

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ ЗІ СПЕКТРАЛЬНИМ УЩІЛЬНЕННЯМ КАНАЛІВ

Запропоновано математичну модель оптичного комутаційного вузла на прикладі крос-комутатора ОХС, яка представляє вхідний інформаційний потік у вигляді матриці, рядки якої відповідають DWDM каналам, а стовпці – довжинам хвиль, відповідно. Запропоновано спосіб забезпечення оптичної комутації без блокування у вузлі, на основі формування бінарних матриць переходів для всіх комутаційних елементів, який дозволяє враховувати показники ефективності оптичних комутаційних вузлів. Запропоновано модель каналу з ортогональним частотним мультиплексуванням, яка дозволяє підвищити співвідношення OSNR для окремого хвильового каналу.

The mathematical model of optical cross-connect switch (OXC) have been presented. Given model, represent the input data stream as a matrix, each rows of which represents the incoming data stream in the form of a matrix whose rows correspond DWDM channels, and columns - wavelengths, respectively. The method of optical switching without blocking in the node, based on the binary switching matrix for all switching elements have been presented. Method takes into account performance of optical switching nodes. In order to achieve better OSNR values the model channel with orthogonal frequency multiplexing have been designed.

1. ВСТУП

В сучасних телекомунікаційних системах основні функціональні властивості фізичного рівня моделі ISO/OSI транспортних DWDM мереж, такі як: підсилення, крос-з'єднання, комутація, контроль діагностика забезпечуються за допомогою оптоелектронних перетворень в кожному вузлі мережі [1-3]. Розвиток мереж приводить до введення нових вузлів і компонентів мережі та виникнення явищ, які не завжди можливо передбачити та врахувати в процесі проектування, тому важливо розвинути методи моделювання для удосконалення проектування та підвищення якості результуючих технічних рішень, що забезпечують конфігурування структури мережі та її адаптацію до змін навантаження. Різні вимоги клієнтів до смуги пропускання роблять оптоелектронне перетворення небажаним до застосування та нерентабельним. Враховуючи актуальність даної тематики, доцільним є комплексне дослідження елементної структури мережі, тобто множини елементів

¹⁸ Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова

транспортної системи, сконфігурованих для утворення наскрізного оптичного каналу передавання інформації в транспортних мережах зі спектральним ущільненням. Не дивлячись на широку різноманітність фізичних принципів, на яких побудовані відомі на сьогодні засоби комутації світлових потоків, жоден з них поки не здатен повністю задовольнити всі вимоги, що пред'являються до комутаційних вузлів сучасних інформаційних мереж. Тому важливим напрямком є розроблення математичних моделей окремих структурно-функціональних елементів повністю оптичної телекомунікаційної мережі та моделювання характеристик якості передавання інформаційних потоків з урахуванням параметрів окремих структурно-функціональних елементів.

2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИЧНОГО ВУЗЛА З КРОС-КОМУТАЦІЄЮ

Оптичний вузол з крос-комутацією (ОХС) є основним елементом в оптичних мережах з WDM [61]. Комутація по довжині хвиль з вхідних волокон на вихідні, в ОХС вносить гомодинні перехідні завади, які мають ту ж довжину хвилі, що і корисний сигнал і таким чином серйозно погіршують характеристики передачі [4,5]. Коли оптичний сигнал проходить через ОХС, безліч перехідних завад додаються до сигналу. Число перехідних завад, внесених кожним сигналом на тій же самій довжині хвилі, що й вихідний сигнал, як правило, знаходиться в випадковій залежності від стану комутуваних з'єднань в ОХС. Відмінності затримок оптичного поширення і стан поляризації вкладів перехідних завад знаходяться також у випадковому порядку, і завади які виникають внаслідок теплових і механічних коливань змінюються в часі. Тому параметри передачі також змінюються в часі. Типова структура ОХС показана на рис.1. На вхід такого комутаційного вузла поступає N каналів, кожен з яких складається з M ущільнених довжин хвиль. На виході вузла – N каналів по M довжин хвиль, відповідно. Розмірність такого вузла буде дорівнювати $N \cdot M$ інформаційних потоків. Як видно з рис. 1, ОХС складається з N оптичних демультиплексорів, M оптичних комутаторів і N мультиплексорів. Вузол побудований за повнозв'язною строго неблокуючою архітектурою, тобто кількість оптичних комутаційних елементів повинна дорівнювати кількості довжин хвиль.

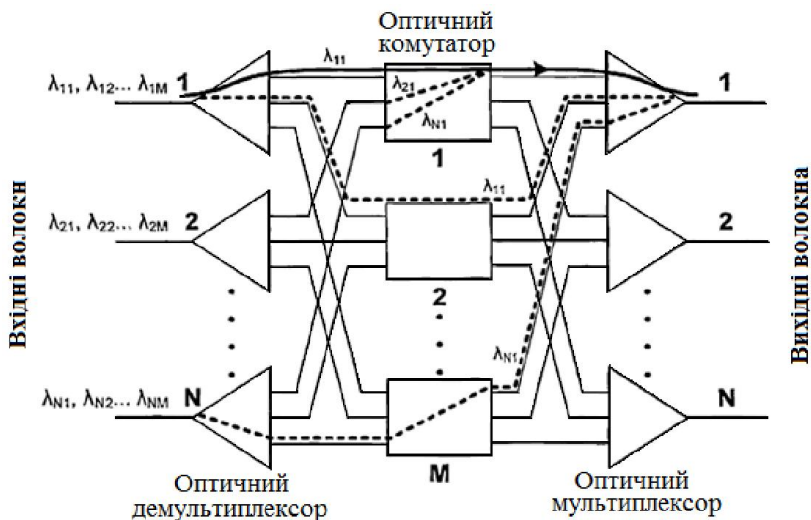


Рис.1. Модель повністю оптичного крос-комутатора для систем зі спектральним ущільненням

Опишемо процес комутації математично, для комутатора розмірністю 4x4 WDM канали. Для спрощення розрахунків прийемо, що кількість довжин хвиль які комутуються у вузлі дорівнює кількості вхідних/вихідних каналів.

Прийемо, що на вхід такого комутаційного вузла поступає 4 канали, кожен з яких складається з 4 ущільнених довжин хвиль. На виході вузла – 4 канали по 4 довжини хвиль, відповідно. Як видно з рис. 1, ОХС складається з N оптичних демультиплексорів, M оптичних комутаторів і N мультиплексорів. Вузол побудований за повнозв'язною строго неблокуючою архітектурою, тобто кількість оптичних комутаційних елементів повинна дорівнювати кількості довжин хвиль.

В запропонованій моделі, інформаційних потік який поступає на вхід комутаційного вузла представляється у вигляді матриці

$$X = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & \lambda_{14} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} & \lambda_{24} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} & \lambda_{34} \\ \lambda_{41} & \lambda_{42} & \lambda_{43} & \lambda_{44} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

З рис.1 можна побачити, що рядки матриці (1) відповідають вхідним DWDM каналам, а стовпці комутаційним елементам, відповідно. Отже на входи 1-го комутаційного елементу поступає 4 інформаційні

потоки, кожен з яких має довжину хвилі λ_{i1} . Тоді вектор вихідних каналів, на які перенаправляються інформаційні потоки з однойменними довжинами хвиль визначається наступним чином:

$$y_i^T = x_i^T \cdot K_j, \quad (2)$$

де K_j – бінарна матриця переходів j -го комутаційного елементу, яка визначає співвідношення між вхідним і вихідним каналом, за яким комутується інформаційний потік для даної довжини хвилі.

Наприклад для чотирьох вхідних DWDM каналів, матриці переходів для окремо взятих комутаційних елементів можуть мати наступний вигляд:

$$K1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, K2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, K3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, K4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Бінарні матриці переходу представлені в (3) вибрані випадковим чином. Обов'язковою умовою при формуванні матриці переходу, є:

$$\prod_i \prod_j K_{ij} = 0. \quad (4)$$

Умова (4) виконується лише у випадку відсутності у двох будь-яких матрицях однойменних одиниць, тобто поелементний добуток усіх матриць повинен дорівнювати нульовій матриці. За формулою (2) проводиться розрахунок векторів вихідних каналів для кожної окремо взятої довжини хвилі і формується матриця вихідного інформаційного потоку в мережі

$$Y = \begin{bmatrix} \lambda_{21} & \lambda_{12} & \lambda_{33} & \lambda_{44} \\ \lambda_{11} & \lambda_{22} & \lambda_{43} & \lambda_{34} \\ \lambda_{41} & \lambda_{32} & \lambda_{13} & \lambda_{24} \\ \lambda_{31} & \lambda_{42} & \lambda_{23} & \lambda_{14} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Матриця (5) відображає набір інформаційних каналів структурованих відповідно до вхідного інформаційного потоку. Рядки матриці відповідають вихідним DWDM каналам, а стовпці - інформаційним потокам на однойменних довжинах хвиль.

Запропонована математична модель дозволяє оптимізувати процес керування комутаційними вузлами на мережевому рівні. Відповідно до таблиці маршрутизації інформаційних потоків на мережевому рівні, комутаційним вузлам пересилаються бінарні матриці переходів K_j , відповідно до яких встановлюються наскрізні з'єднання, необхідні для утворення каналів.

3. МОДЕЛЬ ОПТИЧНОГО КАНАЛУ З ОРТОГОНАЛЬНИМ ЧАСТОТНИМ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯМ

Крім важливого завдання вдосконалення параметрів і конструкцій магістральних волоконно-оптичних кабелів не менш гостро постає задача створення методів передавання інформації в DWDM системах, які б забезпечували кращі енергетичні та спектральні характеристики.

На сучасному етапі розвитку, DWDM системи не мають значного запасу розвитку. Подальше підвищення швидкостей передавання на одній довжині суттєво обмежується впливом нелінійних ефектів, що вимагає більш детального вивчення. А збільшення кількості довжин хвиль в одному волокні, призводить до зменшення рівня оптичного співвідношення “сигнал/шум” (OSNR), як вже було показано в першому розділі.

У зв'язку з цим доцільно піти іншим шляхом, намагаючись підвищити спектральну ефективність оптичних транспортних систем.

Для цього пропонується використати підходи з теорії радіозв'язку, а саме метод ортогонального частотного мультиплексування в поєднанні з вузькосмуговими видами модуляції [6]. Тобто послідовний цифровий інформаційний потік який повинен передаватись на окремо виділеній довжині хвилі, перетворюється в паралельний. Паралельні потоки незалежно модулюються вузько смуговим видом модуляції (QPSK, M-QAM), сумуються між собою, і передаються на приймальну сторону по оптичному волокну. Оскільки сигнал на виході суматора є аналоговим, для передавання через оптичну мережу його необхідно перетворити в цифрову форму, і після цього передати в канал зв'язку.

Для того щоб інформаційні сигнали на виході можна було розділити, їхні несучі коливання вибираються ортогональними. В термінах теорії сигналів це означає, що скалярний добуток між двома будь-якими різними сигналами $S_k(t)$ і $S_l(t)$ з цього ансамблю дорівнює нулю:

$$\langle S_k(t), S_l(t) \rangle = \int_0^T S_k(t) S_l(t) dt = 0, k \neq l, \quad (6)$$

де T – тривалість сигналів.

Простим ансамблем ортогональних сигналів $S_1(t) \dots S_k(t)$ є набір відрізків гармонічних коливань із заданими значеннями амплітуди A_k , початкової фази φ_k які відрізняються один від одного певним частотним зсувом. Математичний вираз для такого сигналу має вигляд [7]:

$$\begin{aligned} \langle S_k(t), S_l(t) \rangle &= \int_0^{T_s} A_k \cos(2\pi f_k t + \phi_k) A_l \cos(2\pi f_l + \phi_l) dt = \\ &= \frac{A_k A_l}{2} \left[\frac{\sin(2\pi(f_k + f_l)T_s + \phi_k + \phi_l) - \sin(\phi_k + \phi_l)}{2\pi(f_k + f_l)} + \frac{\sin(2\pi(f_k - f_l)T_s + \phi_k - \phi_l) - \sin(\phi_k - \phi_l)}{2\pi(f_k - f_l)} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

Якщо сума і різниця частот є цілим кратним значенню $1/T_s$, то скалярний добуток сигналів $S_k(t)$ і $S_l(t)$ дорівнює нулю.

На рис.2 представлено структурну схему оптичного каналу зв'язку з ортогональним частотним мультиплексуванням.

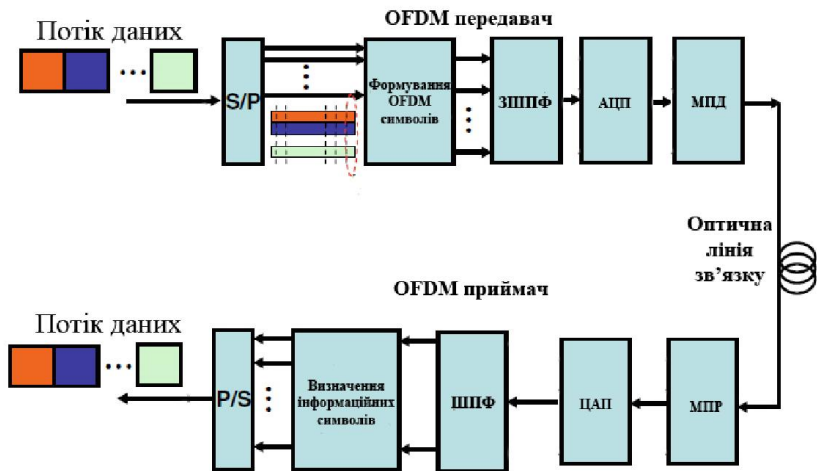


Рис. 2. Структурна схема прямого формування OFDM-сигналів

На рис. 3. представлено залежність коефіцієнта появи бітових помилок від співвідношення OSNR для потоків STM-16, STM-64 та STM-256, для звичайного методу передавання.

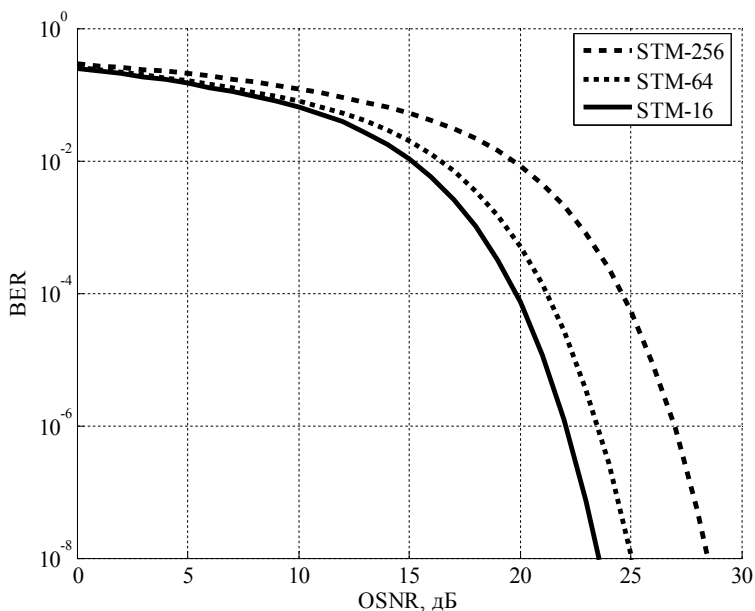


Рис. 3. Залежності коефіцієнта появи бітових помилок від співвідношення “сигнал/шум” при звичайній схемі передавання

Як видно з рис. 3 результати моделювання підтверджують попередні теоретичні розрахунки. Для забезпечення належної якості передавання потоку STM-16, значення OSNR повинне становити приблизно 23 дБ. Для потоку STM-64, значення OSNR становитиме 25 дБ, а для STM-256, OSNR=28 дБ.

Аналогічне моделювання проведено для оптичних систем з використанням ортогонального частотного мультиплексування. Результати моделювання показані на рис. 4.

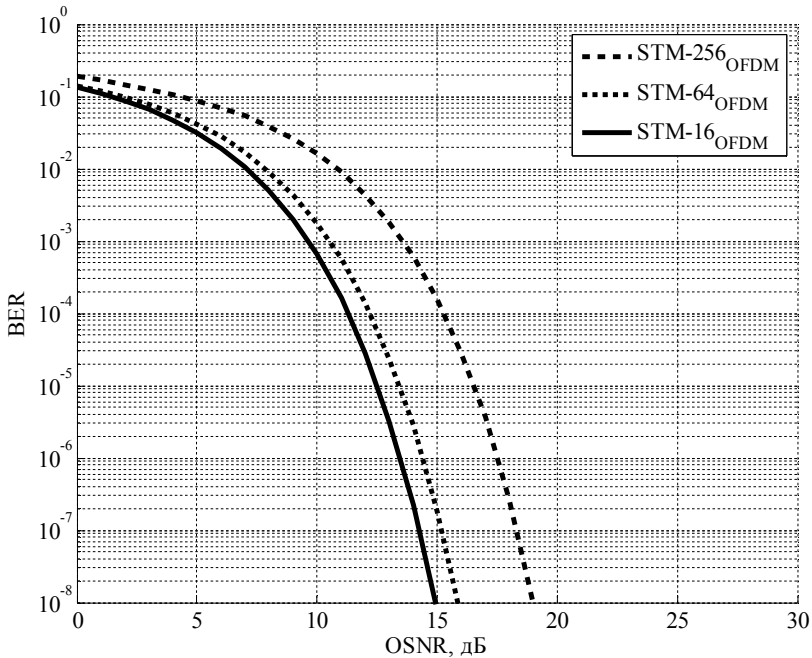


Рис. 4. Залежності коефіцієнта появи бітових помилок від співвідношення “сигнал/шум” при використанні OFDM

Як показують отримані результати, використання технології ортогонального частотного мультиплексування дозволяє значно знизити рівень OSNR, необхідний для передавання інформації з належною якістю, у порівнянні із звичайним методом передавання.

Зокрема для передавання потоку STM-16, необхідне значення OSNR становить лише 15 дБ. Для потоку STM-64, значення OSNR становить 16 дБ, а для потоку STM-256, OSNR=19 дБ. Відповідно можна зробити висновок, що використання технології OFDM дозволяє збільшити кількість хвильових каналів в DWDM системі, а в перспективі дозволяє значно підвищити пропускну спроможність волоконно-оптичних систем зв'язку.

5. ВИСНОВКИ

Запропоновано математичну модель оптичного комутаційного вузла на прикладі крос-комутатора OXC (Optical Cross Connect). Запропонована модель представляє вхідний інформаційний потік у вигляді матриці, рядки якої відповідають DWDM каналам, а стовпці – довжинам хвиль, відповідно. Запропоновано спосіб забезпечення оптичної

комутації без блокування у вузлі, на основі формування бінарних матриць переходів для всіх комутаційних елементів. Перевагою даної моделі є простота матричних обчислень, на основі методів мулевої алгебри, яка не сильно залежить від кількості елементів у матриці, що забезпечує можливість масштабування комутаційного вузла, без ускладнення алгоритму комутації. Крім того модель дозволяє враховувати такі важливі показники ефективності оптичних комутаційних вузлів як загасання, та затримка комутації. Дані параметри враховуються для визначення ефективності оптичного каналу та визначення OSNR. Крім того запропоновано модель яка враховує вплив ербієвих волоконно-оптичних підсилювачів на параметр OSNR. Запропоновано модель каналу з ортогональним частотним мультиплексуванням, яка дозволяє підвищити співвідношення OSNR для окремого хвильового каналу.

Застосування технології WDM на рівні міських мереж дає провайдерам значну гнучкість, яка дозволяє їм пропонувати послуги для різних секторів ринку. Прозорість оптичної передачі дозволяє здійснювати локальний зв'язок по існуючих протоколах (IP, Ethernet і т. д.) з додаванням захисту на рівні ліній SONET/SDH. Витрати на розширення мережі достатньо низькі, оскільки устаткування WDM для коротких міських ліній зв'язку значно дешевше, ніж набагато складніше устаткування для ліній зв'язку великої протяжності.

Більш того, для ефективного використання смуги пропускання систем WDM трафік SONET/SDH, IP або ATM в оригінальному форматі, можна передавати по різних каналах. Системи WDM міського масштабу дозволяють також передавати трафік таких протоколів, як Gigabit Ethernet, FDDI і ESCON. Хоча передавати сигнали типу Gigabit Ethernet, що «неефективно використовують час», в їх оригінальному форматі по каналах WDM високої протяжності не завжди економічно, іноді має сенс це робити для коротких дистанцій, типових для міських мереж зв'язку. Прозорість DWDM-обладнання до різноманітних протоколів передачі дозволяє організувати між вузлами передачу будь-якого трафіку, при чому будь-яке устаткування, наприклад ATM чи IP-комутатори, може безпосередньо підключатися до WDM-обладнання без попередньої інкапсуляції в SDH фрейми. Потенційна можливість збільшення числа спектральних каналів до 80 і більше робить рішення на основі DWDM необмежено масштабованим з практичної точки зору. Заміна устаткування SDH є дорожчим рішенням, але володіє найбільшим мережевим ресурсом, оскільки забезпечує передачу удвічі більшого потоку інформації, ніж альтернативні рішення.

1. *All-Optical Networking Consortium: WDM Description, 1996, <http://www.ll.mit.edu/aon/aonwdm.html>* 2. T. Krause. "Migration to All-Optical Networks". /T. Krause.// Alcatel Network Systems, 1998, <http://www.usa.alcatel.com>

/telecom/transpt/optical/techpaps/migration/ 3. S. Cortez and M. Dickerson. "Enabling the all-optical network". *America's Networks*, 1998, <http://www.americasnetwork.com/issues/98issues/980201/> 4. D.J. Blumenthal, P.R. Prucnal, and J.R. Sauer. " Photonic Packet Switches: Architecture and Experimental Implementations". *Proceedings of the IEEE*, vol.82, no.11, November, 1994, pp.1650-1665 5. Stavdas, A., Avramopoulos, H., Protonotarios, E. N., & Midwinter, J. E. (1999). An OXC architecture suitable for high density WDM wavelength routed networks. *Photonic Network Communication*, 1(1), – P. 77-88. 6. Shieh, W., Bao, H., & Tang, Y. (2008). Coherent optical OFDM: theory and design. *Opt. Express*, 16(2), – P. 841-859. 7. Armstrong, J., & Schmidt, B. J. (2008). Comparison of asymmetrically clipped optical OFDM and DC-biased optical OFDM in AWGN. *Communications Letters, IEEE*, 12(5), – P. 343-345.