

ОБРОБКА ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

Man'ko O.O., Markov S.E., Melishuk I.S. Processing optical signals and the efficiency of communication systems. The development of optical communication systems occurred both through revolution (single-mode fiber, optical amplifiers, wavelength division multiplexing system, new modulation formats) and evolution. An important role in optical systems has an optical signal processing (modulation, coding, multiplexing). The criteria for assessing the degree of development of fiber-optic communication system is its performance. At each step of the revolutionary development of optical communication systems performance increases dramatically. It is shown that the current productivity growth peaked (100G transfer rates, the spectral density of about 2 (bits/s)/Hz). For systems with the new modulation format with increasing spectral efficiency performance decreases, so it can be argued that the development of fiber-optic transmission systems there is a shift from the revolutionary stage of development to evolutionary. The next likely step of a revolutionary development possible will use multicore optical fibers.

Keywords: fiber optic system transmission, performance of optical transmission system, spectral efficiency of optical transmission system, modulation, coding, multiplexing.

Манько О.О., Марков С.Ю., Меліщук І.С. Обробка оптичних сигналів та ефективність систем зв'язку. Розвиток оптичних систем зв'язку відбувався як революційним шляхом (одномодові волокна, оптичні підсилювачі, системи спектрального ущільнення, нові формати модуляції), так і еволюційним. Важливу роль у оптичних системах має обробка оптичного сигналу (модуляція, кодування, мультиплексування). Критерієм оцінки ступеня розвитку волоконно-оптичної системи зв'язку є її продуктивність. В роботі показано, що в даний час зростання продуктивності досягло свого максимуму (швидкість передачі 100G, спектральна щільність близько 2 (біт/с)/Гц). Для систем з новими форматами модуляції з ростом спектральної ефективності продуктивність зменшується, таким чином можна стверджувати, що в розвитку волоконно-оптичних систем передачі спостерігається перехід від революційного етапу розвитку до еволюційного.

Ключові слова: волоконно-оптична система передачі, продуктивність оптичної системи передачі, спектральна ефективність оптичної системи передачі, модуляція, кодування, мультиплексування.

Манько А.А., Марков С.Е., Меліщук И.С. Обработка оптических сигналов и эффективность систем связи. Развитие оптических систем связи происходило как революционным путем (одномодовые волокна, оптические усилители, системы спектрального уплотнения, новые форматы модуляции), так и эволюционным. Важную роль в оптических системах имеет обработка оптического сигнала (модуляция, кодирование, мультиплексирование). Критерием оценки степени развития волоконно-оптической системы связи является ее производительность. В работе показано, что в настоящее время рост производительности достиг своего максимума (скорость передачи 100G, спектральная плотность около 2 (бит/с)/Гц). Для систем с новыми форматами модуляции с ростом спектральной эффективности производительность уменьшается, таким образом можно утверждать, что в развитии волоконно-оптических систем передачи наблюдается переход от революционного этапа развития к эволюционному.

Ключевые слова: волоконно-оптическая система передачі, производительность оптической системы передачі, спектральная эффективность оптической системы передачі, модуляция, кодирование, мультиплексирование.

Вступ

Наразі однією з основних задач є обробка, зберігання та передача цифрової інформації. Діапазон відстані передачі дуже широкий (на чіпі, платі та шині даних, на Землі та в космосі). Кожне з цих застосувань має набір проблем, які можуть бути вирішені з використанням різних систем зв'язку. Оптичні технології зв'язку мають перевагу над іншими в бітовій швидкості та/або в відстані передачі. Ці переваги пояснюються високими частотами оптичних носіїв та дуже малими втратами на оптичних частотах (менше 0,2 дБ/км). Крім того, великою перевагою є: відсутність електромагнітних перешкод, продуктивність, спектральна ефективність, вартість, простота реалізації.

Придатність оптичного зв'язку для різних застосувань може бути проаналізована з використанням трьох основних характеристик систем передачі: чутливості транспондерів, ємності системи та можливості реалізації транспондера.

Чутливість транспондера - мінімальна потужність (або мінімальне відношення сигнал/шум), що необхідна приймачу для здійснення цифрового зв'язку. У цьому контексті "чутливість" включає ефект спотворень сигналу. Ємність системи - обсяг даних, які можна передавати через середовище передачі в одиницю часу. При використанні паралельних смуг це вимагає високих сукупних потужностей транспондера. Реалізація транспондера (фізичні розміри, енергоспоживання, вартість і надійність) часто стає найбільш критичним параметром "входження" оптики в простір застосувань.

Наразі оптичний зв'язок поступово замінює електронні рішення. Розгортання технології "волокно до дому" (FTTH) у даний час ведеться в усьому світі, оптика захоплює простір доступу, і навіть з'єднання стійки зі стійкою стають оптичними. Оптичні рішення ідуть до створення оптичних чіпів та оптичних зв'язків між чіпами [1], тобто до обробки сигналу в оптичному діапазоні та створення фотонних систем зв'язку.

1. Обробка оптичних сигналів

З метою задоволення вимог застосувань на чутливість і потужність в рамках обмежень реалізації обираються кращі методи модуляції і мультиплексування на основі фізичних величин (параметрів), наведених на рис. 1 [2].

Мультиплексування виконується, використовуючи ортогональність в одному або більшій кількості фізичних параметрів, показаних на рисунку 1. Якщо енергія сигналів витікає в сусідні канали, ортогональність деградує і ідеальне відновлення вже не можливе. При хвилевому розділенні каналів це означає появу перехресних завад. В цьому випадку можливе використання зміни поляризації сусідніх каналів для відновлення ортогональності за параметром поляризації (чергування поляризації).

При використанні мультиплексування з розділенням за поляризацією, передаються два незалежних сигнали обох ортогональних поляризацій. Для відновлення цих поляризаційне мультиплексованих бітових потоків використовують або сплітер поляризацій променя, напрями поляризації яких постійно утримуються у відповідності з поляризаціями сигналу (контроль поляризації), або виявляються дві довільні ортогональні поляризації (розділення поляризацій) з використанням когерентного детектування.

Інший спосіб досягнення ортогональності в частотній області полягає в дозволі перекриття спектрів сигналів сусідніх довжин хвиль, але рознос частот має дорівнювати $1/T_s$, де T_s - тривалість символу. В цьому випадку приймач може однозначно відфільтрувати інформацію, що переноситься кожною під несучою за допомогою спочатку множення суперпозиції з синусоїдальною хвилею з частотою потрібної під несучої частоти, а потім інтегруючи по тривалості символу. Ця операція ефективно здійснюється в електронній області з використанням швидкого перетворення Фур'є. Цей вид мультиплексування відомий як ортогональне частотне розділення каналів (OFDM) або когерентний WDM (CoWDM), в залежності від того, де виконується операція мультиплексування – в електронній області або в оптичній (еквівалентно різниці між OFDM і OTDM в часовій області). Якщо ортогональні сигнали не синусоїди, а ортогональні послідовності коротких імпульсів, такий спосіб має назву оптичного множинного доступу з кодовим розділенням (CoDMA) [3].

Нещодавно одержані результати по застосуванню модового мультиплексування в маломодових оптичних волокнах [4]. Таке волокно підтримує малу кількість мод (2-3 моди), тому має перевагу в селективності і легкому управлінні модовими спотвореннями. При використанні режиму мультиплексування мод і техніки цифрової обробки сигналу множинного вводу/виводу, N просторових мод в маломодовому волокні зможуть підтримувати в N разів більшу пропускну здатність, ніж в одномодовому. В експериментах модове мультиплексування досягається в двухмодовому волокні з різними комбінаціями

мод, що підтримуються волокном; наприклад, LP_{01} і LP_{11} мод, двох вироджених LP_{11} мод ($LP_{11a} + LP_{11b}$), і в трехмодовому режимі (моди $LP_{01} + LP_{11a} + LP_{11b}$).

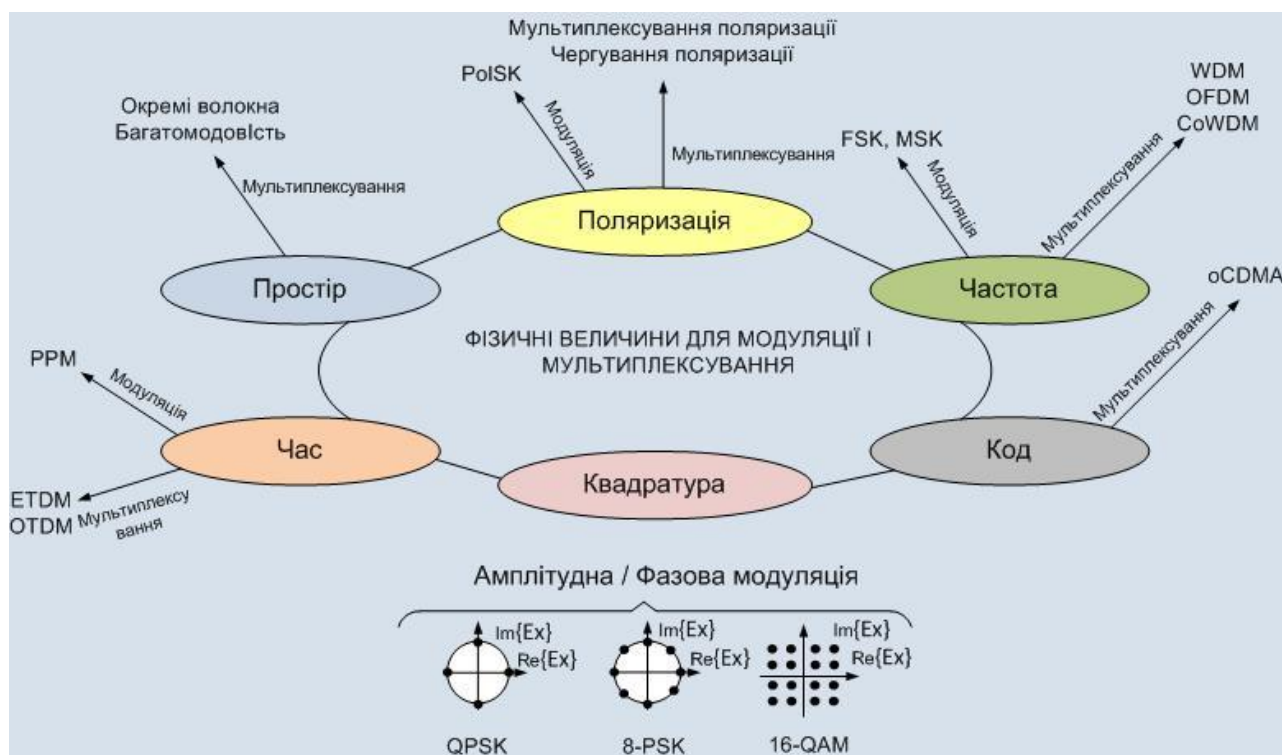


Рис. 1. Фізичні параметри, які можна використовувати для модуляції й мультиплексування в оптичних комунікаціях (OTDM – оптичне мультиплексування із часовим розділенням; ETDM – електронне мультиплексування із часовим розділенням; OCDMA – оптичний множинний доступу з кодовим розділенням; PPM – імпульсна позиційна маніпуляція; PolSK – поляризаційна маніпуляція; FSK – частотна маніпуляція; MSK – маніпуляція з мінімальним частотним зсувом; WDM – мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі; CoWDM – когерентна WDM; OFDM – мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів; PSK – фазова маніпуляція; QPSK – квадратурна фазова маніпуляція; QAM – квадратурна амплітудна модуляція; E_x – напруженість електричного поля оптичної хвилі (x-поляризація))

Нарешті, можна використовувати просторове мультиплексування в явній формі, передаючи різні сигнали паралельним оптичними хвилеводами. Використання паралельних хвилеводів є привабливим при реалізації просторово обмежених систем (з'єднання стійки зі стійкою і коротше). Інший вид просторового мультиплексування – використання багато серцевинних оптичних волокон. У волокнах з хвильовим та модовим мультиплексуванням виникає проблема обмеження потужності, пов'язана з нелінійними спотвореннями сигналу. Для подолання цього обмеження, проводяться дослідження і розробки багато серцевинних волокон (БСВ) [5]. Для таких волокон перехресні перешкоди є одним з найбільш важливих параметрів, і їх придушення має вирішальне значення для передачі сигналів. Показано, що низькі втрати і низькі перехресні перешкоди, необхідні для ліній дальньої передачі, можуть бути досягнуті в зварних БСВ.

Модуляція означає метод, яким цифрова інформація відображається оптичним носієм, і включає кодування для запобігання помилок, що можуть з'явитися при передачі, або для корекції помилок, що виникли при передачі.

Некодована ("вкл/викл") маніпуляція (ООК) використовувалась в оптичному зв'язку протягом десятиліть, завдяки простій апаратній реалізації та інтеграції. Для застосувань, де домінує чутливість, двійкова фазова маніпуляція інтенсивно вивчалась, і встановила кілька рекордів чутливості [6]. Подальше підвищення чутливості може бути отримане за рахунок

смуги модуляції, або M-їчної ортогональної модуляції (кодування).

Ортогональні формати модуляції використовують $M > 2$ ортогональних вимірів сигналів, таких як M часових інтервалів, що не перекриваються на тривалості символу (імпульсна модуляція положення, PPM) або M ортогональних частот (M-позиційна частотна маніпуляція, FSK). У PPM оптичний імпульс передається в одному з M слотів на символ. Позиція зайнятого слоту позначає бітову комбінацію, що транспортується символом. Обидві модуляції PPM і FSK розширяють смугу пропускання сигналу в $M/\log_2 M$ разів у порівнянні з ООК.

Для корекції помилок кодування (попереджуюча корекція помилок, FEC) надлишковість вводиться в передавачі і використовується для корекції помилок в приймачі [7]. Типові FEC для наземних волоконно-оптичних систем сьогодні працюють на швидкості до 40 Гбіт/с з 7% надлишковістю і здатні виправити BER каналу з $2 \cdot 10^{-3}$ до 10^{-16} , що дає поліпшення чутливості на 9 дБ за рахунок надлишковості. Ці чутливості, досягнуті використанням FEC за невеликого розширення смуги пропускання в порівнянні з ортогональною модуляцією, реалізуються за рахунок збільшення складності FEC обробки. Завдяки поєднанню модуляції та кодування, чутливість 1 фотон/біт була зареєстрована за допомогою PPM [8].

Системи з обмеженою пропускнуою здатністю використовують формати модуляції, які уникають збільшення смуги модуляції для забезпечення щільної упаковки WDM каналів [9]. При цьому досягається висока спектральна ефективність (спектральна ефективність SE – швидкість передачі даних поділена на спектральний діапазон, що використовується). Вузькі спектри модуляції досягаються за допомогою декількох рівнів реальної і уявної частин (або амплітуди і фази) комплексного оптичного сигналу, як показано на трьох прикладах на рис. 1. Крім того, використовується FEC для поліпшення чутливості.

Рис. 2 показує компроміс між чутливістю і спектральною ефективністю для лінійного каналу з адитивним білим гаусівським шумом (AWGN).

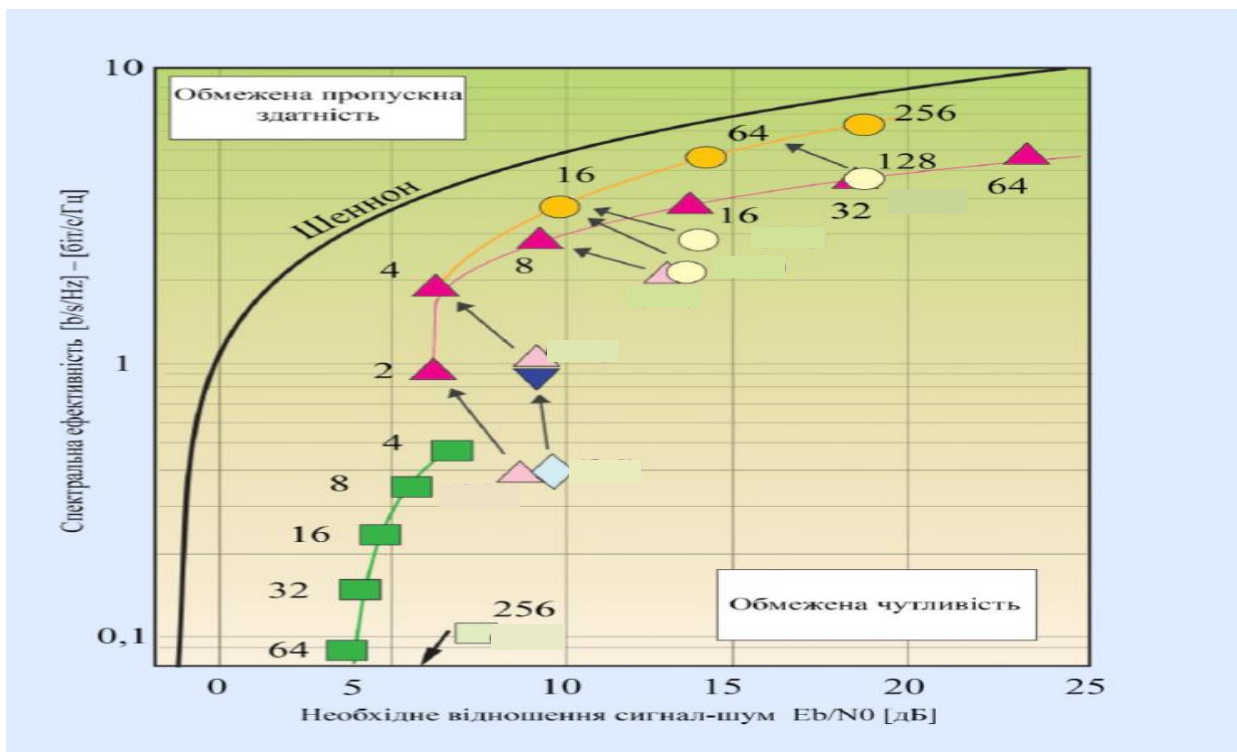


Рис. 2. Компроміс між спектральною ефективністю і чутливістю форматів модуляції, обмежених AWGN. Формати модуляції (яскраві – теоретичні межі; бліді – експеримент) наведені для 7% надлишковості коду методом FEC для коефіцієнту помилок $2 \cdot 10^{-3}$ (квадрати – PPM; трикутники – PSK; кола – QAM; ромби – ООК)

Кінцева межа задається законом Шеннона, якій визначає фізичну межу пропускну здатності каналу зв'язку:

$$C = B \log_2 (1+S/N),$$

де C – пропускну здатність каналу, біт/с, B – смуга пропускання каналу, Гц, S/N – відношення сигнал/шум.

Нижня частина рисунку належить до систем з обмеженою чутливістю, верхня - до систем з обмеженою пропускну здатністю. Теоретично досяжні чутливості для чотирьох видів модуляції (OOK, PSK, QAM, PPM) також показані за умови 7% надлишковості FEC. Очевидно, що труднощі апаратної реалізації заважають реалізувати формати в їх теоретичних межах, як з точки зору чутливості, так і спектральної ефективності.

2. Еволюція оптичних систем передачі та їх ефективність

Розвиток оптичних технологій показує високе зростання швидкості передачі. Наразі досягнуто швидкості 800 Гбіт/с на 400 км і навіть 1 Тбіт/с на 320 км [10]. Але швидкість передачі лише один з чинників, що характеризує систему передачі. З технічної точки зору задача системи зв'язку полягає в тому, щоб передати максимальний потік даних на максимальну відстань з мінімальним використанням спектрального ресурсу. Виходячи з цього в якості базового критерію оцінки ступеню розвитку волоконно-оптичної системи зв'язку можна застосовувати продуктивність системи, яка дорівнює добутку $SE \times L$, де SE – спектральна ефективність, L – дальність передачі.

Спектральна ефективність обладнання звичайно відома, або може бути обчислена. Основна складність полягає в обчисленні дальності передачі, яку може забезпечити система зв'язку. Під дальністю передачі в магістральних системах розуміється дальність передачі в багато пролітної лінії на каскаді підсилювачів без регенерації сигналу. Рис. 3, а проказує зростання продуктивності систем передачі, яке досягнуто за останні 40 років [11], але спектральна ефективність обмежує подальше зростання (рис. 3, б) [10].

Ербієвий волоконний підсилювач (EDFA) дозволив збільшити дальність передачі, що значне підняло продуктивність. Поєднання EDFA з WDM системами ще більш підняло продуктивність оскільки підсилювач одночасно підсилює багато WDM каналів. Це збільшило пропускну здатність волоконно-оптичних систем зв'язку в області спектра на три порядки порівняно з одно канальними системами (рис. 3, а). За останні 10 років зростання продуктивності оптичних систем передачі забезпечувалося використанням спектрально ефективних форматів модуляції.

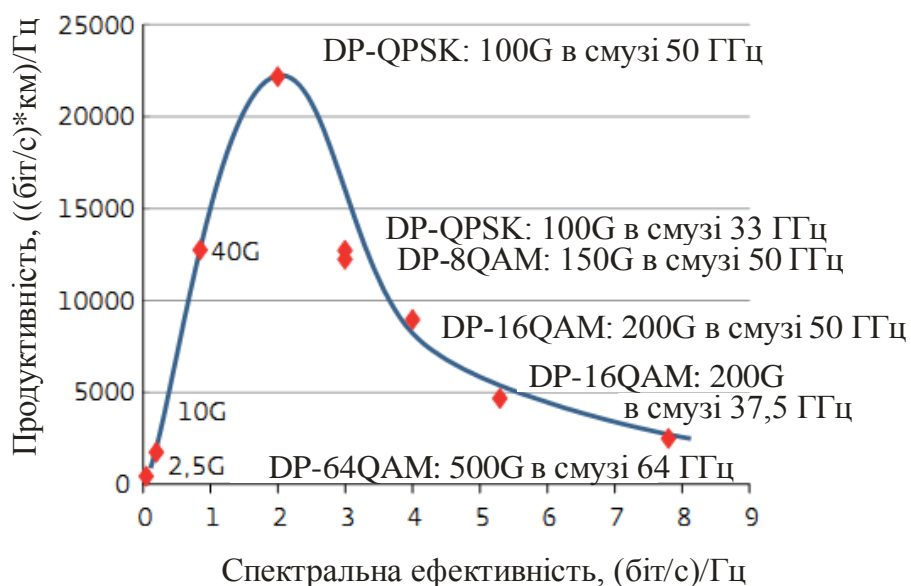
Подальший розвиток волоконно-оптичних систем зв'язку найбільш ймовірно буде спиратися на використання більш складних форматів модуляції (DP-16QAM, DP-64QAM та інші) [12]. Ці формати дозволяють значно підвищити спектральну ефективність. Однак ускладнення модуляції неминуче веде до зменшення дальності передачі. При цьому продуктивність падає, що видно з рис. 3, б.

Таким чином, можна припустити, що в розвитку обладнання волоконно-оптичних систем зв'язку створився перехід від революційного до еволюційного розвитку, межею якого стало досягнення граничних значень продуктивності в системах 100G.

Наразі окрім максимально можливої ємності системи експерти враховують ще два чинники: спрощення управління оптичними мережами та інвестиційні та експлуатаційні витрати на всю систему. Взагалі вибір знаходиться між трьома точками: висока швидкість передачі, малі загальні витрати і простота управління мережею. Метою розробок є використання спектральної ефективності систем передачі до границь їх фізичних обмежень. Волокно з декількома серцевинами одна з таких важливих інновацій, яка може підвищити ємність передачі в декілька разів.



а)



б)

Рис. 3. Продуктивність та спектральна ефективність оптичних систем передачі: а) зростання продуктивності систем передачі завдяки революційним технологіям; б) взаємозв'язок продуктивності існуючих комерційних та лабораторних систем зв'язку та їх спектральної ефективності

Висновки

Потужності WDM систем для звичайних волокон наближаються до своїх принципів обмежень. Методи модуляції і мультиплексування є основними елементами дизайну систем з обмеженими чутливістю та пропускнуою здатністю завдяки принципової перевазі оптичних технологій у пропускнуій здатності. Спектральне ефективна модуляція є ключовим напрямом досліджень для систем з обмеженою пропускнуою здатністю, однак підвищення спектральної ефективності обмежує продуктивність систем передачі. Це показує, що наразі йде час еволюційного розвитку оптичного зв'язку в очікуванні майбутнього революційного стрибка, можливо пов'язаного з багато серцевинними оптичними волокнами.

Література

1. Benner A. F. Exploitation of optical interconnects in future server architectures / A. F. Benner, M. Ignatowski, J. A. Kash, D. M. Kuchta, and M. B. Ritter // IBM J. Res. Dev. – 2005. – V. 49, № 4/5. – P. 755–775.
2. Winzer P.J. Modulation and multiplexing in optical communication systems / P.J. Winzer. // IEEE LEOS NEWSLETTER. – 2009. – V.23, № 1. – P. 4–10.
3. Winzer P.J. Advanced optical modulation formats / P.J. Winzer, R.J. Essiambre. // Proc. IEEE. – 2006. – V. 94, № 5. – P. 952–985.
4. Li A. Reception of Mode and Polarization Multiplexed 107-Gb/s CO-OFDM Signal over a Two-Mode Fiber / Li A., Amin A. Al, Chen X., Shieh W. // Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America). – 2012. – Paper PDPB8. – P. 124–132.
5. Hayashi T. Ultra-Low-Crosstalk Multi-Core Fiber Feasible to Ultra-Long-Haul Transmission / Hayashi T., Taru T., Shimakawa O., Sasaki T., Sasaoka E. // Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America). – 2011. – Paper PDPC2. – P. 213–221.
6. Stevens M.L. Optical homodyne PSK demonstration of 1.5 photons per bit at 156 Mbps with rate-turbo coding / M.L. Stevens. // Opt. Express. – 2008. – V. 16, № 14. – P. 10412–10420.
7. Mizuochi T. Next generation FEC for optical communication / T. Mizuochi. // Proc. Optical Fiber Communication Conf. (OFC). – 2008. – Paper OTuE5. – P. 476–484.
8. Daikoku M. 100 Gbit/s DQPSK transmission experiment without OTDM for 100G Ethernet transport / M. Daikoku, I. Morita, H. Taga, H. Tanaka, T. Kawanishi, T. Sakamoto, T. Miyazaki, T. Fujita. // Proc. Optical Fiber Communication Conf. (OFC). – 2006. – Paper PDP36. – P. 368–381.
9. Величко М.А. Новые форматы модуляции в оптических системах связи / М.А. Величко, О.Е. Наний, А.А. Сусьян // LIGHTWAVE Russian Edition. – 2005. – №4. – С. 21–30.
10. Кобышев В. Рекордная производительность систем 100G как маркер перехода к эволюционному развитию ВОСП / В.Кобышев, А.Леонов, О.Наний, В.Трещиков, Р.Убайдуллаев // Первая миля. – 2015. – № 6. – С. 40–43.
11. Оптические каналы: возможности и ограничения // Connections. – 2014. – V 47, № 10. – С. 40–41.
12. Наний О.Е. Оптические когерентные DWDM системы связи с канальной скоростью 100 Гбит/с / О.Е. Наний, В.Н. Трещиков, Н.В. Гуркин // ФОТОН-ЭКСПРЕСС. – 2014, №4 (116). – С. 24–27.

Автори статті

Манько Олександр Олексійович – д.т.н., професор, професор Київського ННВЦ, Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, Київ, Україна. Тел.: +38 067 408 67 80. E-mail: manko_kiev@mail.ru

Марков Сергій Юхимович – к.т.н., доцент, доцент кафедри телекомунікаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел.: +38 068 124 20 65. E-mail: sergem43@ukr.net

Меліщук Ігор Семенович – к.ф.-м.н., доцент, доцент Київського ННВЦ, Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, Київ, Україна. Тел.: +38 095 448 83 86. E-mail: meligor@kiev ldc.net

Authors of the article

Man'ko Oleksandr Oleksiyovych – doctor of sciences (technical), professor, professor of Kyiv branch of Odessa National Academy of communication named after A. Popov, Kyiv, Ukraine. Tel.: +38 067 408 67 80. E-mail: manko_kiev@mail.ru

Markov Serhiy Yukhymovych – candidate of sciences (technical), associate professor, associate professor of the Department of Telecommunication technologies, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel.: +38 068 124 20 65. E-mail: sergem43@ukr.net

Melishchuk Ihor Semenovych - candidate of sciences (physics-mathematics), associate professor, associate professor of Kyiv branch of Odessa National Academy of communication named after A. Popov, Kyiv, Ukraine. Tel.: +38 095 448 83 86. E-mail: meligor@kiev ldc.net

Дата надходження в редакцію: 12.03.2016 р.

Рецензент: д.т.н., проф. В.А. Дружинін