

УДК 621.391

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ТРАКТІВ

DOI 10.36994/2788-5518-2021-02-02-06

Харлай Л.О., к.т.н., доц. Київський фаховий коледж зв'язку, Київ, Україна.
lharlay@i.ua

Кунах Н.І., д.т.н., проф. Київський фаховий коледж зв'язку, Київ, Україна.
ignaku@ukr.net

Манько О.О., д.т.н., проф. Київський фаховий коледж зв'язку, Київ, Україна.
tanko_kiev@ukr.net

Скубак О.О., к.т.н., доц. Національний університет біоресурсів, Київ, Україна.
skubakan@ukr.net

Нікіфоренко К.Б., к.т.н. Київський фаховий коледж зв'язку, Київ, Україна.
knkfrnk@i.ua

Анотація. У статті розглядаються основні напрями підвищення інформаційно-пропускної спроможності волоконно-оптичних систем передачі. Метою даної роботи є визначення можливості істотного збільшення інформаційної ємності існуючих технологій за рахунок їх комплексного застосування. Як опорна розглянута технологія, що базується на часовому розділенні каналів. Наведено причини її обмежень щодо швидкості передачі. Подано значення досягнутих швидкостей.

Велике значення приділено технології, яка в даний час є основною на транспортних мережах зв'язку – технології з хвильовим поділом каналів. На сьогоднішній день її застосування дозволяє на два-три порядки підвищити інформаційно-пропускну здатність оптичного волокна. У роботі запропоновано розрахункові співвідношення та показано шляхи підвищення інформаційно-пропускної здатності оптичних трактів та їх спектральної ефективності на основі технології з хвильовим поділом каналів.

Подальше підвищення пропускної спроможності технології з хвильовим поділом каналів вдвічі-втричі може бути досягнуто шляхом використання маломодових оптичних волокон із застосуванням відповідних систем передачі. У роботі наведено конструкції маломодових волокон, модових конвертерів, а також мультиплексорів-демультиплексорів та мультиплексорів введення-виводу для маломодових волокон. У кожному з модових режимів використовується технологія хвильового мультиплексування.

Для наступного нарощування інформаційно-пропускної спроможності системи запропоновано технології поляризаційного мультиплексування та просторового рознесення каналів. Технологія поляризаційного мультиплексування дозволяє подальше збільшення швидкості передачі щонайменше вдвічі. При цьому використовується ортогональна поляризація. Технологія просторового поділу дає

можливість збільшити це значення ще, як мінімум, у сім разів. Таким чином, комплексне використання існуючих технологій дозволить значно збільшити інформаційну ємність оптичних систем передачі.

Ключові слова: системи передачі, оптичне волокно, інформаційно-пропускна здатність, просторовий поділ каналів

METHODS OF INCREASING INFORMATION AND PERFORMANCE OF FIBER-OPTICAL TRACKS

Liudmila Kharlai, Ph.D., Ass.Prof. Kiev Specialized College of Communications, Kiev, Ukraine. lharlay@i.ua

Nataliia Kunakh, Dr.habil., Prof. Kiev Specialized College of Communications, Kiev, Ukraine. ignaku@ukr.net

Olexander Manko, Dr.habil., Prof. Kiev Specialized College of Communications, Kiev, Ukraine. manko_kiev@ukr.net

Olexander Skubak, Ph.D., Ass.Prof. National University of Bioresources, Kiev, Ukraine. skubakan@ukr.net

Konstantin Nikiforenko, Ph.D. Kiev Specialized College of Communications, Kiev, Ukraine. knkfrnk@i.ua

Annotation. The article discusses the main directions of increasing the information throughput of fiber-optic transmission systems. The purpose of this work is to determine the possibility of a significant increase in the information capacity of existing technologies due to their complex application. The technology based on time division of channels is considered as a reference. The reasons for its limitations in terms of transmission speed have been identified. The values of the achieved speeds are presented.

Much attention is paid to the technology, which is currently the main one in transport communication networks - technology with wave division of channels. Today, its application allows one to increase the information bandwidth of an optical fiber by two to three orders of magnitude. The paper proposes design ratios and shows ways to increase the information throughput of optical paths and their spectral efficiency based on technology with wave separation of channels.

A further increase in the throughput of wavelength division multiplexing technology by a factor of two or three can be achieved by using low-mode optical fibers with the use of appropriate transmission systems. The paper presents designs of low-mode fibers, mode converters, as well as multiplexers-demultiplexers and input-output multiplexers for low-mode fibers. Moreover, in each of the mode modes, the technology of wave multiplexing is used.

To further increase the information capacity of the system, technologies of polarization multiplexing and channel space diversity have been proposed. Polarization multiplexing technology allows a further increase in the transmission rate by at least two times. This uses orthogonal polarization. The spatial separation technology makes it possible to increase this value by at least seven times. Thus, the complex use of existing technologies will significantly increase the information capacity of optical transmission systems.

Keywords: transmission systems, optical fiber, information bandwidth, spatial separation of channels

Вступ

На сучасному етапі розвитку оптичних інформаційних технологій спостерігається стрімке зростання об'ємів трафіку, що передається по лініях зв'язку, при цьому потреба у збільшенні пропускної здатності мереж зв'язку щорічно приблизно подвоюється. Вирішення цієї проблеми здійснюється шляхом модернізації існуючих волоконно-оптичних систем передавання (ВОСП) із застосуванням нових технологій, що дозволяють максимально використовувати ємність вже прокладених оптичних кабелів та потребують менших термінів реалізації та пов'язаних з цим витрат порівняно з будівництвом нових волоконно-оптичних ліній передавання (ВОЛП) з більш високими швидкостями передавання даних.

Для збільшення пропускної спроможності волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) існує кілька способів. Процес їх реалізації, найчастіше, зводиться до одного з методів ущільнення (мультиплексування) кількох інформаційних потоків в один груповий, що передається по лінії зв'язку. Для подальшого нарощування інформаційної ємності систем передачі широко застосовується поєднання одночасно двох чи більше методів. Загальне значення швидкості передачі оптичного волокна можна описати наступним чином [1]:

$$V_{\text{заг}} = b \cdot N_k \cdot N_m \cdot N_c, \quad (1)$$

де b - бітова швидкість в одному спектральному каналі (відповідає швидкостям синхронної цифрової ієрархії); N_k – кількість спектральних каналів в оптичному волокні (відповідає ієрархії швидкостей DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing – щільне мультиплексування з розподілом по довжині хвилі або спектральне ущільнення каналів); N_m – кількість мод, які використовуються для модового ущільнення волокна (при цьому у кожній моді N_k спектральних каналів); N_c – кількість серцевини в оптичному волокні (при цьому в кожній серцевині використовуються N_m мод). Таким чином для визначення граничних можливостей підвищення інформаційно-пропускної здатності ВОЛП необхідно проаналізувати наявні методи мультиплексування, які її забезпечують.

Оптичні технології з використанням часового мультиплексування (TDM)

Першим методом мультиплексування, який став застосовуватися у волоконно-оптичних системах зв'язку, був метод часового мультиплексування (TDM – Time Division Multiplexing – мультиплексування з розділенням у часі), при якому оптична несуча модулюється цифровим сигналом з бітовою швидкістю b . Швидкість часового мультиплексування обмежується можливостями сучасної електроніки, і в даний час підійшла до своєї межі (Згідно зі стандартом STM-256 - 40 Гбіт/с). На сьогодні в результаті дослідницької роботи досягнуто швидкість порядку 100 Гбіт/с [2]. Цю складову загальної швидкості описує перший множник (1). Подальший розвиток шляхом збільшення ємності каналу зв'язку зустрівся з технологічними обмеженнями щодо швидкості. Пошук шляхів подолання цього обмеження йшов за двома

перспективними напрямками. Один з них був пов'язаний з пошуком можливих шляхів подальшого збільшення швидкості передавання в одному каналі до 160, а потім і до 640 Гбіт/с. Він призвів до впровадження ідеї використання спеціальних імпульсів – солітонів в якості носіїв інформації та появи солітонних мереж зв'язу. Другий шлях був пов'язаний зі збільшенням сумарної пропускної здатності ОВ за рахунок використання в кожному волокні декількох оптичних несучих довжин хвиль. Це призвело до появи технології WDM – технології хвильового мультиплексування.

Таким чином подальше збільшення загальної швидкості передачі базується на технології з розділенням за довжиною хвилі або спектрального мультиплексування (WDM – wavelength division multiplexing) [3], що дозволяє збільшувати швидкості передачі інформації у ВОЛЗ за рахунок одночасної передачі по волокну декількох TDM каналів на різних довжинах хвиль. Ця складова загальної швидкості передачі описується множителем N_k (1).

Хвильове мультиплексування в оптичних системах передавання (WDM)

Отже поряд з часовим мультиплексуванням в оптичних системах зв'язу став використовуватись метод мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі, який називають також хвильовим або спектральним мультиплексуванням.

Суть методу хвильового мультиплексування полягає в об'єднанні декількох оптичних несучих на різних довжинах хвиль лі (на передаючій стороні) і передаванні отриманого сигналу Σ лі по одному ОВ з наступним розділенням несучих – кожна у своє волокно. Можливість впровадження ВОСП з використанням технології WDM на мережах зв'язу була реалізована за рахунок появи оптичних підсилювачів, які дозволяли проводити підсилення групового сигналу в оптичній формі без перетворення його в електричну форму. При цьому ширина діапазону, в якому можна розмістити несучі, визначається смугою підсилення, яка для волоконно-оптичного підсилювача (ВОП) з волокном, легованим ербієм, складає порядку 1530 – 1565 нм. Таким чином, це накладає обмеження на кількість каналів (несучих), які можна сформувати в межах цього частотного діапазону.

В свою чергу частотний план розміщення несучих надано в Рекомендації МСЕ G.694.1. Спочатку в основу проекту стандарту було покладено частотний план з рівномірним розташуванням несучих частот каналів з мінімальним кроком в 100 ГГц, який потім був зменшений до 50 ГГц. При цьому в діапазоні довжин хвиль від 1528,77 нм до 1560,61 нм, який відповідає смузі підсилення оптичного підсилювача, можна розташувати максимально 41 або 81 канал відповідно.

Наступним напрямком підвищення кількості каналів є подальше зменшення кроку несучих до 25 ГГц і навіть до 12,5 ГГц. Частоти несучих (в ГГц) можуть бути отриманими за допомогою узагальненої формули:

$$f = 193,1 \pm n \times f_s, \quad (2)$$

де f_s – крок частотної сітки в ТГц, а n – ціле число: 0, 1, ... m .

Використання такого малого кроку, як 12,5 ГГц, вимагає певних зусиль для підтримки стабільної частоти (довжини хвилі) несучої, температурні зміни якої повинні знаходитись в межах допусків Δf , встановлених стандартами. Ці допуски для різних швидкостей передавання та кроків частотної сітки можуть бути отримані на основі загальної нерівності, яка повинна виконуватись при виборі кроку частотної сітки f_s :

$$4\Delta f \leq f_s - 2B, \quad (3)$$

де B – швидкість передавання в Гбіт/с. Значення частоти надано в ГГц. На основі цього виразу можна отримати наступні оцінки верхньої границі допусків на нестабільність несучої частоти, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1.

Верхня границя допусків на нестабільність несучої частоти.

Крок частотного плану, ГГц	100	50	25	12,5
Швидкість передавання 2,5 Гбіт/с	23	11	5	1,8
Швидкість передавання 10 Гбіт/с	20	7	1,2	-
Швидкість передавання 40 Гбіт/с	5	-	-	-

Необхідно зауважити, що вираз не враховує ширину спектральної лінії лазера, яка для невеликих частотних кроків може мати суттєве значення, і цей факт необхідно мати на увазі. Основна енергія сигналу при імпульсній модуляції зосереджується в основній пелюстці спектру сигналу. Таким чином, можна вважати, що ширина спектру окремого оптичного каналу за рахуномодуляції складає $\delta f_c = \frac{2}{\tau}$, де τ – тривалість модулюючого імпульсу. При застосуванні коду NRZ це співвідношення можна записати у вигляді: $\delta f_c = 2B$, де B – швидкість передавання в каналі. Використання коду RZ призводить до уширення спектру сигналу, а отже - збільшення частотного ресурсу, що споживає ВОСП, при постійному значенні швидкості передавання. Таким чином, використання коду цього типу з точки зору економії частотного ресурсу не є бажаним.

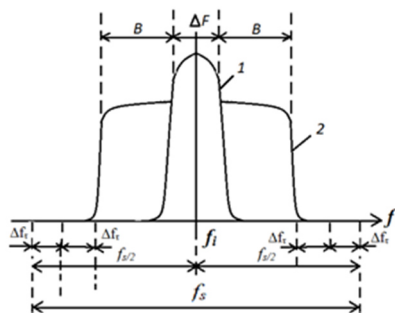


Рис. 1. Спектральні характеристики каналу зв'язку з несівною частотою f_l :
1 – спектральна лінія лазера; 2 – спектр модульованого сигналу; B – швидкість передавання; f_s – інтервал частот між сусідніми каналами; Δf_t – нестабільність частоти з часом ($\pm \Delta f_t$); ΔF – ширина спектральної лінії лазера

При побудові системи передавання зі спектральним розділенням каналів важливе значення має величина частотного інтервалу між каналами f_s , яка повинна включати в себе як ширину каналного спектру (для коду NRZ це $2B$), так і враховувати ширину спектральної лінії лазера ΔF . Крім того, необхідно взяти до уваги такий параметр, як нестабільність частоти з часом $\pm \Delta f_\tau$. Таким чином, інтервал між сусідніми каналами повинен бути не меншим за $2B + \Delta F + 2\Delta f_\tau$. І це граничний випадок, тому що, наприклад, вираз (3) запропоновано з запасом, який складає подвійний допуск на нестабільність несучої частоти. З урахуванням цього, кінцеве співвідношення буде мати вид (4) (рис. 1):

$$2B + \Delta F + 4\Delta f_\tau \leq f_s. \quad (4)$$

При цьому в діапазоні частот $f_{min_{max}}$ можна розмістити: N каналів, Тут E – ціла частина від числа в дужках.

Втрати частотного ресурсу на формування між каналних інтервалів в цьому випадку складатимуть:

$$N = E \left[\frac{f_{max} - f_{min}}{2B + \Delta F + 4\Delta f_\tau} \right], \quad (5)$$

$$\Delta f_v = N(\Delta F + 4\Delta f_\tau) = E \left[\frac{f_{max} - f_{min}}{2B + \Delta F + 4\Delta f_\tau} \right] (\Delta F + 4\Delta f_\tau).$$

При збільшенні швидкості передавання N прямує до одиниці, а відносні частотні втрати на формування між каналних інтервалів $\Delta f_v / (f_{min_{max}})$ зменшуються і прямують до значення $\Delta f_v / (f_{min_{max}}) \rightarrow (\Delta F + 4\Delta f_\tau) / (f_{min_{max}})$.

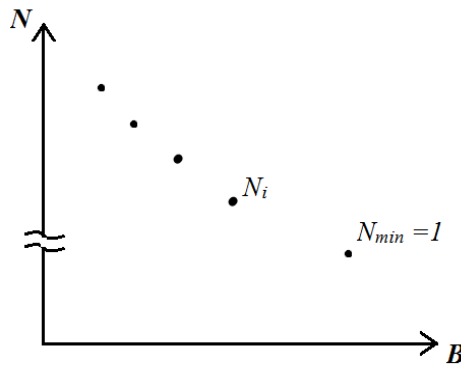


Рис. 2. Залежність кількості каналів у заданому діапазоні частот ($f_{min_{max}}$) від швидкості передавання в окремому каналі: f_{max} - верхня гранична частота діапазону; f_{min} - нижня гранична частота діапазону; N – кількість каналів; B – швидкість передавання

На протизагу частотним втратам на формування між каналних інтервалів можна визначити обернену величину – ефективність використання частотного ресурсу:

$(f_{min_{max}}) / \Delta f_v = (f_{min_{max}}) / (N(\Delta F + 4\Delta f_\tau))$, яка при збільшенні швидкості передавання прямує до значення $(f_{min_{max}}) / (\Delta F + 4\Delta f_\tau)$.

Якісний вигляд залежності кількості каналів від швидкості передавання наведено на рис.2:

Як видно з наведених даних, при збільшенні швидкості передавання V значення N зменшується і відповідно зменшуються втрати частотного ресурсу заданого діапазону при одночасному підвищенні інформаційно-пропускної здатності ВОСП. Таким чином, при фіксованому частотному діапазоні збільшення інформаційно-пропускної спроможності може бути досягнуто за рахунок зменшення числа каналів при одночасному збільшенні швидкості передавання в них. В граничному випадку це може бути один канал з максимальною швидкістю передавання :

$$B = \frac{f_{\max} - f_{\min} - \Delta F - 4\Delta f_r}{2} \quad (6)$$

Спектральна ефективність в цьому випадку також сягає максимуму за рахунок включення в ширину спектру сигналу, що передається, обмежень на ширину спектру ряду попередніх каналних сигналів, кожне з яких складає величину $\Delta F + 4\Delta f_r$.

Така побудова зв'язку дозволяє мінімізувати втрати частотного ресурсу на формування між каналного інтервалу. При цьому однією з технічних проблем є досягнення високої швидкості модуляції за досягненням якої, наприклад, між каналні інтервали у 12,5 ГГц [4] можуть бути замінені інтервалами у 25 ГГц, або навіть у 50 та 100 ГГц з відповідним зменшенням їх числа та втрат на між каналні інтервали. Значну увагу необхідно також приділити застосуванню лазерів з мінімально можливою шириною спектральної лінії. На цей час такими лазерами є лазерні діоди з розподіленим зворотнім зв'язком.

Перешкодами до збільшення швидкості передавання в каналі є наявність хроматичної дисперсії, вплив якої зростає зі збільшенням швидкості передавання. Збільшення швидкості передавання збільшує і вплив уширення імпульсів на режим передавання, що потребує використання в лінії компенсаторів дисперсії на базі компенсуючого волокна, або на основі волоконно-оптичних ґраток Бреґґа. Крім того, як було зазначено вище, завадами до збільшення швидкості є можливості сучасної електроніки. І в цьому напрямку проводяться відповідні роботи.

Також в останні роки активно ведуться роботи по використанню багатомодових (маломодових) волокон MMF для збільшення інформаційно-пропускної здатності ВОЛП. Цей фактор збільшення швидкості передачі описується множителем N_m .

Модове мультиплексування

На сьогоднішній день одержані результати по застосуванню модового мультиплексування в маломодових оптичних волокнах [2,5] (MDM – Mode Division Multiplexing – мультиплексування з розділенням по модам) свідчать про перспективність їх використання. Таке волокно підтримує малу кількість мод (2-3 моди), тому має перевагу в селективності і легкому управлінні

модовими спотвореннями. При використанні режиму мультиплексування мод і техніки цифрової обробки сигналу множинного вводу/виводу, N просторових мод в маломодовому волокні зможуть підтримувати в N разів більшу пропускну здатність, ніж в одномодовому. В експериментах модове мультиплексування досягалось в двомодовому волокні з різними комбінаціями мод, що підтримуються волокном; наприклад, LP01 і LP11 мод, двох вироджених LP11 мод (LP11a + LP11b), і в трьохмодовому режимі (моди LP01 + LP11a + LP11b).

Стандартне багатомодове волокно (MMF) підтримує понад сто мод, що створює великі труднощі для формування і обробки (селекції) оптичного сигналу. Маломодове волокно (FMF – Few Mode Fiber – маломодове волокно) підтримує невелику кількість мод, тому в порівнянні зі стандартним воно має потенціал для значного зменшення складності системи обробки.

Структурою системи передачі $N \times N$ MDM є N передавачів, які генерують каналні сигнали. Мультиплексування N сигналів досягається за допомогою модового мультиплексора. Сигнали, що передаються різними просторовими модами, об'єднуються в маломодовому волокні. Під час передачі, всі моди на одній і тій же довжині хвилі повинні бути оброблені як єдине ціле у вигляді MDM суперканала, а саме, вони посилюються, виводяться або вводяться одночасно без індивідуальної обробки мод. Після передачі по волокну, прийняті сигнали демультимплексуються модовими демультимплексорами.

Демультимплексовані сигнали потім детектуються N когерентними приймачами і перетворюються з оптичної в електричну форму. Електричні сигнали перетворюються в цифрові і обробляються за допомогою модуля цифрової обробки. Алгоритм MIMO (Multiple Input Multiple Output – множинний вхід, множинний вивід) використовується для компенсації модового зв'язку та/або перехресних перешкод в каналі, які можуть бути внесені мультиплексором/демультимплексором (MUX/DEMUX) або волокном. Очікується, що якщо MUX/DEMUX має унітарну функцію передачі з рангом N , що дорівнює кількості мод, підтримуваних FMF волокном, то пропускну здатність каналу може бути в N раз більше, ніж одномодової системі.

У такій системі передачі є три основні проблеми створення або вибору:

- 1) відповідного оптичного волокна;
- 2) конвертора мод з моди LP01 в моди вищого порядку і навпаки;
- 3) модового мультиплексора / демультимплексора.

Волокна для систем модового мультиплексування

Розглянемо першу проблему на прикладі двомодового оптичного волокна (TMF). Найпростіший спосіб зробити TMF полягає в розробці профілю показника заломлення волокна зі значенням нормованої частоти (V) вище, ніж для умови одномодового режиму ($V > 2,4$), але нижче, ніж для умови трьохмодового режиму ($V < 3,8$). TMF, яке використано в роботі [2], є спеціально виготовленим волокном, легованим германієм. Діаметр серцевини 11,9 мкм, номінальна зміна показника заломлення (Δn) $5,4 \times 10^{-3}$; довжина хвилі відсічення моди LP11 - 2323 нм і втрати 0,26 дБ / км. Волокно має

нормовану частоту $V = 3,62$. На рис.3 показана залежність індексу ефективного показника заломлення моди від довжини хвилі для цього волокна. У нижній частині малюнка показані виміряні модальні профілі для LP01 моди і двох вироджених LP11 мод. У верхній частині малюнка показаний ступінчастий профіль показника заломлення волокна. Передбачається, що диференціальну модову затримку (DMD) і загасання цього волокна може бути додатково зменшено шляхом оптимізації виготовлення.

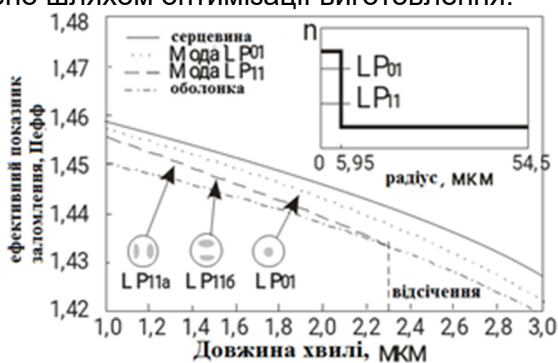


Рис. 3. Дисперсійні залежності для мод LP01 і LP11 двомодового волокна

Відомі й інші результати по розробці маломодових волокон з поліпшеними характеристиками [2]. Нещодавно розроблена конструкція TMF з низьким DMD, низьким рівнем зв'язку мод і малими втратами. У цьому волокні використана серцевина з градієнтним профілем показника заломлення і подвійною оболонкою, як показано на рис.4 [6]. Серцевина з градієнтним профілем показника заломлення сприяє зниженню DMD, а траншейна структура оболонки забезпечує низькі втрати для LP11 мод. DMD в гіршому випадку для мод LP11 і LP11 вимірюється такою малою величиною як 0,076 пс / м, а втрати для обох мод LP01 і LP11 нижче, ніж 0,2 дБ/км.

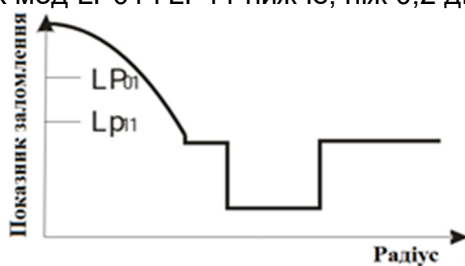


Рис. 4. Профіль показника заломлення градієнтного двомодового оптичного волокна з низькою DMD, низьким зв'язком мод і низькими втратами.

Модовий конвертер

Основне завдання модового конвертера (МК) полягає в перетворенні оптичних сигналів від моди LP01 до моди більш високого порядку (наприклад,

до моди LP11) і навпаки. Здійснити перетворення мод можна за допомогою довгоперіодної волоконної решітки (ДПВР) [7].

ДПВР є волоконно-оптичною структурою з періодичною зміною властивостей уздовж волокна. У цій структурі створюються умови резонансу для взаємодії декількох мод, що поширюються в одному напрямку. Період структури становить величину порядку частки міліметра, тому їх виготовлення досить просте, наприклад, можна виготовити решітку шляхом механічного тиску на двомодове волокно. Залежно від симетрії збурення, за допомогою якого створюється решітка, зв'язок може бути створений між модами різної симетрії.

У волокні, в якому підтримуються тільки дві моди (LP01 і LP11), резонансний зв'язок виникає в тому випадку, коли крок решітки Λ дорівнює довжині биття

$L_B = 2\pi/(\beta_{01} - \beta_{11})$, де β_{01} , β_{11} постійні поширення мод LP01 і LP11. На рис.5 показана фізична конструкція модового конвертора на основі ДПВР. Двомодове волокно, що використовується в конвертері, таке ж, як волокно передавання з довжиною хвилі коливань моди, $L_B = 524$ мкм.

Налаштувати крок решітки можна шляхом зміни кута перетинання волокна щодо решітки. В роботі використовуються металеві решітки з низькою точністю відстані між канавками (приблизно $\sim 0,5$ мм) з подальшою настройкою кроку решітки шляхом регулювання кута перетину волокна. Створено конвертер з номінальним 100% коефіцієнтом конверсії. Модовий коефіцієнт загасання конвертера є прийнятним з результатом 17 дБ і 22 дБ для моди LP11 для гірших і кращих поляризацій, відповідно (на довжині хвилі 1550 нм). Модовий коефіцієнт загасання визначається як відношення потужності моди LP11 і потужності моди LP01. Внесені втрати становлять близько 2 $\sim$ 3 дБ (LP01 + LP11).

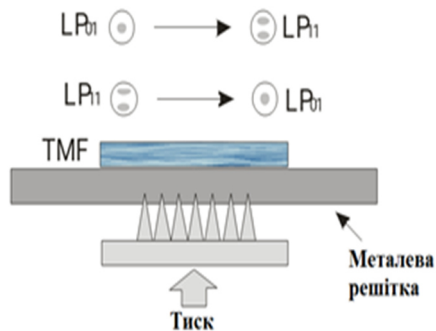


Рис. 5. Принципова схема LP01 / LP11 модового конвертора на основі ДПВР.

Ці та інші результати показують, що модові коефіцієнти загасання моди LP11 можуть підтримуватися на рівні 20 дБ з малою поляризаційною залежністю і низькими відносними втратами 1,5 $\sim$ 2,5 дБ для діапазону довжин хвиль шириною 13 нм з центром у 1551 нм.

Мультиплексор/демультиплексор

Або (MUX/DMUX), що виконує вирішальну функцію модового мультиплексування і де мультиплексування, було запропоновано в роботі [8]. Він виконаний шляхом висвітлення торцевої грані двомодового волокна трьома відповідним чином розміщеними плямами від SMF.

Такий модовий мультиплексор може бути розширений, щоб підтримувати більше мод шляхом використання більшої кількості відповідним чином розміщених плям.

Мультиплексор вводу/виводу в системах з модовим мультиплексуванням

У протяжних системах передачі з маломодовими волокнами, подібно тенденціям в оптичних мережах з одномодовими волокнами, збільшення ємності буде досягнуто за рахунок спектрального ущільнення (WDM). У таких системах, реконфігуровані оптичні мультиплексори введення/виведення (ROADM), які підтримують всі поширені моди, будуть ключовим елементом для реалізації гнучких мереж. В якості першого кроку на шляху до таких ROADM, в роботі [9] було запропоновано маломодовий оптичний мультиплексор вводу/виводу (OADM) і продемонстрована його робота введення/виведення спільно з MDM передачею. Архітектура маломодового волокна, сумісного з OADM, може бути схожа на його одномодові прототипи, так як модова залежність кута розходження променя в маломодовому волокні невелика, що забезпечує практичну реалізацію OADM, використовуючи компоненти вільного простору. Такі OADM можуть бути зменшені, а число портів введення/виводу може бути збільшено за допомогою прийнятих технологій, таких як MEMS (мікроелектромашинна система) і LCOS (технологія рідких кристалів на кремнієвій основі). В роботі наведено приклад двомодового OADM, сумісного з компонентами вільного простору, спроектованого і побудованого за допомогою коліматорів і пари тонкоплівкових фільтрів.

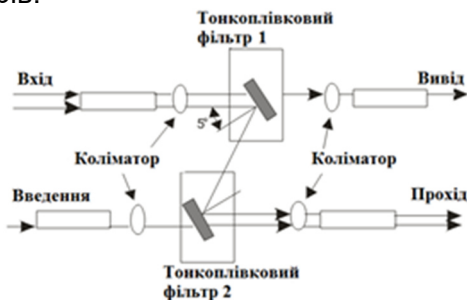


Рис. 6. Схематичне зображення двомодового OADM

На (рис. 6) показана архітектура OADM. Тонкоплівкова структура (TFF) виступає в якості смугового фільтра в моді передачі і в якості режекторного фільтра для відбитої моди. Використано дворазове відбиття, для того щоб

значно придушити канал виведення на виході, який в іншому випадку служить в якості внутрішньосмугової перехресної перешкоди для каналу введення. TFF нахилється на кут 5° для досягнення вторинного розподілу портів in/add (вхід/введення) і drop/through (вивід/прохід) в конфігурації подвійного відображення. Нахил 5° також запобігає спотворенням накопичених багаторазових відбиттів від портів виведення або введення.

Мультиплексування за поляризацією

Ущільнення потоків інформації може проводитися за допомогою оптичних несучих, що мають лінійну поляризацію (метод ущільнення по поляризації) [10]. При цьому площа поляризації кожної несучої повинна бути розташована під своїм кутом (рис.7) Мультиплексування здійснюється за допомогою спеціальних оптичних призм. Однак, поляризаційне ущільнення може працювати тільки тоді, коли в середовищі передачі відсутня оптична анізотропія (волокно не повинно мати локальних неоднорідностей і вигинів).

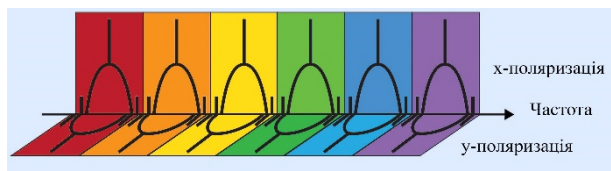


Рис. 7. Мультиплексування з використанням ортогональності за поляризацією

При використанні мультиплексування з розділенням за поляризацією, передаються два незалежних сигнали обох ортогональних поляризацій. Для відновлення цих поляризаційно мультиплексованих бітових потоків використовують або сплітер поляризацій променя, напрями поляризації яких постійно утримуються у відповідності з поляризаціями сигналу (контроль поляризації), або виявляються дві довільні ортогональні поляризації (розділення поляризацій) з використанням когерентного детектування.

При застосування ортогональних поляризацій інформаційно-пропускна здатність ВОЛП збільшується у два рази.

Волокна з багатьма серцевинами

Поряд з перерахованими способами можна використовувати просторове мультиплексування в явній формі, передаючи різні сигнали паралельним оптичними хвилеводами. Використання паралельних хвилеводів є привабливим при реалізації просторово обмежених систем (з'єднання стійки зі стійкою та коротші з'єднання). Інший вид просторового мультиплексування – використання багато серцевинних оптичних волокон. У волокнах з хвильовим та модовим мультиплексуванням виникає проблема обмеження потужності, пов'язана з нелінійними спотвореннями сигналу. Для подолання цього обмеження, проводяться дослідження і розробки багато серцевинних волокон (БСВ) [11]. Для таких волокон перехресні завади є одним з найбільш важливих

параметрів, і їх придушення має вирішальне значення для передачі сигналів. Показано, що низькі втрати і низькі перехресні завади, необхідні для ліній дальньої передачі, можуть бути досягнуті в зварних БСВ. При цьому оптичне волокно містить 7 серцевин, 6 яких розташовані симетрично навколо сьомої, що розташована по осі оптичного волокна. Значення множника N_s у виразі (1) дорівнює при цьому семи.

Висновки

Технології передавання з часовим розділенням каналів, що з'явилися першими, на сьогодні значно вичерпали свій інформаційно-пропускний ресурс і тепер взаємодіють в напрямку його нарощування з технологіями хвильового мультиплексування. Крім того за останній час з'явилися нові напрямки підвищення інформаційно-пропускної здатності, які базуються на досягненнях своїх попередників. Це, зокрема, технологія модового мультиплексування, мультиплексування за поляризацією, та поява оптичних волокон з багатьма серцевинами, яку можна вважати в значній мірі революційною, оскільки вона підвищує інформаційно-пропускну здатність в сім разів, а в майбутньому ця цифра може бути переглянута ще в більшу сторону. Причому, вона не потребує таких обмежень та умов, які накладаються на оптичні волокна, призначені для маломодового режиму, або для мультиплексування за поляризацією. На додаток до цього, значний резерв для нарощування інформаційно-пропускної здатності являють собою складні формати модуляції, які дозволяють значно підвищити спектральну ефективність ВОСП.

Література

1. Каток, В.Б. Модовое мультиплексирование в волоконно-оптической связи / В.Б. Каток, С.Е. Марков, А.А. Манько // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2014. – №4. – С.61 – 67.
2. Salsi, M. Transmission at 2x100Gb/s, over Two Modes of 40km-long Prototype Few-Mode Fiber, using LCOS based Mode Multiplexer and Demultiplexer / M. Salsi, C. Koebele, D. Sperti, P. Tran, P. Brindel, H. Mardoyan, S. Bigo, A. Boutin, F. Verluise, P. Sillard, M. Bigot-Astruc, L. Provost, F. Cerou, G. Charlet // Optical Fiber Communication Conference. – OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), paper PDPB9.
3. Жирар, Андре. Руководство по технологии и тестированию систем WDM [Текст]: пер. с англ. / Андре Жирар. – М.: EXFO, 2001. – 264 с.
4. ITU-T Recommendation G.694.1 (06/02) Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid.
5. Li, A. Reception of Mode and Polarization Multiplexed 107-Gb/s CO-OFDM Signal over a Two-Mode Fiber / A. Li, A. Amin Al, X. Chen, W. Shieh // Optical Fiber Communication Conference. – OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2012), paper PDPB8.
6. Gruner-Nielsen, L. Few Mode Transmission Fiber with low DGD, low Mode Coupling and low Loss / L. Gruner-Nielsen, Y. Sun, J. W. Nicholson, D. Jakobsen, Lingle, B. Palsdottir // Optical Fiber Communication Conference. – OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2012), paper PDP5A.1.
7. Иванов, О. В. Оболочечные моды волоконных световодов и длиннопериодные волоконные решетки [Текст] / О. В. Иванов, С. А. Никитов. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 252 с.

8. Ryf, R. Low-Loss Mode Coupler for Mode-Multiplexed transmission in Few-Mode Fiber / R. Ryf, M. A. Mestre, A. Gnauck, S. Randel, C. Schmidt, R. Essiambre, P. Winzer, R. Delbue, P. Pupalais, A. Sureka, Y. Sun, X. Liang, D. Peckham, A.H. McCurdy, R. Lingle // Optical Fiber Communication Conference. – OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2012), paper PDP5B.5.
9. Chen, X. Reception of Dual-LP11-Mode CO-OFDM Signals through Few-mode Compatible Optical Add/Drop Multiplexer / X. Chen, A. Li, J. Ye, A. Amin Al, W. Shieh // Optical Fiber Communication Conference. – OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2012), paper PDP5B.4.
10. Манько, О. Обробка оптичних сигналів та ефективність систем зв'язку / О. Манько, С. Марков, І. Меліщук // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2016. – №2(42) С.44-50.
11. Hayashi, T. Ultra-Low-Crosstalk Multi-Core Fiber Feasible to Ultra-Long-Haul Transmission / T. Hayashi, T. Taru, O. Shimakawa, T. Sasaki, E. Sasaoka // Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America). – 2011. – Paper PDPC2.

References

1. Katok, V.B. Modovoe multipleksirovanie v volokonno-opticheskoy svyazi / V.B. Katok, S.E. Markov, A.A. Man'ko // Telekomunikacijni ta informacijni tekhnologii. – 2014. – №4. – С.61 – 67.
2. Salsi, M. Transmission at 2x100Gb/s, over Two Modes of 40km-long Prototype Few-Mode Fiber, using LCOS based Mode Multiplexer and Demultiplexer / M. Salsi, C. Koebele, D. Sperti, P. Tran, P. Brindel, H. Mardoyan, S. Bigo, A. Boutin, F. Verluise, P. Sillard, M. Bigot-Astruc, L. Provost, F. Cerou, G. Charlet // Optical Fiber Communication Conference. – OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), paper PDPB9.
3. ZHirar, Andre. Rukovodstvo po tekhnologii i testirovaniyu sistem WDM [Tekst]: per. s angl. / Andre ZHirar. – М.: EXFO, 2001. – 264 s.
4. ITU-T Recommendation G.694.1 (06/02) Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid.
5. Li, A. Reception of Mode and Polarization Multiplexed 107-Gb/s CO-OFDM Signal over a Two-Mode Fiber / A. Li, A. Amin Al, X. Chen, W. Shieh // Optical Fiber Communication Conference. – OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2012), paper PDPB8.
6. Gruner-Nielsen, L. Few Mode Transmission Fiber with low DGD, low Mode Coupling and low Loss / L. Gruner-Nielsen, Y. Sun, J. W. Nicholson, D. Jakobsen, R. Lingle, B. Palsdottir // Optical Fiber Communication Conference. – OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2012), paper PDP5A.1.
7. Ivanov, O. V. Obolochetnye mody volokonnyh svetovodov i dlinnoperiodnye volokonnye reshetki [Tekst] / O. V. Ivanov, S. A. Nikitov. – Moskva : FIZMATLIT, 2012. – 252 c.
8. Ryf, R. Low-Loss Mode Coupler for Mode-Multiplexed transmission in Few-Mode Fiber / R. Ryf, M. A. Mestre, A. Gnauck, S. Randel, C. Schmidt, R. Essiambre, P. Winzer, R. Delbue, P. Pupalais, A. Sureka, Y. Sun, X. Liang, D. Peckham, A.H. McCurdy, R. Lingle // Optical Fiber Communication Conference. – OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2012), paper PDP5B.5.
9. Chen, X. Reception of Dual-LP11-Mode CO-OFDM Signals through Few-mode Compatible Optical Add/Drop Multiplexer / X. Chen, A. Li, J. Ye, A. Amin Al, W. Shieh // Optical Fiber Communication Conference. – OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2012), paper PDP5B.4.
10. Manko, O. Obrobka optychnykh syhnaliv ta efektyvnist system zviazku / O. Manko, S. Markov, I. Melishchuk // Naukovi zapysky Ukrainskoho naukovo-doslidnoho instytutu zviazku. – 2016. – №2(42) S.44-50.
11. Hayashi, T. Ultra-Low-Crosstalk Multi-Core Fiber Feasible to Ultra-Long-Haul Transmission / T. Hayashi, T. Taru, O. Shimakawa, T. Sasaki, E. Sasaoka // Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America). – 2011. – Paper PDPC2.