

ВИСОКОШВИДКІСНІ ОПТИЧНІ МЕРЕЖІ ДОСТУПУ

Визначено розширені функціональні параметри волоконно-оптичних мереж доступу та способи підвищення ефективності роботи волоконно-оптичних лінійних трактів за рахунок використання багаторівневих форматів модуляції, багатоосердних оптичних волокон та спектрального ущільнення оптичних каналів.

Ключові слова: волоконно-оптичний лінійний тракт, волоконно-оптична лінія зв'язку, пропускна здатність

M.V. VASYLKIVSKYI, G.L. ANTONIUK, O.S. POLUDENKO, K.O. KOVAL

Vinnytsia National Technical University

HIGH-SPEED OPTICAL ACCESS NETWORKS

Abstract - Advanced functional parameters of fiber-optical access networks as well as effectiveness increase means of fiber-optical line channels by means of the use of multilevel modulation formats, multicore fibers (MCF) and spectral density of optical channels are determined.

Construction principles of advanced fiber-optical transmission systems with the use of MCF of single-mode fiber (SMF) and few-mode fiber (FMF), the technology of multilevel modulation formats (PDM-QAM), superchannel (OFDM), coherent optical receiver are described.

The methods of transmission speed increase of data signals in FOTS, considering the operating range of signal-to-noise relation, nonlinear effect impact in fiber-optic communication line (FOCL) and maximal length of fiber optic linear path (FOLP) are suggested.

It is proved, that the application of multilevel modulation formats of information data, superchannels based on OFDM with polarization and mode multiplexing may provide the optical channel capacity more than 1 Tbit/s. Additionally, the interaction of FOCL based on MCF and FMF with the multilevel modulation formats of optical channels, as well as mode multiplexing and OFDM allows to gain the transmission speed in FOLP above 1 Pbit/s.

Keywords: fiber-optic linear path, fiber-optic communication line, bandwidth.

Вступ

Збільшення темпів використання інформаційних послуг вимагає покращення функціональних характеристик телекомунікаційних мереж. Більшість оптичних мереж доступу побудовані на основі волоконно-оптичних лінійних трактів (ВОЛТ) з пропускною здатністю оптичних каналів 10 Гбіт/с та з використанням технології OTN-OTN [1].

Покращення функціональних характеристик ВОЛТ можна здійснити різними методами, а саме: за рахунок модового, просторового та поляризаційного мультиплексування при використанні нових типів оптичних волокон (ОВ) зі збільшеною робочою смугою; багатопозиційних форматів модуляції оптичних сигналів та високощільного спектрального мультиплексування оптичних каналів [2].

Підвищення швидкості передавання інформаційних потоків призводить до зменшення тривалості імпульсів цифрової послідовності та розширення діапазону робочих частот. Волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ) на базі стандартних одномодових ОВ характеризуються обмеженою пропускною здатністю 100 Тбіт/с. Широке використання технології щільного мультиплексування DWDM та спектральних суперканалів на основі мультиплексування з ортогональним частотним розподілом OFDM, стимулює дослідження шляхів покращення характеристик існуючих ВОЛТ та перспектив їх модернізації за рахунок використання стандартних та нових ВОЛЗ, оптичних трансиверів, комутаторів, форматів кодування оптичних сигналів [3].

Метою роботи є підвищення ефективності високошвидкісних мереж доступу за рахунок використання багатопозиційних форматів модуляції оптичних сигналів та високощільного спектрального мультиплексування оптичних каналів.

Основна частина

Максимальна пропускна здатність ВОЛЗ на основі одномодового ОВ (G.652 (с, d)) при використанні оптичних сигналів в форматі NRZ становить 26 Тбіт/с. А максимальна швидкодія одноканального ВОЛТ при використанні формату модуляції з спектральною ефективністю 0,5 біт/с/Гц (NRZ) становить лише 2,128 Тбіт/с – (4,39 ТГц) [4].

Підвищити ефективність використання робочої смуги ВОЛЗ на основі стандартних ОВ можна за допомогою багаторівневих форматів модуляції оптичної носійної частоти. За допомогою амплітудно-фазового та поляризаційного кодування (решіткове кодування – (TCM)) можна збільшувати спектральну ефективність використання робочих частот ОВ, що забезпечить збільшення швидкості передачі інформаційних даних при незмінній смузі робочих частот оптичного каналу. Але, використання багаторівневих форматів модуляції може призводити до зменшення значення OSNR через вплив додаткових оптичних шумів, який обмежує максимально допустиму довжину ВОЛТ. При цьому, пропускну здатність оптичного каналу можна визначити за формулою

$$C_{Och} = B_{Och} \log_2 \left(1 + \frac{S_{Och}}{N_{Och}} \right),$$

де B_{Och} – смуга робочих частот оптичного каналу; S_{Och} – потужність оптичного сигналу в каналі;
 N_{Och} – потужність шуму в оптичному каналі.

Максимальне підвищення спектральної ефективності при заданому значенні OSNR багатопозиційного оптичного сигналу через вплив нелінійних ефектів в ОВ характеризується критерієм Шеннона. Збільшення спектральної ефективності оптичних каналів в магістральних ВОЛТ (понад 10 біт/с/Гц) можна здійснити за рахунок: використання малошумних оптичних підсилювачів; коригування помилок (FEC) в оптичному приймачі; використання ОВ з мінімальним коефіцієнтом нелінійності; поляризаційного мультиплексування (PM); багатопозиційної модуляції (m-QAM) та (m-PSK) (рис. 1); технології щільного розміщення підносійних частот оптичних каналів (OFDM).

При збільшенні кількості позиційних станів модульованого сигналу та зменшенні інформаційної або символної швидкості передачі даних необхідно враховувати додаткове зменшення співвідношення сигнал/шум (OSNR) в оптичному каналі ВОЛТ (рис. 2).

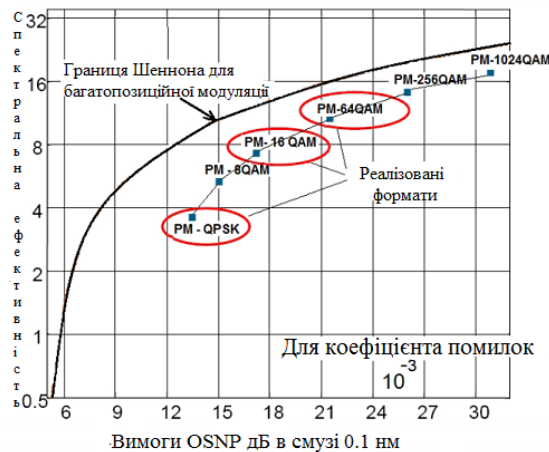


Рис. 1. Залежність спектральної ефективності оптичних сигналів від OSNR в оптичному каналі ВОСП

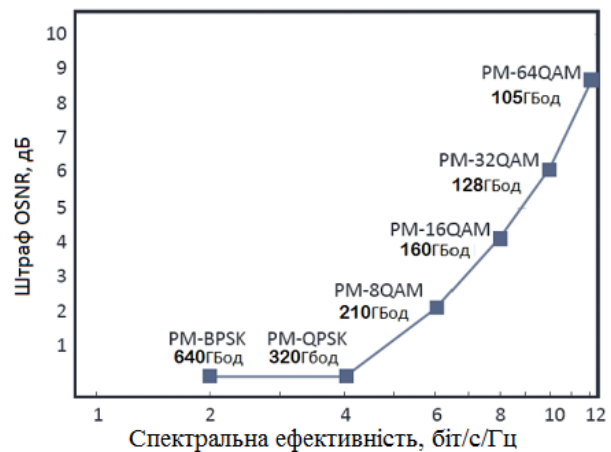


Рис. 2. Залежність співвідношення сигнал/шум від спектральної ефективності оптичних сигналів при різних форматах модуляції

У когерентних ВОСП з багаторівневими форматами модуляції оптичних сигналів за рахунок цифрового оброблення сигналів в оптичному приймальному модулі можна отримати підвищення чутливості оптичного приймача на 3 – 34 дБ.

На рис. 3 показано залежність спектральної ефективності передавання інформаційних потоків в стандартних оптичних каналах (понад 480 Гбіт/с) від кількості квадратурних компонент модульованого оптичного сигналу.

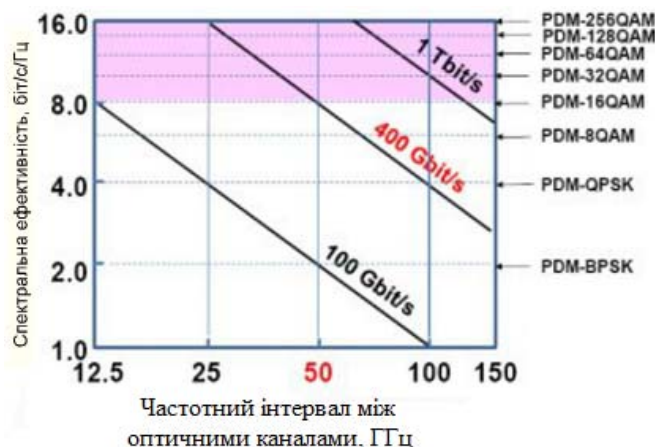


Рис. 3. Залежність швидкості передавання інформаційних даних в ВОСП від спектральної ефективності оптичних каналів

Процес цифрового оброблення сигналів в оптичному приймачі здійснюється у послідовності: аналого-цифрового перетворення; відновлення тактової частоти; компенсація накопиченої хроматичної дисперсії за рахунок цифрової фільтрації; компенсація накопиченої поляризаційно модової дисперсії за допомогою цифрового еквалайзера; відновлення оптичної носійної частоти та фази для вирівнювання квадратурних компонент (алгоритм Вітербі) та реалізації гомодинного приймання; відновлення цифрового потоку з допустимим коефіцієнтом помилок (не менше 10^{-2}). Блок коригування помилок (FEC) забезпечує підвищення значення OSNR в оптичних каналах ВОЛТ за рахунок використання кодів Ріда-Соломона (RS) з

різними структурами блоків (255/239), (255/241) (рис. 4).

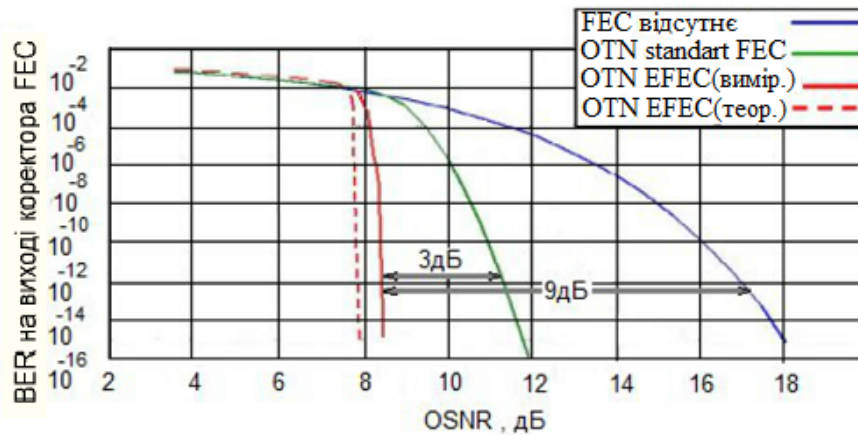


Рис. 4. Особливості використання функції коригування помилок (FEC) в оптичних каналах ВОСП

В оптичних приймачах високошвидкісних трасиверів використовуються р-і-п – фотодіоди з хвилевими секціями детектування та високошвидкісні лавинні фотодіоди (APD) високої чутливості та ефектом «квантових ям» (MQV). Когерентна гомодинна технологія приймання багатопозиційних сигналів, яка полягає у використанні додаткового гетеродину забезпечує підвищення чутливості фотоприймачів [5]. Приклад каскадного цифрового оброблення сигналів для компенсації дисперсійних спотворень, вирівнювання фаз оптичної носійної та гетеродину, відновлення цифрових даних з заданим коефіцієнтом помилок відображено на (рис. 5).

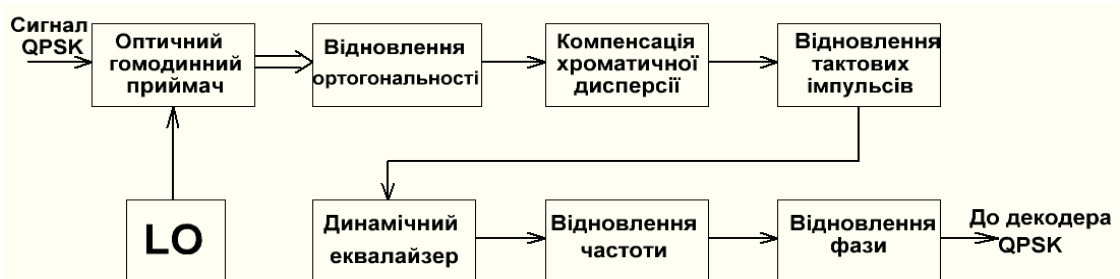


Рис. 5. Узагальнена структура блоку цифрового оброблення оптичного сигналу в когерентному оптичному приймачі

Підвищення бюджету потужності ВОЛТ можна здійснити за рахунок збільшення енергетичного потенціалу ВОСП за допомогою підсилювача вихідної потужності в оптичному передавачі та збільшення чутливості оптичного приймача за допомогою попереднього підсилення на його вході.

Виконати оцінювання накопичених шумів в ВОЛТ з каскадним з'єднанням оптичних підсилювачів можна за нормованим значенням відношення сигнал/шум (OSNR) відносно коефіцієнта помилок в оптичному каналі

$$OSNR = P_{out.} - A_{VOLZ.OP} - NF - 10 \lg(N) - 10 \lg(h \cdot f \cdot \Delta f),$$

де $P_{out.}$ – рівень потужності на виході оптичного підсилювача в ВОЛТ, який визначається кількістю спектральних каналів та допустимим значенням потужності групового оптичного сигналу, що не призводить до появи нелінійних ефектів в ОБ; $A_{VOLZ.OP}$ – значення втрат потужності оптичних сигналів в ВОЛЗ, яке визначається мінімальним значенням чутливості оптичного приймача при заданому коефіцієнті помилок;

NF – коефіцієнт шуму оптичного підсилювача; h – постійна Планка; f – центральна частота оптичного каналу; Δf – ширина смуги пропускання оптичного каналу; N – кількість оптичних підсилювачів в ВОЛТ.

Використання оптичних мультиплексорів з комутаторами в ВОЛТ створює широкі можливості для побудови надійних, захищених мереж з гнучким керуванням розподілу ресурсів (пропускної здатності) оптичних каналів та створення різних з'єднань. При цьому, при використанні оптичних підсилювачів, компенсаторів дисперсії та мультиплексорів, зменшується співвідношення OSNR, що знижує бюджет потужності в ВОЛТ. В результаті, узагальнене співвідношення OSNR на виході оптичного мережного елементу (оптичного підсилювача, мультиплексору виділення/введення, комутатора та ін.) багатоканального ВОЛТ можна визначити за виразом

$$OSNR_{out.} = -10 \lg \left(10^{-0,1(OSNR_{in})} + 10^{-0,1(P_{m,1} - NF_1 - 10 \lg(h \cdot f \cdot \Delta f))} + 10^{-0,1(P_{m,2} - NF_2 - 10 \lg(h \cdot f \cdot \Delta f))} + \dots + 10^{-0,1(P_{m,N} - NF_N - 10 \lg(h \cdot f \cdot \Delta f))} \right),$$

де $OSNR_{in}$ – співвідношення оптичний сигнал/шум на вході оптичного мережного елементу (ONE);

P_{in} – рівень потужності сигналу в оптичному каналі на вході ONE; NF – коефіцієнт шуму ONE.

Необхідно відмітити, що нормоване значення OSNR залежить також від формату модуляції оптичних сигналів в каналах ВОСП. У високошвидкісних ВОЛТ використовуються декілька форматів модуляції оптичних носійних частот: амплітудні (ASK), фазові (PSK), поляризаційні (PolSK) та комбіновані (рис. 6).

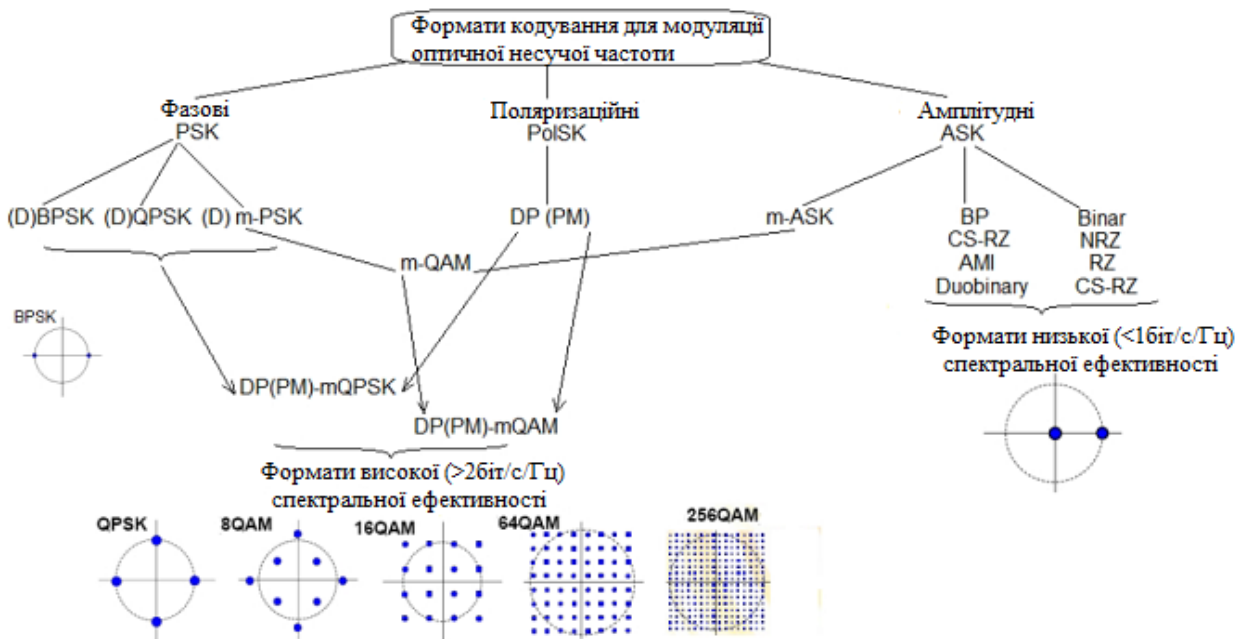


Рис. 6. Види форматів модуляції оптичних сигналів у ВОЛТ

Необхідно відмітити ще два взаємопов'язані фактори, які характеризують функціональні параметри високошвидкісних магістральних ВОЛТ, це дисперсія та нелінійні ефекти в ВОЛЗ і компонентах ВОСП.

Результуючу питому дисперсію одномодових ВОЛТ можна визначити за допомогою виразу

$$\Delta\tau^2 = \left((-L_{\text{ВОЛЗ}} \Delta\lambda M(\lambda)) + (L_{\text{ВОЛЗ}} \Delta\lambda B(\lambda)) \right)^2 + \left(\tau_{\text{ПМД}} \sqrt{L_{\text{ВОЛЗ}}} \right)^2,$$

де $L_{\text{ВОЛЗ}}$ – довжина ВОЛЗ; $\Delta\lambda$ – ширина спектру випромінювання джерела оптичних сигналів в ВОСП;

$M(\lambda)$ – коефіцієнт питомої матеріальної дисперсії; $B(\lambda)$ – коефіцієнт питомої хвильоводної дисперсії;

$\tau_{\text{ПМД}}$ – коефіцієнт питомої поляризаційно модової дисперсії.

Зміну дисперсійних характеристик ВОЛТ можна контролювати за допомогою коефіцієнта бітових помилок, який визначається в приймальному модулі ВОСП і не повинен перевищувати значення 10^{-12} . Максимальну довжину ВОЛТ, яка характеризується накопиченням значенням поляризаційно модової дисперсії (ПМД) можна визначити за формулою

$$L_{\text{ВОЛТ(ПМД)}} = \left(\frac{E}{B_{\text{макс}} \cdot \tau_{\text{ПМД}}} \right)^2,$$

де E – коефіцієнт зміни бітового інтервалу через вплив ПМД при заданому коефіцієнті помилок;

$B_{\text{макс}}$ – максимальна швидкість ВОСП.

Вплив нелінійних ефектів на роботу ВОЛЗ, через нелінійну залежність показника заломлення матеріалу осердя одномодового ОВ від величини напруженості електричного поля когерентних оптичних сигналів можна визначити

$$n_1(\lambda, E) = n_{\text{эф.}}(\lambda) \pm \gamma \frac{P}{A_{\text{эф.}}},$$

де $n_{\text{эф.}}(\lambda)$ – значення показника заломлення осердя одномодового ОВ при низькому рівні потужності оптичних сигналів; γ – коефіцієнт нелінійності матеріалу осердя одномодового ОВ (коефіцієнт Керра);

P – потужність оптичних сигналів у волокні; $A_{\text{эф.}}$ – ефективна площа осердя одномодового ОВ.

Додаткові втрати потужності оптичних сигналів в ВОЛЗ через вплив нелінійних ефектів (фазову самомодуляцію, фазову кросмодуляцію, чотирихвильове змішування, вимушене комбінаційне розсіювання)

Рамана та вимушене комбінаційне розсіювання Брюлієна) можуть становити від 0,5 дБ до 1 дБ. Можливість зменшення впливу нелінійних ефектів в ВОЛЗ характеризується балансом між максимальним значенням потужності оптичних сигналів, допустимою дисперсією та значенням міжканального інтервалу при заданому зменшенні потужності [6].

Для досягнення швидкості передавання інформаційних сигналів понад 100 Гбіт/с необхідно використовувати високошвидкісні оптичні трансивери на основі зовнішніх модуляторів (EAM, MZM) при одночасному керуванні інтенсивністю, фазою та поляризацією оптичних сигналів (рис. 7).

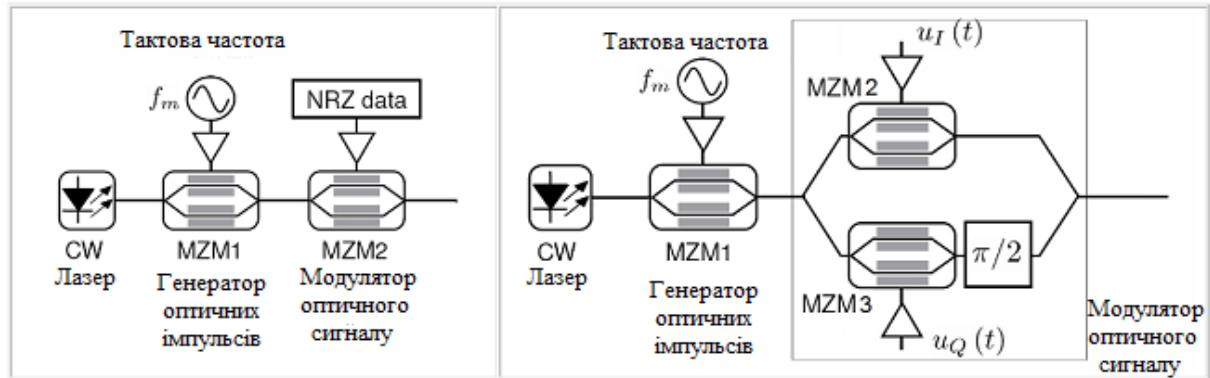


Рис. 7. Узагальнені структури оптичних передавачів з зовнішніми модуляторами (MZM) (каскадне та паралельне включення)

За допомогою технології поділу носійної частоти на підносійні зі зменшеним міжканальним інтервалом можна продовжити підвищення швидкодії оптичних каналів. Формування оптичних підносійних частот відбувається на основі технології оптичного ортогонального мультиплексування частот (OFDM) (рис. 8).

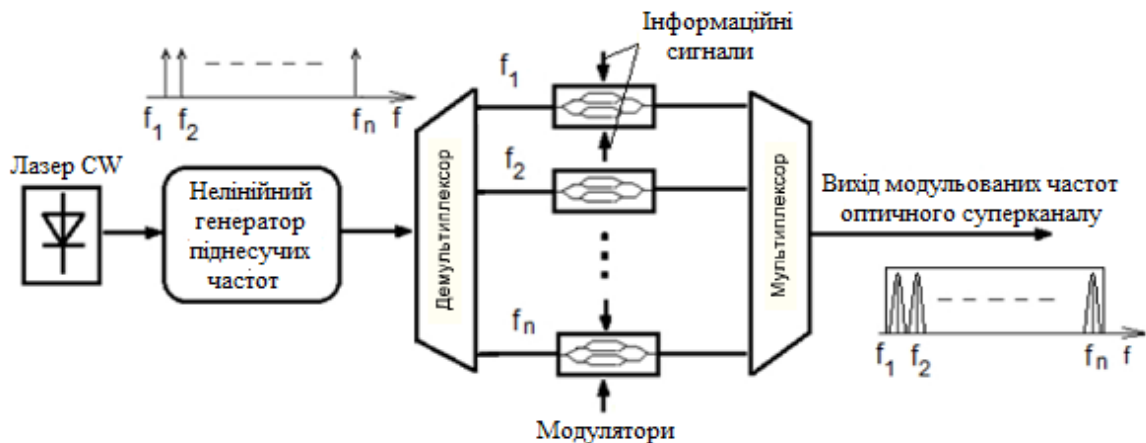


Рис. 8. Узагальнена структура блоку формування підносійних оптичного суперканалу з нелінійним генератором

У високошвидкісних ВОЛТ додатково можуть використовуватись багатоосердні одномодові ОБ (MCF), які за рахунок просторового оптичного мультиплексування (OSDM) дозволяють реалізувати пропускну здатність ВОЛЗ понад 1000 Тбіт/с. Іншим варіантом нарощування пропускну здатності оптичних мереж доступу може бути використання технології модового мультиплексування.

Висновки

Запропоновано методи збільшення швидкості передавання інформаційних сигналів у ВОСП, що мають враховувати робочий діапазон співвідношення сигнал/шум, вплив нелінійних ефектів у ВОЛЗ та максимально допустиму довжину ВОЛТ.

Доведено, що використання багаторівневих форматів модуляції інформаційних даних, суперканалів на основі OFDM з поляризаційним та модовим мультиплексуванням може забезпечити пропускну здатність оптичного каналу понад 1 Тбіт/с, а поєднання ВОЛЗ на основі багатоосердних одномодових ОБ з багатопозиційними форматами модуляції оптичних сигналів, технологією модового мультиплексування та OFDM дозволить досягнути швидкість передавання в ВОЛТ понад 1 Пбіт/с.

Література

1. Фокин В.Г. Оптические системы с терабитными и петабитными скоростями передачи: учебное пособие / Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики. Новосибирск, 2016. – 162 с.
2. Бортник Г.Г. Метод оцінювання детермінованих складових фазового дрижання у цифрових системах передавання / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, О.Г. Бортник. – Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012, № 3. – С.45-48.
3. Бортник Г.Г. Методи та засоби оцінювання параметрів абонентських ліній зв'язку. Г.Г. Бортник, В.М. Кичак, В.Ф. Яблонський - Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006.- 139с.
4. Бортник Г.Г. Системи передавання в електрозв'язку. Г.Г. Бортник, О.А. Семенюк, О.В. Стальченко. – Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 138 с.
5. Бортник Г.Г. Математична модель джитеру у волоконно-оптичних системах передачі інформації. Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, В.А. Челюян. - Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології, 2009, № 1. – С. 234-238.
6. Бортник Г.Г. Спектральні моделі фазового дрижання в цифрових системах передачі. Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, М.А. Мельник. - Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки. – 2012, № 1. – С. 173-176.

References

1. Fokyn V.H. Opticheskiye systemy s terabytnymy y petabytnymy skorostiamy peredachy: uchebnoe posobyе / Sybyrskiy gosudarstvennyy unyversytet telekommunyatsiy y ynformatyky. Novosybyrsk, 2016. – 162 s.
2. Bortnyk H.H. Metod otsiniuvannia determinovanykh skladovykh fazovoho dryzhannia u tsyfrovyykh systemakh peredavannia / H.H. Bortnyk, M.V. Vasylykivskiy, O.H. Bortnyk. – Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2012, № 3. – S.45-48.
3. Bortnyk H.H. Metody ta zasoby otsiniuvannia parametriv abonentskykh linii zviazku. H.H. Bortnyk, V.M. Kychak, V.F. Yablonskyi - Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2006.- 139s.
4. Bortnyk H.H. Systemy peredavannia v elektrosvyazku. H.H. Bortnyk, O.A. Semeniuk, O.V. Stalchenko. – Navchalnyi posibnyk. – Vinnytsia: VNTU, 2006. – 138 s.
5. Bortnyk H.H. Matematychna model dzhyteru u volokonno-optychnykh systemakh peredachi informatsii. H.H. Bortnyk, M.V. Vasylykivskiy, V.A. Cheloian. - Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii, 2009, № 1. – S. 234-238.
6. Bortnyk H.H. Spektralni modeli fazovoho dryzhannia v tsyfrovyykh systemakh peredachi. H.H. Bortnyk, M.V. Vasylykivskiy, M.A. Melnyk. - Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, Tekhnichni nauky. – 2012, № 1. – S. 173-176.

Рецензія/Peer review : 13.4.2017 р.

Надрукована/Printed :18.6.2017 р.

Стаття рецензована редакційною колегією