SOA або EDFA. Для зменшення позасмугового шуму використовується оптичний фільтр у складі оптичного приймача після попереднього підсилення оптичних сигналів. Загалом, тип і розподіл внесеного шуму є різними для різних типів приймачів тому, шум підсиленого спонтанного випромінювання є основним у системі на основі SOA, тоді як у приймачі на основі APD домінуючим джерелом є дробовий шум, а тепловий шум визначає шумові параметри приймача на основі PIN [4].

Лінійне вирівнювання та нелінійна компенсація широко використовуються для сигналів PAM. На рисунку 1 показано алгоритми обробки сигналів PAM в оптичному передавачі та оптичному приймачі. Після відображення символів PAM-4 для попередньої компенсації характеристики каналу та покращення якості сигналу використовується фільтр із кінцевою імпульсною характеристикою (FIR) у часовій області. Оскільки PAM є багаторівневими сигналами, нелінійна компенсація може бути дуже простою за допомогою методу на основі пошукової таблиці, як зазначено в [7]. В передавачі після вузла DSP сигнали PAM повторно дискретизуються і за допомогою ЦАП перетворюються на аналоговий сигнал.

В приймачі спочатку здійснюється дискретизація до однієї або двох вибірок на символ, а потім виконується оброблення за допомогою алгоритмів відновлення сигналу та синхронізації. В оптичному приймачі також використовується лінійне вирівнювання на основі прямого еквалайзера або еквалайзера зі зворотним зв'язком зазвичай для пост-еквалайзерів [1].

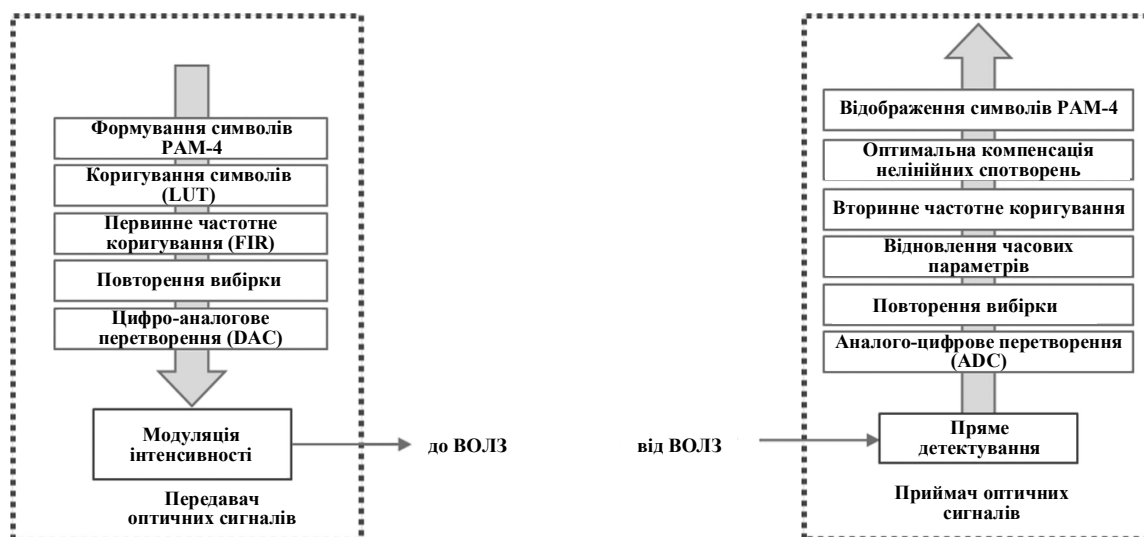


Рис. 1. Алгоритм обробки сигналів PAM в оптичному передавачі та оптичному приймачі телекомунікаційної системи

Для формування інформаційних потоків даних із швидкістю 400G за допомогою трансиверу із заданим рівнем технологічності, розміром, енергоспоживанням та вартістю допоміжного телекомунікаційного обладнання найбільш перспективним рішенням є використання 4-х потоків $\times 100$ Гбіт/с/λ на основі сигналів PAM [7]. При цьому, довжина ВОЛТ в таких телекомунікаційних системах доступу обмежена значенням 10 км через вплив на енергетичну характеристику тракту передавання хроматичної дисперсії (CD) в C-діапазоні. Вбудована оптична CD-компенсація використовується в системах доступу із ВОЛТ довжиною 80 км [8]. Телекомунікаційні системи без вбудованих оптичних модулів CD-компенсації технологічно простіші та гнучкіші. Пряме виявлення за квадратичним законом забороняє компенсацію після CD-компенсації при сильному згасанні потужності; тому попередня компенсація CD вважається більш ефективним методом [9]. Вплив нелінійних (NL) спотворень, що виникають в процесі модуляції, впливу залишкового рівня CD на процес прямого детектування сигналів погіршують продуктивність телекомунікаційної системи доступу [2, 3].

Досліджено, що ВОЛТ довжиною 400 км на основі технології PAM-4 та прямого детектування оптичних сигналів із використанням додаткової цифрової попередньої компенсації хроматичної дисперсії та розширеної компенсації NL-спотворень може забезпечити передавання чотирьох потоків 112 Гбіт/с без оптичної компенсації CD. На рисунку 2 показано принцип цифрової попередньої компенсації хроматичної дисперсії, у якому оптичний синфазний і квадратурний (I/Q) модулятор використовується для модуляції цифрових попередньо скомпенсованих сигналів PAM. Оскільки попередня компенсація CD включає інформацію про фазу, I/Q модулятор керується незалежними сигналами I та Q після попередньої компенсації CD. Подвійний MZM також може використовуватися для попередньої компенсації CD, у якому два плеча використовуються для модуляції I та Q. При цьому, додаткова компенсація спотворень NL, тобто нелінійна компенсація Вольтера може додатково покращити продуктивність ВОЛТ [4].

Формати модуляції PAM підвищеної розрядності (PAM-8 та PAM-16) забезпечують можливість збільшити об'єм переданих даних без збільшення швидкості передачі сигналу у ВОЛТ систем доступу із прямим детектуванням. При цьому, збільшення розрядності формату модуляції зумовить підвищення вимог до енергетичного потенціалу ВОЛТ [5]. Дослідження показує, що у порівнянні із сигналами PAM-4 втрати потужності для PAM-8 збільшуються на 3,6 дБ, а для сигналів PAM-16 на 6,9 дБ. Для досягнення гнучкої зміни швидкості передачі даних, спектральної ефективності та згладжування ступінчастого коригування

потужності при зміні розрядності формату модуляції PAM пропонується використовувати кодовану модуляцію ймовірнісної форми для системи IM-DD на основі PAM [6]. Сигнали PAM підвищеної розрядності передбачають підвищену лінійність при генерації, модуляції та детектуванні, що зумовлює збільшення впливу нелінійних спотворень, тому останнім часом здійснюється багато досліджень компенсації нелінійних спотворень [7-9].

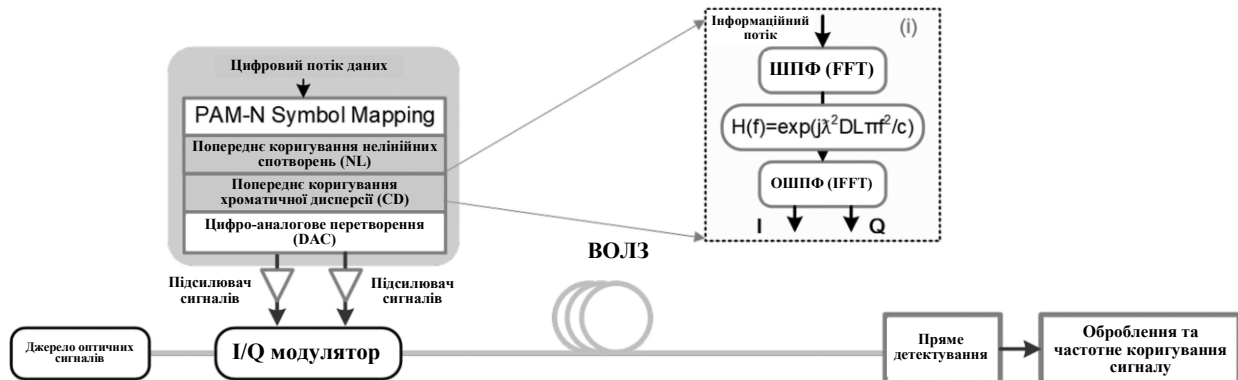


Рис. 2. Схема попередньої компенсації CD та попередньої компенсації NL

Амплітудно-фазова модуляція з придушенням носійної (CAP) є різновидом квадратурно-амплітудної модуляції QAM [3]. Модуляція CAP використовується для ВОЛТ малої відстані, оскільки вважається, що вона має розумну складність реалізації та хорошу продуктивність. В результаті, такі ВОСП характеризуються підвищеними телекомунікаційними параметрами з використанням недорогих оптичних компонентів, таких як DML і поверхнево-випромінюючий лазер з вертикальним резонатором, а також оптичних і електричних компонентів з обмеженою пропускну здатністю [3]. Зменшена складність модуляції CAP у порівнянні з модуляціями OFDM [4] та QAM-SCM [5] через відсутність перетворення електричного сигналу в дійсне значення, використання ускладненого змішувача, та радіочастотного джерела або оптичного синфазного/квадратурного (I/Q) модулятора, а також дискретного перетворення Фур'є, яке використовується при генерації та демодуляції сигналу OFDM [6]. Використання багатодіапазонного формату модуляції CAP-16-QAM забезпечує розширення смуги пропускання для високошвидкісної передачі даних на короткій відстані. Використання цифрового еквайзера на основі каскадного багатомодульного алгоритму (СММА) для вирівнювання міжсимвольних завад (ISI) CAP-16-QAM підвищує продуктивність телекомунікаційної системи передавання. Система високорівневої модуляції формату CAP, CAP-64-QAM зі швидкістю передачі даних 60 Гбіт/с, вказує на можливість потенційного застосування у високошвидкісному оптичному зв'язку.

Структури передавача та приймача на основі модуляції CAP m-QAM для оптичної безпроводної системи передачі показані на рисунку 3. Двовимірний CAP може бути згенерований за допомогою двох ортогональних фільтрів або пари узгоджених фільтрів [7]. Частота дискретизації фільтрів формування визначається частотою дискретизації даних у бодах і ЦАП. Для генерації CAP компоненти I та Q послідовності з підвищеною дискретизацією розділяються та надсилаються до цифрових фільтрів формування відповідно. На виході приймача отриманий сигнал після понижувального перетворення подається на два узгоджених фільтри для розділення компонентів I та Q.

Пари ортогональних і узгоджених фільтрів $f_I(t)$, $f_Q(t)$, $mf_I(t)$ і $mf_Q(t)$ є відповідними фільтрами формування, які утворюють так звану пару Гільберта для передавача і приймача. Після зменшення дискретизації лінійний еквайзер використовується для комплексного сигналу, а декодер використовується для отримання оригінальної послідовності бітів.

Сигнал CAP може бути згенерований з використанням кількох діапазонів, що додатково покращить загальну пропускну здатність [1, 4]. На відміну від односмугової CAP, багатосмугова CAP використовує багатофільтрові пари, які розташовані в різних частотних піддіапазонах [6]. Для кожного піддіапазону два ортогональних фільтри будуються шляхом множення косинусного імпульсу з квадратним коренем на синус і косинус відповідно. Центральна частота косинуса та функції синуса визначають центральну частоту піддіапазону. В результаті, багатодіапазонний сигнал CAP можна використовувати для мультиплексування піддіапазонів для досягнення високої швидкості передачі даних [7], а також для волоконно-оптичних мереж множинного доступу [8].

Ускладнене визначення параметрів дискретизації для прийнятих сигналів зумовлює виникнення ISI та перехресних завад між синфазною та квадратурною складовими. Таким чином, після зменшення дискретизації для комплексного сигналу використовується лінійний еквайзер, а для отримання оригінальної послідовності бітів використовується декодер. У телекомунікаційній системі використовується

двоступеневе вирівнювання, зокрема вирівнювання ISI та відновлення фази (PR) для вирівнювання сигналу CAP. Вирівнювання ISI виконується за допомогою алгоритму постійного модуля (CMA) для попередньої конвергенції з наступним СММА. Однак вирівнювання сигналу високого порядку CAP-QAM за допомогою СММА є складним завданням, оскільки кільцевий інтервал у QAM зазвичай менший, ніж мінімальний інтервал між символами. Загалом, для сигналів CAP також можна використовувати стандартні методи вирівнювання як для PAM і QAM.

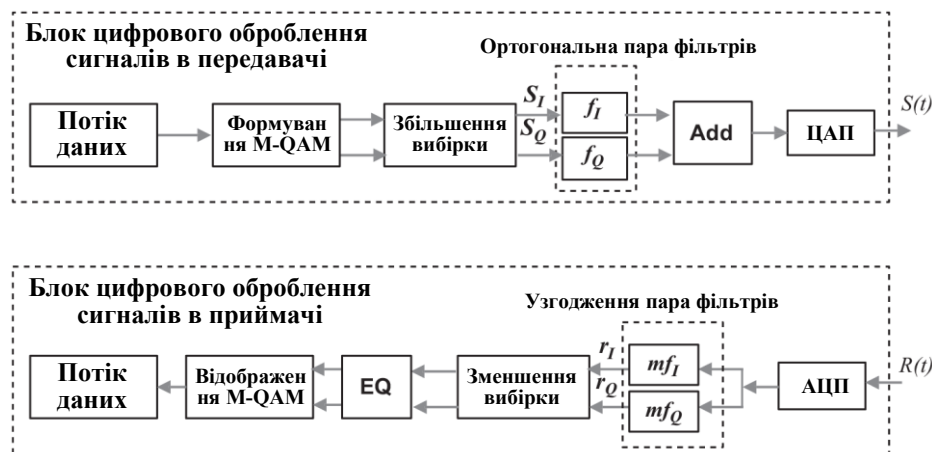


Рис. 3. Схеми передавача та приймача на основі CAP m-QAM для генерації та обробки сигналу CAP

У звичайному форматі модуляції OFDM кожна піднесійна передає символ QAM з комплексним значенням, що призводить до кількох ортогональних компонентів сигналу з синфазними (I) і квадратурними (Q) додатковими елементами в радіочастотному діапазоні. Формат модуляції OFDM став одним із найбільш часто використовуваних форматів даних для сучасних систем бездротової передачі даних. Наприклад, типова компонентна несуча (LTE) OFDM займає смугу пропускання близько 20 МГц на радіочастотній несучій із 2048 загальними піднесучими та 1201 звантаженою піднесучою. Різновид формату модуляції з кількома несучими на основі OFDM (DMT) також генерується за допомогою зворотного швидкого перетворення Фур'є (IFFT) і швидкого перетворення Фур'є (FFT). Основна відмінність між OFDM і DMT полягає в тому, що сигнал, створений за допомогою DMT, має дійсне значення в області амплітуди сигналу, яка не містить жодної інформації про фазу. Технології OFDM і DMT широко використовуються для різних телекомунікаційних стандартів і стандартів передачі даних, таких як бездротова мережа локального доступу IEEE 802.11a/g/n/ac/ad, бездротова персональна мережа IEEE 802.15.3a, інфокомунікаційна мережа IEEE 802.16. для мікрохвильового доступу, цифрового ефірного відеомовлення [9].

Схема системи передавання даних із використанням технології DMT показані на рисунку 4. Першим кроком є перетворення двійкової інформації в символи QAM. Потім символні потоки будуть перетворені з послідовного в паралельний, де кожен символ в одному стовпці паралельних даних переноситься однією піднесучою. Метод IFFT використовується для перетворення сигналів із частотної у часову область. Потім частина вибірок у кінці кожного символу після операції IFFT реплікується як циклічний префікс (CP), який буде додано до початку сигналів у часовій області, перш ніж вони перетворюються назад у послідовні вибірки даних. Цифро-аналоговий перетворювач (DAC) використовується для перетворення оцифрованих зразків в аналогові, які надсилаються на передавач і модулюються оптичною носійною. Процес відновлення сигналу в приймачі в основному є зворотним процесом у порівнянні із формуванням сигналів в передавачі, і потоки сигналу проходять через функціональні блоки: аналого-цифровий перетворювач (АЦП), послідовно-паралельний перетворювач, блок видалення CP, ШПФ, еквалайзер і декодер символів. Після ШПФ лише одна половина сигналу двосторонньої смуги буде розглянута для вирівнювання. Оскільки технологія DMT розподіляє сигнали на багато піднесучих, і інформаційний потік для кожної піднесучої можна розглядати як плоску функцію у вузькій смузі пропускання, для вирівнювання загальної характеристики каналу в частотній області можна використовувати простий еквалайзер, який є набагато ефективнішим з точки зору обчислень, ніж адаптивні цифрові фільтри на основі алгоритму LMS для обробки сигналів з однією несучою.

Оскільки сигнал DMT містить групу піднесучих, потужність і формат модуляції кожної піднесучої можна змінювати з метою адаптування до параметрів каналу, що максимізує ефективність використання смуги пропускання або мінімізує споживання енергії. Основна ідея підвищення ефективності смуги пропускання полягає у призначенні QAM-сигналів вищого та нижчого порядку піднесучим із вищим та нижчим SNR відповідно.

Протягом тривалого часу формати модуляції OFDM та DMT з циклічним префіксом (CP) домінували у телекомунікаційних системах передачі даних. Однак викликало багато дискусій питання про те, чи є технологія OFDM оптимальним форматом для бездротової та дротової мережі доступу [1]. Зокрема, виконання IFFT та FFT при передачі даних з використанням OFDM з прямокутним вікном зумовлює значні втрати потужності через позасмугове випромінювання. При об'єднанні багатоконпонентних несучих в одному частотному діапазоні для усунення міжканальних завад, спричинених втратами потужності через позасмугове випромінювання між сусідніми несучими повинні використовуватись захисні смуги, які одночасно знижують спектральну ефективність системи передавання приблизно на 30%. Також, для захисту від ISI, спричиненого багатопроменевими ефектами технологія OFDM вимагає застосування CP, що додатково знижує спектральну ефективність приблизно на 5%–20% залежно від кількості додаткових вибірок CP, необхідних для подолання розподілу затримки каналу по всіх піднесучих. В результаті, здійснено впровадження нових форматів модуляції з багатьма несучими, включаючи банки фільтрів з кількома несучими [5], універсальні фільтри з декількома несучими [6] та узагальнене мультиплексування з частотним поділом [7], які базуються на методах фільтрації для формування кожної підносійної або групи підносійних із можливістю придушення втрат потужності через позасмугове випромінювання, що компенсує обчислювальні складності при підвищенні ефективності використання смуги пропускання.

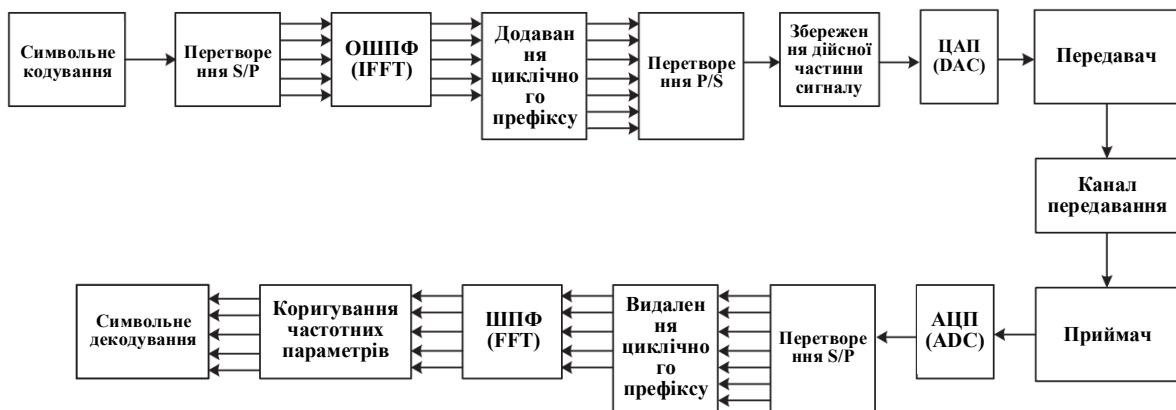


Рис. 4. Структура цифрової системи передавання даних із використанням технології DMT

Технологія когерентного оптичного зв'язку з подвійною поляризацією може максимізувати спектральну ефективність волоконно-волоконних систем передачі для сучасних транспортних магістралей і метро мереж. Однак є й деякі труднощі, які обмежують подальше впровадження когерентних технологій в мережах доступу. Зокрема, підвищена складність когерентного передавача та приймача при мультиплексуванні даних у чотирьох ортогональних каналах ніж у системах IM-DD, що призводить до значного збільшення собівартості. Подальше збільшення складності і експлуатаційних витрат системи зумовлене необхідністю гарантування ортогональності чотирьох каналів, ретельного контролювання фази, поляризації, синхронізації та фазового шуму [8].

Сучасні технології прямого детектування в телекомунікаційних системах доступу забезпечують спрощення архітектури, зниження собівартості обладнання та покращення чутливості приймача в обмін на часткове зниження спектральної ефективності у порівнянні із технологією когерентної оптики. В результаті, забезпечуються оптимізовані шляхи підвищення пропускної здатності телекомунікаційних мереж доступу. Зокрема, одним із перспективних підходів є самокогерентний метод Крамерса–Креніга (КК) [9]. Схема прямого виявлення на основі КК використовує реконструкцію амплітуди та фази в сигналах мінімальної фази за допомогою співвідношення КК, які подані як

$$\varphi_s(t) = \frac{1}{2\pi} p.v. \int_{-\infty}^{\infty} dt \frac{\log[I(t)]}{t-t'} \quad (1)$$

де $p.v.$ - вказує на основне значення;

$I(t)$ - фотострум фотодіода.

$$S(t) = \left\{ \sqrt{I(t)} \exp[i\varphi_s(t)] - A \right\} \exp(i\pi Bt) \quad (2)$$

де $\varphi_s(t)$ - значення фази вхідного сигналу;

A - значення вихідного сигналу гетеродину оптичного приймача;
 B - ширина смуги пропускання системи.

Системні архітектури між когерентним і оптичним зв'язком на основі детектора КК порівнюються на рисунку 5 (а) і (б), відповідно. На рисунку 5 (б) показано, що апаратне забезпечення системи на основі методу КК значно спрощене, в якому модулятор I/Q використовується як передавач, а простий фотодетектор інтегрований з аналого-цифровим перетворювачем та вузлом цифрової обробки сигналів системи. Одною з головних переваг приймача із використанням методу КК є можливість підвищення стійкості системи передавання до нелінійних спотворень. В оптичних телекомунікаційних системах на основі технології SSB завади SSBI значно знижують якість сигналу, алгоритми обробки цифрового сигналу для усунення SSBI є досить складними або ненадійними [5], а метод усунення SSBI, заснований на додаванні захисних смуг зменшує ефективність використання пропускну здатності системи [6]. В телекомунікаційних системах на основі методу КК відновлення сигналу базується на співвідношеннях між амплітудою та фазою сигналів згідно рівнянь (1) і (2), які не містять SSBI подібно нелінійному ефекту другого порядку. При цьому, можна досягти помітних покращень чутливості приймача в системах прямого детектування. Однак одним із головних недоліків КК-приймача є те, що операція логарифмування в рівнянні (1) розширює спектр сигналів [7]. Таким чином, для відновлення сигналу в системі КК зазвичай потрібна дво-чотирикратна передискретизація, що значно збільшує собівартість вузлів аналого-цифрового перетворення.

При зростанні інтересу до розширеної системи прямого детектування на основі приймача КК було опубліковано багато інноваційних робіт та цікавих результатів. Поляризаційний мультиплексований КК приймач був продемонстрований в [8], який подвоює спектральну ефективність системи. Також запропонований модифікований приймач КК для точної реконструкції поля при низькому відношенні несучої до потужності сигналу [9]. Застосовуючи експоненціальну операцію до сигналу SSB, критерій мінімальної фази автоматично задовольняється, що значно спрощує процес генерації сигналу. Таким чином, традиційний приймач на основі методу КК розширено для відновлення будь-яких типів DSB когерентних оптичних сигналів із синфазними та квадратурними компонентами. Оскільки запропонована архітектура цифрового тракту значно ускладнює систему передавання, тому необхідно підвищувати вимоги до конструкції оптичного фільтра із стрімким коефіцієнтом спаду частотної характеристики та точною можливістю його налаштування. Отже, використання методу КК дозволяє покращити чутливість приймача системи прямого детектування не зважаючи на тимчасову присутність технічних проблем реалізації, зокрема підтримку мінімального фазового стану сигналів, підвищену частоту дискретизації та високу складність цифрового оброблення сигналів.

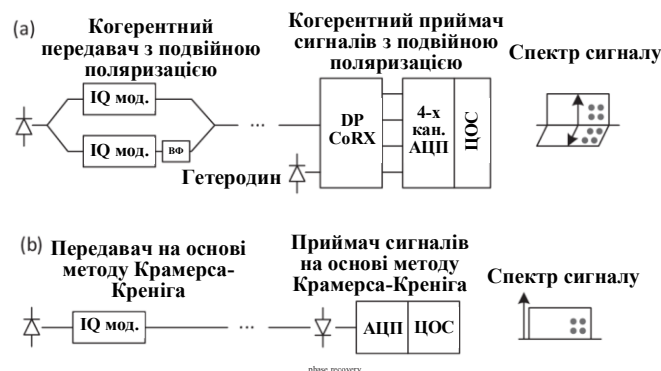


Рис. 5. Системні архітектури (а) звичайної когерентної оптичної системи та (б) оптичного приймача на основі Крамерса-Креїнга

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У дослідженні представлено цифрові оптичні тракти передавання із використанням технології IM-DD, включаючи визначення напрямку вдосконалення систем доступу за допомогою різних форматів модуляції високого порядку та засобів DSP. Здійснено дослідження принципів генерації, детектування та відновлення сигналів PAM-4, CAP і DMT для високошвидкісних телекомунікаційних систем доступу. У високошвидкісній системі IM-DD процес DSP стає все більш і більш важливим, оскільки задіяні формати модуляції високого порядку страждають від лінійних і нелінійних спотворень каналу. Здійснено аналіз і порівняння складності, продуктивності та вартості оптимальних форматів модуляції. Визначено, що сигнали PAM демонструють меншу складність, просту реалізацію та низьке енергоспоживання при застосуванні засобів DSP. Тому технологія PAM-4 широко використовується та стандартизована в різних оптичних телекомунікаційних системах. Також визначено, що передавання інформаційних потоків 200G, 400G і більше на канал стає досить складною задачею для систем IM-DD, навіть за умови використання

запропонованих формати модуляції високого порядку. Науковою новизною виконаних досліджень є оптимальні архітектури оптичних систем доступу, як результат застосування досліджених ефективних технологій побудови високошвидкісних телекомунікаційних систем доступу. Таким чином, технологія когерентної оптики відіграватиме значну роль у майбутніх високошвидкісних оптичних мережах доступу.

Література

1. J. Wang, Z. Jia, L.A. Campos, C. Knittle, "Delta-sigma modulation for next generation fronthaul interface," *Journal of Lightwave Technology*, Volume 37, Issue 12, June 15, 2018, pp. 2838–2850.
2. J. S. Wey and J. Zhang, "Passive optical networks for 5G transport: Technology and standards," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 12, 2019, pp. 2830–2837.
3. J. Zhang, J. S. Wey, J. Yu, Z. Tu, B. Yang, W. Yang, Y. Guo, X. Huang, and Z. Ma, "Symmetrical 50-Gb/s/λ PAM-4 TDM-PON in O-band with DSP and Semiconductor Optical Amplifier Supporting PR-30 Link Loss Budget," *Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest, Optical Society of America*, 2018, paper M1B.4.
4. Q. Hu, K. Schuh, M. Chagnon, F. Buchali, and H. Bülow, "84 GBd faster-thanNyquist PAM-4 transmission using only linear equalizer at receiver," *Optical Fiber Communication Conference (OFC), OSA Technical Digest, Optical Society of America*, 2019, paper W4I., p. 2.
5. S. Ummethala, J. N. Kemal, M. Lauermann, A. S. Alam, H. Zwickel, T. Harter, Y. Kutuvantavida, L. Hahn, S. H. Nandam, D. L. Elder, L. R. Dalton, W. Freude, S. Randel, and C. Koos, "Capacitively coupled silicon-organic hybrid modulator for 200 Gbit/s PAM-4 signaling," *Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest, Optical Society of America*, 2019, paper JTh5B.2.
6. Zonglong He, Tianwai Bo, and Hoon Kim, "Probabilistically shaped coded modulation for IM/DD system," *Optics Express*, vol. 27, 2019, pp. 12126–12136.
7. A. Masuda, S. Yamamoto, H. Taniguchi, M. Nakamura, and Y. Kisaka, "255-Gbps PAM-8 transmission under 20-GHz bandwidth limitation using NL-MLSE based on Volterra filter," *Optical Fiber Communication Conference (OFC), OSA Technical Digest, Optical Society of America*, 2019, paper W4I.6.
8. N. K ikuchi, R. Hirai, and T. Fukui, "BER improvement of IM / DD higher-order optical PAM signal with precise non-linearity compensation," *Optical Fiber Communication Conference (OFC), OSA Technical Digest, Optical Society of America*, 2019, paper W4I.1.
9. S. An, Q. Zhu, J. Li, and Y. Su, "Modified KK receiver with accurate field reconstruction at low CFSR condition," *Proceedings of Optical Fiber Communication*, 2019, paper M1H.3.

References

1. J. Wang, Z. Jia, L.A. Campos, C. Knittle, "Delta-sigma modulation for next generation fronthaul interface," *Journal of Lightwave Technology*, Volume 37, Issue 12, June 15, 2018, pp. 2838–2850.
2. J. S. Wey and J. Zhang, "Passive optical networks for 5G transport: Technology and standards," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 12, 2019, pp. 2830–2837.
3. J. Zhang, J. S. Wey, J. Yu, Z. Tu, B. Yang, W. Yang, Y. Guo, X. Huang, and Z. Ma, "Symmetrical 50-Gb/s/λ PAM-4 TDM-PON in O-band with DSP and Semiconductor Optical Amplifier Supporting PR-30 Link Loss Budget," *Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest, Optical Society of America*, 2018, paper M1B.4.
4. Q. Hu, K. Schuh, M. Chagnon, F. Buchali, and H. Bülow, "84 GBd faster-thanNyquist PAM-4 transmission using only linear equalizer at receiver," *Optical Fiber Communication Conference (OFC), OSA Technical Digest, Optical Society of America*, 2019, paper W4I., p. 2.
5. S. Ummethala, J. N. Kemal, M. Lauermann, A. S. Alam, H. Zwickel, T. Harter, Y. Kutuvantavida, L. Hahn, S. H. Nandam, D. L. Elder, L. R. Dalton, W. Freude, S. Randel, and C. Koos, "Capacitively coupled silicon-organic hybrid modulator for 200 Gbit/s PAM-4 signaling," *Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest, Optical Society of America*, 2019, paper JTh5B.2.
6. Zonglong He, Tianwai Bo, and Hoon Kim, "Probabilistically shaped coded modulation for IM/DD system," *Optics Express*, vol. 27, 2019, pp. 12126–12136.
7. A. Masuda, S. Yamamoto, H. Taniguchi, M. Nakamura, and Y. Kisaka, "255-Gbps PAM-8 transmission under 20-GHz bandwidth limitation using NL-MLSE based on Volterra filter," *Optical Fiber Communication Conference (OFC), OSA Technical Digest, Optical Society of America*, 2019, paper W4I.6.
8. N. K ikuchi, R. Hirai, and T. Fukui, "BER improvement of IM / DD higher-order optical PAM signal with precise non-linearity compensation," *Optical Fiber Communication Conference (OFC), OSA Technical Digest, Optical Society of America*, 2019, paper W4I.1.
9. S. An, Q. Zhu, J. Li, and Y. Su, "Modified KK receiver with accurate field reconstruction at low CFSR condition," *Proceedings of Optical Fiber Communication*, 2019, paper M1H.3.