

УДК 691.7.068.4  
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/08>

**Омецинська Н.В.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**Гуйда О. Г.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**Вишемірська Я.С.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**Мінаєва Ю.Ю.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

## АНАЛІЗ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙНИХ ТРАКТІВ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ТЕХНОЛОГІЙ TDM, WDM, UDWDM ТА СОЛІТОННИХ СИСТЕМ

*Поряд з основними чинниками, що викликають спотворення оптичних імпульсів при високошвидкісній передачі цифрових даних, таких як згасання потужності оптичного сигналу, поляризаційна дисперсія моди, нелінійні ефекти, вагомим чинником є хроматична дисперсія.*

*Актуальною проблемою, що потребує систематичного вирішення при модернізації існуючих та розбудові нових ВОЛЗ, є попередній вибір лінійного оптичного волокна (ОВ) з потрібними передавальними характеристиками. Поставник пропонує різні типи одномодових ОВ, які істотно різняться за своїми характеристиками та вартістю. При виборі ОВ потрібно враховувати не тільки дисперсійні характеристики волокна (хроматична дисперсія і нахил хроматичної дисперсії), але й такі характеристики як діаметр поля моди та ефективну площу, коефіцієнт згасання оптичної потужності та локальні втрати потужності сигналу за рахунок оптичного випромінювання на макровигинах волокна. Передавальні характеристики оптичного волокна залежать від його конструктивних параметрів – профілю показника заломлення (ППЗ) в поперечному перерізі волокна. Оптичні волокна із заданим профілем показника заломлення (ПЗ) виготовляються із компонентного кварцового скла за добре відпрацьованими на даний час технологіями. Однак, через високу вартість технологічного пошуку конструктивних параметрів волокон з наперед заданими передавальними характеристиками, важливим є попереднє математичне моделювання потрібного волокна. Повний аналіз передавальних характеристик одномодового ОВ може бути виконаним за відомої спектральної залежності коефіцієнта фази напрямленої волоконом моди та розподілу в поперечному перерізі волокна її електромагнітного поля. Ці величини знаходяться в результаті розв'язання хвильових рівнянь, для яких немає точного аналітичного розв'язку, за довільного профілю ПЗ, тому застосовуються наближені методи їх розв'язання. Ефективність попереднього математичного моделювання волокна з наперед заданими передавальними характеристиками суттєво підвищується, якщо при числовому програмному підході до аналізу передавальних характеристик ООВ застосовується методика багатofакторного перебору параметрів профілю ПЗ.*

**Ключові слова:** *однохвильовий волоконно-оптичний канал, технологія WDM, TDM-сигнал, щільного хвильового мультиплексування*

**Постановка проблеми.** Як відомо, одним із способів збільшення пропускної здатності однохвильового волоконно-оптичного каналу, організованого за технологією TDM розділення різних сигналів в часі (Time Division Multiplexing – накладання розділене в часі), є збільшення швидкості передавання даних, значення якої обмежується

дисперсійними явищами у волоконно-оптичному світловоді (дисперсія хроматична і дисперсія поляризованої моди) та швидкодією електронних компонент системи передачі.

У технології WDM (Wavelength Division Multiplexing – ущільнення за довжинами хвиль, або Спектральне ущільнення каналів передачі),

немає багатьох обмежень і технологічних труднощів, властивих технології TDM. Для підвищення пропускної здатності, замість збільшення швидкості передавання в однохвильовому каналі, як це реалізовано в технології TDM, в технології WDM збільшують число каналів (кожний канал на своїй довжині хвилі), які використовують для одночасного передавання різних сигналів по одному і тому самому волокну. Отже, на кожній носійній довжині хвилі в системі WDM може передаватися ТДМ-сигнал. Системи передачі, побудовані за цим принципом, гібридними системами TWDM. На практиці вживають також і термін: ВОСП зі спектральним ущільненням каналів (ВОСП СРК).

В основі технології спектрального розділення – створення сукупності каналів, кожен з яких передається на своїй довжині носійної хвилі з використанням за середовище передавання одного й того самого оптичного волокна та наступним розподілом сигналу кожного каналу на свій приймач.

Система WDM багато в чому схожа на традиційну систему TDM. Сигнали різних довжин хвиль, що генеруються декількома оптичними передавачами, об'єднуються оптичним мультиплексором (OM – Optical Multiplexer, MUX (Multiplexer)) в багатоканальний груповий оптичний сигнал. При великих відстанях передачі групового сигналу, на лінії зв'язку встановлюється один або декілька оптичних підсилювачів. Демультимплексор DEMUX (Demultiplexer) приймає об'єднаний сигнал, виділяє з нього початкові канали різних довжин хвиль і спрямовує їх на відповідні фотоприймачі. На проміжних вузлах деякі канали можуть бути додані або виділені з об'єданого сигналу за допомогою мультиплексорів введення/виведення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження способів підвищення пропускної здатності волоконно-оптичних лінійних трактів при застосуванні технологій tdm, wdm, udwdm та солітонних систем висвітлюється в роботах І.-В. О. Сергієнко, О.О. Манько.

**Постановка завдання.** Провести аналіз способів підвищення пропускної здатності волоконно-оптичних лінійних трактів при застосуванні технологій tdm, wdm, udwdm та солітонних систем.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Теоретично можлива передача в будь-якому оптичному діапазоні довжин хвиль, проте тривалий час практичні обмеження залишали для використання в системах WDM порівняно вузький діапазон в околі довжини хвилі 1550 нм, оскільки оптичні підсилювачі на волокнах, легованих

ербієм (EDFA – Erbium-Doped Fiber Amplifier), працюють саме в цьому діапазоні. У разі використання EDFA відбувається підсилення групового WDM сигналу без корекції його форми. Підсилювачі EDFA забезпечують безпосереднє посилення оптичних сигналів, без їх перетворення в електричні сигнали та в зворотньому напрямку (демодуляція), мають низький рівень шумів, а їх робочий діапазон довжин хвиль практично точно відповідає вікну прозорості кварцового оптичного волокна. Саме завдяки появі підсилювачів з таким поєднанням якостей, лінії зв'язку і мережі на основі систем DWDM (стали економічно привабливими).

Підсилювач EDFA складається з відрізка волокна, легованого ербієм. В такому волокні сигнали певних довжин хвиль можуть посилюватися за рахунок енергії зовнішнього випромінювання накачування.

В простих конструкціях EDFA посилення відбувається в достатньо вузькому діапазоні довжин хвиль – приблизно від 1525 нм до 1565 нм. В ці 40 нм уміщається декілька десятків каналів DWDM.

Розробка різних схем накачування потужності дозволила створити підсилювачі EDFA з розширеним робочим діапазоном від 1570 нм до 1605 нм (L-діапазон). Такі підсилювачі також називають довгохвильовими підсилювачами LWEDFA (Long Wavelength EDFA).

Необхідність ефективно використовувати прокладений кабель привела до значного збільшення числа каналів, що передаються по одному волокну, і до зменшення частотного інтервалу між ними. Системи з частотним інтервалом  $\Delta$  між каналами, що дорівнює 100 ГГц ( $\Delta\lambda \approx 0,8$  нм на довжині хвилі 1550 нм) і менше називають системами щільного хвильового мультиплексування DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). При цьому системи з більшим інтервалом частот між каналами називають системами CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) або системами грубого хвильового мультиплексування; зазвичай до них застосовують також і назву – системи WDM. Сучасні WDM системи на основі стандартного частотного плану (ITU-T Rec. G.692) можна поділити на три групи:

- грубі WDM (Coarse WDM – CWDM) – системи з шириною каналу не менше 200 ГГц, що дають змогу мультиплексувати не більше 16 каналів.

- щільні WDM (Dense WDM – DWDM) – системи з шириною каналу не меншого 100 ГГц, що дають змогу мультиплексувати не більше 32 каналів.

– високощільні WDM (High Dense WDM – HDWDM) – системи з шириною каналів 50 ГГц і менш, що дають змогу мультиплексувати не менше 64 каналів. (ITU-T Rec. G.692, ITU-T Rec. G.694.1, ITU-T Rec. G.694.2).

В стані лабораторних випробовувань та сертифікації перебуває UDWDM (Ultra Dense Wave Division Multiplexing) – для яких є можливою пропускна здатність до 1 Tbit/s по єдиному волокну використовуючи тільки одне спектральне вікно C.

В лабораторних умовах досягнуто використання 84 каналів з шириною розділення 1,5 ГГц. Подібні результати свідчать про можливість подальшого спектрального ущільнення каналів, яка відповідає 1/64 прийнятої на сьогодні 100 ГГц частотної сітки. Однак, подібне UDWDM ущільнення ставить вимогу надзвичайно високої стабільності до збереження довжини хвилі, що і є основним предметом нашої дисертації.

Сучасні тенденції розвитку телекомунікацій свідчать про перспективність волоконнооптичних систем передачі, в яких поєднуються часове мультиплексування TDM одного з рівнів: STM-16 на 2,5 Гбіт/с; STM-64 на 10 Гбіт/с; STM-256 на 40 Гбіт/с – який на сьогоднішній день у сукупності з попередніми стандартами є широко застосованим в індустрії; а також і STM-1024 на 160 Гбіт/с в межах однієї довжини хвилі, і хвильове мультиплексування WDM. На систему передачі, що використовує ці технології, накладаються їхні сумарні обмеження. З одного боку, швидкість передачі окремої TDM системи, що входить складовою частиною у WDM систему, визначає максимальну довжину лінійного тракту (дистанцію між передавачем та приймачем), для конкретного типу лінійного оптичного волокна з конкретними дисперсійними характеристиками. При цьому використання WDM технології дозволяє у N разів збільшити пропускну здатність одного волокна, де N – кількість спектральних каналів у об'єднаному сигналі.

Зауваження (для усунення неоднозначності трактування терміна). Пропускна спроможність волоконно-оптичного тракту оцінюється величиною добутку швидкості передачі бітів, B, на дистанцію передачі L між оптичним передавачем та приймачем. Вимірюється відповідно в км\*Гбіт/с. Це для однієї носійної хвилі. За передачі по одному оптичному каналу сигналу TDM із швидкістю передачі SDH-системи (Synchronous digital hierarchy – синхронна цифрова ієрархія), що використовує рівень STM-64 (Synchronous transport module – синхронний транспортний модуль рівня

STM-64), тобто 10 Гбіт/с, на відстань 100 км, маємо величину пропускної спроможності лінійного тракту в 1000 (км\*Гбіт/с). Для порівняння: для лінійного тракту на багатомодовому волокні вибором оптимального градієнтного профілю показника заломлення (цей профіль описується розподілом вздовж діаметра поперечного перерізу ОВ показника заломлення і формується процесі промислового виробництва волокна) мінімізують міжмодову дисперсію і досягають найбільших значень пропускної спроможності до 2 (км\*ГГц). Якщо передається груповий сигнал з розділенням каналів за довжиною носійних хвиль, то говорять лише про сумарну швидкість передачі по одному волокну, яка збільшується пропорційно до числа цих каналів: 128 каналів x 10 Гбіт/с дають сумарну швидкість 128 Тбіт/с.

Для підвищення пропускної спроможності лінійного тракту необхідно використовувати оптичне волокно з меншим коефіцієнтом D [пс/(нм·км)] хроматичної дисперсії. І в одноканальних TDM системах це застосовується. Зокрема, використовують оптичне волокно з якомога меншим коефіцієнтом хроматичної дисперсії на робочій довжині хвилі.

Однак, у WDM системах має місце нелінійна взаємодія між окремими каналами (її інтенсивність сягає максимуму при нульовому коефіцієнті хроматичної дисперсії волокна), а також й нелінійні ефекти хроматичної, фазової та поляризаційної дисперсії.

Серед нелінійних ефектів у першу чергу слід виділити чотирихвильове змішування: якщо система WDM використовує носійні частоти  $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ , чотирихвильове змішування викликає появу нових сигналів на частотах  $2f_i - f_j$ , та  $f_i + f_j - f_k$ . Ці сигнали виникають як перехресні перешкоди по відношенню до існуючих сигналів та збільшуються зі зменшенням інтервалів між каналами, причому у волокнах з меншою дисперсією вплив перехресних перешкод підсилюється. Ці комбінаційні складові можуть стати причиною підвищення коефіцієнта помилок на приймачі сигналу. Окрім цього, за рахунок нелінійних перетворень зменшується енергія корисного сигналу, і ці втрати можуть призвести до зменшення довжини регенераційної дільниці за потужністю.

Таким чином, хроматична дисперсія відіграє ключову роль в ослабленні впливу нелінійних явищ, – її збільшення веде до зменшення нелінійних перетворень, які характеризуються появою «паразитних» сигналів. З іншого боку – збільшення дисперсії призводить до зменшення максимальної

довжини лінійного тракту. Отже, системи WDM потребують застосування оптичних волокон з компромісними дисперсійними характеристиками, при цьому значення дисперсії в робочому діапазоні хвиль WDM системи повинне бути досить малим, але не дорівнювати нулю. Такі типи оптичних волокон були створені і отримали назву волокон з ненульовою зміщеною дисперсією, NZDSF (non-zero dispersion shift fiber). Як приклад можна навести волокно True Wave фірми Lucent Technologies та волокна SMF-LS і LEAF™ фірми Corning. В цих волокнах довжина  $\lambda_{0*}$  хвилі нульової дисперсії (величина D коефіцієнта хроматичної дисперсії має нульове значення) зміщується за межі вікна 1550 нм ( до 1565, 1565-1620), внаслідок чого дисперсія стає достатньо великою, щоб подавити впливу чотирихвильового змішування, і разом з тим достатньо малою, щоб не накладати жорсткого обмеження на дистанцію передачі, спричиненого розширенням імпульсу в часі.

У технології TDM пропускна здатність збільшується виключно за рахунок збільшення швидкості передачі бітів. Наскільки великою може бути зроблена ця швидкість – в межах певних фундаментальних обмежень оптичного волокна – залежить від електронних компонентів, що використовуються. Щоб одержувати дані від кожного джерела, зберігати їх, передавати протягом відповідних часових інтервалів, зчитувати і коректно доставляти користувачу, потрібне застосування цифрових інтегральних схем. Переважна більшість цих цифрових компонент повинна працювати зі швидкістю, що дорівнює або є близькою до швидкості передачі системи TDM. Не зважаючи на те, що швидкодія електронних пристроїв продовжує рости, технологія TDM завжди матиме обмеження через необхідність установки найсучаснішого устаткування.

До термінального електронного устаткування для каналів на окремих довжинах хвиль системи WDM висуваються певні вимоги, як і в системах TDM. Однак, електронне устаткування в окремому спектральному каналі повинне підтримувати тільки швидкість передачі по цьому каналу, а не сумарну швидкість групового сигналу. Таким чином, повна пропускна здатність лінії зв'язку не обмежена явно швидкістю роботи електронних пристроїв, що використовуються. За необхідності, повну пропускну здатність можна збільшити у будь-який момент, додавши в існуючу систему WDM декілька додаткових спектральних каналів.

Отже, максимально швидкісну лінію зв'язку TDM, яку тільки можна створити з використан-

ням найсучаснішого електронного обладнання, в системі WDM можна впровадити як один з багатьох спектральних каналів.

На останок варто згадати спроби використати властивість солітонного розповсюдження хвильового пакету та спроби їх використання в ВОЛЗ.

Зі збільшенням швидкості передачі вчені зіткнулися з низкою технологічних складностей, подолання яких мусіло задовольняти ряд взаємовиключних вимог, щодо ширини (12 пс), стійкості одиночного імпульсу, а також потужності такого генерованого імпульсу, з метою його передавання на десятки кілометрів без частого підсилення та корекції. Солітони, відкриті в 19-тому столітті, як явище в пружному середовищі – хвильові пакети спеціальної форми, які розповсюджуються в сильно-дисперсному середовищі на великі відстані без істотних втрат в потужності та формі. Подібні хвильові пакети стало можливо створювати і для оптичних хвиль, з застосування світлодіодних лазерів накачки. На початку 90-х років 20-го століття були отримані результати 320 Гб/с на довжині регенераційного відрізка більше ніж тисяча кілометрів. При чому досягалося не лише збереження форми і потужності, але і відсутність спотворення характеристик імпульсів при зіткненні солітонів, що демонструвало властивості, характерні для частинок.

**Висновки.** По при видатні властивості солітонних імпульсів були виявлені декілька обмежень, які призвели до гальмування розробок оптосолітонних ліній зв'язку.

При збільшенні швидкості передачі, відстань між інформаційними імпульсами, якими в даному випадку є солітон, зменшується. При малій відстані не вдається уникнути взаємодій між солітонами, що призводить до колапсу останніх. Іншими перешкодами застосування солітонів є притаманні їм явища шуму когерентного підсилення (ефект Гордона–Хауса), та акумуляція підсиленого спонтанного випромінювання (ASE).

Без застосування спеціальних заходів вдалося забезпечити передачу солітонним системим імпульсів шириною дл 2пс, зі швидкістю 40 Гб/с без істотного ефекту взаємодії. Застосовуючи спеціальні заходи, як то модуляцію амплітуди сусідніх солітонів, та їх поляризацію в ортогональних площинах, можна довести характеристики до 160 Гб/с на 250 км. Що не перевищує показників для стандартних волокон зіз використанням супергаусового, чи нюквістового імпульсу.

На додачу, широке розповсюдження методики попередньої частотної модуляції (ПЧМ, або чір-

пудання), порушує баланс між дисперсійними та нелінійними ефектами, які необхідні для існування солітонів. Таким чином ці два підходи на сьогоднішній день є взаємовиключними, з очевидною перевагою методів чірпування та пасивної компенсації дисперсії.

#### Список літератури:

1. Власов О. М. Підвищення пропускної спроможності волоконно-оптичних лінійних трактів на одномодових світловодах / О. М. Власов, Н. В. Омецинська, Іван-В. О. Сергієнко // Матеріали VII наукової конференції ДУІКТ «Сучасні тенденції розвитку технологій в інфокомунікаціях та освіті», Харків, 25–26 листопада, 2010. С. 132–137.
2. Манько А.А. Методы улучшения дисперсионных характеристик спектрально-селективных оптических элементов на основе рассеяния света // Зв'язок. 2012. № 4. С. 32–35
3. Sergijenko Ivan-V. Optimal values of chirp parameter of optical transmitters to compensation of the chromatic dispersion in tracts / Ivan-V. Sergijenko, Natalia Ometsyns'ka // Матеріали 6-й Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2010», 19–24 апреля 2010. Севастополь. 2010. С. 47.
4. О.М. Власов, Н.В.Омецинська, І.О. Сергієнко. Дисперсія поляризованої моди у волоконно-оптичних лініях зв'язку // Зв'язок. Київ, 2011 р. № 4. С. 15–22.

#### **Ometsynska N.V., Guida O.G., Vyshemirska Ya.S., Minaieva Yu.Yu. ANALYSIS OF THE METHODS OF INCREASE THE BAND CAPACITY OF FIBER-OPTIC LINE TRACTS USING THE TECHNOLOGIES OF TDM, WDM, UDWDM AND SOLITON SYSTEMS**

*Along with the main factors that cause the distortion of optical pulses during high-speed digital data transmission, such as optical signal power attenuation, polarization mode dispersion, nonlinear effects, chromatic dispersion is an important factor.*

*An urgent problem that requires a systematic solution in the modernization of existing and construction of new optical fiber lines is the preliminary selection of a linear optical fiber (OL) with the required transmission characteristics. The supplier offers different types of single-mode OBs, which differ significantly in their characteristics and cost. When choosing an OB, it is necessary to take into account not only the dispersion characteristics of the fiber (chromatic dispersion and the slope of the chromatic dispersion), but also such characteristics as the diameter of the mode field and the effective area, the attenuation coefficient of the optical power and local losses of the signal power due to optical radiation at the macrobends of the fiber. The transmission characteristics of an optical fiber depend on its design parameters – the profile of the refractive index (RI) in the cross-section of the fiber. Optical fibers with a given refractive index (RI) profile are manufactured from component quartz glass using currently well-proven technologies. However, due to the high cost of the technological search for design parameters of fibers with predetermined transmission characteristics, preliminary mathematical modeling of the desired fiber is important. A complete analysis of the transmission characteristics of a single-mode OV can be performed based on the known spectral dependence of the phase coefficient of the mode directed by the fiber and the distribution of its electromagnetic field in the cross section of the fiber. These quantities are the result of solving wave equations for which there is no exact analytical solution, for an arbitrary profile of the software, therefore, approximate methods of their solution are used. The effectiveness of the preliminary mathematical modeling of the fiber with predetermined transmission characteristics is significantly increased if the method of multifactor selection of the parameters of the PZ profile is used in the numerical program approach to the analysis of the transmission characteristics of the fiber optic cable.*

**Key words:** *single-wave fiber optic channel, WDM technology, TDM signal, dense wave multiplexing.*