

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-20>

УДК 535.345

МАНЬКО Олександр

Київський фаховий коледж зв'язку
<https://orcid.org/0000-0002-2131-3597>
manko_kiev@ukr.net

СЕМЕНКО Анатолій

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»
<https://orcid.org/0000-0002-7043-7801>
setel@ukr.net

ХАРЛАЙ Людмила

Київський фаховий коледж зв'язку
<https://orcid.org/0000-0002-7633-933X>
lharlay@i.ua

КУНАХ Наталя

Київський фаховий коледж зв'язку
<https://orcid.org/0000-0003-3740-3631>
ignaku@ukr.net

НАПРЯМКИ ПОКРАЩЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ СИСТЕМ ПЕРЕДАВАННЯ НА СУЧАСНИХ DWDM МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ

В роботі наведено напрями подальшого розвитку сучасного волоконно-оптичного зв'язку. Відмічено необхідність постійного зростання інформаційно-пропускної здатності оптичних ліній зв'язку, пов'язаного зі зростанням інформаційно-пропускної здатності оптичного волокна. Розглянуто принципи технології DWDM, що дозволяє забезпечити зростаючі потреби у збільшенні цієї здатності. Зауважено про необхідність високої кількості регенераторів на лініях оптичного передавання для впровадження DWDM технології, та зроблено висновок про доцільність використання замість регенераторів широкопasmових оптичних підсилювачів, що підсилюють оптичний груповий сигнал у чисто оптичному виді, не переводячи його в електричну форму.

Крім того, в роботі наведені проблеми, які виникають при використанні оптичних підсилювачів, зокрема це генерація квантового шуму під час роботи підсилювача, яка погіршує співвідношення сигнал/шум в лінії та в кінцевому випадку на вході приймального пристрою.

В роботі також наведено інші чинники, які погіршують в кінцевому результаті співвідношення сигнал/шум на вході оптичного приймального пристрою. Серед таких чинників мають місце зокрема оптичні шуми, які виникають в оптичному волокну за причини релієвського розсіювання.

Представлено вплив на співвідношення сигнал/шум режиму модуляції оптичного сигналу на виході лазерного джерела. Показано, що збільшення співвідношення гасіння на виході модулятора та відповідне зростання глибини модуляції підвищують співвідношення сигнал шум на виході оптичного підсилювача.

Розглянуто найбільш поширені типи модуляторів для високошвидкісних DWDM технологій. Такими є модулятори Маха – Цендера та електроабсорбційні модулятори, які обидва забезпечують необхідну швидкість передавання для технологій STM-64 або вище.

Показано переваги модулятора на основі Маха –Цендера, як такого, що може забезпечити краще співвідношення гасіння за рахунок вибору керуючої напруги.

Проведено та надано розрахунки співвідношення сигнал/шум на виході оптичного підсилювача в залежності від глибини оптичної модуляції та різних значень коефіцієнта шуму (шум фактора) оптичного підсилювача). Показано, що збільшення глибини модуляції та зменшення шум фактора значно покращує співвідношення сигнал/шум на виході підсилювача. При цьому коефіцієнт шуму може бути зменшений за рахунок вибору довжини хвилі випромінювання накачування.

Зроблено висновки щодо особливостей застосування різних типів оптичних підсилювачів на мережах зв'язку.

Ключові слова: Оптичний підсилювач, модуляція, глибина модуляції, співвідношення гасіння, шум-фактор

MANKO Olexander

Kyiv Professional College of Communication

SEMENKO Anatoliy

Open International University of Human Development

KHARIAI Liudmila, KUNALH Natalia

Kyiv Professional College of Communication

DIRECTIONS FOR IMPROVING THE QUALITY PARAMETERS OF TRANSMISSION SYSTEMS ON MODERN DWDM COMMUNICATION NETWORKS

The paper presents directions for the further development of modern fiber-optic communication. The need for a constant increase in the information-throughput capacity of optical communication lines, associated with the increase in the information-throughput capacity of an optical fiber, is noted. The principles of DWDM technology, which allows to meet the growing needs for increasing this capacity, are considered. The need for a high number of regenerators on optical transmission lines for the introduction of DWDM technology was noted, and a conclusion was drawn about the expediency of using broadband optical

amplifiers instead of regenerators, which amplify the optical group signal in a purely optical form, without converting it into electrical form.

In addition, the work presents the problems that arise when using optical amplifiers, in particular, the generation of quantum noise during the operation of the amplifier, which worsens the signal-to-noise ratio in the line and, in the final case, at the input of the receiving device.

The paper also gives other factors that worsen the signal/noise ratio at the input of the optical receiving device. Among such factors are optical noise, which occurs in an optical fiber due to Rayleigh scattering.

The effect on the signal/noise ratio of the optical signal modulation mode at the output of the laser source is presented. It is shown that an increase in the damping ratio at the output of the modulator and a corresponding increase in the modulation depth increase the signal-to-noise ratio at the output of the optical amplifier.

The most common types of modulators for high-speed DWDM technologies are considered. These are Mach-Zehnder modulators and electroabsorption modulators, both of which provide the required baud rate for STM-64 or higher technologies.

The advantages of a Mach-Zehnder-based modulator are shown, as it can provide a better damping ratio due to the selection of the control voltage.

Calculations of the signal/noise ratio at the output of the optical amplifier depending on the depth of the optical modulation and different values of the noise factor of the optical amplifier have been carried out and provided. It is shown that increasing the modulation depth and reducing the noise factor significantly improves the signal-to-noise ratio at the output of the amplifier. At the same time, the noise coefficient can be reduced by choosing the wavelength of the pumping radiation.

Conclusions have been made regarding the features of the application of various types of optical amplifiers in communication networks.

Keywords: Optical amplifier, modulation, modulation depth, damping ratio, noise factor

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Волоконно-оптичний зв'язок характеризується досить великою інформаційно-пропускною ємністю. Потенціал оптичного волокна дозволяє передавати дані інформаційними потоками в декілька Тбіт/с і більше [1,2].

До цього часу вважалося, що цей потенціал ніколи не буде повністю використаний. Однак з появою Інтернет-мереж та систем мобільного зв'язку обсяги голосового трафіку та трафіку даних в мережах почали стрімко зростати і зараз, за оцінками експертів, попит на збільшення пропускної можливості мереж оптичного зв'язку зростає з кожним роком. Тому потрібні нові технології передачі інформації. Суть розроблених і найбільш поширених на сьогоднішній день технологій (SDH, ATM, IP) [3,4] полягає в послідовній передачі бітів одного інформаційного потоку, представленої в двійковій формі, по волокну. І такий метод не гарантує безперервного збільшення обсягу переданої інформації [5]. Це вимагає рішення з набагато вищим потенціалом пропускної здатності і можливістю швидкого збільшення цієї пропускної здатності в міру необхідності.

Аналіз досліджень та публікацій

Технологія хвильового розділення та мультиплексування

Найбільш перспективними технологіями, що дозволяють будувати оптичні мережі з практично необмеженими можливостями інформаційно-пропускної здатності, вважаються технології WDM (wavelength division multiplexing) або SDM (spectrum division multiplexing - СПК) [2].

Суть технології WDM полягає у створенні декількох паралельних інформаційних каналів різної довжини хвилі в межах одного оптичного волокна. Довжина несучої хвилі в кожній окремій системі передавання вибирається з великою точністю, щоб спектр сигналів в оптичному діапазоні не перекривався з сусіднім.

Таким чином, оптична система передачі зі спектральним розділенням каналів (ВОСП з СПК) – це система передачі, яка передає кілька каналів по одному оптичному волокну відповідного кабелю, причому для кожного каналу використовується джерело випромінювання з визначеною довжиною хвилі.

Як видно з рис. 1, передавальна сторона ВОСП з СПК має канали з довжинами хвиль $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$. Мультиплексори (MUX) використовуються для складання потужності різних оптичних несучих в одне оптичне волокно (ОВ). На приймальній стороні демультиплексори (DEMUX) використовуються для приймання та розділення оптичних каналів на різних довжинах хвиль $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$. Після чого відбувається спрямування їх до відповідних оптичних приймачів (ОПр). На вході приймача може бути встановлений смуговий фільтр для зменшення взаємних між каналних впливів і підвищення завадостійкості передавання інформації. Таким чином, N спектрально розділених оптичних каналів можна організувати по одному ОВ [2].

Одночасно поява нових технологій викликала питання, які треба було вирішувати. Базовим питанням була одночасна регенерація значного числа оптичних каналів, тому що груповий сигнал у складі великого числа каналів потрібно було розгрупувати і спрямувати кожен канал у визначене волокно і на вхід визначеного регенератора. Після проведення процесу відновлення канали повинні були знову угрупуватись в одне волокно. Кількість регенераторів у кожному пункті була рівною числу оптичних каналів, а кількість каналів перевищувала десятки і нестримно зростала, що також підвищувало вартість

ліній передавання. Потрібно було знайти дієве рішення цих питань. І воно було знайдено з розробкою різних типів оптичних підсилювачів [5].

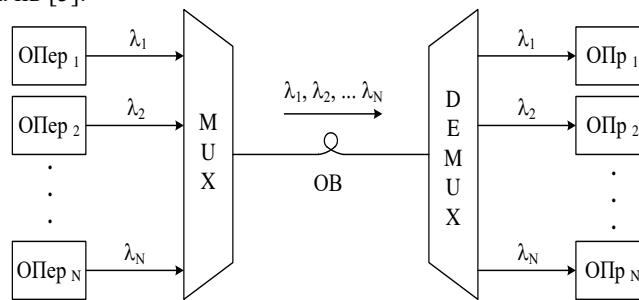


Рис.1. Узагальнена структурна схема ВОСП з СРК

Оптичні підсилювачі

Такий суттєво важливий параметр ВОСП, як протяжність регенераційної або підсилювальної ділянки в основному залежить від втрат у лінійному оптичному волокні [2]. Для досить протяжних ліній обмеження, за рахунок загасання, як правило, долається використанням регенераторів, в яких оптичний сигнал спочатку перетворюється в електричний сигнал, а потім відтворюється (регенерується) за допомогою типових схемних рішень. Ці регенератори, слід зауважити, є порівняно складними та мають високу вартість для систем зі спектральним розділенням каналів за довжиною хвилі (DWDM), тому що кожен канал використовує свій окремий регенератор. При цьому, для попереднього розділення групи каналів та подальшого об'єднання після операції регенерації необхідне використання складних та високовартісних пристроїв – демультимплексору та мультимплексору, які самі по собі за конструкцією та виконанням є дуже високоточними оптичними системами. Враховуючи той факт, що число оптичних каналів сучасних DWDM – систем передавання перевищує не один десяток, ціна обладнання помітно зростає. Альтернативне рішення для зниження цих втрат передбачає застосування оптичних підсилювачів [5], які підсилюють комплексний оптичний сигнал у широкій смузі частот, що утворена з множини каналів, безпосередньо не потребуючи його трансформації в електричну форму (рис.2).

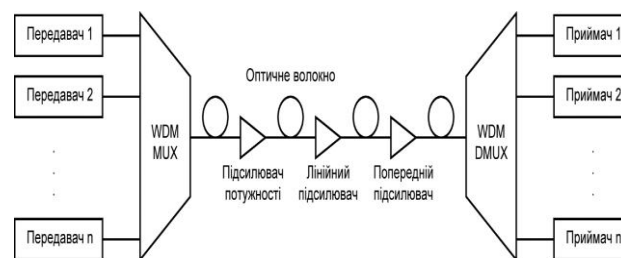


Рис.2. Варіант структури волоконно-оптичної лінії зв'язку зі спектральним мультимплексуванням та оптичними підсилювачами

Оптичні підсилювачі (ОП) або (Optical amplifiers (OAs)) — це пристрої, побудовані і на лазерних принципах функціонування [5]. Вони мають на вході комплексний сигнал, що утворений з групи оптичних каналів, кожен з яких розташований у межах певної ділянки стандартизованого діапазону оптичних довжин хвиль, і одночасно та незалежно посилюють всю групу каналів кожен на своїй довжини хвилі.

Використання ОП в системах оптичного передавання дає певний ряд переваг. Найважливішою серед цих переваг є потенціальна можливість побудувати оптичні системи передавання аномально великих довжин без наявності регенераторів, а лише з оптичними підсилювачами, такі, як, наприклад, транскеанські системи. Впровадження ОП, найімовірніше за все, дозволить виключити з експлуатації більшість наявних на цей час типових ділянок регенерації, та, у випадку розробки нових телекомунікаційних маршрутів, зробить зайвим проектування багатьох регенераційних ділянок, за рахунок заміни регенераторів оптичними підсилювачами [5].

Існують різні типи ОП. Серед них: волоконно-оптичний підсилювач (EDFA), легований іонами ербію, напівпровідникові оптичні підсилювачі (SOA), підсилювачі на ефекті Рамана [5,6]. ОП використовують електричну або оптичну енергію для переведення електронів на високий енергетичний рівень. Енергія, звичайно, надається шляхом інжекції електричного струму (у SOA) або оптичного випромінювання на певних довжинах хвиль в підсилювачах EDFA та Рамана.

Підсилювачі типу EDFA (Erbium-doped fibre amplifier)

EDFA — це відрізок оптичного волокна довжиною від кількох метрів до кількох десятків метрів, в осердя якого включено рідкоземельний елемент ербій. Іони ербію можуть збуджуватися за допомогою накачування на кількох оптичних частотах. Дві найбільш вживані довжини хвиль збудження - 980 нм і 1480 нм [2]. Коли сигнали накачування з цими довжинами хвиль поширюються через леговане волокно, іони ербію збуджуються (електрони переходять на вищий енергетичний рівень), і вхідний оптичний сигнал може бути підсилений стимульованим випромінюванням, за рахунок зворотного переходу електронів на нижчий енергетичний рівень. При цьому відбувається генерація фотонів у діапазоні довжин хвиль 1530-1565 нм (С-діапазон). При зміні побудови підсилювача, цей діапазон також може бути зміщений в сторону більш довгих хвиль (L-діапазон).

Основна структура EDFA складається із з'єднувачів, волокна, легованого ербієм, і двох оптичних ізоляторів (по одному на кожному кінці) (рис. 3).

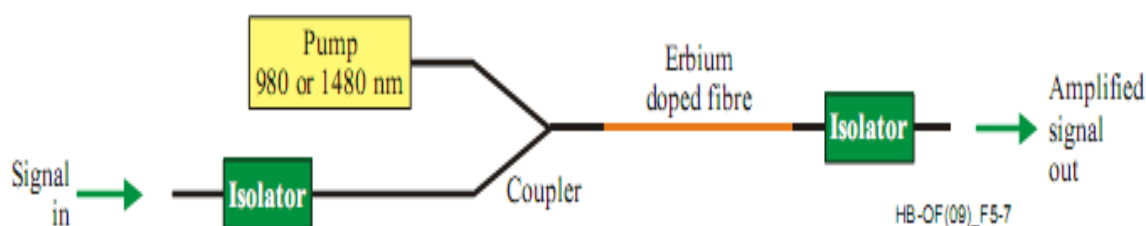


Рис.3. Приклад можливої структурної побудови підсилювача EDFA

Волокно, по якому розповсюджується сигнал, під'єднується через ізолятор, який значно знижує рівень відбитого в зворотному напрямку світла. EDFA збуджується джерелом лазерного випромінювання, відомого як лазер накачування. Потужність випромінювання накачування (довжина хвиль 980 нм або 1480 нм) подається в EDFA поряд із вхідним сигналом даних. Накачування переводить іони ербію на вищий енергетичний рівень, що в результаті зворотного стимульованого переходу призводить до підсилення інформаційного сигналу, в діапазоні довжин хвиль 1535 – 1565 нм.

Оптичні підсилювачі на основі легованих ербієм оптичних волокон забезпечують в робочому діапазоні (1535 – 1565 нм) коефіцієнт підсилення порядку 10...46 дБ, за рівня вихідної потужності -10...+15 дБм. Потужні напівпровідникові лазерні діоди використовуються як джерела забезпечення випромінювання накачування EDFA. Оскільки EDFA є конструктивно сумісними зі структурою лінійного оптичного волокна, підсилювач під'єднується до волокна простим зварюванням. При цьому втрати на з'єднання складають порядку десятків часток децибела.

Проте, слід відмітити що поруч із перевагами, які забезпечуються, при використанні EDFA, виникають певні проблеми, пов'язані з генерацією квантового шуму.

Квантові шуми на оптичних мережах зв'язку та їх вплив на параметри якості систем передавання

Оптичний підсилювач типу EDFA є квантовою системою, що працює на принципах інверсії населеності квантових рівнів. Для створення інверсії у волокно оптичного підсилювача подається випромінювання накачування з виходу зовнішнього джерела. При цьому електрони в іонах ербію переходять на вищі енергетичні рівні, певний час перебуваючи на них та створюючи таким чином інверсну заселеність.

За відсутності інформаційного сигналу іони ербію переходять в основний стан з низькою енергією мимовільно. В цей момент відбувається випромінювання фотонів з енергією та довжиною хвилі, яка відповідає даному переходу. Тобто з'являється спонтанне випромінювання. Слід підкреслити, що в робочому режимі за наявності інформаційного сигналу частина збуджених іонів переходить в основний стан спонтанно самі по собі. При цьому спонтанне випромінювання також підсилюється, приводячи до появи підсиленого спонтанного випромінювання. Підсилене спонтанне випромінювання є основним джерелом шумів.

Наступним джерелом шумових квантів є релєвське розсіяння [7]. Потік цих квантів у волокні, завдяки наявності оптичних підсилювачів, може також підвищувати свій рівень.

Важливою причиною появи шумових квантів в лінії є також модулятори оптичного випромінювання лазерних джерел. Зокрема це модулятори Маха – Цендера та електроабсорбційні модулятори [8]. Через недостатній рівень співвідношення гасіння при передаванні символу «0» має місце

просочування оптичної потужності в волоконно-оптичний тракт, і яку в цьому випадку можна трактувати як шумовий сигнал.

Залежність якості передавання (коефіцієнта помилок) при наявності шумового фактору можна подати наступним виразом та відповідним графіком [9]:

$$BER \approx \frac{e^{-\frac{Q^2}{2}}}{\sqrt{2\pi} \left(\left(1 - \frac{1}{\pi}\right)Q + \frac{\sqrt{Q^2 + 2\pi}}{\pi} \right)}$$

Шумова характеристика самого оптичного підсилювача виражається через такий параметр, як коефіцієнт шуму, який у EDFA лежить в межах від 3-4 дБ (для довжини хвилі накачування 980 нм) до 5,5 дБ (для довжини хвилі накачування 1480 нм). Таким чином, представляє інтерес визначення співвідношення сигнал шум на виході оптичного підсилювача, при відомих параметрах модуляції оптичного сигналу та коефіцієнті шуму оптичного підсилювача.

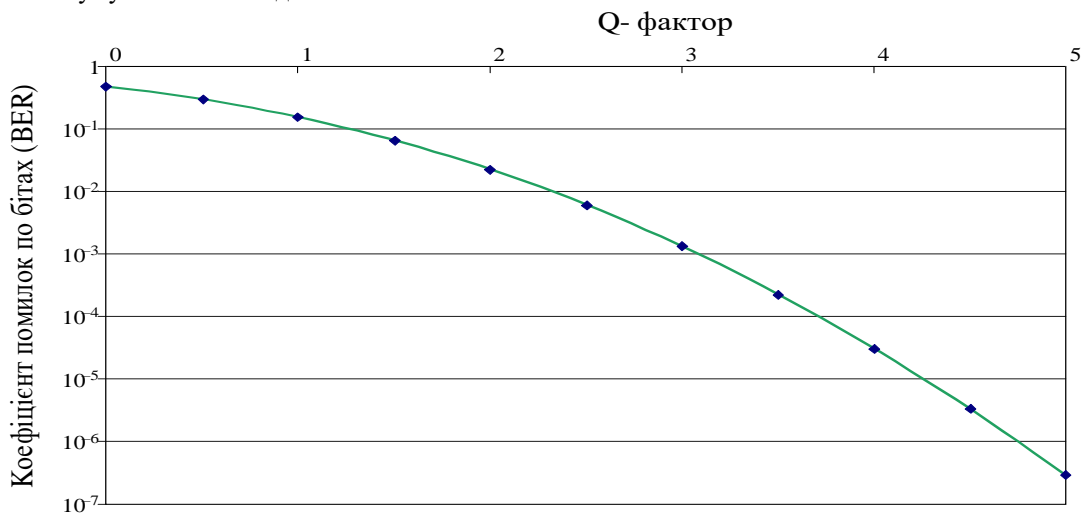


Рис.4. Залежність коефіцієнта помилок від співвідношення сигнал/шум

Розрахунок співвідношення сигнал/шум на виході оптичного підсилювача

Якість оптичного сигналу характеризують величиною, яку прийнято називати оптичним відношенням сигнал/шум (*OSNR*). *OSNR* дорівнює відношенню потужності корисного сигналу до потужності шуму в спектральному інтервалі $\Delta\nu$, яке визначається смугою пропускання фільтра або демультіплексора на приймальній стороні. Значення *OSNR* повинно бути достатньо великим, щоб забезпечити необхідну для стандарту передачі максимально допустиму частоту появи помилок (BER). У міру поширення сигналу між підсилювачами значення *OSNR* може тільки спадати.

Для розрахунку відношення сигнал/шум на виході оптичного підсилювача, підключеного до прийомного обладнання будемо використовувати наступний вираз [10]:

$$OSNR = \frac{m^2 \cdot P_{SIN}}{h \cdot \nu \cdot B \cdot NF}$$

де *OSNR* – відношення сигнал/шум;

m – глибина оптичної модуляції;

P_{SIN} – потужність оптичного сигналу на вході підсилювача (Вт);

h – стала Планка, рівна $6,6252 \cdot 10^{-34}$ Втс²;

ν – частота світлового сигналу (Гц);

B – ширина смуги частот приймача (пропорційна швидкості передавання) [11];

NF – коефіцієнт шуму оптичного підсилювача (шум-фактор).

Співвідношення $P_{SN} / (h \cdot \nu \cdot B)$ характеризує співвідношення сигнал/шум на вході підсилювача.

Розрахунки проведемо в залежності від різної глибини модуляції при відношенні потужності вхідного сигналу до потужності шуму на вході підсилювача в 10дБ.

Крім того, вони будуть проведені для трьох значень шум-фактора підсилювача: NF_1, NF_2, NF_3 :

$$NF_1 = 3 \text{ дБ (2 рази);}$$

$$NF_2 = 6 \text{ дБ (4 рази);}$$

$$NF_3 = 9 \text{ дБ (8 раз).}$$

Глибина модуляції визначається через співвідношення гасіння (Extinction ratio) джерела сигналу. Воно визначається виразом:

$$ExRt = \frac{A}{B},$$

де A – величина сигналу при передачі «1»;

B – величина сигналу при передачі «0».

Розрахувати глибину модуляції m через $ExRt$ можна за співвідношенням:

$$m = 1 - \frac{1}{ExR} = 1 - \frac{1}{A/B} = 1 - \frac{B}{A}.$$

За отриманими даними будемо графіки залежності $OSNR$ від глибини модуляції m (рис.5).

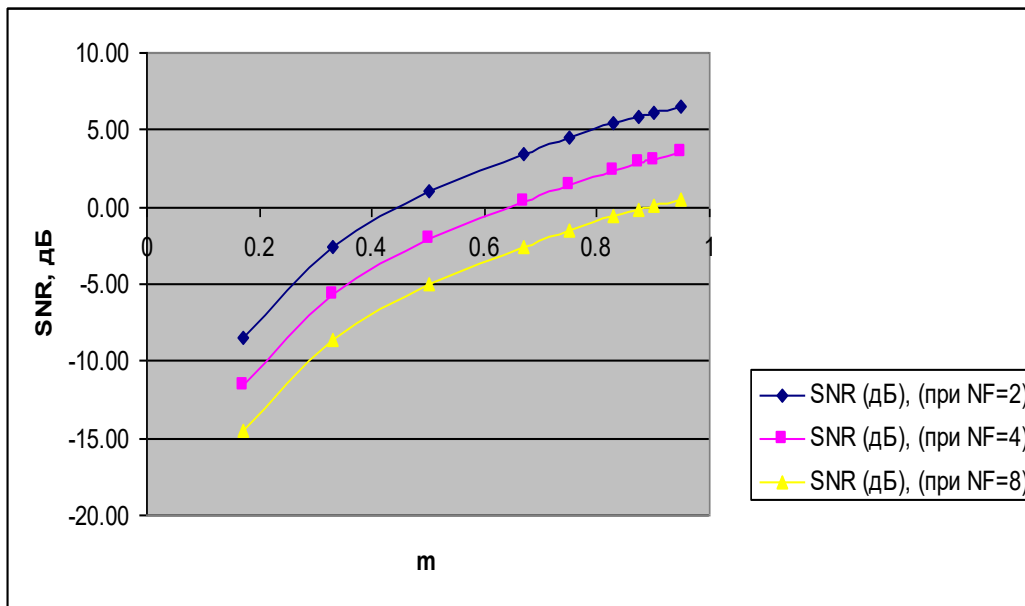


Рис.5. Залежність співвідношення сигнал/шум від глибини модуляції при різних значеннях коефіцієнту шуму на виході оптичного підсилювача

Від'ємне значення сигнал/шум означає, що при цьому рівень сигналу буде менше за рівень шуму. При нульовому значенні відношення сигнал/шум потужність сигналу буде дорівнювати потужності шуму. При цьому сигнал можна буде розрізнити на фоні шумів – при появі сигналу сумарна потужність на вході приймача збільшується удвоє – на 3 дБ.

З отриманих результатів можна зробити висновок, що для збільшення відношення сигнал/шум на виході підсилювача необхідно покращувати глибину модуляції та брати підсилювач з меншим коефіцієнтом шуму.

Глибина модуляції m підвищується за рахунок збільшення співвідношення A/B . Її підвищення можна досягти шляхом вибору відповідної технології модуляції. Мінімізувати коефіцієнт шуму волоконно-оптичного підсилювача (EDFA) до 3-4 дБ можна, використовуючи довжину хвилі накачування 980 нм. При використанні довжини хвилі накачування 1480 нм коефіцієнт шуму буде складати 5,5 дБ.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Впровадження ряду типів волоконно-оптичних підсилювачів зумовило появу нової технології волоконно-оптичного зв'язку. А саме – технології спектрального розділення каналів. Це надало можливість передачі без регенераторів значної кількості оптичних каналів на досить великі відстані, що дозволило побудову трансокеанських ліній. В теперішній час можна зробити висновки, що рішення на базі EDFA, впроваджені на лініях, показали хороші практичні результати. Вони досить надійні, відносно не дорогі, досить ефективні та не мають кращих інших варіантів при розробці багатоканальних (DWDM) ВОСП з відстанню між підсилювачами в межах 60 – 120 км та високою густиною оптичних каналів. При чому покращити параметри якості передавання за рахунок зменшення коефіцієнта помилок (BER) збільшенням співвідношення сигнал/шум можна за рахунок вибору технології модуляції та довжини хвилі накачування ОП.

Література

1. Бирюков Н.Л., Стеклов В.К. Транспортные сети и системы электросвязи. Системы мультиплексирования: Учебник для студентов вузов по специальности "Телекоммуникации" / Под ред. Стеклова В.К. – К. Випол, 2003.- 352 с.
2. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи.- М.: Техносфера, 2003. – 440 с.
3. Бірюков М.Л., Стеклов В.К., Костік Б.Я. Транспортні мережі телекомунікацій. Системи мультиплексування: Підручник для студентів вищ. техн. закладів / Під ред. Стеклова В.К.– К.: Техніка, 2005.- 312 с.
4. Слепов Н.Н. Синхронные цифровые сети SDH.- М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 1997.-148 с.
5. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. 2-е исправл. изд. – М.: Радио и связь, 2003. – 468 с.
6. Харлай Л.О., Манько О. О. Особливості застосування оптичних підсилювачів на сучасних DWDM мережах зв'язку // Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології. – 2022. – №2(04). – С. 40 – 47.
7. Manko O.O. Numerical modeling of passing noise photonic stream caused by Rayleigh Scattering in optical lines / Manko O.O., Markov S.Y., Koshman E.M.// *Электроника и связь. Тематический выпуск НТУУ „КПИ” «Проблемы электроники».* – 2007. – ч.3. – С.22 – 23.
8. Макаров Т.В. Когерентные волоконно-оптические системы передачи. Учебник для вузов. Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова, Одесса, 2009. – 220 с.
9. Personic S.D. Receiver Design for Digital Fiber Optic Communication Sysytems // *Bell System Technical Journal.* – 1973. – 52, N 6. – p. 843-886.
10. ITU-T Recommendation G.663, Application related aspects of optical amplifier devices and sub-systems, Geneva, 2011.
11. J. Boiko, O. Eromenko, I. Kovtun and S. Petrashchuk, "Effectiveness Improvement Method for Signal Processing in Optical Telecommunication," 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 777-782.

References

1. Byriukov N.L., Steklov V.K. Transportnye sety y systemy elektrosviazy. Systemy mulitypleksirovaniya: Uchebnyk dlia studentov vuzov po spetsyalnomy "Telekommunikatsyy" / Pod red. Steklova V.K. – K.: Vipol, 2003. – 352 s.
2. Fryman R. Volokonno-optycheskye systemy svyazy.- M.: Tekhnosfera, 2003. – 440 s.
3. Biriukov M.L., Steklov V.K., Kostik B.Ia. Transportni merezhi telekommunikatsii. Systemy mulitypleksuvannia: Pidruchnyk dlia studentiv vyshch. tekhn. zakladiv / Pid red. Steklova V.K. – K.: Tekhnika, 2005. – 312 s.
4. Slepov N.N. Synkhronnye tsyfrovyye sety SDH.- M.: EKO-TRENDZ, 1997.-148 s.
5. Slepov N.N. Sovremennyye tekhnolohyy tsyfrovyykh optovolokonnykh setei svyazy. 2-e yspravl. yzd. – M.: Radyo y sviaz, 2003. – 468 s.
6. Kharlai L.O., Manko O. O. Osoblyvosti zastosuvannia optychnykh pidsyliuvachiv na suchasnykh DWDM merezhakh zviazku // *Infokomunikatsiini ta kompiuterni tekhnolohii.* – 2022. – №2(04). – S. 40 – 47.
7. Manko O.O. Numerical modeling of passing noise photonic stream caused by Rayleigh Scattering in optical lines / Manko O.O., Markov S.Y., Koshman E.M.// *Elektronika I svyaz. Tematicheskyy vypusk NTUU"KPI" "Problemy elektroniki".* – 2007. – ch.3. – S.22 – 23.
8. Makarov T.V. Koherentnyye volokonno-optycheskye systemy peredachy. Uchebnyk dlia vuzov. Odessaia natsyonalnaia akademyia svyazy ym. A.S. Popova, Odessa, 2009. – 220 s.
9. Personic S.D. Receiver Design for Digital Fiber Optic Communication Systems // *Bell System Technical Journal.* – 1973. – 52, N 6. – p. 843-886.
10. ITU-T Recommendation G.663, Application related aspects of optical amplifier devices and sub-systems, Geneva, 2011.
11. J. Boiko, O. Eromenko, I. Kovtun and S. Petrashchuk, "Effectiveness Improvement Method for Signal Processing in Optical Telecommunication," 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 777-782.