

ведеться, а значення ДГЗ не є мінімальним. Переважно за зменшення динаміки (збільшення часу, протягом якого ОВ не змінюється) спостерігається зростання ефективності використання методу мінімізації. Якщо довжина ОВ зростає, то спостерігається переміщення оптимального значення також в бік збільшення.

Отже, для ОВ заданої довжини за постійної динаміки існує така кількість еліпсів поляризації вхідного сигналу, для якої поляризаційно-модова дисперсія буде мінімальною. Для конкретного волокна цей параметр (кількість вхідних сигналів) потрібно підбирати, тому що для різних волокон він також відрізняється (лежить в межах 15–30 точок).

Висновки

Оптичне волокно, що складається з N двозаломлюючих сегментів по-різному модифікує вхідне світлове випромінювання різних довжин хвиль (оптичних несучих системи DWDM), що і призводить до виникнення різних значень ДГЗ.

Для ОВ заданої довжини за постійної динаміки існує такий еліпс поляризації вхідного сигналу, для якого поляризаційно-модова дисперсія буде мінімальною.

На основі досліджень залежності диференціальної групової затримки від довжини хвилі і еліпса поляризації вхідного сигналу запропоновано схему мінімізації ПМД оптичного лінійного тракту системи з спектральним ущільненням каналів зі зворотним зв'язком і модулятором вхідного випромінювання, використання якої дає змогу зменшити поляризаційно-модову дисперсію у 4–7 разів залежно від динаміки зміни оптичного волокна.

На основі результатів дослідження залежності ефективності методу від динаміки зміни оптичного волокна можна зробити висновок, що чим менша швидкість зміни параметрів оптичного волокна, тим вища ефективність використання запропонованого методу мінімізації ПМД.

1. Шерклифф У. Поляризований світ. – М., 1965. 2. Убайдулаев Р.Р. Волоконно-оптичні мережі. – М., 2000. 3. Чернихівський Є.М., Климаш М.М. Моделювання і дослідження поляризаційно-модової дисперсії оптичного волокна: Матеріали міжнародної конференції COMINFO–2005.

УДК 681.32.03

М.М. Климаш, І.В. Демидов, І.Б. Чайковський
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра телекомунікацій

АНАЛІЗ КОНФІГУРАЦІЇ ТА ПАРАМЕТРІВ DWDM СИСТЕМ ОПТИЧНИХ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРАКТІВ

© Климаш М.М., Демидов І.В., Чайковський І.Б., 2006

Розглянуто проблеми аналітичної оцінки якості функціонування DWDM-систем і запропоновано шляхи оптимізації параметрів оптичних DWDM-трактів на основі програмної моделі.

The problems of an analytical estimation of DWDM systems' operation quality are considered and the ways of DWDM baseband transmission paths parameters optimization on the basis of programmatic model are proposed.

Вступ

Оцінка якості передавання інформації у системі з оптичним частотним ущільненням необхідна під час проектування оптичного обладнання на стадії розробки оптичних компонентів та

волокон. Здійснення контролю за конфігурацією активного та пасивного типів обладнання, за умови системно-технічного підходу до проектування систем зв'язку, дає змогу отримати адекватну оцінку поведінки DWDM системи. Це має особливе значення, коли, як один з компонентів системи, планується використання обладнання, що теоретично здатне забезпечити збільшення пропускної здатності, але водночас виникають сумніви щодо можливого негативного впливу на властивості та погіршення загальних характеристик якості передавання системи.

Розгляд питань ефективного використання обладнання для досягнення максимальної теоретично можливої пропускної здатності сегмента глобальної транспортної мережі неможливий без заглиблення у фізичний аналіз оптичних процесів у волокнах оптичного тракту загалом.

Внаслідок того, що в системах спектрального розділення каналів використовується обладнання, яке не є ідеальним з фізичної точки зору та має визначені допуски, тією чи іншою мірою виникають паразитні перехресні завади між каналами, які мультиплекуються.

Варто звернути увагу на те, що виграш за перехресними завадами, у ВОСП-СР у кінцевому підсумку є визначальним щодо формування економічних співвідношень – вартості обладнання, що застосоване по відношенню до технічних параметрів (швидкості та якості передавання) системи.

Із збільшенням кількості каналів, які ущільнюються у системах волоконно-оптичного зв'язку, окрім зростання складності дотримання необхідних частотних параметрів, спостерігається багато ефектів у компонентах тракту (волокні), що не дають можливості інженерові-проектувальнику провести розрахунок енергетики волоконно-оптичної системи передачі зі спектральним розділенням каналів (ВОСП-СР).

Аналіз якості передавання DWDM систем

Багато методик, наприклад [1], пропонують враховувати неузгодженості параметрів оптичних компонентів у системах з частотним оптичним розділенням каналів (ОЧПК) за допомогою так званих оптичних штрафів в енергетичному бюджеті оптичного тракту. Виникає однак справедливе запитання: Чи може емпірична, у багатьох випадках, формула відобразити необхідне фізичне явище із достатньою точністю?

Запропонований у цій роботі підхід до розрахунків якісних характеристик системи містить елементи декомпозиції там, де це можливо зробити, і елементи рекомпозиції для проектування систем із набору оптичних компонентів зі сталими або в певних межах змінними параметрами.

Найбільш характерним для магістральних оптичних DWDM трактів є оптичний підсилювач (наприклад, типу EDFA). Доволі високий (20–25 дБ) коефіцієнт підсилення дає змогу компенсувати втрати, що вносяться пасивними елементами мультиплексора та демультимплексора, включаючи багато компонентів, які описані нижче. Водночас шумові параметри підсилювачів справляють вплив на якісні характеристики DWDM системи.

Розгляд питання перехресних завод неможливий без врахування того, що передача інформації в ВОСП здійснюється в двійковій формі, тобто говорять про певний коефіцієнт якості передачі – коефіцієнт помилок на виході оптичного тракту, що, своєю чергою, залежить від двох чинників – загальних шумів системи та перехресних завод, які за великим рахунком теж можна вважати шумами, у випадку, коли вони впливають на оптичний частотний канал. Отже, можна сказати, що аналіз перехресних завод системи передавання можна провести як оцінку якісних показників її роботи, розрахувавши в належний спосіб необхідні фактори впливу. Важливим є прийняття поняття “сукупність шумів та завод”, що надалі пропонується називати шумо-завади.

Відомо, що середовище поширення електромагнітних хвиль, у нашому випадку – волокно, – може виявляти певні нелінійні ефекти, якщо потужність випромінювання є для цього достатньою. Отже, виникають складні спектральні спотворення групового сигналу. У цій ситуації доводиться встановлювати межу оптичної потужності, яка, своєю чергою, встановить межу відношення с/ш, та відповідно максимально допустиму ємність системи за умови сталої потужності оптичних випромінювачів кожного частотного каналу, особливо у магістральних трактах великої протяжності.

Основним системним параметром, що характеризує якісні характеристики системи з цифровим методом передачі, є достовірність передавання інформації. Як вже зазначалося, для цифрових систем передачі таким коефіцієнтом є $K_{ном}$ (BER) або ймовірності $P_{ном}$, що виникають під час передачі деякого числа повідомлень (біт інформації). Взагалі кажучи, $P_{ном}$ можна інтерпретувати як функцію від відношення с/ш, тобто $P_{ном} = f\left(\frac{C}{Ш}\right)$. Для двійкових цифрових каналів такою функцією є функція Крампа, що протабульована та широко використовується в інженерних розрахунках. В такий спосіб розрахунок $P_{ном}$ еквівалентний розрахунку с/ш, а це, своєю чергою, реалізується за допомогою аналізу загальних шумів каналу системи, до складу яких включаються перехресні завади, шуми апаратури, волокна тощо.

Отже, як було зазначено вище, пропонується розрахувати якісні показники роботи системи передавання інформації, а саме: коефіцієнти помилок на виходах, використовуючи як ключовий параметр відношення сигнал/шум. Згідно з [2–3] для запису коефіцієнта помилок через Q-фактор використовується формула

$$P_{ном} = \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Q^2}{2}}, \quad (1)$$

де Q-фактор – системний параметр, що визначається статистичними закономірностями на приймальному кінці системи під час прийняття рішень щодо рівня сигналу у кожен момент час.

Ці закономірності враховують усі сукупні шуми і завади (назвемо шумо-завадами) системи. Своєю чергою, існує аналітичний запис для знаходження величини Q-фактора:

$$Q = f\left(\frac{C}{Ш}\right) = \frac{2 \frac{P_{co}}{P_{шо}} (\Delta V_{ок})^{-0.5}}{1 + \left(1 + 4 \frac{P_{co}}{P_{шо}}\right)^{-0.5}}, \quad (2)$$

де P_{co} – абсолютний рівень оптичного сигналу на фотоприймачі; $P_{шо}$ – абсолютний рівень шумів на фотоприймачі, ширина смуги оптичного каналу, фактична ширина смуги оптичного каналу.

Відповідно в децибелах Q-фактор запишеться як $20\lg\left(f\left(\frac{C}{Ш}\right)\right)$ із виразу, який подається у [3].

Отже, розглянемо параметри компонентів системи DWDM, які впливають на значення складових P_{co} , $P_{шо}$, $\Delta V_{ок}$, які входять до виразу (2).

В загальному пропонується рівень шумів системи передавання розрахувати за допомогою такого виразу:

$$P_{шо} = N \cdot (k_1(N)K_{ш,ДВ} + 2k_2K_{ш,ОМ} + M \cdot k_3K_{ш,ОП} + k_4(N)K_{ш,ФП}) + K_{ш,ОБ}(L_{\Sigma}, P_{ож}), \quad (3)$$

де N – кількість частотних каналів; $k_1 \dots k_4$ – коефіцієнти співвідношень, приймемо для задачі оцінки коефіцієнта помилок $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = 1$; $K_{ш,ДВ}$ – значення коефіцієнта шумо-завад для джерел випромінювання; $K_{ш,ОМ}$ – коефіцієнт шумо-завад оптичного мультиплексора; $K_{ш,ОП}$ – коефіцієнт шумо-завад для оптичного підсилювача; M – кількість підсилювачів; $K_{ш,ФП}$ – коефіцієнт шумо-завад для фотоприймачів ВОСП; $K_{ш,ОБ}$ – коефіцієнт шумо-завад для волокна оптичних трактів.

Усі коефіцієнти мають бути подані для абсолютних потужностей. Значення $K_{ш,ОБ}$ формується завдяки трьом основним нелінійним явищам в одномодових оптичних волокнах:

$$K_{ш,ОБ} = K_{SRS} + K_{SBS} + K_{FW}, \quad (4)$$

де K_{SRS} – вплив розсіювання Рамана–Мандельштама; K_{SBS} – розсіювання Мандельштама–Бріллюена (РМБ або SBS); K_{FW} – вплив чотирихвильового змішування.

Вплив нелінійних ефектів на параметри DWDM систем

SRS (Stimulated Raman Scattering) являє собою значно меншу проблему порівняно зі стимульованим бріллюєнівським розсіюванням (SBS). Реальні волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ) допускають використання оптичного підсилювача (EDFA) з рівнем порядку 25 дБп або декількох підсилювачів з меншим рівнем вихідного сигналу. SRS за своєю природою близьке до SBS, але викликається іншими фізичними явищами.

SRS є частотно-залежним і проявляється більш виражено на коротких хвилях порівняно з довгохвильовими (тобто на більш високих частотах). Можна зауважити, що короткохвильові канали мають набагато меншу амплітуду порівняно з довгохвильовими каналами, тобто спостерігається зміна амплітуд сигналів по кожному з каналів. При цьому більшому затуханню піддаються саме більш короткохвильові (високочастотні) канали. У системах WDM вплив цього типу розсіювання полягає у перерозподілі потужності з короткохвильових у довгохвильові канали. У цьому випадку це явище працює, як раманівський підсилювач, і довгохвильові канали підсилюються за рахунок короткохвильових до того часу, поки різниця у довжинах хвиль лежить у смузі частот раманівського підсилення. Це явище може виникнути у кварцовому волокні, де підсилення може стати результатом використання кроку між каналами 200 нм.

Найбільше збіднюються короткохвильові канали, оскільки їх потужність може одночасно перекачуватися у багато каналів одночасно. Такий перерозподіл потужності між каналами можна визначити за характеристиками системи, тому що він залежить від характеру розташування біт – підсилення проходить тільки у тому випадку, коли двійкові “1” присутні в обох каналах одночасно. Зазначене підсилення призводить до збільшення флуктуацій потужності, яка збільшує рівень шуму приймача та погіршує його характеристики. Раманівським перехресним завадам можна запобігти, якщо потужності каналів зробити такими малими, що підсилення вийде незначним за усією довжиною волокна. Під час використання в системах DWDM-раманівських підсилювачів необхідно враховувати факт виникнення перехресних завад, що викликаються наявністю декількох сигналів, переданих на різних довжинах хвиль.

SRS може виникнути у системах, що використовують як одномодове, так і багатомодове волокно. Для того, щоб спостерігати SRS за наявності тільки одного каналу без використання оптичного підсилювача, необхідно мати рівень сигналу порядку +30 дБп. У [3] для SRS вказується, що поріг, за якого в багатоканальній системі спостерігається погіршення на 1 дБ, що викликається наявністю раманівського випромінювання, може бути оцінений з нерівності

$$P_{tot} \cdot \Delta\lambda \cdot L_{eff} < 40 [мВт \cdot нм \cdot Мм], \quad (5)$$

де P_{tot} – сумарна потужність всіх каналів WDM (мВт); $\Delta\lambda$ – смуга оптичного спектра (нм), у якій розподілені ці канали; L_{eff} – ефективна довжина, виражена в метрах, Мм, що визначається як

$$L_{eff} = \frac{4,343}{\alpha} (1 - e^{-0,23\alpha L}), \quad (6)$$

де α – коефіцієнт загасання волокна (дБ), а L – довжина волокна (км).

Отже, запишемо з врахуванням виразів (5), (6):

$$K_{SRS} = \frac{P_{tot} \cdot 4,343 \cdot \Delta\lambda \cdot (1 - e^{-0,23\alpha L})}{40 \cdot \alpha} (дБн) \cdot \quad (7)$$

Поріг SRS для систем, що використовують волокно типу G.653, дещо нижчий, ніж для систем, що використовують волокно типу G.652, через меншу ефективну площу волокна G.653.

SRS фактично не вносить погіршень в одноканальні системи. Ефект SRS лише обмежує світлову потужність в каналі.

Під час використання одноканальних систем небажані ділянки спектра можуть бути прибрані за допомогою фільтрів. Для WDM систем до цього часу практично немає технічних прийомів, які уможливили б прибрати вплив SRS. Разом із цим вплив SRS можна знизити зменшенням вхідної оптичної потужності.

SBS (Stimulated Brillouin Scattering) встановлює верхню межу на рівень оптичної потужності, що може бути переданий оптичним волокном. За перевищення визначеного рівня оптичної потужності, названого порогом SBS, в ОВ виникає акустична хвиля, під впливом якої змінюється величина індексу рефракції n . Зміни n , що викликають розсіювання світла, приводять до додаткової генерації акустичних хвиль. Для збудження РМБ спектральна густина початкового випромінювання повинна бути значно більшою, ніж для раманівського розсіювання – 10 мВт у смузі частот 10–50 МГц. Унаслідок цього ефекту виникає хвиля зі зміщеною частотою (хвиля Стокса – Stokes), що поширюється у зворотному напрямку до джерела світла, у результаті чого корисна передана оптична потужність послаблюється. Тим самим обмежується гранично досяжна потужність, що може бути передана передавачем у лінію. Наприклад, за довжини хвилі 1550 нм розсіяне світло зсувається вправо приблизно на 11 ГГц. Це розсіювання (SBS) має найнижчу порогову потужність. Було показано, що поріг SBS може змінюватися залежно від типу волокна і навіть залежно від конкретного волокна. Поріг має порядок від 5 до 10 мВт для вузькосмугових лазерів із зовнішньою модуляцією. Для лазерів з безпосередньою модуляцією ця потужність може бути порядку 20–30 мВт. Для волокон G.653 поріг SBS дещо менший, ніж для систем G.652. Це виникає через меншу ефективну площу волокон типу G.653. Можна також сказати, що це справедливо для всіх нелінійних ефектів, що розглядаються. Поріг SBS чутливий до спектральної ширини джерела випромінювання і рівня випромінюваної потужності. Однак він не залежить від кількості каналів WDM.

Крім ефекту зниження корисної потужності, виникають і шуми (підвищується відносна інтенсивність шуму – RIN, наприклад, з -155 дБ/Гц до -138 дБ/Гц), що погіршують характеристики BER (імовірність виникнення помилки). Особливо важливо контролювати SBS у високошвидкісних транспортних оптичних системах, обов'язково використовуючи модулятори з зовнішньою модуляцією (External modulators) і лазерні джерела безупинних коливань (CW – Continuous Wave).

Акустична хвиля, що з'являється, за своєю природою є гіперзвуковою, і її частотний спектр може розташовуватися до 10...13 ТГц (10^{13} Гц). SBS обмежує рівень світлової енергії, що може бути передана волокном. Рівень вхідної потужності, яка подається у волокно, за якої проходить різке наростання рівнів розсіювання, визначається як поріг SBS та описується формулою

$$P_{th} = 21 \cdot \frac{KA_{eff}}{gL_{eff}} \cdot \frac{\Delta\nu_P - \Delta\nu_B}{\Delta\nu_B}, \quad (8)$$

де g – означає коефіцієнт підсилення Бріллюена; A_{eff} – ефективну площу серцевини, K – стала, що визначається ступенем свободи стану поляризації. Для G.652 – $K = 2$. Змінні $\Delta\nu_B$ та $\Delta\nu_P$ представляють спектральну ширину смуги Бріллюена і джерела накачки відповідно.

Погіршення відношення сигнал/шум, що викликані SBS, не виникнуть у системах, де ширина лінії джерела випромінювання значно перевищує ширину смуги Бріллюена, або там, де потужність сигналу менша від порогової потужності SBS.

Можна прийняти, що за умови перевищення теоретичного порога (8) погіршення K_{SBS} становитиме приблизно 10 дБп на канал, що абсолютно неприпустимо [2].

Чотирьохвильове змішування (ЧХЗ) виникне, якщо в речовину ввести два сигнали з різними частотами, з доволі великою інтенсивністю – у спектрі розсіяного сигналу будуть компоненти з чотирма частотами (з врахуванням розсіювання Релея–Мандельштама), причому у разі накладання двох частот одна на одну, що практично є можливо, виникають фотони з частотами, які відрізняються від несучої $\nu_{c3} = \nu_n - 2\omega_c$. Частотний спектр розсіяного випромінювання розширюється,

причому деякі зі складових можуть підсилюватися за рахунок подавлення інших. За N оптичних несучих у результаті ЧХЗ кількість складових визначиться співвідношенням $0.5N^2(N-1)$.

ЧХЗ може проявлятися і за одного оптичного сигналу, який переносить інформацію методом амплітудної модуляції, тобто його спектр складається з трьох основних складових: центральної частоти та бокових частот, за високих швидкостей передачі бокові частоти є сильно рознесені по відношенню до центральної, тому кожна з них є самостійною несучою з точки зору ЧХЗ. Вплив ЧХЗ на передачу проявляється як додаткові перехресні завади, міжсимвольні завади за високих швидкостей передачі, збіднення потужності сигналів одних каналів за рахунок впливу на інші.

Ефективність ЧХЗ також чутлива до загальної оптичної потужності у волокні. Наближена формула з розрахунку ефективності FWM_p для SMF-28 (як найбільш частий випадок на практиці для СНД), з урахуванням частотного кроку розміщення N каналів d_f , може бути записана у вигляді

$$FWM[\text{дБ}] \approx -57 + 10\lg(N/d_f) + 1200/d_f. \quad (9)$$

Так, для 8-канальної CWDM із кроком частотного розміщення в $d_f = 200$ ГГц (192,4 – 193,8 ТГц) FWM_p становитиме $\sim -46,7$ дБ, а для 16-канального розміщення з частотним кроком у 100 ГГц FWM_p становитиме $\sim -37,7$ дБ. Нагадаємо, що електричний еквівалент FWM_p дорівнює подвоєному значенню оптичної ефективності FWM_p і для останнього випадку дорівнюватиме $-75,4$ дБ.

Найбільший паразитний вплив ЧХЗ справляє на СПІ, в яких оптичний тракт побудований на оптичному волокні зі зміщеною нульовою дисперсією G.653 DSF, практично не впливає на одномодове стандартне волокно G.652 SMF. Досліди показали, що для волокон G.653 ці завади є практично неприйнятними (до 20 дБп), тоді як для G.652 вони фактично відсутні.

Для того, щоб адекватно подавляти генерацію продуктів ЧХЗ в промисловості, було запропоновано використовувати волокна з мінімально допустимою, але ненульовою дисперсією в області підсилення оптичних підсилювачів. Як альтернатива, пропонується використання чергування прольотів з протилежними за знаками дисперсіями. Переважно можна забезпечувати збільшення кроку між каналами та існування нерівномірного кроку між ними, за рахунок цього зменшуючи рівень завад від ЧХЗ.

Шуми активних компонентів систем DWDM

Якщо визначені специфікації DWDM вимагають дотримання малої ширини смуги випромінювання (0.01...0.5 нм) G.692, G.957, то далеко не всі випромінювачі забезпечують її.

Спектр сигналу, модульованого за інтенсивністю, нагадує спектр АМ-сигналу. Він містить бічні складові, причому спектр вихідного сигналу має бути практично обмеженим першою гармонікою тактової частоти. Нестабільність частоти для STM-64 у 10 ГГц викличе накладання на частоти сусіднього групового каналу недопустиме зростання шуму, подавлення сигналу і зрив функціонування системи. Для STM-256 навіть про половину допусків системи STM-64 мову вести не можна. Тобто система стабілізації частоти має бути дуже якісною. Для STM-64 ширина спектральної лінії не має перевищувати 0.08 нм за спектральних інтервалів 50 ГГц. Для STM-16 $\Delta\lambda = \pm 0.5$ нм (G.957).

Вихід з вказаних частотних смуг веде до появи недопустимих перехресних завад. Загалом питання можна вирішити введенням додаткових фільтрів, але це викличе значне подорожчання системи та необхідність використання додаткових підсилювачів.

Розрахуємо коефіцієнт шумо-завад джерела випромінювання спільно з фотодетектором, використовуючи формули аналізу [6]:

$$K_{ш.ДВ} + K_{ш.ФП} = \frac{m^2}{2\Delta\nu_{кан}} \left(R + \frac{2q}{P_{ex}S} + \frac{I_n^2}{P_{ex}^2 S^2} \right)^{-1}, \quad (10)$$

де m – індекс каналної оптичної модуляції, часто називають ОМІ (Optical Modulation Index).

Зазвичай цей індекс виражається у відсотках, але в розрахункові формули необхідно підставляти безрозмірну величину, таку як $m_{[\%]}/100$. Наприклад, $m = 4\%$ еквівалентне $m = 0,04$;

$\Delta\nu_{кан}$ – шумова смуга каналу у виділеній смузі; R – відносна інтенсивність шумів RIN (Relative Intensity Noise), що розраховується, як шумова потужність, приведена до смуги 1 Гц, стосовно оптичної потужності до немодульованої несучої. Має розмірність дБ/Гц. q – заряд електрона, S – чутливість оптичного модуля, що залежить від оптичної довжини хвилі. Типові значення становлять $S_{1310} = 0,85$ А/Вт і $S_{1550} = 0,95$ А/Вт на 1310 нм і 1550 нм відповідно. Фізично параметр S показує (див. рис. 4), який струм (у мА) з’явиться на виході фотодетектора за впливу на його вході оптичної потужності в 1 мВт (0 дБп); I_n – еквівалентний шумовий тепловий струм підсилювача, вимірюваний в $nA/\sqrt{Гц}$. Типова величина I_n для трансімпедансного каскаду, виконаного на GaAs польовому транзисторі, становить 7...8 $nA/\sqrt{Гц}$. Сьогодні з’явилися мал шумні підсилювальні транзистори з дуже великим вхідним опором, що мають вхідний шумовий струм до 5 $nA/\sqrt{Гц}$. Крім того, з обмеженням смуги частот загальна корисна потужність падатиме, а із зростанням понад обмеження, вона спадатиме за рахунок перерозподілу у заборонений позаканальний діапазон частот, при цьому ініціюється зменшення відношення сигнал/шум, що, своєю чергою, еквівалентне погіршенню якості передавання інформації у системі. Запишемо коефіцієнт рівня міжканальних завад оптичного сигналу, який характеризує втрати потужності [7]:

$$P_{кан\ зав} = P_{кан} \cdot e^{-5 \frac{\Delta\nu_{смуги}}{\Delta\nu_{ок}}}, \quad (11)$$

де $P_{кан}$ – потужність оптичного каналу; $\Delta\nu_{смуги}$ – діапазон частот, виділений на канал. Далі в розрахунках можна прийняти, що з врахуванням фільтрації спектра як рівня потужності каналу системи, використовується величина втрат на перекриття спектрів $P_{кан\ зав}$, яку підсумуємо з експлуатаційними шумами системи джерело випромінювання – фотодетектор з виразу (10).

Оптичний підсилювач підіймає рівень не тільки корисного оптичного сигналу, а й паразитних гармонік, які, власне, й становлять основу для перехресних завад оптичних систем. Крім того, оптичні підсилювачі (як EDFA, так і SRS) мають власні шуми.

Наявність коефіцієнта шуму (NF) підсилювача викликана підсиленням спонтанним випромінюванням (ASE). Коефіцієнт шуму ВОП визначається з такого виразу [3]:

$$NF = \frac{2P_{ASE}}{h\nu_c\Delta\nu(G_A - 1)} \text{ (дБ)}, \quad (12)$$

де P_{ASE} – потужність підсиленого спонтанного випромінювання; h – стала Планка; ν_c – частота сигналу;

$$P_{ASE} = 2n_s h\nu_A(G_A - 1), \quad (13)$$

де n_s – коефіцієнт спонтанної емісії. Коефіцієнт спонтанної емісії може приймати значення від 1 до 10 для оптичних підсилювачів з $G_A > 1$. Для типових ербієвих підсилювачів сучасних ВОСП з $G_A \gg 10$ дБ, типове значення NF лежить у межах 3дБ < NF < 6дБ. Якщо підсилювачі вмикаються послідовно каскадами, то можна показати, що шум – фактор першого каскаду визначає шум–фактор всього підсилювача. Коефіцієнт шуму NF_R раманівського розподіленого підсилювача визначається з виразу

$$NF_R = 2 / \ln G_R, \quad (14)$$

де G_R – коефіцієнт підсилення раманівського підсилювача, який визначається з виразу

$$G_R = e^{\frac{g_R P_n L}{A_{эф}}}, \quad (15)$$

де g_R – раманівський коефіцієнт; P_n – потужність накачки; $A_{эф}$ – ефективна площа перерізу; L – довжина волокна. Можна прийняти $g_R = 7 \cdot 10^{-17}$ км/Вт. Потужність накачки дійсно лежить у межах від 0.5...0.8 Вт до кількох ват [5].

Отже, отримаємо загальний коефіцієнт шуму оптичного підсилювача:

$$K_{ш.оп} = \frac{1}{M} \sum_M K_{ш.кан} \cdot (NF_{A_M} - K_{A_M}), \quad (16)$$

де NF_A – шуми конкретного підсилювача; K_A – коефіцієнт підсилення підсилювача; $K_{ш.кан}$ – коефіцієнт шумо-завад каналу передачі, отриманий перед кожним оптичним підсилювачем; M – кількість підсилювачів.

Шуми фотодетектора та відповідно коефіцієнт $K_{ш.ФП}$ задаються, враховуючи дані виробників, які ними подаються; $K_{ш.ом}$ також розраховується, враховуючи дані виробників обладнання.

Реально враховується енергетичний 3 дБ запас по відношенню сигнал/шум завдяки кодуванню (FEC), яке застосовується на магістральних ВОСП. Цей запас вводиться у формі покращання с/ш на фотодетекторі і є далеко не максимально досяжним.

Імітаційна програмна модель DWDM лінійного тракту

Модель для розрахунку завад системи побудована у вигляді комп'ютерної програми, у вікні якої є можливість вибрати виконання та параметри обладнання. Результатами розрахунків є відношення сигнал/шум оптичного сигналу, розрахований Q-фактор. На підставі цього можна зробити висновок про якісні характеристики системи (розраховується коефіцієнт помилки). Ця та інша інформація про систему формується у вигляді звіту. Програма написана на підставі об'єктно-орієнтованої мови програмування C++ Builder 5.0. Алгоритми програми реалізовані на основі формул (1), (2), параметри для яких, своєю чергою, отримуються з формул (3)–(18), наведених вище. Розрахунки відбуваються для рівнів сигналу та шуму, які із врахуванням вхідних параметрів системи обробляються у віртуальних пристроях, оформлених як об'єкти. Це оптичні передавачі, оптичний тракт, оптичні підсилювачі тракту, фотодетектори. Оптичний сигнал проходить через них послідовно, маємо змогу спостерігати поступове погіршення оптичного відношення с/ш під час проходження віртуального оптичного тракту.

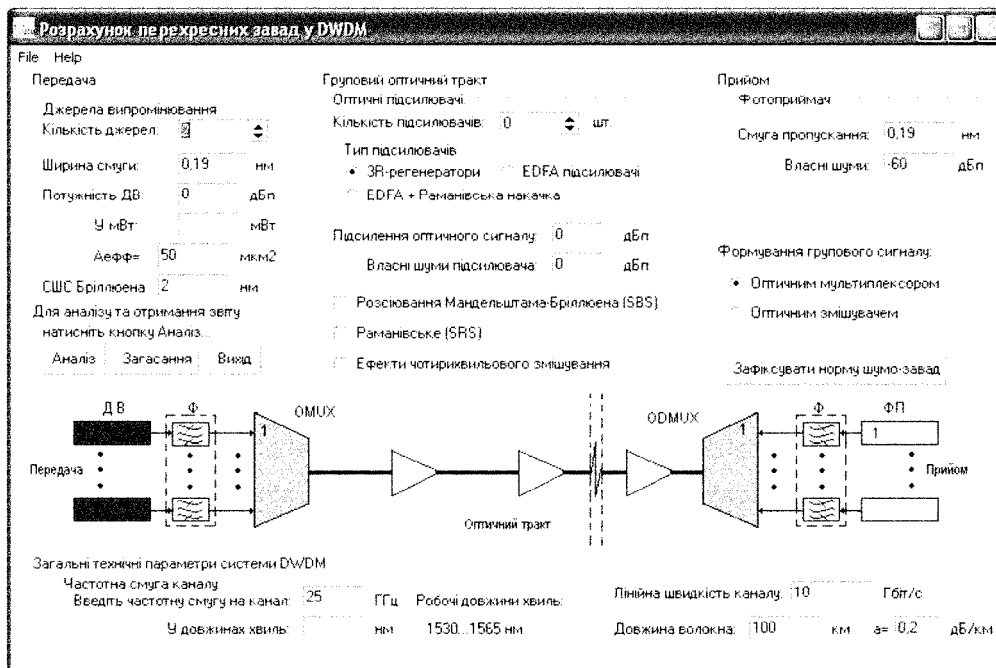
Наведемо отримані за допомогою моделі результати аналізу різних конфігурацій систем DWDM, за допомогою яких з'являється можливість змінити ті чи інші параметри системи, задля отримання максимальної технічної вигоди під час проектування (оптимізації). Всі результати передбачають врахування погіршень поширення оптичного сигналу внаслідок нелінійностей оптичного волокна та інших чинників впливу різних компонентів системи.

Для прикладу задамо початкові умови розрахунку: 40 каналів WDM, кількість проміжних підсилювачів EDFA – 12, коефіцієнт підсилення – 40 дБп та шумів – 3 дБп, шуми фотодетектора – 70 дБп, довжина волокна – 600 км, коефіцієнт загасання ОВ – 0,2 дБ/км. Швидкість передавання в оптичному каналі задамо порядку 10 Гбіт/с. Отримаємо в результаті, що максимальна допустима потужність може досягати -3 дБп на канал за допустимого рівня завад. Оцінений максимальний коефіцієнт помилок дорівнює $1,76 \cdot 10^{-11}$. Загальний вигляд вікна програмної моделі показано на рисунку

Підсилювачі EDFA, які розглядаються в моделі, вносять погіршення сигнал/шум зі збільшенням довжини тракту. Загальне погіршення відношення ΔNF переважно є пропорційним до кількості підсилювачів тракту.

Дослідження, проведені з використанням моделі, показують, що найбільше погіршення в тракт вноситься підсилювачами, що мають низький коефіцієнт підсилення та високий рівень власних шумів. Із збільшенням кількості підсилювачів у відповідну кількість разів і погіршиться відношення с/ш.

У зв'язку з тим, що фактично не використовується повне теоретичне завантаження оптичних кабелів, завжди залишається можливість до певної міри знизити рівень перехресних завад та завдяки цьому забезпечити збільшення потужності в каналі, зменшивши кількість підсилювачів та збільшивши довжину тракту. При цьому важливе значення матимуть тип вибраного волокна та якість підсилювачів EDFA.



Загальний вигляд вікна програмної моделі

Побудована комп'ютерна модель дає можливість проаналізувати роботу системи передачі інформації зі спектральним ущільненням каналів в плані перехресних завад та шумів системи. Слід зазначити, що модель не є повним відображенням системи ВОСП-СР, в ній передбачений частковий аналіз енергетичного бюджету ВОСП, за умови того, що система була розрахована за технічними параметрами до цього. Мається на увазі, що можна практично довільно змінювати доступні у моделі визначені технічні умови та параметри, отримуючи результати у вигляді якісних показників роботи системи.

Розрахунок значень шумів оптичних компонентів системи передавання у програмній моделі проводиться за (4), (7), (8), (9) – для волокна, за (10), (11) – для джерела оптичного випромінювання, за (12)–(16) – для оптичних підсилювачів. Загальний коефіцієнт якості передавання (очікуваний коефіцієнт помилок) оптичного каналу отримується з формул (1)-(3).

Програма забезпечує автоматичну конвертацію діапазону частот у смугу довжин хвиль. Вибір лінійної швидкості каналу та шумових параметрів оптичних підсилювачів дає змогу провести всебічний розгляд тракту системи DWDM у плані заводозахищеності та шумів.

Графічне зображення системи дає поблокове подання компонування системи DWDM залежно від кількості каналів та оптичних підсилювачів в оптичному тракту.

Висновки:

1. Запропонований підхід до оцінки якості та перехресних міжканальних завад дає змогу сформулювати методику для оцінки їхнього впливу на якісні показники роботи системи з DWDM, виробити стратегію для технологічного зменшення значення завад ще у процесі проектування подібних систем передавання інформації.
2. Сформовано концепцію розгляду множини чинників впливу на якість передання оптичної системи та окреслено на цій підставі коло ключових питань для першочергового аналізу.
3. Розроблена імітаційна програмна модель DWDM-лінійного тракту шляхом модифікацій і доопрацювання забезпечує можливість створення повноцінної інструментарію для комплексного аналізу систем DWDM вже на спектральному рівні.

1. Бурдин В.А., Воронков А.А., Самойлова Н.А., Попов В.Б. Исследование параметров волоконно-оптической линии передачи. – Самара, 2002. 2. Roger L. Freeman, Fiber-Optic Systems for

Telecommunications, 2nd ed., John Willey&Sons. – New York, 2002. 3. Скляр О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. – М., 2004. 4. Guide to WDM Technology Testing, 2nd ed., EXFO Electro-Optical Engineering, Inc., Quebec City, Canada, 2000. 5. Applications Related Aspects of Optical Fiber Amplifier Devices and Subsystems, ITU-T Rec. G.663, ITU Geneva, October 1996. 6. Матеріали сайту <http://www.conturm.ru>. 7. Климаш М.М., Романчук В.І. Методи розрахунку перехресних міжканальних завад в транспортних телекомунікаційних системах // Моделювання та інформаційні технології: Зб. наук. праць ІПМЕ НАН України. – К., 2005. – Вип. 31. – С. 25–28.