

УДК 681.326

Г. Л. Лисенко, к. т. н., доц.;

С. Є. Тужанський;

Мотаз Х Я Даду

ГРАНИЧНІ МОЖЛИВОСТІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЄМНОСТІ МЕРЕЖ SWANET З УРАХУВАННЯМ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАГОЛОВКІВ ПАКЕТІВ

Розглянуто особливості впливу характеристик заголовків пакетів в оптичних мережах SWANET на інформаційну ємність з урахуванням лінійних та нелінійних оптичних ефектів у оптичному волокні. Досліджено спектральні особливості заголовків пакетів у SWANET. Проаналізовано механізми підвищення інформаційної ємності SWANET та DWDM-мереж зі швидкістю передачі даних 40 Гбіт/с.

Вступ

Постійне зростання обсягів інформації в системах передачі далекого та регіонального зв'язку змушує провайдерів вести пошук найпродуктивніших передавальних засобів, одночасно зменшуючи вартість переданої через канал зв'язку інформації.

Загальна смуга пропускання сучасних волоконних ліній містить у собі голосовий трафік, відео, банківську та комерційну інформацію, Інтернет, а також додаткові буферні потужності. На характеристики роботи системи істотно впливають стандарт мережі і протоколи передачі [1]. Окремий клас мереж, в яких для передавання даних не використовуються оптоелектронні перетворення, становлять цілком оптичні мережі (AON), зокрема мережі із багатохвильовою маршрутизацією заголовків SWANET. Особливістю останніх, у порівнянні з традиційними AON із повністю оптичною пакетною комутацією, є значне підвищення кількості адрес станцій призначення (вузлів мережі) за однакових можливостей електронних пристроїв [2].

Очікується, що у 2006 році потреба в пропускну здатності магістральних каналів зв'язку становитиме декілька Тбіт/сек, отже використання повністю оптичних мереж стає все актуальнішим та економічно привабливішим. Можливий варіант розвитку магістральних волоконно-оптичних систем пов'язаний із поєднанням технологій SWANET та DWDM (щільне хвильове мультиплексування). Найпривабливішими для цього сьогодні є канали із швидкістю 40 Гбіт/с. Однак, досі існують певні перешкоди на шляху повномасштабного розгортання таких систем, пов'язані із необхідністю установки нового обладнання терміналів і оптичних систем, обмеженою щільністю каналів при використанні стандартних підходів, зменшенням дальності передачі, а також більшими складністю і зоною обслуговування системи.

Граничні можливості інформаційної ємності мереж SWANET та DWDM

Основні фізичні механізми, що обмежують максимальну смугу пропускання оптичного волокна відомі — це лінійні та нелінійні оптичні ефекти. До перших відносяться загасання сигналу у волоконному кабелі, квантовий поріг чутливості фотоприймачів, хроматична та поляризаційна мода дисперсії, подвійне променезаломлення світла.

Розглянемо спочатку вплив вказаних лінійних явищ на залежність часових параметрів передачі пакетів та особливостей маршрутизації заголовків у SWANET з урахуванням дальності передачі.

Питома хроматична дисперсія для Triwave волокна із ненульовою зміщеною дисперсією в L -діапазоні прозорості оптичного волокна [3]

$$D(\lambda) = \frac{\lambda S_0}{4} \left(1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \right) \approx 3,5 \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}}.$$

Поляризаційна мода дисперсія для кращих зразків компенсованих волокон становить

$$\tau_{pmd} \leq 0,1 \text{ пс}/(\text{нм} \cdot \text{км}) [3].$$

Теоретичний квантовий поріг чутливості фотоприймача визначається за максимальним значенням частоти бітових помилок ($BER \leq 10^{-9}$). Згідно з розподілом Пуассона в напівпровідниковому середовищі імовірність емісії n електронів за інтервал імпульсу τ

$$P_r(n) = \bar{N}^n \frac{e^{-\bar{N}}}{n!}.$$

Для максимального значення BER у випадку р-і-n фотодіоду можна записати

$$P_r(0) = e^{-\bar{N}} = 10^{-9} \Rightarrow \bar{N}_{pin} = 9 \ln 10 = 20,7 \approx 21.$$

Для лавинного APD фотодіоду $BER \leq 10^{-11}$

$$\bar{N}_{pin} = 11 \ln 10 = 25,3 \approx 25.$$

Для реальних фотоприймальних пристроїв граничне значення чутливості становить $N > 1000$ [4].

Таким чином, для максимальної квантової ефективності $\eta = 1$, враховуючи що бітовий інтервал дорівнює половині ширини смуги пропускання $1/\tau = B/2$, відповідна енергія [4]

$$E = \bar{N} \frac{h\nu}{\eta} \Rightarrow P_r(0) = \bar{N}_0 \frac{hcB}{2\lambda}.$$

Необхідно зазначити, що бітовий інтервал пакета й заголовка в мережі SWANET можуть відрізнятися. Це обумовлено тим, що за наявності помилок передачі заголовка існує ймовірність втратити весь пакет даних, що призведе до різкого збільшення коефіцієнта помилок у системі для даних. Такі обставини накладають жорсткіші вимоги до передачі заголовка в досліджуваній мережі. Для подальшої оцінки впливу параметрів заголовка на швидкодію й дальність будемо вважати коефіцієнт помилок для заголовка на порядок меншим, ніж для даних

$$10 \cdot BER_{head} \leq BER_{data}.$$

Результати дослідження впливу вказаних лінійних ефектів на взаємозв'язок дальності передачі із смугою пропускання для одномодової передачі в мережі SWANET на довжині хвилі 1550 нм (використовуючи DBR-лазер із спектральною шириною $\sigma_\lambda = 0,1$ нм і потужністю, що вводиться у волокно $P_{tx} = 0$ дБм, коефіцієнт загасання оптичного кабелю в L -діапазоні $\alpha = 0,2$ дБ/км) показано на рис. 1.

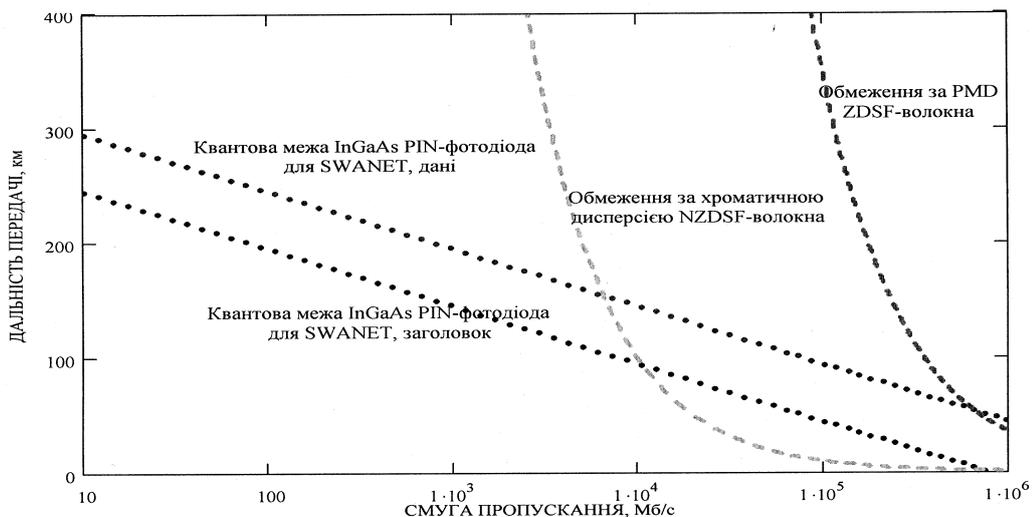


Рис. 1. Теоретичні границі дальності передачі SWANET як функції пропускну здатності з урахуванням вимог до заголовка пакетів (із використанням DBR-лазеру та PIN фотодіоду на InGaAs)

Границя інформаційної ємності телекомунікаційних систем визначається за критерієм Хартлі-Шеннона [5]:

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = WC,$$

де W — спектральна ширина каналу, S/N — відношення сигнал-шум, C — спектральна ефективність системи.

Оцінка цієї величини для максимальної спектральної ширини каналу, обумовленої внутрішніми механізмами втрат під час розповсюдження світла у кварцовому склі 50 ТГц (вікно прозорості 1200—1600 нм) [6] і типового оптичного співвідношення сигнал-шум 20 дБ дає граничне значення інформаційної ємності без урахування нелінійних механізмів 330 Тбіт/с.

На рис. 2 зображено залежності спектральної ефективності каналу зв'язку у випадку лінійного режиму передачі для класичного критерію Хартлі-Шеннона, постійної модуляції інтенсивності із когерентним детектуванням та відповідно прямим детектуванням [7].

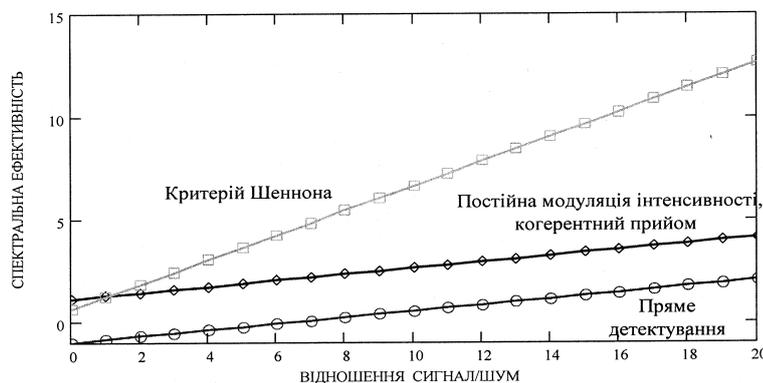


Рис. 2. Функція залежності спектральної ефективності DWDM-системи в лінійному режимі передачі від співвідношення сигнал-шум, дБ

За відсутності нелінійностей максимальна спектральна ефективність DWDM-системи SWANET із гаусовим шумом також може бути вираженою через шуми оптичних підсилювачів [6]

$$C_0 = \log_2 \left(1 + \frac{I}{I_n} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{I}{n_s a G h \nu B} \right),$$

де n_s — кількість волоконних прогонів, a — постійна, G — коефіцієнт підсилення оптичного підсилювача, h — стала Планка, ν — робоча частота, B — смуга пропускання оптичного волокна.

До основних нелінійних ефектів, які обмежують максимальне пропускання сигналу в оптичному волокні, відносять стимульоване раманівське розсіювання SRS, власну SPM та перехресну SPM фазові модуляції, чвертьхвильове змішування FWM [3, 4]. Відповідні перекручування у волоконних лініях сприяють виникненню міжсимвольної інтерференції або спотворенню сигналів на приймальному кінці лінії, збільшується частота бітових помилок. Окрім названих, істотно обмежує дальність та смугу пропускання у DWDM-системах ефект спонтанно підсиленого випромінювання ASE.

Для стандартного волокна із площею модового поля $A_{eff} = 80 \text{ мкм}^2$ відповідна порогова потужність для виникнення стимульованого раманівського розсіювання становить 1,8 Вт. У DWDM системах поруч із зменшенням робочої частоти негативним наслідком ефекту SRS також є зростання втрат для каналів із меншою довжиною хвилі.

SPM — ефект власної модуляції фази хвилі, що приводить до поширення спектра імпульсу та збільшення дисперсії. Показник заломлення матеріалу волокна залежить від інтенсивності спадного випромінювання

$$n = n_0 + n_2 \frac{P(t)}{A_{eff}},$$

де n_0 — лінійний показник заломлення, $n_2 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ мкм}^2/\text{Вт}$ — нелінійний показник заломлення,

$P(t)$ — потужність джерела.

Зокрема, для DSF-волокна із $D = 17$ пс/(нм·км) на відстані 50 км у разі збільшення потужності на вході з 4 мВт до 20 мВт наведена нелінійна дисперсія приводить до збільшення ширини імпульсу приблизно в три рази [7]. Оцінка границі добутку пропускної здатності на дальність передачі згідно з рис. 3 дає значення порядку $4 \cdot 10^{11} \frac{\text{Гбіт}}{\text{с}} \text{км}$.

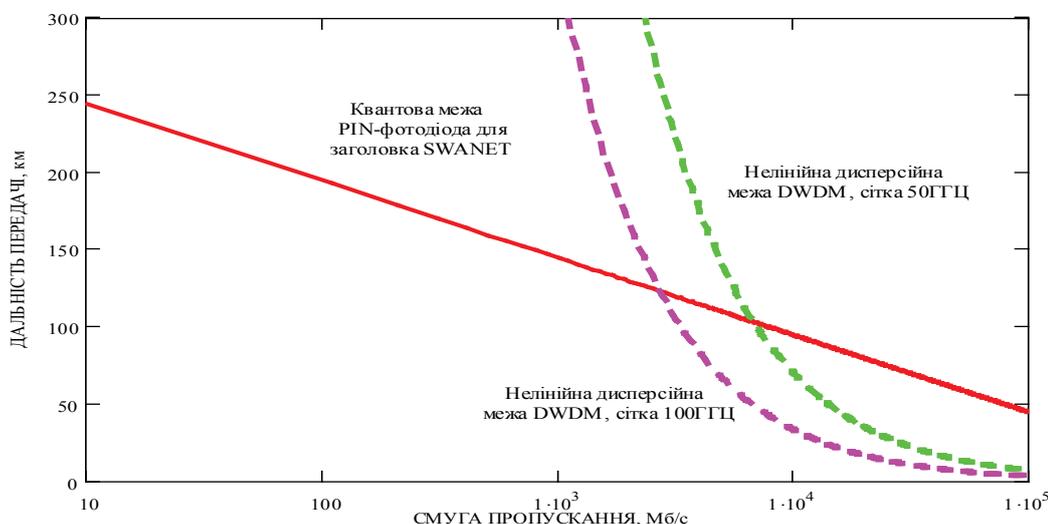


Рис. 3. Залежність дальності передачі SWANET від смуги пропускання з урахуванням нелінійної дисперсії DWDM-систем

Як бачимо, використання частотного плану 50 ГГц істотно підвищує ефективність роботи мережі, тому ущільнення каналів з використанням частотних планів ІТУ-Т менших 100 ГГц в SWANET може бути доцільним. Однак повний аналіз повинен враховувати ефекти чвертьхвильового змішування, виникнення міжсимвольної інтерференції в разі високих швидкостей передачі, а також значне підвищення вартості обладнання та інші фактори.

Згідно з [6] власна SPM та перехресна CPM фазової модуляції є найвагомими нелінійними ефектами, що обмежують пропускну здатність оптичного волокна. На роботу системи з хвильовим мультиплексуванням істотно впливають перехресна фазова модуляція CPM та чвертьхвильове змішування FWM (останній ефект особливо впливає на роботу систем з низькою дисперсією).

У роботі [6] Mitra та Stark вперше розрахували нелінійні границі інформаційної ємності волоконно-оптичних комунікацій. Доведено, що максимальне значення спектральної ефективності для системи із мультиплікативним Гаусовим шумом становить 2,3 біт/(с·Гц). Пізніше доведено [7], що за певних умов (когерентний прийом, недвійкова модуляція та ін.) ця величина може бути збільшена практично вдвічі.

Дослідження спектральних особливостей заголовків пакетів SWANET

Для проведення аналізу залежності спектрального діапазону довжин хвиль, що передаються в заголовках пакетів мережі SWANET, дослідимо максимально можливу їх кількість залежно від числа розрядів p даних для випадків невеликої ($N \leq 1000$) і максимально можливої ($N \leq 2^{32}$) кількості адрес станції призначення (вузлів мережі).

З рис. 4, а видно, що якщо розрядності заголовка $p = 2$ максимальна кількість вузлів мережі, на які можуть передаватися пакети, обмежена числом довжин хвиль стандартного C-діапазону з інтервалом частот 100 ГГц (частотний план ІТУ-Т). Відповідна значенню 32 кількість адрес обмежена 1024 вузлами. Тому в реальних системах з $N > 1000$ така розрядність заголовка не повинна використовуватися. Також, згідно з рис. 4б, при певній кількості адрес (> 1048576) 4-розрядні заголовки також не зможуть бути переданими за допомогою вказаного числа довжин хвиль. Для більших розрядностей практично будь-яке значення вузлів мережі в межах 2^{32} може бути забезпечено в частотному інтервалі 100 ГГц.

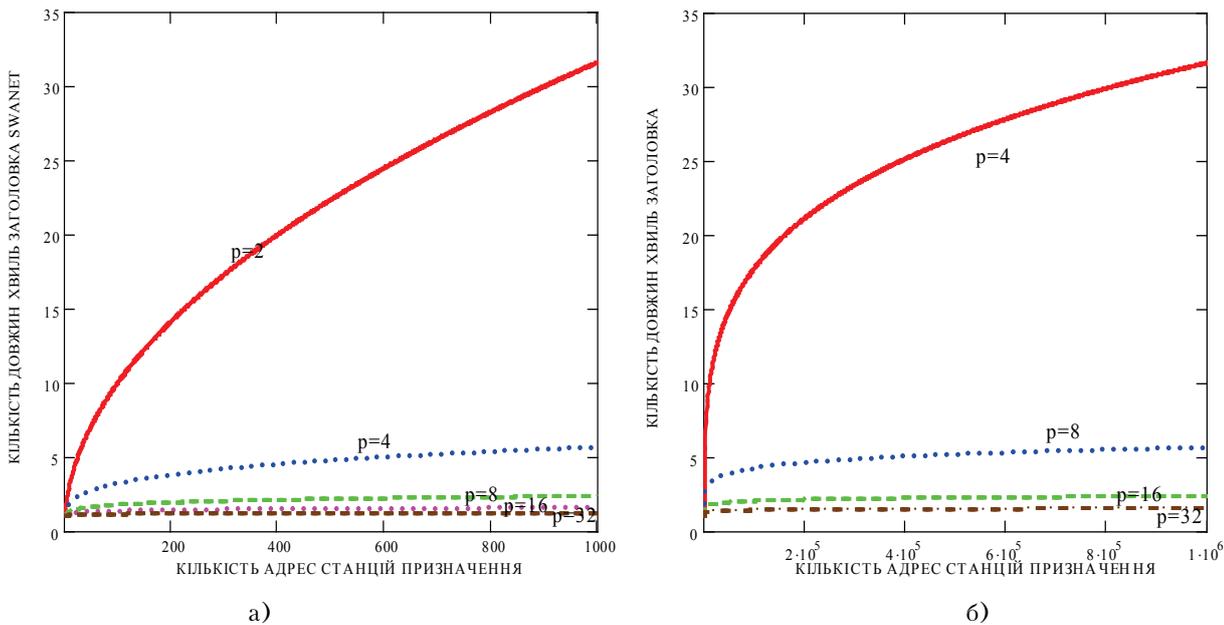


Рис. 4. Спектральна залежність розрядності заголовків пакетів SWANET від кількості адрес станцій призначення для $N \leq 1000$ (а) та $N \leq 10^6$ (б)

Слід зазначити, що потенційно в мережі SWANET можливо також використання щільнішого хвильового мультиплексування з сітками частотного плану 50 ГГц і 25 ГГц. При цьому відповідна кількість довжин хвиль, які використовуються, зростає відповідно в 2 або 4 рази. Проте використання таких частотних планів припускає як значне підвищення вартості устаткування мережі, так і обмеження по подальшому мультиплексуванню каналів передачі через ефекти чвертьхвильового змішування і додаткові підвищення дисперсії. Останній чинник також обмежує кількість довжин хвиль, які можуть бути використані для передачі (для стандарту STM-64 з сіткою 50 ГГц діапазон хвиль 1540...1560 нм).

Механізми підвищення інформаційної ємності SWANET та DWDM-мереж

У наш час оптичні мережі забезпечують високу щільність каналів, велику швидкість передачі інформації каналами на далекі відстані, значною мірою завдяки фотонним технологіям (Рамановські та EDFA оптичні підсилювачі, DWDM, компенсація хроматичної дисперсії), а також електронним технологіям (швидкодійні електронні інтегральні схеми, пряме виправлення помилок). Однак оптичні провідні системи зв'язку, як і раніше, відстають від неоптичних провідних систем зв'язку щодо використання інших важливих методів модуляції й оброблення сигналів, включаючи недвійкову модуляцію, адаптивне вирівнювання й кодовану модуляцію. Ці методи модуляції й оброблення сигналів можуть відігравати важливу роль у підвищенні пропускної здатності волоконно-оптичних ліній і зниженні вартості передачі інформації.

Підвищення пропускної здатності й розширення зони діяльності можуть бути досягнуті за допомогою застосування нових схем модуляції й використання нових оптичних, електронних і гібридних методів оброблення сигналу.

Надалі ми розглянемо різні методи оброблення сигналів і формати модуляції для того, щоб з'ясувати як вони будуть сприяти досягненню поставленої задачі. При цьому будуть розглянуті технічні переваги й економічні вигоди систем, які використовують пряме детектування. Такі сучасні схеми оброблення сигналів як електронне адаптивне вирівнювання, відновлення тактової частоти й даних (CDR), корекція сигналу помилок (FEC), використовуються в голосових системах зв'язку, мобільних телефонах, лініях цифрових підписів. Разом з наявними методами модуляції вони істотно поліпшують робочі параметри SWANET на основі DWDM, надають їй гнучкість і можливість

реконфігурування, знижують витрати на виробництво, підвищують ступінь інтеграції компонентів, зменшують вартість обслуговування.

Формат модуляції, вирівнювання, CDR й FEC відіграють певну роль, перешкоджаючи погіршенню роботи лінії, як зазначено в табл. 1. Різні сполучення цих методів також можуть істотно поліпшити інформаційну ємність волоконної мережі й знизити вартість переданої інформації.

Таблиця 1

Методи підвищення граничних можливостей SWANET на основі DWDM

Метод	Можливості збільшення пропускної здатності і дальності системи
формат модуляції	<ul style="list-style-type: none"> — формати модуляції, які звужують оптичний спектр, можуть зменшити міжканальний інтервал в DWDM мережах і зменшити хроматичну дисперсію та відповідно міжсимвольну інтерференцію в оптичному сигналі у волоконній лінії; — формати модуляції, які збільшують тривалість сигналу, можуть акумулювати некомпенсовані хроматичну й поляризаційну модову дисперсію до того, як міжсимвольна інтерференція в оптичному сигналі стане вагомою; — формати модуляції постійної інтенсивності можуть зменшити SPM та CPM і зменшити перекручування сигналу в лінії
адаптивне електричне вирівнювання	вирівнювання може зменшувати, або усувати ефекти міжсимвольної інтерференції після оптоелектронного перетворення і детектування символу в приймачі
адаптивне відновлення даних і тактової частоти CDR	адаптивне відновлення даних і тактової частоти відслідковує відкриття спектрального каналу й намагається втримати подачу даних на рівні центра спектру, за наявності міжсимвольної інтерференції й перекручування сигналу після оптоелектронного перетворення й детектування символу в приймачі
детектування сигналу помилок FEC	FEC містить алгоритмічні схеми кодування (через додаткові «службові розряди», що вбудовуються в електричний сигнал до електрооптичного перетворення в передавачі). Вони надають можливість детектування й корекції помилок після оптоелектронного перетворення і відновлення даних у приймачі

Економічність роботи DWDM системи зв'язку продовжує зростати в наслідок поліпшення пропускної здатності волокна. Загальна пропускна здатність визначається наявною смугою пропускання волокна і спектральною ефективністю. Дослідження показали, що спектральна ефективність вище 1 біт/(сГц) може бути досягнута в WDM та DWDM системах [7—8]. Однак, використання методів двійкового модулювання, таких як NRZ і RZ амплітудної модуляції, обмежує спектральну ефективність величиною нижче 1 біт/(сГц). Наступне покоління DWDM систем вже починає використовувати канали зі швидкістю 40 Гбіт/с з міжканальним інтервалом 50 ГГц, що відповідає спектральній ефективності 0,8 біт/(сГц). Системи, які наближаються до цих меж мають потребу в методах недвійкового кодування, таких як багаторівнева модуляція інтенсивності або фазова модуляція [9—14].

Таблиця 2

Порівняння методів модуляції для 40 Гбіт/с систем

Метод	Переваги	Недоліки	Література
NRZ	базовий метод (немає обмеження відношення оптичний сигнал/шум OSNR)	одиничний стан модуляції; 90 % спектральної ширини відповідає 66 ГГц (крім носія), границя міжканального інтервалу 100 ГГц	[3,4]
RZ	немає обмеження OSNR; забезпечує найкращу стійкість до нелінійних ефектів у волокні; дещо більший інтервал імпульсу дає збільшення стійкості до PMD	90 % спектральної ширини > 66 ГГц (без фільтрації); міжканальний інтервал обмежений 100 ГГц; вимагає додаткового каскаду модулятора; вимагає складного керування для компенсації хроматичної дисперсії	[3]
дуобінарність	немає обмеження OSNR; 90 % спектральної ширини відповідає 33 ГГц, можливий міжканальний інтервал 50 ГГц; звуження спектра підвищує стійкість до некомпенсованої хроматичної дисперсії CD	вимагає додаткового попереднього кодера; складніший провідний сигнал; нижча стійкість до нелінійностей волокна	[9]

Метод	Переваги	Недоліки	Лі- тера- тура
M-PAM	повністю електронний метод; спектральна ширина дорівнює $\log_2 M$; міжканальний інтервал 50 ГГц (потенційно 25 ГГц); спектральне звуження поліпшує стійкість до некомпенсованої хроматичної дисперсії; більша тривалість символу поліпшує стійкість до некомпенсованих дисперсій	OSNR штраф залежить від величини модуляції M; складніший сигнал; вимагає граничного зниження на приймачі; вимагає спеціального M-PAM приймача для контролю оптичного каналу в лінії	[10]
SSB/ VSB	немає обмеження OSNR; звужений спектр дає можливість зменшити міжканальний інтервал	потрібна спеціальна оптична фільтрація або складні модулятори; VSB використовує змінний міжканальний інтервал; обмежена стійкість до нелінійностей волокна	[11]
DPSK	поліпшення OSNR (з балансованим приймачем); постійна кадрова модуляція зменшує SPM та CPM	потрібне інтерферометричне детектування; спеціальний DPSK приймач для контролю оптичних каналів; немає спектрального звуження, міжканальний інтервал обмежений 100 ГГц	[12]
DQPSK	немає обмеження OSNR; постійна кадрова модуляція зменшує SPM, CPM; 90 % спектральної ширини становить 33 ГГц, можливий міжканальний інтервал 50 ГГц; спектральне звуження поліпшує стійкість до некомпенсованої CD; більша тривалість символу поліпшує стійкість до некомпенсованого CD й PMD	потрібне інтерферометричне детектування; складний електричний сигнал або два модулятори; потрібно DQPSK приймач для контролю оптичного каналу в оптичній системі	[13]
SCM+ M-QAM	спектральне звуження і тривалість символу залежить від величини модуляції; спектральне звуження поліпшує стійкість до некомпенсованої CD; більш низька частота носія й (або) більша тривалість символу поліпшує стійкість до некомпенсованих CD і PMD	OSNR штраф залежить від кількості носіїв, спектральна ефективність більша ніж зсув за допомогою великого OSNR штрафу; вимагає складної електроніки; жорсткі вимоги до лінійності в модуляторі; вимагає спеціального приймача для контролю оптичного каналу; стійкість до дисперсії є функцією частоти носія й тривалості символу	[14]

В табл. 2 зібрані основні переваги й недоліки різних методів модуляції й схем гібридної модуляції, які досліджені на предмет використання в оптичних передавальних системах високої пропускної здатності. Ці переваги й недоліки, як очікується, будуть характерні й для систем 40 Гбіт/с, хоча не всі методи, наведені в табл. 2, були досліджені з урахуванням можливого використання в лініях, що працюють зі швидкістю 40 Гбіт/с. Формат «базової» модуляції в табл. 2 є NRZ (неповернення до нуля) із амплітудною маніпуляцією, всі інші формати відносяться (для 40 Гбіт/с) у термінах відносної стійкості до нелінійних явищ поширення у волокні, таких як SPM (імпульсна модуляція) і CPM (перехресна фазова модуляція), стійкість до некомпенсованих CD й PMD, яка досягає міжканального інтервалу і складність реалізації як термінального устаткування, так і оптичної лінійної системи.

За допомогою бітового кодування символів методи недвійкової модуляції можуть істотно звужити спектр, що веде до виникнення вузького міжканального інтервалу в DWDM системах SWANET й, отже, висшої спектральної ефективності. Звуження спектра може також зменшити ефект хроматичної дисперсії. Бітове кодування символів також подовжує сигнал, що може підвищити стійкість до перекручувань у ході поширення сигналу в волокні (більше значення некомпенсованих дисперсій може бути накопичено, перш ніж виникне міжсимвольна інтерференція). Так, усунення необхідності встановлювати дороге й громіздке оптичне PMD компенсаційне устаткування в центральному офісі, може заощадити десятки тисяч доларів.

Методи модуляції, такі як DPSK, DQPSK кодують інформацію в оптичних сигналах, які мають номінально постійну інтенсивність. Такі формати модуляції можуть зменшити ефекти SPM й CPM і перекручування сигналів, що накопичується в ході руху сигналу по оптичній лінії.

Висновки

Поєднання SWANET та DWDM у С-діапазоні прозорості оптичного волокна дозволяє отримати теоретичну межу кількості адрес станцій призначення в разі використання більш ніж чотирьох довжин хвиль заголовка для частотного плану 100 ГГц.

Фундаментальні лінійні та нелінійні оптичні ефекти у волокні істотно обмежують інформаційну ємність наявних волоконно-оптичних SWANET-мереж із DWDM на великих відстанях передачі. Можливими шляхами підвищення інформаційної ємності є збільшення спектральної ефективності як за рахунок використання сучасних методів модуляції сигналів, так і за рахунок адаптивного відновлення даних, тактової частоти і корекції сигналу помилок. При цьому перевагу необхідно надавати недвійковим методам модуляції, міжканальний інтервал в яких становить ≤ 50 ГГц. Оскільки економічні параметри систем SWANET із магістральною швидкістю передачі 40 Гбіт/с значно обмежені вартістю систем компенсації хроматичної та поляризаційної модової дисперсій, внаслідок цього вкрай важливою є підвищена стійкість до спотворювань у ході поширення сигналу. Зокрема, методи DPSK і DQPSK, внаслідок номінально постійної інтенсивності, здатні підвищити спектральну ефективність при когерентному прийомі на 1,1 біт/(с·Гц) у порівнянні із теоретичною границею Шеннона.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лысенко Г. Л., Тужанский С. Е., Мотаз Х Я Даду. Анализ степени оптимизации современных региональных оптических сетей // Оптико-электронні інформаційно-енергетичні технології. — 2002. — № 2(4). — С. 125—130.
2. Buckman L. A., Wu M. S., Giaretta G., Li G. S., Pepeljugoski P. K., Goodman J. W., Varma A., Lau K. Y., Chang-Hasnain C. J. A Novel All-Optical Self-Routed Wavelength-Addressable Network (SWANET) // IEEE Photonics Technology Letters. — 1995. — Vol. 7. № 9. — P. 1066—1068.
3. Убайдуллаев Р. Р. Волоконно-оптические сети. — М.: Эко-Трендз, 1998. — 267 с.
4. Gerd Keiser. Optical Fiber Communications // McGraw Hill International Editions, 1990. — P. 461.
5. Shannon C. E. A mathematical theory of communications // Bell Syst. Tech. J. — 1948. — Vol. 27. — P. 379—423, P. 623—656.
6. Mitra P. P. and Stark J. B. Nonlinear limits to the information capacity of optical fibre communications // Nature. — 2001. — Vol. 411. — P. 1027—1030.
7. Mecozzi A., Shtaif M. On the capacity of intensity modulated systems using optical amplifiers // IEEE Photon. Technol. Lett. — 2001. — Vol. 13. — P. 1029—1031.
8. Eiselt M. Limits on WDM systems due to four-wave mixing: A statistical approach // Lightwave Technol. — 1999. — Vol. 17. — P. 2261—2267.
9. Ono T., Yano et al Y. Characteristics of Optical Duobinary Signals in Terbits Capacity, High-Spectral-Efficiency WDM Systems // IEEE J. Lightwave Technol. — 1998. — Vol. 16. — P. 788—797.
10. Noe R., Polarization mode dispersion tolerance of bandwidth-efficient multilevel modulations schemes // PROC. ESOC 2001. Paper WL 4-1. — 2001. — P. 198—199.
11. Frignac et al Y. Transmission of 256 wavelength-division and polarization-division multiplexed channels at 42,7Gb/s (10,2 Tb/s capacity) over 3x100km of TeraLight Fiber. // OFC 2002 Postdeadlines Papers, Paper FC 5-1. — 2002.
12. Rhode et al M. Robustness of DPSK direct detection transmission format in standart fiber WDM systems // Electr. Lett. — 2000. — Vol. 36. — P. 1483—1484.
13. Norimatsu S., Iwashita K., Noguchi K. An 8Gb/s QPSK optical homodyne detections experiment using external-cavity laser diodes // IEEE Photon. Technol. Lett. — 1992. — Vol. 14. — P. 765—767,
14. Wolcott T., Eleniak S., Shmidt E. SCM complements DWDM, increases capacity // WDM solutions. — 2002. — P. 73—76.

Рекомендована кафедрою лазерної та оптоелектронної техніки

Надійшла до редакції 25.04.05
Рекомендована до друку 3.05.05

Лисенко Геннадій Леонідович — доцент; *Тужанський Станіслав Євгенович* — асистент; *Мотаз Х Я Даду* — аспірант.

Кафедра лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет