

## МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

УДК 621.39

І.В. Горбатий

Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра телекомунікацій

### ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ У СУЧАСНИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Ó Горбатий І.В., 2012

I.V. Gorbatyy

### RESEARCH OF METHODS OF HIGH SPEED DATA TRANSMISSION IN THE MODERN FIBER OPTIC SYSTEMS

Ó Gorbatyy I.V., 2012

Досліджено методи високошвидкісного передавання даних у сучасних волоконно-оптичних системах передавання (ВОСП), виявлено обмеження та вироблено рекомендації щодо їх застосування. Установлено, що найперспективнішим для забезпечення високошвидкісного передавання даних у сучасних ВОСП є використання двополяризаційної М-фазної маніпуляції (ДП М-ФМн), двополяризаційної М-позиційної квадратурної амплітудної модуляції (ДП М-КАМ) та двополяризаційної М-позиційної амплітудної модуляції багатьох складових (ДП М-АМБС), що характеризуються вищою інформаційною ефективністю порівняно із застосованою в нових пристроях для передавання даних двополяризаційною квадратурною фазовою маніпуляцією (ДП КФМн).

*Ключові слова: волоконно-оптична система передавання (ВОСП), модуляція сигналу, завадостійке кодування, інформаційна ефективність.*

The methods of high-speed data transmission in the modern fiber optic telecommunication systems (FOTS) were explored, the limitations were exposed and recommendations in relation to their application were produced. It was set, that most perspective for providing a high speed data transmission in modern FOTS are the dual polarization M-ary phase shift keying (DP M-PSK), dual polarization M-ary quadrature amplitude modulation (DP M-KAM) and dual polarization M-ary amplitude modulation of many components (DP M-AMMC), that characterize by the higher informative efficiency in comparison with the dual polarization quadrature phase shift keying (DP QPSK) witch is applying in the new devices for the data transmission.

*Key words: fiber optic telecommunication system (FOTS), modulation of signal, antinoise coding, informative efficiency.*

#### Вступ

Основою волоконно-оптичних систем передавання (ВОСП) є волоконно-оптичні кабельні лінії зв'язку. Перевагами волоконно-оптичних кабелів порівняно з кабелями зв'язку на основі металевих проводів є:

- широкосмуговість і можливість високошвидкісного передавання інформації;

- мале загасання (ослаблення) сигналу у вікнах прозорості оптичного волокна;
- висока завадозахищеність від електромагнітних завад;
- мала маса;
- відсутність дефіцитних кольорових металів – міді та свинцю;
- неможливість загоряння через коротке замикання волокон.

Наявність перелічених вище переваг спричинює використання волоконно-оптичних кабелів зв'язку для передавання переважної більшості інформації магістральними мережами та початок їх активного застосовування для передавання даних до окремих абонентів мережами доступу. У зв'язку з необхідністю збільшення швидкості та об'ємів передавання даних виникає потреба в ефективнішому використанні волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ). Це можливо, зокрема, впровадженням ВОСП на основі сучасних видів модуляції оптичної хвилі, що характеризуються вищою інформаційною ефективністю порівняно із традиційною бінарною амплітудною маніпуляцією (БАН, binary amplitude shift keying – BASK) оптичної хвилі. Підвищенню ефективності ВОСП присвячено публікації [1, 2], проте це питання залишається актуальним і потребує подальших досліджень.

Метою роботи є дослідження методів високошвидкісного передавання даних у сучасних ВОСП, виявлення обмежень та вироблення рекомендацій щодо їх застосування.

### Фізичні явища в оптичному волокні, що впливають на довжину регенераційної ділянки ВОЛЗ

Відстань, на яку можливо передати інформацію через оптичне волокно (довжина регенераційної ділянки ВОЛЗ), залежить, переважно, від загасання й дисперсії сигналів у волокні [1]. Розглянемо вплив загасання в оптичному волокні на довжину регенераційної ділянки.

Сумарне загасання  $\alpha_{ВОЛЗ}$  (дБ) у ВОЛЗ без підсилювачів обчислюють згідно з таким співвідношенням:

$$\alpha_{ВОЛЗ} = l_{ЛЧ} \alpha_{ЛЧ} + \alpha_{зв} n_{зв} + \sum_{i=1}^{n_{зк}} \alpha_{зк_i} + \alpha_{рз} n_{рз} + \sum_{j=1}^{n_{г}} \alpha_{г_j}, \quad (1)$$

де  $l_{ЛЧ}$  – довжина лінійної частини ВОЛЗ, км;  $\alpha_{ЛЧ}$  – коефіцієнт загасання в лінійній частині ВОЛЗ, дБ/км;  $\alpha_{зв}$  – загасання в місці зварювання волокна, дБ;  $n_{зв}$  – кількість місць зварювання волокна у ВОЛЗ;  $\alpha_{зк_i}$  – загасання в  $i$ -му з'єднувальному кабелі, дБ;  $n_{зк}$  – кількість з'єднувальних кабелів у ВОЛЗ;  $\alpha_{рз}$  – загасання сигналу в роз'ємному з'єднанні, дБ;  $n_{рз}$  – кількість роз'ємних з'єднань у ВОЛЗ між передавачем і приймачем;  $\alpha_{г_j}$  – загасання сигналу в  $j$ -му відгалужувачі, дБ;  $n_{г}$  – кількість відгалужувачів у ВОЛЗ між передавачем і приймачем.

Кількість місць зварювання волокна  $n_{зв}$  залежить від будівельної довжини  $l_{каб}$  (км) застосованого під час будівництва ВОЛЗ волоконно-оптичного кабелю й може бути знайдена за допомогою такого співвідношення:

$$n_{зв} = \text{окр} \left( \frac{l_{ЛЧ}}{l_{каб}} + 0.499999 \right) - 1, \quad (2)$$

де функція округлення значення аргументу  $x$  до найближчого цілого

$$\text{окр}(x) = \begin{cases} n, & \text{якщо } n \leq x < n + 0,5; \\ n + 1, & \text{якщо } n + 0,5 \leq x < n + 1, \end{cases} \quad (3)$$

де  $n$  – ціле число.

Для лінії з довжиною  $l_{ЛЧ}$ , що дорівнює довжині регенераційної ділянки  $l_{р\delta}$  (км), повинна виконуватись рівність:

$$P_{npd} = \alpha_{ВОЛЗ} + P_{зан} + P_{прм}, \quad (4)$$

де  $P_{npd}$  – потужність передавача, дБВт;  $\alpha_{ВОЛЗ}$  – загальне загасання сигналу у ВОЛЗ, дБ;  $P_{зан}$  – запас потужності для компенсації шумів у ВОЛЗ й спотворення сигналу при передаванні через ВОЛЗ, дБ;  $P_{прм}$  – чутливість приймача, дБВт.

Довжина регенераційної ділянки  $l_{pd\alpha}$  ВОЛЗ, обмежена загасанням в оптичному волокні, дорівнює довжині лінійної частини  $l_{ЛЧ}$  ВОЛЗ, при якій набуває мінімального значення така функція:

$$F_{\alpha}(l_{ЛЧ}) = \left| \frac{P_{npd} - \alpha_{зв} \left( \text{окр} \left( \frac{l_{ЛЧ}}{l_{каб}} + 0.499999 \right) - 1 \right) - \sum_{i=1}^{n_{зк}} \alpha_{зк_i} - \alpha_{pz} n_{pz} - \sum_{j=1}^{n_g} \alpha_{\theta_j} - P_{зан} - P_{прм}}{\alpha_{ЛЧ}} \right|. \quad (5)$$

При невеликих довжинах з'єднувальних кабелів (до декількох десятків метрів) можна знехтувати загасанням у них.

Розглянемо вплив дисперсії сигналів у волокні на довжину регенераційної ділянки ВОЛЗ. Дисперсія – це розсіювання в часі спектральних або модових складових оптичного сигналу, що спричинює збільшення тривалості оптичного імпульсу на виході ВОЛЗ. Дисперсія обмежує діапазон частот, придатних для використання оптичного волокна, та зменшує дальність передавання інформації по такому волокні, оскільки чим довша ВОЛЗ, тим більше проявляється дисперсія й більше розширення імпульсу.

Розрізняють міжмодову (модову)  $\tau_{мм}$ , хроматичну (частотну)  $\tau_{xp}$  і поляризаційно-модову  $\tau_{ПМ}$  дисперсії [3]. Міжмодова дисперсія спричинена наявністю великої кількості мод в оптичному волокні, кожна з яких поширюється зі своєю швидкістю. В одномодових волокнах міжмодова дисперсія відсутня.

Хроматична дисперсія поділяється на матеріальну  $\tau_{mat}$  і внутрішньомодову (хвилевідну)  $\tau_{\omega m}$  дисперсії. Матеріальна дисперсія пов'язана із залежністю показника заломлення оптичного волокна від довжини хвилі сигналу. Внутрішньомодова дисперсія обумовлена процесами всередині моди й пов'язана зі світловідною структурою моди. Для сучасних одномодових волоконно-оптичних кабелів зв'язку хроматичну дисперсію  $\tau_{xp}$  (с) визначають згідно з таким виразом:

$$\tau_{xp} = D_{xp}(\lambda_p) \cdot \Delta\lambda_{npd} \cdot l_{ЛЧ}, \quad (6)$$

де  $D_{xp}(\lambda_p)$  – коефіцієнт хроматичної дисперсії оптичного волокна, залежний від робочої довжини хвилі  $\lambda_p$ , пс/(нм·км);  $\Delta\lambda_{npd}$  – ширина спектра сигналу на виході джерела випромінювання (передавача), нм.

Коефіцієнт хроматичної дисперсії становить

$$D_{xp}(\lambda_p) = \frac{S_0}{4} \lambda_p \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_p} \right)^4 \right], \quad (7)$$

де  $S_0$  – коефіцієнт нахилу дисперсійної характеристики оптичного волокна, пс/(км·нм<sup>2</sup>);  $\lambda_0$  – довжина хвилі нульової дисперсії оптичного волокна, нм.

Найуживанішим залишається стандартне одномодове оптичне волокно з незміщеною дисперсією, що класифікують стандартом G.652. Його параметри оптимізовані для роботи в діапазоні довжин хвиль 1,31 мкм, у якому волокно характеризується нульовою хроматичною дисперсією сигналів і незначним загасанням [1]. Таке волокно застосовують для однохвильового й

багатохвильового передавання даних, зокрема в діапазоні довжин хвиль 1,55 мкм, забезпечуючи передавання зі швидкістю до 10 Гбіт/с. Для стандартного одномодового оптичного волокна з нульовою дисперсією  $S_0 = 0,092$  пс/(км·нм<sup>2</sup>) і  $\lambda_0 = 1310$  нм [4], а формула (7) придатна для розрахунків у діапазоні робочих довжин хвиль 1200–1600 нм. Як видно з виразу (6), хроматична дисперсія тим більша, чим більша ширина спектра випромінювання передавача й довжина лінійної частини ВОЛЗ. Однак, якщо передавач працює на довжині хвилі 1,31 мкм, тоді хроматичною дисперсією при розрахунках можна знехтувати. У такому разі на передавання даних по ВОЛЗ впливатиме лише поляризаційно-модова дисперсія.

Нехай на вхід ВОЛЗ подають сигнал у вигляді прямокутних імпульсів неполяризованої оптичної хвилі, що в загальному може бути подано як суму двох ортогонально-поляризованих хвиль (мод). Реальні оптичні волокна не є ідеально симетричними відносно своєї осі, тому сталі поширення таких мод не є однаковими. У зв'язку із цим час проходження кожної моди через ВОЛЗ буде дещо відрізнятись, що спричинить “розмивання” фронту та спаду й, як наслідок, збільшення тривалості імпульсів оптичної хвилі на вході приймача, що є сумою двох ортогонально-поляризованих мод. Це явище називають поляризаційно-модовою дисперсією [1]. Оскільки тривалість переданих імпульсів буде тим більшою, чим більша довжина ВОЛЗ, поляризаційно-модова дисперсія є одним із факторів, що впливає на довжину регенераційної ділянки як неполяризованих, так і поляризованих оптичних хвиль. Поляризаційно-модову дисперсію  $\tau_{PM}$  (с) обчислюють за формулою

$$\tau_{PM} = K_{PM} \sqrt{l_{LЧ}}, \quad (8)$$

де  $K_{PM}$  – коефіцієнт поляризаційно-модової дисперсії оптичного волокна, пс/(км)<sup>1/2</sup>.

У загальному випадку дисперсія ВОЛЗ  $\tau_{ВОЛЗ}$  (с) залежить від міжмодової  $\tau_{mm}$  (с), хроматичної  $\tau_{xp}$  (с) і поляризаційно-модової  $\tau_{PM}$  (с) дисперсії та приблизно дорівнює дисперсії сигналів у лінійній частині ВОЛЗ довжиною  $l_{LЧ}$ :

$$\tau_{ВОЛЗ} \approx \tau_{LЧ} = \sqrt{(\tau_{mm})^2 + (\tau_{xp})^2 + (\tau_{PM})^2} = \sqrt{(\tau_{mm})^2 + (\tau_{mat} + \tau_{\epsilon m})^2 + (\tau_{PM})^2}. \quad (9)$$

Дисперсія сигналів у волокні обмежує смугу пропускання  $\Delta F_{ВОЛЗ}$  (Гц) ВОЛЗ, що може бути визначена так [1, 5]:

$$\Delta F_{ВОЛЗ} \approx 1 / \sqrt{(T_{nрd})^2 + (\tau_{ВОЛЗ}(l_{LЧ}))^2 + (T_{nрm})^2}, \quad (10)$$

де  $T_{nрd}$  – швидкодія передавача ВОСП, с;  $T_{nрm}$  – швидкодія приймача ВОСП, с.

Зі збільшенням довжини ВОЛЗ дисперсія сигналів у оптичному волокні зростає, а смуга пропускання волокна зменшується. Максимальна швидкість передавання даних по ВОЛЗ залежить від застосованого для передавання різновиду модуляції сигналу й завадостійкого кодування та смуги пропускання лінії зв'язку. Саме тому дисперсія обмежує смугу пропускання оптичного волокна, а значить, і довжину регенераційної ділянки ВОЛЗ при заданій швидкості передавання даних та обраному різновиді модуляції сигналу й завадостійкого кодування (при заданій ширині спектра  $\Delta f_{nрd}$  (Гц) модульованого сигналу на виході передавача). Оскільки дисперсія залежить від довжини лінії зв'язку, тому довжина регенераційної ділянки  $l_{pд}$ , обмежена дисперсією сигналів у оптичному волокні, дорівнює довжині  $l_{LЧ}$  ВОЛЗ, за якої набуває мінімального значення така функція:

$$F_{\tau}(l_{LЧ}) = \left| 1 / \sqrt{(T_{nрd})^2 + (\tau_{ВОЛЗ}(l_{LЧ}))^2 + (T_{nрm})^2} - \Delta F_{nрd} \right|. \quad (11)$$

Зменшення довжини регенераційної ділянки ВОЛЗ також може бути спричинене іншими фізичними явищами в оптичному волокні, зокрема повертанням площини поляризації оптичної хвилі на виході ВОЛЗ, деполіризацією поляризованої хвилі, нелінійними ефектами.

В оптичному волокні наявне явище повертання площини поляризації оптичної хвилі на виході ВОЛЗ відносно площини поляризації хвилі на вході, що спричинене неоднорідністю реальних оптичних волокон. Таке явище істотно впливає на можливість розпізнавання сигналу приймачем у системах передавання на основі поляризованих світлових хвиль. Якщо поворот площини поляризації незначний, тоді довжина регенераційної ділянки ВОЛЗ буде дещо меншою, оскільки сигнал на виході аналізатора поляризації в приймачі буде меншим порівняно з випадком, коли на приймач приходить хвиля з площиною поляризації, що повністю збігається з площиною поляризації аналізатора. При значному повертанні слід підстроювати площину поляризації аналізатора приймача відповідно до площини поляризації оптичної хвилі на виході оптичного волокна.

При поширенні поляризованого світлового пучка вздовж оптичного волокна за деяких умов спостерігається його часткова або повна деполаризація. Явище деполаризації підсилюється у разі диференційної групової затримки світлових хвиль, які поширюються вздовж швидкої й повільної осей волокна, що перевищує когерентний час джерела випромінювання [1]. Коли диференційна груповая затримка таких світлових хвиль значно менша когерентного часу джерела випромінювання, впливом явища деполаризації на довжину регенераційної ділянки ВОЛЗ можна знехтувати.

До нелінійних ефектів у оптичному волокні, зокрема, належать чотирихвильове змішування та стимульоване розсіювання Бріллюена. Чотирихвильове змішування спричинює появу завад у системах із багатохвильовим передаванням даних (наприклад, DWDM) за рахунок появи нових гармонік у діапазоні робочих частот одного з каналів передавання за рахунок змішування сигналів у сусідніх каналах, що призводить до погіршення відношення потужності сигналу до потужності шуму на вході приймача й відповідного зменшення довжини регенераційної ділянки ВОЛЗ. Стимульоване розсіювання Бріллюена встановлює верхню межу на рівень оптичної потужності, що можливо передати оптичним волокном. Впливом згаданих нелінійних ефектів можливо знехтувати у випадку однохвильового передавання даних та застосуванні передавачів, потужність сигналу на виході яких менша граничного значення, установленого стимульованим розсіюванням Бріллюена.

Отже, знаючи довжину регенераційної ділянки  $l_{p\delta_\alpha}$  ВОЛЗ, обмежену загасанням оптичного волокна, та довжину регенераційної ділянки  $l_{p\delta_\tau}$ , обмежену дисперсією сигналів у оптичному волокні, що одержані з урахуванням за потреби впливу інших фізичних явищ в оптичному волокні, визначають номінальну довжину регенераційної ділянки  $l_{p\delta_n}$  згідно з таким співвідношенням:

$$l_{p\delta_n} = \begin{cases} l_{p\delta_\alpha}, & \text{якщо } l_{p\delta_\alpha} < l_{p\delta_\tau}; \\ l_{p\delta_\tau}, & \text{якщо } l_{p\delta_\tau} \leq l_{p\delta_\alpha}. \end{cases} \quad (12)$$

### Методи модуляції оптичної хвилі, що застосовують у сучасних ВОСП

У традиційних ВОСП застосовують БАМн, що полягає в передаванні оптичної хвилі певної потужності протягом інформаційного такту, якщо необхідно передати сигнал "1", та відсутності оптичної хвилі протягом інформаційного такту, якщо потрібно передати сигнал "0". БАМн характеризується частотною ефективністю 1 біт/(с·Гц). Отже, у традиційних ВОСП інформацію передають за допомогою імпульсів світлової хвилі.

У сучасних ВОСП почали впроваджувати методи когерентного передавання даних, при цьому застосовують фазову маніпуляцію оптичної хвилі. Розрізняють гомодинний та гетеродинний методи когерентного передавання даних. Найпоширенішими різновидами маніпуляції, що застосовують у таких системах, є бінарна фазова маніпуляція (БФМн, binary phase shift keying – BPSK) із частотною ефективністю 1 біт/(с·Гц) та квадратурна фазова маніпуляція (КФМн, quadrature phase shift keying – QPSK) з частотною ефективністю 2 біт/(с·Гц). Останній різновид маніпуляції дає змогу передавати інформацію зі швидкістю, що у два рази вища від систем із

застосуванням БАМн чи БФМн. Однак використання фазової маніпуляції спричинює ускладнення передавального та приймального пристроїв, оскільки необхідно забезпечити високу стабільність робочої частоти передавача та синхронне приймання сигналу приймачем.

Для подальшого підвищення ефективності ВОСП провідні компанії в галузі розроблення обладнання для таких систем ведуть дослідні роботи, пов'язані з використанням поляризаційної модуляції. Особливої уваги заслуговує двополяризаційна КФМн (ДП КФМн, dual polarization quadrature phase shift keying – DP QPSK), що передбачає формування суми двох когерентних ортогонально-поляризованих оптичних коливань з однаковою частотою, кожне з яких модульоване з використанням КФМн. При використанні двох потоків по 25 Гбіт/с на вході модулятора КФМн забезпечують швидкість передавання по 50 Гбіт/с завдяки кожному оптичному коливанню, а оскільки такі коливання є ортогонально-поляризованими, можливо передавати їх разом по одній ВОЛЗ та забезпечувати швидкість 100 Гбіт/с [6].

Застосовуючи поляризаційну модуляцію необхідно сформувати сигнал, що складається з двох ортогонально-поляризованих хвиль, та забезпечити їх розпізнавання на приймальній стороні. Однак під час передавання поляризованих хвиль через волокно за певних умов, згаданих вище, слід урахувати явища поляризаційно-модової дисперсії, повороту площини поляризації та деполаризації, що ускладнюють процес передавання даних. Також у ВОСП із застосуванням ортогонально-поляризованих хвиль слід урахувати вплив перехідних завод. Якщо  $P_{прм}$  – чутливість приймача, обмежена власними шумами, то для забезпечення передавання сигналу з потужністю  $P_c$  (Вт) за наявності в лінії внутрішньоканальної перехідної завади з потужністю  $P_{ш}$  (Вт) і поляризацією, що збігається з поляризацією сигналу, та за відсутності синхронізації між сигналом та заводою в часі під час використання, наприклад, БАМн необхідно забезпечити запас потужності (дБ) [1]

$$P_{зан} = -10 \lg \left( 1 - 2 \sqrt{P_{ш} / P_c} \right). \quad (13)$$

На рис. 1 зображено залежність необхідного запасу потужності від відношення потужності внутрішньоканальної перехідної завади з поляризацією, що збігається з поляризацією сигналу, до потужності сигналу, одержану згідно з виразом (13).

Перспективним на сучасному етапі розвитку є впровадження ВОСП на основі різновидів двополяризаційної амплітудно-фазової модуляції оптичної хвилі, зокрема двополяризаційної М-позиційної квадратурної амплітудної модуляції (ДП М-КАМ) і двополяризаційної М-позиційної амплітудної модуляції багатьох складових (ДП М-АМБС), що характеризуються вищою частотною та інформаційною ефективностями порівняно із ДП КФМн [6, 7, 8].

Розглянемо, як довжина регенераційної ділянки ВОЛЗ залежить від обраного різновиду модуляції сигналу й заводостійкого кодування. На довжину регенераційної ділянки ВОЛЗ, обмежену дисперсією сигналів у волокні, впливає ширина спектра  $\Delta F_{прд}$  (Гц) модульованого і кодованого сигналу на виході

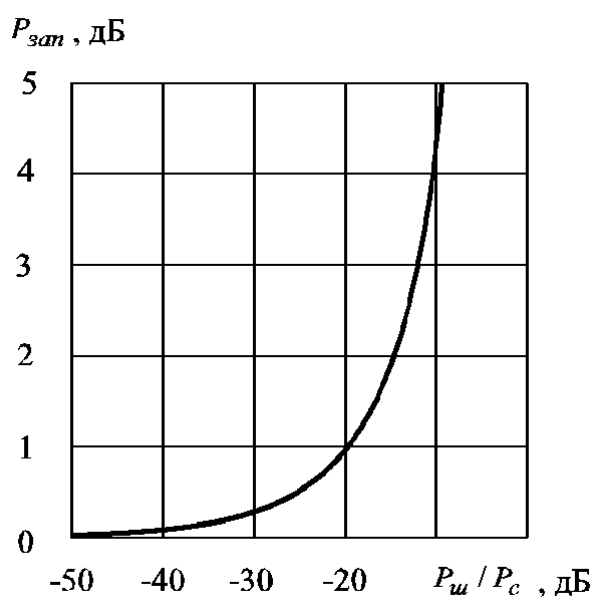


Рис. 1. Залежність необхідного запасу потужності від відношення потужності внутрішньоканальної перехідної завади з поляризацією, що збігається з поляризацією сигналу, до потужності сигналу

передавача (формула придатна для обчислень, якщо ширина спектра сигналу передавача за відсутності модуляції незначна порівняно з шириною спектра модульованого сигналу)

$$\Delta F_{npd} = \frac{V_{\sigma}}{\gamma_{mod} K_{код}}, \quad (14)$$

де  $V_{\sigma}$  – швидкість передавання даних у цифровому телекомунікаційному каналі, біт/с;  $\gamma_{mod}$  – частотна ефективність застосованого різновиду модуляції, біт/(с·Гц);  $K_{код}$  – ступінь кодування, що є параметром застосованого завадостійкого коду, безрозмірна величина.

Для того, щоб прийняти такий сигнал, приймач повинен мати смугу пропускання  $\Delta F_{nrm}$  (Гц), не меншу, ніж

$$\Delta F_{nrm} = K_{зан} \cdot \Delta F_{npd} = \frac{K_{зан} \cdot V_{\sigma}}{\gamma_{mod} K_{код}}, \quad (15)$$

де  $K_{зан} = 1,1$  – коефіцієнт запасу, безрозмірна величина.

Реальна чутливість  $P_{nrm}$  (дБВт) приймача дорівнює

$$P_{nrm} = 10 \lg \left( h_{ex} \Big|_{P_{\sigma_3}} k_B T_{nrm}^e \Delta F_{nrm} \right) - \Delta \beta_{код}, \quad (16)$$

де  $h_{ex} \Big|_{P_{\sigma_3}}$  – відношення потужності сигналу до потужності шуму на вході приймача, що забезпечує певне допустиме значення ймовірності бітової помилки  $P_{\sigma_3}$  під час розпізнавання інформації вирішуючим пристроєм у разі застосування конкретного різновиду модуляції та завадостійкого кодування, безрозмірна величина;  $k_B$  – стала Больцмана, Вт·с/К;  $T_{nrm}^e$  – шумова температура приймального пристрою, К;  $\Delta \beta_{код}$  – енергетичний виграш за рахунок кодування, що є параметром застосованого завадостійкого коду, дБ.

З іншого боку, чутливість  $P_{nrm}$  (дБВт) оптичного приймача під час застосування БАМн без кодування може бути обчислена за допомогою виразу [1]

$$P_{nrm} = 10 \lg (h f_p n_0 \Delta F_{nrm}), \quad (17)$$

де  $h$  – стала Планка, Вт·с;  $f_p$  – робоча частота оптичної хвилі, Гц;  $n_0$  – чутливість оптичного приймача у разі застосування БАМн, фотон/біт.

З виразів (15)–(17) одержано такий вираз для обчислення чутливості оптичного приймача у разі застосування різних видів модуляції та завадостійкого кодування:

$$P_{nrm} = 10 \lg \left( \frac{h_{ex_{mod}} \Big|_{P_{\sigma_3}}}{h_{ex_{БАМн}} \Big|_{P_{\sigma_3}}} h f_p n_0 \Delta F_{nrm} \right) - \Delta \beta_{код}, \quad (17)$$

де  $h_{ex_{mod}} \Big|_{P_{\sigma_3}}$  – відношення потужності сигналу до потужності шуму на вході приймача, що забезпечує певне допустиме значення ймовірності бітової помилки  $P_{\sigma_3}$  під час розпізнавання інформації вирішуючим пристроєм у разі застосування обраного різновиду модуляції, безрозмірна величина;  $h_{ex_{БАМн}} \Big|_{P_{\sigma_3}}$  – відношення потужності сигналу до потужності шуму на вході приймача, що забезпечує певне допустиме значення ймовірності бітової помилки  $P_{\sigma_3}$  під час розпізнавання інформації вирішуючим пристроєм у разі застосування БАМн, безрозмірна величина.

**Результати досліджень**

Використовуючи співвідношення (1)–(17), досліджено взаємозв’язок між швидкістю передавання даних  $V_0$  через ВОСП та номінальною довжиною регенераційної ділянки  $l_{p0n}$  під час використання певного різновиду модуляції за ширини спектра модульованого сигналу 1,074 ГГц і 26,84 ГГц та ймовірності бітової помилки  $P_{0s} = 10^{-9}$  під час розпізнавання інформації вирішуючим пристроєм. Результати досліджень наведені на рис. 2.

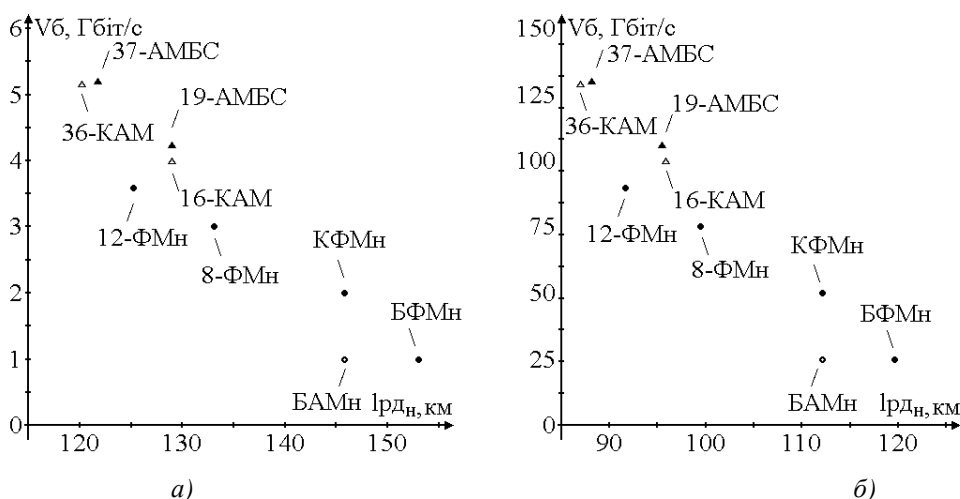


Рис. 2. Взаємозв’язок між швидкістю передавання даних  $V_0$  через ВОСП та номінальною довжиною регенераційної ділянки  $l_{p0n}$  у разі використання певного різновиду модуляції за ширини спектра модульованого сигналу: а) 1,074 ГГц; б) 26,84 ГГц

Моделювання здійснено для робочої довжини хвилі  $\lambda_p = 1310$  нм за відсутності завадостійкого кодування, у разі використання одномодового волоконно-оптичного кабеля типу Corning SMF-28™ (відповідає рекомендаціям ІТУ-Т G.652) з  $\alpha_{ЛЧ} = 0,35$  дБ/км,  $K_{ПМ} = 0,1$  пс/(км)<sup>1/2</sup>,  $l_{каб} = 3$  км, передавача з параметрами  $P_{прд} = -23,01$  дБВт,  $T_{прд} = 8$  пс, приймача з параметрами  $T_{прм} = 10$  пс,  $n_0 = 18$  фотон/біт (чутливість ідеального оптичного приймача у разі застосування БАМн [1]), коефіцієнтах  $\alpha_{36} = 0,2$  дБ,  $\alpha_{3k_i} = 0$  дБ,  $n_{3k} = 2$ ,  $\alpha_{pз} = 0,32$  дБ,  $n_{pз} = 4$ ,  $\alpha_{в_j} = 0$  дБ і  $P_{зан} = 0$  дБ.

З рис. 2 видно, що у разі застосування 37-АМБС порівняно із БФМн номінальна довжина регенераційної ділянки зменшується на 20% за ширини спектра модульованого сигналу 1,074 ГГц і на 36% – при 26,84 ГГц, при цьому досягнуто збільшення швидкості передавання даних у 5,209 разів. Отже, використання ефективніших різновидів модуляції є доцільним. З рис. 2 також видно, що запропонований різновид модуляції М-АМБС у загальному дає змогу передавати дані на більшу відстань та з більшою швидкістю порівняно з відомими різновидами модуляції М-КАМ та М-ФМн. Слід зауважити, що реально досяжна чутливість оптичного приймача буде гіршою порівняно з ідеальним приймачем, тому на практиці номінальна довжина регенераційної ділянки буде дещо меншою від зображеної на рис. 2.

Кращих результатів можливо досягти під час застосування різновидів двополяризаційної модуляції, що дозволяють збільшити частотну ефективність ВОСП у два рази порівняно з використанням неполяризованих світлових хвиль. При цьому виникають проблеми, які розглянуті



вище, що спричинюють зменшення довжини регенераційної ділянки. Однак аналіз останніх публікацій [2, 9, 10] свідчить, що цей напрямок є актуальним і активно розвивається останнім часом. Провідні компанії світу вже почали розробляти телекомунікаційне обладнання на основі ДП БФМн, ДП КФМн і ДП 16-КАМ.

У разі збільшення швидкості передавання на довжину регенераційної ділянки істотніше починає впливати дисперсія. Як впливає з [2, 9, 10], доцільніше компенсувати дисперсію не приєднанням у лінію зв'язку спеціальних пристроїв, а за допомогою спеціального оброблення прийнятого сигналу в приймачі. У роботі [11] описано спосіб зменшення поляризаційно-модової дисперсії в чотири рази. У роботах [6, 7, 8] запропоновано методи адаптивного передавання даних у ВОСП та структури приймальних і передавальних пристроїв на основі ДП М-ФМн, ДП М-КАМ та ДП М-АМБС, що дозволяють забезпечити вищу інформаційну ефективність та швидкість передавання даних порівняно з відомими методами передавання даних на основі широко вживаних різновидів модуляції сигналу, забезпечити компенсацію впливу повороту площини поляризації та зменшити вплив поляризаційно-модової дисперсії шляхом підстроювання поляризації аналізаторів приймача відповідно до поляризації складових оптичної хвилі на виході оптичного волокна з подальшим цифровим обробленням сигналу в приймальному пристрої.

Отже, найперспективнішим для забезпечення високошвидкісного передавання даних у сучасних ВОСП є використання ДП М-ФМн, ДП М-КАМ та ДП М-АМБС.

### Висновки

Розглянуто фізичні явища в оптичному волокні, що впливають на довжину регенераційної ділянки ВОЛЗ. Проаналізовано можливість використання сучасних методів передавання даних у ВОСП, показано їх переваги та недоліки, виявлено обмеження щодо їх застосування. Установлено, що найперспективнішим для забезпечення високошвидкісного передавання даних у сучасних ВОСП є використання ДП М-ФМн, ДП М-КАМ та ДП М-АМБС, що характеризуються вищою інформаційною ефективністю порівняно із застосованою в нових пристроях для передавання даних ДП КФМн.

1. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения / А.Б. Иванов. – М. : Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999. – 672 с. 2. Барсков А. Возвращение к истокам [Електронний ресурс] // А. Барсков // Журнал сетевых решений / Телеком. – 2011. – №04. – Режим доступа : <http://www.osp.ru/telecom/2011/04/13008343/>. 3. Гроднев И.И. Линии связи : учебник для вузов / И.И. Гроднев, С.М. Верник. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1988. – 544 с. : ил. 4. Corning SMF-28TM Optical Fiber. Product Information [Електронний ресурс]. – Режим доступа : <http://www.corning.com/opticalfiber/>. 5. Справочник по волоконно-оптическим линиям связи / Л.М. Андрушко, В.А. Вознесенский [и др.] ; под ред. С.В. Свечникова и Л.М. Андрушко. – К.: Техника, 1988. – 239 с. 6. Klymash M. Fiber optic telecommunication system with the use of modulation D8PSK / M. Klymash, I. Gorbatyy // The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics. Proc. of the XIth International Conf. CADSM 2011. – Polyana-Svalyava (UKRAINE). –2011. – P.147-148. 7. Горбатий І.В. Передавання інформації у волоконно-оптичних системах із використанням сучасних методів формування та оброблення сигналів / І.В. Горбатий // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Електроніка". – Львів, 2011. – №708. – С. 131–137. 8. Горбатий І.В. Адаптивне передавання даних у волоконно-оптичних системах із використанням амплітудної модуляції багатьох складових / І.В. Горбатий // Зб. наук. пр. (Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України). – К. : 2011. – Вип. 60. – С. 172–181. 9. Коротковський Е. Reliance Globalcom выбирает когерентную технологию 40-Gbps для подводной кабельной сети FNAL [Електронний ресурс] / Е. Коротковський. – Режим доступа : <http://www.ovols.ru/?p=277>. 10. Hardy S. Alcatel-Lucent makes 400-Gbps play [Електронний ресурс] / S. Hardy. – Режим доступа : <http://www.lightwaveonline.com/>

articles/2012/03/alcatel-lucent-makes-400-gbps-play.html. 11. Чернихівський Є.М. Математичне моделювання телекомунікаційних систем та мереж : навч. посібник / Є.М. Чернихівський. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2011. – 272 с.

УДК 530.145

В.М. Фітьо

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра фотоніки

## ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР’Є ДЛЯ РОЗВ’ЯЗАННЯ ОДНОВИМІРНОГО РІВНЯННЯ ШРЕДІНГЕРА

© Фітьо В.М., 2012

V.M. Fitio

## APPLYING FOURIER TRANSFORMATION FOR SOLUTION OF THE ONE-DIMENSIONAL SCHRÖDINGER EQUATION

© Fitio V.M., 2012

Розроблено числовий метод розв’язання стаціонарного одновимірного рівняння Шредінгера. Метод ґрунтується на перетворенні Фур’є хвильового рівняння. Внаслідок чого отримуємо інтегральне рівняння, в якому інтеграл замінюємо підсумовуванням. Остаточно отримуємо задачу лінійної алгебри на власні числа та власні вектори, які відповідають дискретним рівням енергії та Фур’є-образам хвильових функцій. За допомогою зворотного Фур’є-перетворення отримуємо хвильову функцію. Для одновимірного скінченного кристала дискретні рівні енергії розщеплюються і формують заборонені та дозволені зони. Метод перевірений на багатьох прикладах і характеризується високою точністю пошуку дискретних рівнів енергії.

*Ключові слова: перетворення Фур’є, рівняння Шредінгера, згортка, рівні енергії.*

Developed a numerical method of solution of the one-dimensional steady Schrödinger equation. This method is based on Fourier transformation of the wave equation. As a result, we obtain integral equation, in which we replace integral with summation. Finally we get the problem of linear algebra on eigenvalues and eigenvectors that correspond to discrete energy levels and the Fourier transform of wave functions. Using inverse Fourier transformation we get wave function. For one-dimensional finite crystal discrete energy levels are split and form band gaps and allowed zones. This method was tested on many examples and is characterized by precision search of discrete energy levels.

*Key words: Fourier transformation, Schrödinger equation, convolution, energy levels.*

### Вступ

Навіть останнім часом тривають пошуки розв’язків одновимірного стаціонарного рівняння Шредінгера, причому стараються сформулювати потенціальну енергію так, щоб відповідне рівняння можна точно розв’язати аналітично [1,2,3]. Проте існує невелика кількість функціональних залежностей потенціальної енергії, коли можна отримати аналітичний розв’язок [4]. Існує