

Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан, Т.А. Максимюк, В.З. Пашкевич
Національний університет “Львівська політехніка”

МОДЕЛЬ АКУСТООПТИЧНОГО КОМУТАТОРА ДЛЯ ПОВНІСТЮ ОПТИЧНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

© Стрихалюк Б.М., Кайдан М.В., Максимюк Т.А., Пашкевич В.З., 2013

B.M. Stryhalyuk, M.V. Kaidan, T.A. Maksymyuk, V.Z. Pashkevych
Lviv Polytechnic National University

MODEL OF ACOUSTOOPTICAL SWITCH FOR ALL OPTICAL TELECOMMUNICATION SYSTEMS

© Stryhalyuk B.M., Kaidan M.V., Maksymyuk T.A., Pashkevych V.Z., 2013

Optical communication using semiconductor lasers as sources and optical fiber as the transmission medium is the only solution to handle the massive growth of network traffic. A single strand of fiber offers a bandwidth of 25 000 GHz, and a cable containing about 1000 optical fibers can carry six billion simultaneous full-screen videophone conversations – one for every person on earth. To utilize the potential bandwidth available on these optical fibers, other components of the optical network system have to be developed, ranging from detectors to multiplexers, buffers and switches. This paper addresses to acoustooptical technique, which could applied to switching optical signals. In general, a switch is concerned with the routing of message information in response to supervisory control signals. The message information could be large blocks of multiplexed traffic in the optical core network or a large number of lower bit channels delivered to the users in the optical access network. However, the application of an optical switch may not just be limited to the communication networks but also will incorporated in the communication cores of a large multi-processor computer where the data rates may exceed 100 Gbit/s. With new schemes being experimented for secure communication and for computing using quantum phenomena, new architecture will be required for switches that do not interrupt the phase information of the quantum packets.

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 presented. The advantage of our model is the simplicity of matrix computations based on Boolean algebra methods, which is not strongly dependent on the number of elements in the matrix and able to scale switching node switching algorithm without cumbersome calculations.

We propose the model of optical switch based on acousto-optic cell. Unlike previous implementations, it is able for two-dimensional signals switching, by using mutually orthogonal acousto-optical cells. Thus, the proposed structure of the switching node is fully connected, and allows to switching information signal with an arbitrary carrier frequency from any input channel to any output channel, with the possibility of wavelength conversion.

Furthermore, we design an improved model of wavelength adjustment device. The novelty of the proposed device lies in using a single converter, instead of wavelength converters array. Our device based on the four-wave mixing effect and adaptable for any combination of input/output wavelengths by the reference signal generator Implementation of this device allows will improve the scalability of optical transport network structure.

Key words: DWDM, optical switching, acoustooptical cell, four-wave mixing.

Запропоновано математичну модель оптичного комутаційного вузла на прикладі крос-комутатора, яка зображає 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. Представлена структурна схема оптичного комутатора на основі акустооптичної комірки. На відміну від попередніх реалізацій, цей комутатор дозволяє комутувати сигнал у двох площинах за рахунок використання двох взаємно ортогональних акустооптичних комірок. Запропоновано удосконалену модель пристрою узгодження довжин хвиль, яка працює на основі ефекту чотирихвильового змішування. Ця модель є адаптивною для будь-якої комбінації вхідних/вихідних довжин хвиль, за рахунок генератора опорного сигналу, керованого контролером.

Ключові слова: DWDM, оптична комутація, акустооптична комірка, чотирихвильове змішування.

Вступ

Сучасні оптичні телекомунікаційні системи здатні забезпечити пропускні здатності каналів на рівні декількох терабіт за секунду. Однак на сучасному етапі розвитку основні функціональні властивості фізичного рівня транспортних DWDM мереж, такі як: підсилення, крос-з'єднання, комутація, контроль-діагностика забезпечуються за допомогою оптоелектронних перетворень у кожному вузлі мережі [1–3]. Розвиток технологій призводить до введення нових вузлів і компонентів у мережі, які працюють на основі оптичних ефектів та явищ, що дає змогу уникнути перетворень сигналу із оптичного представлення у електричне, і навпаки. Незважаючи на широку різноманітність фізичних принципів, на яких побудовані відомі 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 комутаційних вузлів, які функціонують на основі різноманітних оптичних ефектів [4], та визначення їхніх характеристик. Серед основних параметрів, на основі яких формують вимоги до сучасних оптичних комутаторів, можна виділити такі: час затримки комутації, складність реалізації системи управління комутатором, повнозв'язність та масштабованість.

На початку 90-х років XX ст. з'явилися перші системи автоматичної просторової комутації, які почали використовувати як ефективний засіб для забезпечення резервних перемикачів і дистанційної реконфігурації оптичної мережі. Проте недоліком систем була низька швидкість відгуку на запити керуючого процесора, яка перебувала в межах 10–15 мс, що було явно недостатньо для розроблення швидкісного оптичного комутатора. У середині 90-х років XX ст. був випущений перший оптичний комутатор із спектральним перемиканням каналів. Показники оперативності спектральної комутації кращі, але і тут світова промисловість поки далека від створення оперативного комутатора WDM. Тому актуальним науковим завданням постає розроблення нових методів оптичної комутації з інтелектуальним управлінням, які б забезпечили мінімальний час реагування на зміни в мережі, а також адаптувались до характеру розподілення інформаційних потоків під час довгострокової експлуатації.

Узагальнена математична модель оптичного вузла з крос-комутацією

Оптичний вузол з крос-комутацією (ОХС) є основним елементом в оптичних мережах зі спектральним ущільненням [5]. Типова структура ОХС показана на рис. 1. На вхід такого комутаційного вузла надходить N каналів, кожен з яких складається з M ущільнених довжин хвиль. На виході вузла – N каналів по M довжин хвиль, відповідно. Розмірність такого вузла дорівнюватиме $N \cdot M$ інформаційних потоків. Як видно з рис. 1, ОХС складається з N оптичних демультиплексорів, M оптичних комутаторів і N мультиплексорів. Особливістю цього вузла є те, що він побудований за повнозв'язною строго неблокуючою архітектурою, тобто кількість оптичних комутаційних елементів повинна дорівнювати кількості довжин хвиль.

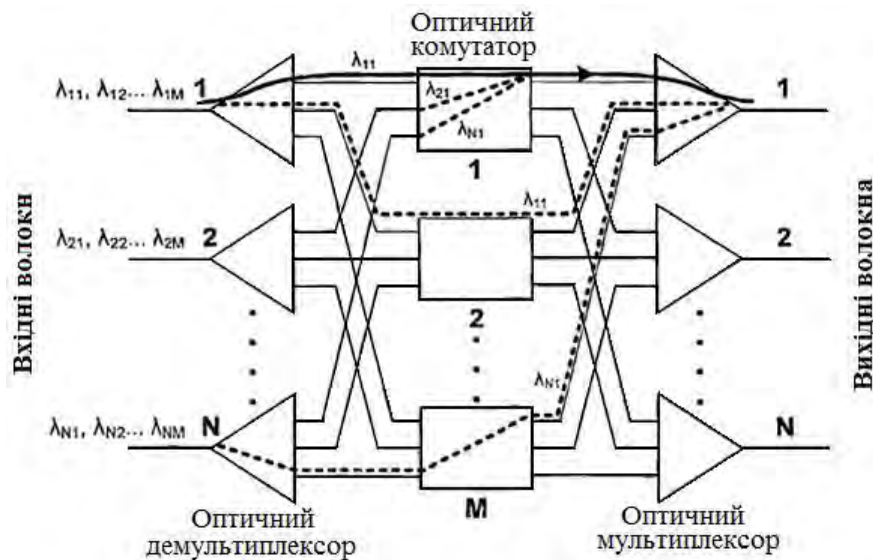


Рис. 1. Модель повністю оптичного крос-комутатора для систем зі спектральним ущільненням

Опишемо математичну модель процесу комутації, для комутатора розмірністю 4x4 WDM канали. Для спрощення розрахунків прийнемо, що кількість довжин хвиль, які комутуються у вузлі, дорівнює кількості вхідних/вихідних каналів, тобто комутаційна матриця є квадратною.

Приймається, що на вхід такого комутаційного вузла надходить 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 повнзв'язною строго неблокуючою архітектурою, тобто кількість оптичних комутаційних елементів повинна дорівнювати кількості довжин хвиль.

У запропонованій моделі інформаційних потоків, який надходить на вхід комутаційного вузла, подамо у вигляді матриці:

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

З рис.1 можна побачити, що рядки матриці (1) відповідають вхідним DWDM каналам, а стовпці комутаційним елементам, відповідно. Отже, на входи першого комутаційного елемента надходять чотири інформаційні потоки, кожен з яких має довжину хвилі λ_{i1} . Тоді вектор вихідних каналів, на які перескеруються інформаційні потоки з однойменними довжинами хвиль, визначається так:

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

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

Наприклад, для чотирьох вхідних DWDM каналів матриці переходів для окремо взятих комутаційних елементів можуть мати такий 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, наведені в (3), вибрані випадково. Обов'язковою умовою при формуванні матриці переходу є:

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

Умова (4) виконується лише за 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:

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

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 дає змогу оптимізувати процес керування комутаційними вузлами на мережевому рівні. Відповідно до таблиць 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.

Модель оптичного комутатора на основі акустооптичних комірок

Акустооптичні комірки сьогодні активно затребувані під час розроблення і виробництва широкого спектра лазерної та оптичної апаратури, що функціонує в ультрафіолетовій, видимій та інфрачервоній областях оптичного спектра [6]. Акустооптичні прилади не містять рухомих механічних частин і управляються електронним сигналом, що визначає їх високу швидкодію і широкі функціональні можливості. Саме акустооптичні методи управління світлом найефективніші при розробленні оптичних комутаційних вузлів.

Під час поширення плоскої акустичної хвилі в кристалі утворюються періодичні шари зміни показника заломлення, які представляють для падаючого світла періодичні дифракційні ґратки, що рухаються із швидкістю звуку. Пройдене через таке середовище світло відхиляється на неоднорідностях показника заломлення на кут, залежний від періоду дифракційних ґраток, який, своєю чергою, пропорційний частоті поширення звукової хвилі в кристалі. Отже, відхилений оптичний сигнал комутується з матрицею вихідних оптичних волокон внаслідок акустооптичної взаємодії [7].

Акустооптичний комутатор здійснює оптичну апаратну комутацію, зв'язуючи вхідне оптичне волокно з волокном вихідного оптоволоконного масиву. На рис. 2 наведена система акустооптичного комутатора для комутації вхідного оптичного сигналу з однією із вихідних оптичних ліній. Волоконно-оптичний масив 3 складається з $N \cdot M$ оптичних портів, які розміщені у формі квадратної матриці. Рядки цього масиву являють собою вихідні оптичні лінії, а стовпці – довжини хвиль, відповідно.

Розглянемо структурну схему акустооптичного комутатора, зображеного на рис. 2. Вхідний сигнал 5 надходить по оптичному волокну 1. Сигнал фокусується лінзою 6 на пристрій повороту площини поляризації 7. Площина поляризації сигналу повертається так, щоб сигнал попадав на лінзу 9 з максимальною інтенсивністю.

Сплітер 10 розділяє оптичний сигнал 5 так, щоб сигнал 5, a , ідентичний сигналу 5, передавався контролеру 12. Залежно від сигналів контролера, двокоординатна акустична комірка 8, яка складається з двох оптично-активних кристалів з п'єзоперетворювачами, орієнтованих перпендикулярно одна до одної, відхиляє оптичний сигнал 5 в двох площинах відповідно до індексу довжини хвилі та вихідного каналу. Відхилений оптичний сигнал проєктується на лінзу 9, яка фокусує оптичний сигнал 5 у відповідний вихідний порт масиву 3.

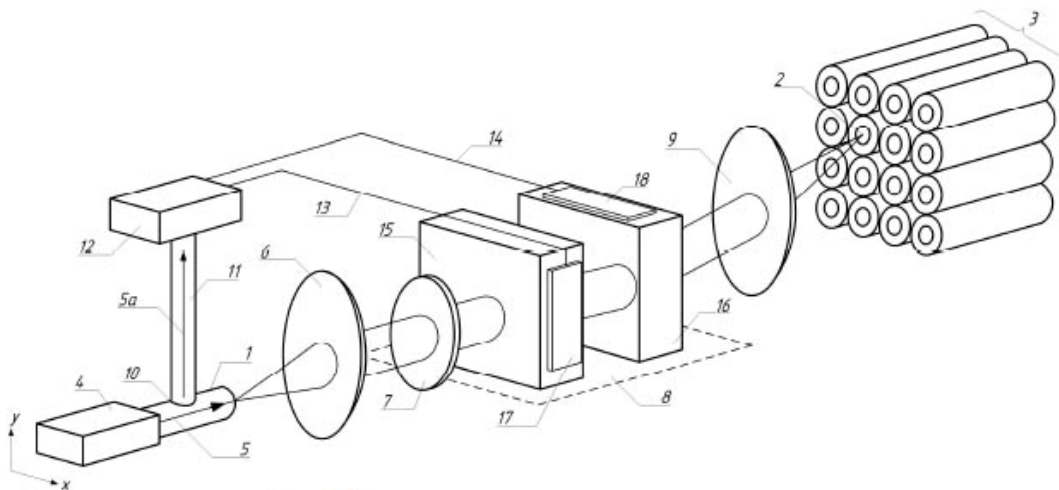


Рис. 2. Модель акустооптичного комутатора

Модель пристрою узгодження довжин хвиль на основі ефекту чотирьохвильового змішування

Пристрої узгодження довжин хвиль на основі нелінійного ефекту чотирьохвильового змішування [10] в оптичному волокні використовують явище, за якого три хвилі з частотами f_1 , f_2 , f_3 приводять до генерації четвертої хвилі $f = f_1 + f_2 - f_3$ або $f = 2f_1 - f_3$ при $f_1 = f_2$. Модель пристрою для узгодження довжин хвиль наведена на рис. 3.



Рис. 3. Модель пристрою узгодження довжин хвиль

Особливість цього процесу полягає в тому, що генеруємо опорну хвилю, яка лежить в смузі взаємодіючих частот, близьких між собою. Враховуючи невелику амплітуду генеруючої складової, зазвичай використовують напівпровідниковий оптичний підсилювач, а також спеціальне оптичне волокно, в якому ефект чотирьохвильового змішування сильно виражений. Тоді подавання на напівпровідниковий оптичний підсилювач основного $f_{вх}$ і опорного сигналів $f_{оп}$ спричиняє до генерації на виході хвильового конвертера частоти:

$$f_{вих} = 2f_{вх} - f_{оп}, \quad (6)$$

за умови, що всі вказані частоти лежать в робочій смузі частот підсилювача. Згенерована таким чином довжина хвилі становитиме

$$I_{вих} = \frac{I_{вх} I_{оп}}{2I_{оп} - I_{вх}}. \quad (7)$$

Основна перевага цього методу узгодження довжин хвиль полягає в тому, що він прозорий по відношенню до формату перетворюваного сигналу. Можна відзначити, що нелінійні ефекти в оптичному волокні, що призводять до генерації нових гармонік, зумовлені переважно нелінійністю

показника заломлення. Вони можуть спостерігатися і при малих інтенсивностях вхідного випромінювання, враховуючи дуже низькі втрати світлового пучка частоти f_0 у волокні, що характерно для діапазону третього вікна прозорості.

Висновки

Застосування оптичної комутації не сприяє збільшенню швидкості передавання, а тільки оптимізує управління потоками в системах DWDM. Оскільки DWDM не призводить до подальшого підвищення ефективності використання вже прокладених кабельних систем, необхідно оптимізувати роботу системи DWDM за рахунок оптичної комутації. Запропоновано математичну модель оптичного комутаційного вузла на прикладі крос-комутатора ОХС (Optical Cross Connect). Запропонована модель зображає 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 цієї моделі є простота матричних обчислень, на основі методів булевої алгебри, яка не значно залежить від кількості елементів у матриці, що забезпечує можливість масштабування комутаційного вузла без ускладнення алгоритму комутації.

Наведена структурна схема оптичного комутатора на основі акустооптичної комірки. На відміну від попередніх реалізацій, цей комутатор дає змогу комутувати сигнал у двох площинах, за рахунок використання двох взаємно ортогональних акустооптичних комірок. Отже, запропонована структура комутаційного вузла є повнозв'язною і дає змогу комутувати інформаційний сигнал з довільною частотою несучої з будь-якого вхідного каналу в будь-який вихідний канал з можливістю перетворення несучої. Крім того, запропоновано удосконалену модель пристрою узгодження довжин хвиль. Новизна запропонованого пристрою полягає в тому, що замість масиву конвертерів довжин хвиль використовується один універсальний, який працює на основі ефекту чотирьоххвильового змішування. Модель є адаптивною для будь-якої комбінації вхідних/вихідних довжин хвиль за рахунок генератора опорного сигналу, керованого контролером. Отримані результати дають можливість сформулювати концепцію побудови комутаційних вузлів повністю оптичної телекомунікаційної мережі. Сформовано підходи до побудови повністю оптичних комутаторів для систем, які використовують технологію спектрального ущільнення каналів DWDM. Комутаційна підсистема мережі також повинна працювати без оптоелектронного перетворення сигналу, забезпечуючи водночас можливість перетворення довжини хвилі коли це необхідно.

1. *All-Optical Networking Consortium: WDM Description, 1996, <http://www.ll.mit.edu/aon/aonwdm.html>*. 2. T. Krause. "Migration to All-Optical Networks". 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. Стрихалюк Б.М, Думич С.С, Кайдан Н.В., Холявка О.В, Красько Е.В. Математическая модель процесса коммутации информационных потоков в полностью оптических телекоммуникационных системах.// 11-я междунар. науч.-практич. конф. "Мультисервисные сети и предоставление услуг-2012", СПГУТ им. Бонч-Бруевича, 11–16 октября 2012. – СПб., 2012. 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), 77-88. 6. A. S. Andrushchak, E. M. Chernyhivsky, Z. Y. Gotra, M. V. Kaidan, A. V. Kityk, N. A. Andrushchak, T. A. Maksymyuk, B. G. Mytsyk and W. Schranz, "Spatial anisotropy of the acousto-optical efficiency in lithium ni-obate crystals", *Journal of Applied Physics*, vol.108, no.10, 103118-103118 (pp.1-5). 7. A.S. Andrushchak, M.V. Kaidan, Ye. M. Chernyhivskiy, O.V. Yurkevych, T.A. Maksymyuk, B.G. Mytsyk, and A.V. Kityk, "Application efficiency increasing of LiNbO₃:MgO and GaP crystals for acoustooptical high-frequency control of powerfull laser irradiation", In *Proc. IEEE International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling 2010 (LFNM 2010)*, pp.173-175.