

УДК 621.391

І.І. Слюсарь, В.І. Слюсар, О.П. Ільченко, В.П. Матько

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

## ОПТИЧНИЙ ДОСТУП НАСТУПНОГО ПОКОЛІННЯ НА ОСНОВІ КОНВЕРГЕНТНИХ РІШЕНЬ

*В роботі розглянута реалізація концепції оптичного доступу наступного покоління на основі конвергентних рішень «радіо поверх оптики». Розроблена модель гібридної пасивної оптичної мережі з використанням спектрального ущільнення оптичних каналів, по кожному з яких передається радіосигнал на основі ортогональної частотної дискретної модуляції (OFDM). В ході проведеного аналізу варіантів запропонованої гібридної пасивної оптичної мережі, визначені недоліки використання OFDM. З метою їх усунення та підвищення пропускної здатності мережі запропоноване використання методу неортогональної частотної дискретної модуляції (N-OFDM).*

**Ключові слова:** пасивна оптична мережа, оптична розподільча мережа, оптичний доступ, DWDM, NGOA, N-OFDM, ODN, OFDM, WDM.

### Вступ

Як відомо [1], пасивні оптичні мережі (Passive Optical Network, PON) мають низку переваг: мінімальне використання активного обладнання; мінімізація кабельної інфраструктури; низька вартість обслуговування; можливість інтеграції з кабельним телебаченням; достатні масштабованість та щільність абонентських портів. Домінуючою формою PON в Європі та Північній Америці є Gigabit PON (GPON), а в Азії популярна Ethernet PON (EPON) – частина IEEE 802.3ah (EFM). Зазвичай, PON має топологію дерева. У проміжних вузлах дерева можуть розміщуватись пасивні оптичні розгалужувачі з коефіцієнтом розгалуження до 1:64 або навіть 1:128 [2].

Останнім часом, існує значна потреба у підвищенні пропускної здатності PON через збільшення кількості абонентів, обсягу відео-контенту та ін. [3].

Як наслідок, можна констатувати той факт, що існуючі класичні підходи щодо організації PON не задовольняють світовим тенденціям розвитку оптичного доступу. Одним з шляхів підвищення ефективності мереж доступу на основі оптичного волокна (ОВ) є створення гібридних PON, використання технологій «радіо поверх оптики».

**Мета роботи:** реалізація концепції оптичного доступу наступного покоління на основі конвергентних рішень «радіо поверх оптики».

### Основна частина

В класичній PON для передачі прямого та зворотного каналу використовується одне ОВ, смуга пропускання якого динамічно розподіляється між абонентами, або 2 ОВ – в разі резервування. Низхідний потік (Downstream, DS) від центрального вузла (Central Office, CO) до абонентів йде на довжині хвилі 1490 і 1550 нм для відеосигналу у смузі радіочастот (RF-video), такого ж, як й в мережах кабель-

ного телебачення. У висхідних потоках (Upstream, US) від абонентів (довжина хвилі – 1310 нм) усунення колізій здійснюється за рахунок протоколів арбітражу на основі протоколів множинного доступу з часовим розподілом (Time Division Multiplex, TDMA). В них вже реалізовані функції управління смугою пропускання, якістю обслуговування та ін.

При цьому, ефективний спосіб доставки, в тому числі з точки зору вартості, поверх існуючої інфраструктури вимагає IPTV з технологією IP-multicast. IP-multicast дає можливість реплікації одного каналу для кожного глядача, таким чином оптимізуючи ємність обладнання доступу. Однак, зі швидким зростанням відеоконтенту за технологією Over-the-Top (OTT) перевантажується не тільки бізнес відео-сервісів, а ще й мережі. Через те, що OTT – сукупність unicast, неможливо отримати перевагу ефективності IP-multicast. Хоча й немає різниці в швидкості з'єднання у абонента між IPTV- або OTT-відеоканалом, пропускна здатність обладнання мережі доступу значно перевантажується, коли кожен глядач отримує свій власний ексклюзивний відеоканал. Все це спонукає шукати нові варіації підвищення пропускної здатності мереж доступу.

В рамках концепції наступного покоління оптичного доступу (Next Generation Optical Access, NGOA) для існуючих PON передбачено використання технологій, що наведені на рис. 1 [2]. Розробка технологій 10G PON і WDM-PON покликана вирішити питання з обмеженням на обсяги трафіку, що виділяється. Серед основних переваг WDM-PON слід виділити наступні:

- користувачу надається виділена смуга (немає розподілу на конкурентній основі);
- сигнали абонентів фізично ізольовані;
- ефективно використовується ОВ;
- можливе значне збільшення дальності зв'язку (наприклад, використовуючи масиви оптичних хви-

леводів (Arrayed Waveguide Grating, AWG) з низькими втратами замість неефективних з точки зору втрат сплітерів при стандартному для GPON бюджеті у 28 дБ, можна підключати абонентів на відстані близько 80 км).

В цілому, WDM-PON розглядається як довгострокове рішення оптичного доступу.

Дана технологія вже показує високі показники в мобільних додатках (Long Term Evolution, LTE) та додатках масштабу підприємства. З такими характеристиками «швидкість/відстань» оператори мереж

можуть доставляти сервіси GE до підприємства без будь-якого активного обладнання між CO і кінцевим користувачем. Характерними результатами цього є значна економія капітальних і операційних витрат, так як традиційна агрегація та транспортні вузли можуть бути віддаленими в архітектурі мережі, а CO – об'єднані (рис. 2). Для мобільного транзиту LTE малий час очікування WDM-PON і надмірність транспорту, що поєднані в одному обладнанні, представляє дуже цікаве рішення з низькою повною вартістю володіння (Total Cost of Ownership, TCO).

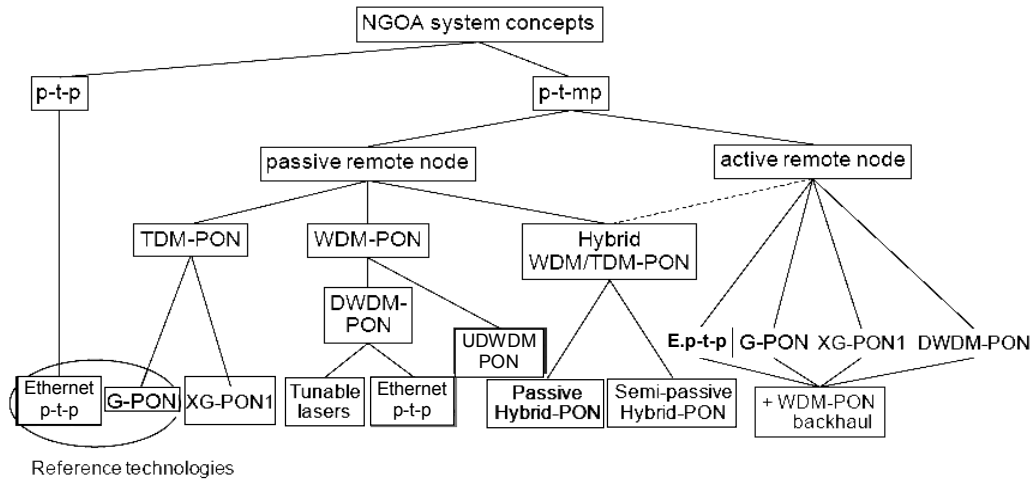


Рис. 1. Концепція систем NGOA

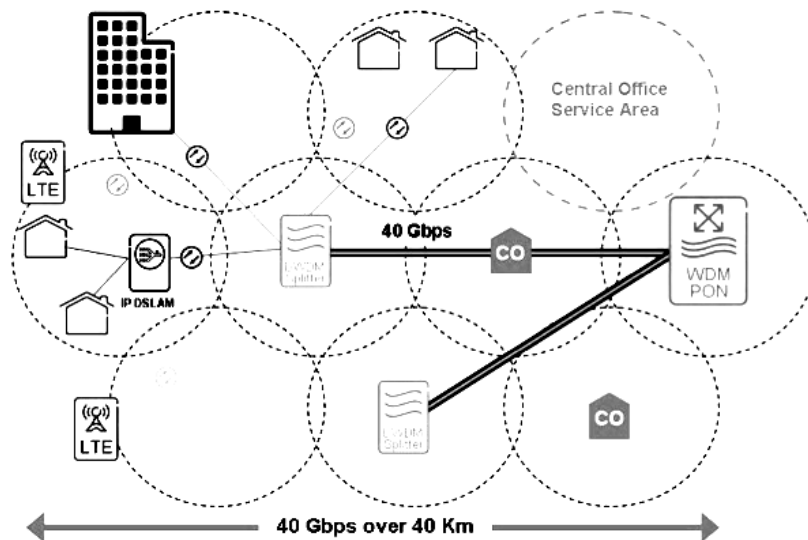


Рис. 2. Розподіл вузлів WDM-PON і консолідація з CO

Для впровадження та управління WDM-PON, придатних для мережного оператора, необхідно застосовувати «безбарвну» технологію WDM-PON. Це дозволяє будь-якому ONT підключитися де б то не було до PON і автоматично налаштуватися на потрібний оптичний канал. На даний час, на розгляді знаходяться три безбарвних технології WDM-PON:

- віддалено відібрана (Remotely Seeded);
- повторне використання довжини хвилі (Wavelength Reuse);
- тунельні лазери.

В свою чергу, організація «Мережа доступу з повнофункціональними послугами» (Full Service Access Network, FSAN) [3] пропонує два шляхи оптимізації: NG PON1 – для нових технологій, що працюють на існуючих оптичних розподільчих мережах (Optical Distribution Network, ODN); NG PON2 – для нових технологій, що працюють на існуючих ODN – як опція. За даними FSAN, проект NG PON2 спирається на наступні реалізації: з 40G TDM – 40G TDM-PON; PON зі спектральним ущільненням (Wavelength Division Multiplex, WDM) – WDM-PON;

з ортогональним частотним ущільненням (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) або варіантом OFDMA (можливість динамічного розподілу несучих підканалів або послуг користувачам) – OFDMA PON, гібридні WDM-PON, наприклад: спільно з 10G TDM.

В ході проведеного аналізу перспективних напрямків створення NGOA основними слід вважати:

– розвиток технологій WDM-OFDM-PON, що забезпечують підвищення швидкості та розширення радіусу покриття TDM-PON до 40-60 км;

– розробка консолідованих конвергентних рішень «радіо поверх оптики», енергопостачання/телекомунікації та ін.

Як зрозуміло, в оптичних телекомунікаційних системах приділяється підвищена увага до OFDM, як засобу подолання різних обмежень волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП), наприклад: вплив хроматичної дисперсії (може викликати міжсимвольну інтерференцію), поляризаційної модової дисперсії, фазової самомодуляції, забезпечення відносної інтенсивності шуму та ін. Тобто, OFDM є гарним кандидатом для підвищення відстані та швидкості передачі. Добре відомий класичний формат

кодування NRZ не може працювати на великих відстанях при швидкості 10 Гбіт/с і вище. А компенсувати хроматичну дисперсію по довжині тракту іноді є економічно недоцільним.

Як відомо [4], при OFDM високошвидкісний інформаційний потік розділяється на множину низькошвидкісних підканалів, які передаються на ортогональних несучих. Варіант схеми формування сигналу OFDM або кодованого OFDM (Coded OFDM, COFDM), що спираються на використання зворотного швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) наведені на рис. 3, рис. 4. Умовою ортогональності підканалів OFDM є збіг несучих з максимумами АЧХ фільтрів, синтезованих на приймальній стороні шляхом операції ШПФ над сигнальної вибіркою. Якщо в якості фізичного каналу виступає оптична несуча, то вона модулюється за інтенсивністю груповим інформаційним сигналом OFDM [5]. На приймальній стороні оптична несуча потрапляє на фотодетектор, на навантаженні якого виділяється електричний сигнал групового потоку, що надходить після підсилення на декодер OFDM.

При цьому, коефіцієнт модуляції оптичного випромінювання залежить від кількості підканалів і зазвичай не перевищує 10%.

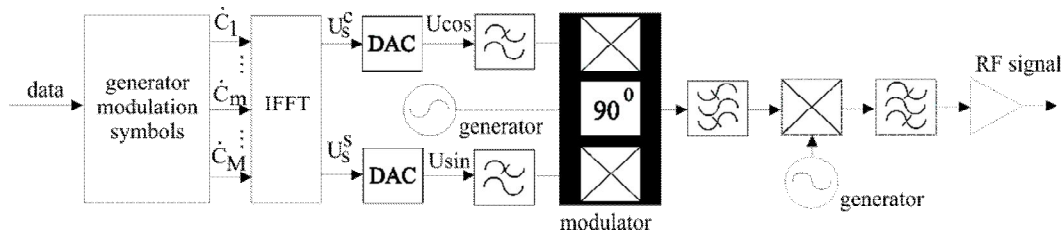


Рис. 3. Схема формування OFDM (COFDM) на передавальній стороні

Електронний пристрій частотного ущільнення та ват-амперна характеристика лазера повинні мати підвищену лінійність в широкому діапазоні рівнів. Згідно [6], розроблені проекти спільного використання DWDM і когерентного оптичного OFDM (CO-OFDM) зі швидкостями 100 Гбіт/с. Такий підхід важливий для майбутніх високошвидкісних ВОСП. В цілому, потенційні можливості OFDM в PON підтверджені низкою проектів, що розглянуті в [6-8 та ін.].

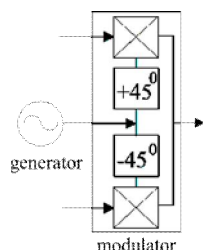


Рис. 4. Модулятор для схеми зі зниженням помилок формування

Таким чином, на підставі проведених досліджень можливо виділити основні варіанти побудови PON на базі конвергентних рішень з OFDM для багатокористувацького доступу:

– OFDMA-PON – різним користувачам призначені різні ортогональні несучі підканалів одного діапазону;

– OFDMA-TDMA-PON – різним користувачам призначені різні ортогональні несучі підканалів і часові інтервали одного діапазону;

– OFDMA-TDMA-WDMA-PON: різним користувачам призначені різні ортогональні несучі підканалів і часові інтервали та довжини хвиль.

Однак, при впровадженні OFDM слід враховувати його недоліки, наприклад: залежність правильного декодування даних від зсуву по частоті, неоптимальне використання частотного діапазону, а також особливості використання ШПФ для формування частотних фільтрів. Основною проблемою використання операції ШПФ, що не згадується в описах стандартів зв'язку на основі OFDM є паразитні фазові викривлення комплексних амплітуд сигналів. Такі викривлення супроводжують ШПФ. При використанні QAM-алгоритмів модуляції вони не дозволяють достовірно декодувати інформацію. Для усунення обмежень OFDM по частотному ущільненню пропонується підхід, що базується на методі неортогональної дис-

кретної частотної модуляції (N-OFDM), при якому, на відміну від OFDM, рознесення частот не прив'язується до максимумів АЧХ фільтрів ШПФ (рис. 5) [9]. Слід звернути увагу на той факт, що такий сигнал при частотному рознесенні підканалів на ширину фільтра ШПФ, він перетворюється в OFDM-сигнал. Для QAM-алгоритмів модуляції несучих підканалів інформація в переданому повідомленні міститься у величині квадратурних складових амплітуд сигналів. В роботі отримана оптимальна за методом максимуму правдоподібності оцінка цих складових і розроблені модифікації N-OFDM, наприклад, без використання ШПФ на приймальній стороні та ін.

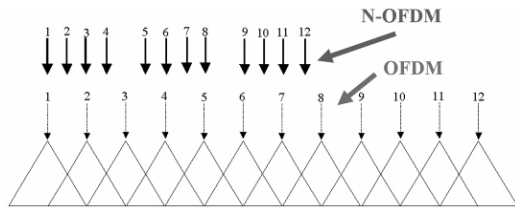


Рис. 5. Компонівка N-OFDM (OFDM) сигнала

В цілому, N-OFDM дозволяє збільшити пропуску здатність оптичного доступу.

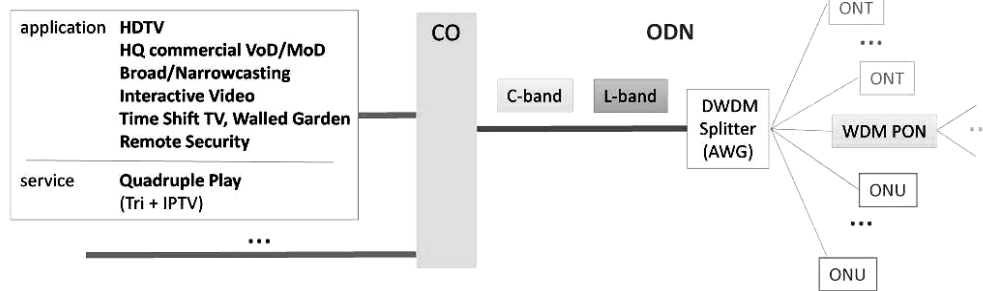


Рис. 7. Варіант гібридної N-OFDM-X-PON

Крім того, підвищення пропускну здатності запропонованої гібридної N-OFDM-X-PON принаймні вдвічі можливе при використанні поляризаційного ущільнення. На даний час, ущільнення потоків інформації за допомогою оптичних несучих, що мають лінійну поляризацію, (Polarization Division Multiplexing, PDM) має обмежене застосування через необхідність відсутності оптичної анізотропії

Враховуючі вище зазначене, пропонується кілька варіантів гібридної N-OFDM-X-PON (де символ «X» – інші технології) з використанням N-OFDM (рис. 6, рис. 7). З метою проведення плавної модернізації або апгрейду, обладнання оптичного лінійного терміналу (Optical Line Terminal, OLT) для формування N-OFDM передбачає режим роботи з OFDM, що забезпечує узгодження з оптичними мережними терміналами (Optical Network Termination, ONT) або оптичними мережними блоками (Optical Network Unit, ONU).

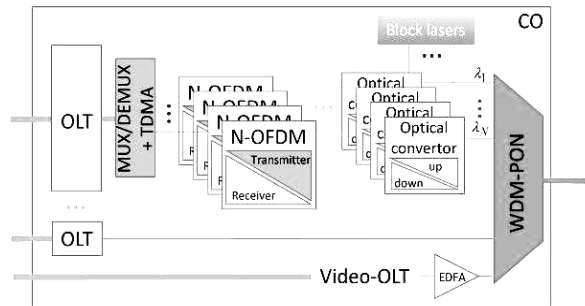


Рис. 6. Структура CO при використанні N-OFDM

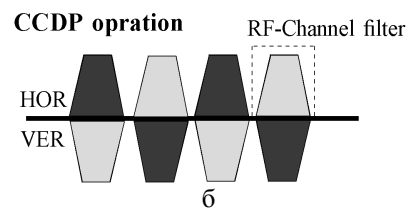
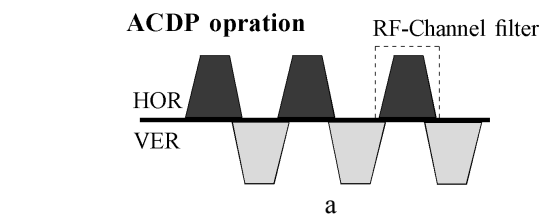


Рис. 8. Методи розстановки частот несучих сигналів подвійної поляризації: а – на сусідніх частотних каналах (ACDP); б – на суміжних частотних каналах (CCDP)

Метод ACDP (Adjacent Channel Dual Polarized) припускає використання різних частот сигналів (сусідніх або суміжних по частотній сітці) на ортогональній поляризації. Як наслідок, його практична реалізація простіша в технічному та алгоритмічному аспек-

тах [5]. Мультиплексування здійснюється за допомогою спеціальних оптичних призм (наприклад, призма Рошона).

Зняття зазначеного обмеження можливе за рахунок властивостей сигналів N-OFDM (OFDM). Це завдання може вирішуватися в рамках двох основних методів розподілу частот несучих сигналів подвійної поляризації, приведених на рис. 8.

а розв'язка між сигналами різної поляризації додатково підвищується за рахунок частотно-селективної дії амплітудно-частотних характеристик частотних фільтрів. До недоліків ACDP слід вважати не ефективне використання спектрального діапазону,

стикаючись з необхідністю компоновки несучих підканалів N-OFDM (OFDM) в ортогональній поляризації в шаховому порядку. Даного недоліку позбавлений метод підвищення пропускної здатності за рахунок використання поляризаційної розв'язки в одному (суміщеному) частотному каналі (Co-channel Dual Polar system, CCDP). Результативність застосування CCDP багато в чому визначається коефіцієнтом крос-поляризаційної розв'язки (XPD). Проте, навіть, якщо величина відповідного параметра буде недостатньою, проблема мінімізації крос-поляризаційних завад при CCDP може бути успішно вирішена за допомогою введення до складу апаратури спеціальної системи придушення крос-поляризаційної завади (Cross-polarization Interference Cancellation, XPIC). Як наслідок, у разі неможливості компенсувати оптичну анізотропію ОВ, для впровадження PDM доцільно застосувати ACDP з шаховим рознесенням несучих підканалів OFDM величиною половини смуги пропускання радіочастотного фільтра.

### Висновки

Таким чином, в рамках концепції NGOA для підвищення пропускної здатності мереж доступу в роботі запропоновано використання конвергентних рішень «радіо поверх оптики» з N-OFDM (OFDM). З одного боку, OFDM є засобом подолання впливу хроматичної дисперсії, міжсимвольної інтерференції, поляризаційної модової дисперсії, фазової самомодуляції, забезпечення відносної інтенсивності шуму та ін. З іншого боку, для усунення обмежень OFDM по частотному ущільненню пропонується підхід, що базується на методі неортогональної дискретної частотної модуляції (N-OFDM). При цьому, можливе впровадження гібридних N-OFDM-X-PON, що базуються на технологіях WDM, N-OFDM (OFDM, OFDMA), TDM та ін. Подальші перспективні дослідження спрямовані на визначення технічних аспектів практичної реалізації запропонованої моделі N-OFDM-X-PON.

### ОПТИЧЕСКИЙ ДОСТУП СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОНВЕРГЕНТНЫХ РЕШЕНИЙ

И.И. Слюсарь, В.И. Слюсар, А.П. Ильченко, В.П. Матко

*В работе рассмотрена реализация концепции оптического доступа следующего поколения на основе конвергентных решений «радио поверх оптики». Разработана модель гибридной пассивной оптической сети с использованием спектрального уплотнения оптических каналов, по каждому из которых передается радиосигнал на основе ортогональной частотной дискретной модуляции (OFDM). В ходе проведенного анализа вариантов предложенной гибридной пассивной оптической сети, определены недостатки использования OFDM. С целью их устранения и повышения пропускной способности сети, предложено использование метода неортогональной частотной дискретной модуляции (N-OFDM).*

**Ключевые слова:** пассивная оптическая сеть, оптическая распределительная сеть, оптический доступ, DWDM, NGOA, N-OFDM, ODN, OFDM, WDM.

### OPTICAL ACCESS NEXT GENERATION CONVERGED SOLUTIONS

I.I. Slyusar, V.I. Slyusar, O.P. Ilchenko, V.P. Matko

*The paper deals with the realization of the concept of the next-generation optical access based on convergent solutions "over the radio optics." A model of a hybrid passive optical network using the WDM optical channels, each of which transmits a radio signal based on an orthogonal discrete frequency modulation (OFDM). During the analysis of options offered by hybrid passive optical network, identified disadvantages of using OFDM. In order to eliminate them and improve network capacity, using the method suggested nonorthogonal discrete frequency modulation (N-OFDM).*

**Keywords:** Passive Optical Network, Optical Distribution Network, Optical Access, DWDM, NGOA, N-OFDM, ODN, OFDM, WDM.

### Список літератури

1. Воробієнко П.П. Телекомунікаційні та інформаційні мережі: Підруч. для ВНЗ [Текст / П.П. Воробієнко, Л.А. Нікітюк, П.І. Резніченко. – К.: «Саммит-книга», 2010. – 640 с.
2. *Technical Assessment and Comparison of Next-Generation Optical Access System Concepts* [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: [http://www.ict-oase.eu/public/files/OASE\\_WP4\\_D4\\_2\\_2.pdf](http://www.ict-oase.eu/public/files/OASE_WP4_D4_2_2.pdf). – Дата доступу: 25.02.2015.
3. *Next Generation PON Task Group* [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.fsan.org/>. – Дата доступу: 25.02.2015.
4. Слюсар В.И. Неортогональное частотное мультиплексирование (N-OFDM) сигналов. Часть 1. [Текст] / В.И. Слюсар // Технологии и средства связи. – 2013. – № 5. – С. 61-65.
5. Складов О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи: Уч. пособие. 2-е изд., стер [Текст] / О.К. Складов. – СПб.: Лань, 2010. – 272 с.
6. *Optical Communication System Design. Coherent Optical OFDM* [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: [http://optiwave.com/applications/\\_coherent-optical-ofdm-2/](http://optiwave.com/applications/_coherent-optical-ofdm-2/) – Дата доступу: 25.02.2015.
7. Коврига Е.А. PON – сети нового поколения. Ч. 1. Применение ортогонального частотного мультиплексирования в пассивных оптических сетях / [Електронний ресурс] / Е.А. Коврига. – Режим доступу до ресурсу: [http://vsbel.by/File/2011\\_4/Vols.pdf](http://vsbel.by/File/2011_4/Vols.pdf). – Дата доступу: 25.02.2015.
8. Sanchez C. OFDM-IDMA for Uplink Transmission in Passive Optical Networks / C. Sanchez, B. Ortega, J. Capmany // *IEEE Photonics Journal Volume 4, Number 1, February 2012* [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6095575>. – Дата доступу: 25.02.2015.
9. Патент України № 47918А, МПК<sup>7</sup> Н 04J 1/00. Спосіб частотного ущільнення вузькосмугових інформаційних каналів [Текст] / Слюсар В.І., Смоляр В.Г., Слюсар І.І. – Оубл. 15.07.02, Бюл. №7, 2002.

Надійшла до редколегії 8.05.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.А. Краснобаєв, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава.