

УДК 681.3

В.П. КОЖЕМ'ЯКО, В.І. МАЛІНОВСЬКИЙ, В.В. МОРОЗ

ЗАСТОСУВАННЯ KVP-ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА TDM-УЩІЛЬНЕННЯ ДЛЯ СТИСНЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРИ ПЕРЕДАВАННІ ЧЕРЕЗ ПАРАЛЕЛЬНІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ІНТЕРФЕЙСИ

Вінницький національний технічний університет,
21021, вул.Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна

Анотація. Розкрито особливості передавання інформації у волоконно-оптичних середовищах паралельних інтерфейсів. Розглянуто метод застосування ущільнення каналів при передаванні інформації у високошвидкісних паралельних волоконно-оптичних інтерфейсах, який базується на поєднанні технології часового ущільнення TDM із KVP-перетворенням.

Abstract. The features of information transmission in fiber-optic environments parallel interfaces. The methods use time division multiplexing, with coupling with KVP-transform, when transmitting data in high-speed parallel optical fiber interfaces are considered.

Анотація. Раскрыты особенности передачи информации в волоконно-оптических средах параллельных интерфейсов. Рассмотрены методы применения уплотнения каналов при передаче информации в высокоскоростных параллельных волоконно-оптических интерфейсах, который основывается на объединении технологии временного мультиплексирования TDM с KVP-преобразованием.

Ключові слова: високошвидкісні паралельні волоконно-оптичні інтерфейси (ВПОІ), KVP-перетворення, TDM, WDM, оптичне волокно (ОВ), волоконно-оптична лінія зв'язку (ВОЛЗ).

ВСТУП

Волоконно-оптичні канали застосовуються переважно у мережах передавання даних. Але також в останні роки, ВОЛЗ набули застосування у локальних системах передачі та інтерфейсах доступу, завдяки кращим показникам швидкодії та малого рівня спотворення сигналів.

Волоконно-оптичний канал [1] містить оптичне середовище, яке спричиняє найбільший вплив на інформаційний сигнал, якщо його довжина значно більша за довжину інших компонентів ланки передавання даних. Але цей вплив є невеликим, і діє переважно на форму імпульсів інформаційного сигналу, а не на його тривалість. Крім того, рівень сигналу не є критичною величиною, оскільки сучасні лавинні (APD) фотодетектори, у сукупності із сучасними підсилювальними трактами на базі операційних підсилювачів, дозволяють практично повністю відтворити втрати інформації. Тому більшість волоконно-оптичних каналів зв'язку можуть передавати інформацію на відносно великих відстанях (до 70-150км [1]) без регенерації із незначними втратами по швидкості поширення імпульсів.

Для локальних волоконно-оптичних ліній із довжиною до декількох десятків метрів, втрати і спотворення сигналу практично відсутні, а швидкість передавання залишається стабільно високою. Це дозволяє вигідно використовувати переваги ВОЛ для побудови локальних систем передавання інформації із високою швидкістю.

ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕДАВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ У ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ ПАРАЛЕЛЬНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ

Світловолокно характеризується двома найважливішими параметрами [1]: оптичними втратами і дисперсією (уширення інформаційних).

Прояв явища дисперсії (рис. 1) у ВОЛ в загальному вигляді характеризується трьома основними факторами:

- 1) різницею швидкостей розповсюдження направлених мод (міжмодова дисперсія τ_{mod});
- 2) напрямними властивостями волокна (хвильова дисперсія τ_w);
- 3) властивостями матеріалу оптичного волокна (матеріальна дисперсія τ_{mat})

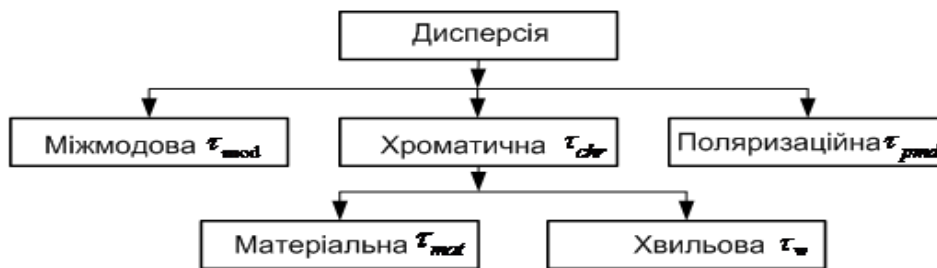


Рис. 1. Види дисперсії у оптичному волокні [3]

Робимо висновок, чим менше значення дисперсії, тим більший потік інформації можна передавати по волокну.

Для того щоб в процесі передачі сигналу зберігалась його форма, а величина амплітуди зазнавала найменших спотворень необхідно зберігати співвідношення сигнал/шум у встановлених допустимих межах $S/N_{\min} \leq S/N \leq 1$. При цьому, мінімально допустиме значення сигнал/шум S/N_{\min} визначається в критичних умовах із максимальної швидкості передавання даних.

Для зменшення величини дисперсії та відповідно збільшення швидкості передавання, окрім заходів підтримання величини сигнал/шум, обирають одномодове оптичне волокно, в якому відсутня найбільш вагома складова – модова дисперсія.

Оптичні втрати у ВОЛ складаються із 3-х основних факторів: втрати на поглинання; втрати на розсіювання та кабельні втрати (рис. 2).



Рис. 2. Основні типи втрат в волокні [3]

Повна величина оптичних втрат у ВОЛ визначається за формулою [3]:

$$\alpha = \alpha_{\text{int}} + \alpha_{\text{rad}} = \alpha_{\text{abs}} + \alpha_{\text{sct}} + \alpha_{\text{rad}} \quad (1)$$

Оптичні втрати на поглинання α_{abs} складаються як з власних втрат в кварцовому склі та із втрат випромінювання на домішках. Складова власних втрат зростає із переходом в ультрафіолетову та інфрачервону області. При довжині хвилі випромінювання вище 1,6мкм кварцове скло ВОЛ стає непрозорим за рахунок втрат, пов'язаних з інфрачервоним поглинанням.

Окрім втрат, на розсіювання α_{sct} значний вплив становлять оптичні втрати при релеєвському розсіюванні, які виникають на неоднорідностях матеріалу ВОЛ мікроскопічного масштабу: випромінювання розсіюється на таких неоднорідностях у різних напрямках, а частина корисного сигналу втрачається в оболонці волокна.

Оптичні втрати при релеєвському розсіюванні значно залежать від довжини хвилі за законом $\alpha_{\text{sct}} \sim \chi \lambda^{-4}$, де χ – коефіцієнт пропорційності, та значно зростаються у коротких областях довжин хвиль.

Промислова довжина хвилі, на якій досягається найменші релеєвські втрати для кварцового волокна (SiO₂), складає 1550 нм та вибрана в результаті компромісу між втратами та мінімальною дисперсією кварцових волокон.

Складова кабельних втрат α_{rad} обумовлена механічними та геометричними деформаціями і різного роду вигинами, при яких утворюється механічні навантаження у волокнах. Ця складова втрат виникає як при виробництві, так і при інсталяції ВОЛІ, та є нівідемною постійною їх частиною для конкретного волоконно-оптичного каналу.

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ХВИЛЬОВОГО WDM, ЧАСТОТНОГО FDM ТА ЧАСОВОГО TDM УЩІЛЬНЕННЯ КАНАЛІВ У ВИСОКОШВИДКІСНИХ ПАРАЛЕЛЬНИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ІНТЕРФЕЙСАХ

Метод ущільнення на базі частотного розділення каналів FDM (Frequency Division Multiplexing) [1, 3] активно використовується у високошвидкісних системах передавання (наприклад, в таких поширених технологіях як xDSL, HomePNA, HomePlug та ін.). Принцип FDM (Frequency Division Multiplexing) [3] ущільнення передбачає широкосмугову передачу даних та підключення абонентських пристроїв до спільного каналу або об'єднаної мережі, використовуючи частотне розділення каналів у різних смугах частот сітки FDM з метою зменшення числа каналів або підвищення пропускної здатності. Розміщені канали у різних смугах частот $w(F)$ теоретично не впливають один на одного, при виконанні умов виключення накладання спектрів сигналів за методом частотного розподілення смуг сигналів.

Для вирішення задач підвищення пропускної спроможності каналів паралельних волоконно-оптичних інтерфейсів, можна запропонувати скористатись об'єднанням оптичних каналів у волокнах, шляхом технології оптичного хвильового мультиплексування WDM (Wave Division Multiplexing).

Використання способу хвильового мультиплексування WDM для побудови оптичних інформаційних каналів показано на рис. 3.

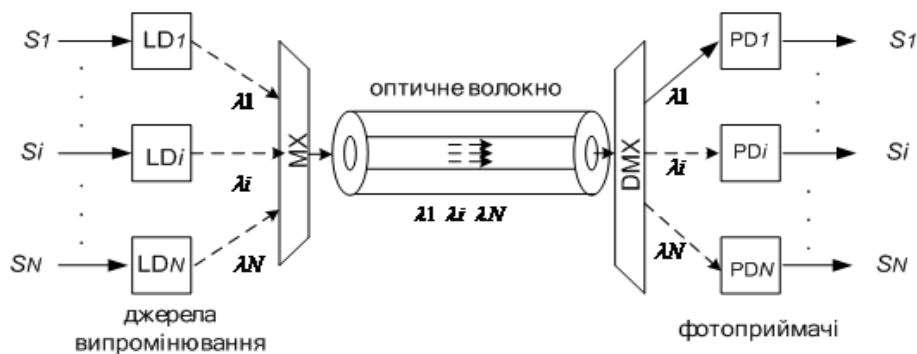


Рис. 3. Застосування технології хвильового мультиплексування у волоконно-оптичних лініях:

де S_1 - S_N - інформаційні сигнали каналів 1- N ;

LD_1 - LD_N – лазерні джерела оптичного випромінювання;

PD_1 - PD_N – фотоприймачі;

MX , DMX - хвильові мультиплексор та демультимплексор відповідно

Технологія WDM може суттєво підвищити пропускну здатність каналів волоконно-оптичних інтерфейсів, наприклад в традиційних мережах до 2003 року досягнута символна швидкість складала 10,72 Тбіт/с, а у 2012 р. — 20 Тбвт/с) [5].

При організації оптичних каналів паралельних волоконно-оптичних інтерфейсів, можливим є зменшення кількості фізичних волоконних ліній шляхом поєднаного використання фізичного середовища для реалізації інформаційних та енергетичних каналів. Це забезпечується шляхом введення у одне волокно відразу групи оптичних каналів за допомогою хвильового мультиплексування WDM (Wave Division Multiplexing) на різних оптичних частотах (у відповідності із спектральним планом затвердженим міжнародною асоціацією ITU DWDM). У волоконно-оптичних каналах можуть використовуватись різні види технології WDM, зокрема її підвиди: DWDM, CWDM, SWDM та HD WDM.

Перша – це технологія щільного хвильового мультиплексування DWDM (Densely Wave Division Multiplexing), що обумовлює розміщення світлових спектрів у волокні з відстанню між спектральними смугами менше за 2-10 нм у оптичній частотній сітці (частотний розкид складає не менше 100 ГГц) [3].

Використання даної технології може значно підвищити кількість інформаційних каналів (до 40 каналів) в одному волоконному середовищі, таким чином збільшити масштабованість системи. Але присутні обмеження на кількість каналів, викликані необхідністю правильного розміщення спектральних довжин хвиль випромінювання лазерних джерел і їх смугою частот $\Delta\lambda$.

Другим видом технології WDM є технологія грубого хвильового мультиплексування CWDM

(Coarse Wave Division Multiplexing) із частотним розкидом каналів не менше 200 ГГц, що обумовлена мінімально допустимою відстанню між світловими спектрами у волокні не менше за 20 нм. Дана технологія є дешевшою у аспекті апаратної реалізації, але кількість інформаційно-енергетичних каналів буде значно меншою ніж у першому випадку (не більше 18 каналів).

Останні версії технології WDM – зокрема High Dense WDM (HDWDM) та Super WDM (SWDM) передбачають розміщення спектральних каналів волоконно-оптичної системи із допустимим розкидом у 50 ГГц та менше, це дозволяє мультиплексувати не менше 64 каналів у волокні із відстанню між спектральними смугами менше за 2 нм у оптичній частотній сітці.

Оскільки джерела випромінювання мають не визначені довжини хвиль випромінювання, то необхідною умовою при здійсненні хвильового WDM-мультиплексування є виключення можливості перекриття (накладання) смуг спектрів довжин хвиль для кожного з каналів S_1 - S_N .

Розташування спектрів оптичних сигналів показано на рис.4.

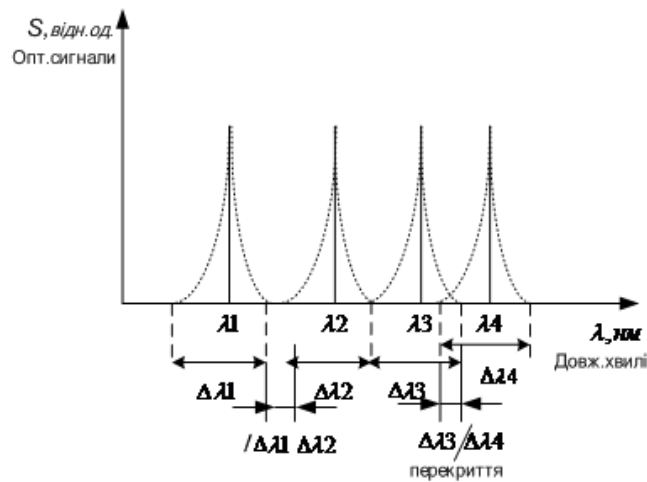


Рис.4. Розташування спектрів оптичних сигналів у WDM системах

У деяких випадках, оптичні смуги довжин хвиль $\Delta\lambda_3$, $\Delta\lambda_4$ сигналів перекиваються, що створює умови високих завад для цих сигналів при їх відновленні на фотоприймачі WDM-каналу ВОЛЗ. Тому для стабільної роботи необхідно розміщувати канали з певним мінімально допустимим інтервалом $|\Delta\lambda_{i,i+1}|$, як це показано для спектрів сигналів $\Delta\lambda_1$, $\Delta\lambda_2$.

Основним обмеженням виступають спектральні параметри лазерних джерел випромінювання і фотоприймачів, які на практиці важко реалізуються до таких значень. Вартість таких компонентів оптоелектронної елементної бази є істотно вищою за аналогічні в інших діапазонах.

Але здебільшого перших двох типів технологій – CWDM та WDM на практиці цілком достатньо для організації спектральних каналів у волоконно-оптичних системах передачі інформації. Аналогічно до цього, їх цілком достатньо буде для організації каналів у паралельних волоконно-оптичних інтерфейсах.

Також існує відома технологія часового мультиплексування інформаційних каналів TDM (Time Division Multiplexing). Принцип роботи полягає у розділенні інформаційних каналів при передачі у часовому просторі (рис. 5).

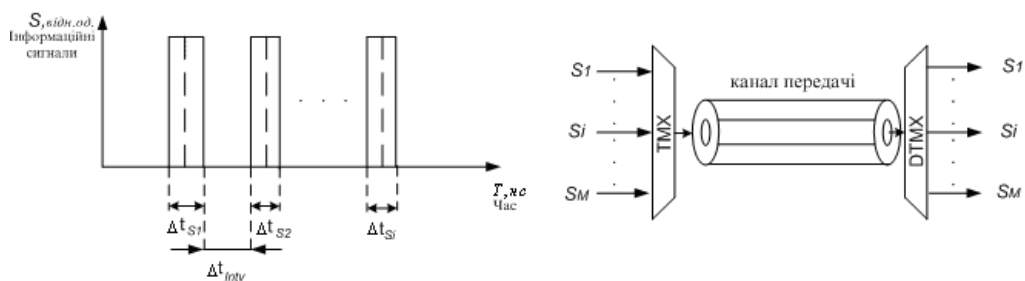


Рис. 5. Принцип роботи відомої схеми часового мультиплексування інформаційних каналів.

де $S_1, S_2... S_1...S_N$ - інформаційні сигнали каналів 1-N;

$TMX, DTMX$ - часові мультиплексор та демультимплексор;

$\Delta t_{S1}, \Delta t_{S2}, \Delta t_{Si}$ - часові інтервали інформаційних сигналів S_1, S_2, S_i ;

Δt_{Intv} - часовий інтервал між тривалостями сусідніх інформаційних сигналів

Зменшивши тривалість інтервалів Δt_{inv} і збільшивши частоту слідування інформаційних каналів можливим є розміщення M -кількості сигналів у одному фізичному інформаційному каналі, і якщо позначити через B -швидкість одного інформаційного каналу, то можливо збільшити загальну швидкість у фізичному інформаційному каналі бінарного провідника до величини $B_z = B \cdot M$.

При застосуванні ущільнення у паралельних волоконно-оптичних інтерфейсах та для збільшення пропускної здатності одиничних волоконних ліній, актуальним представляється комплексне застосування вищеписаних технологій TDM та WDM.

Розглянемо принцип комплексного застосування технологій хвильового ущільнення на прикладі рис.6.

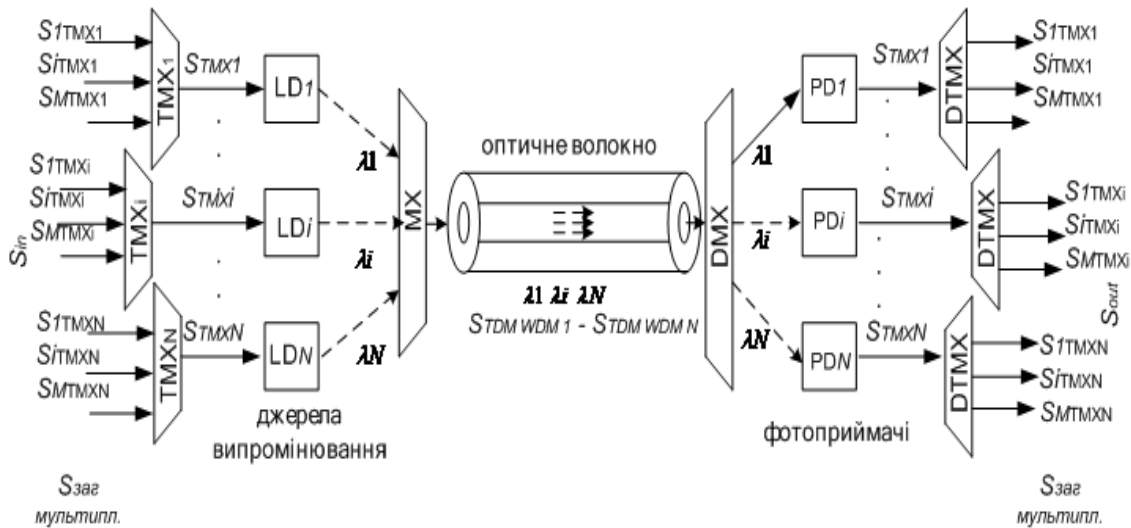


Рис.6.Принцип комплексного застосування технологій мультиплексування TDM і WDM у волоконних каналах ВПВОІ

Група вхідних S_{in} сигналів формується за допомогою високошвидкісних лазерних джерел випромінювання LD1- LDN (волоконно-оптичних передавальних модулів на основі лазерних діодів). Детектування інформації забезпечується на виході лінії ВОЛЗ волоконно-оптичними фотодетекторами PD1-PDN (на основі лавинних – APD, або p-i-n – фотодіодів), які формують групу електричних вихідних S_{out} сигналів. Мультиплексовані кодером системи в часі, сигнали $STMX1$ - $STMXN$ мультиплексується ще і по оптичним частотам λ_1 - λ_N мультиплексором MX системи, та вводяться у оптичне волокно. На виході відбувається зворотня операція демultipлексування оптичним демultipлексором DMX та подача на електронний декодер для часового демultipлексування.

Загальну кількість каналів, які можливо ущільнити за допомогою поєднання технологій TDM і WDM можна визначити виходячі з кількості входів мультиплексорів M для TDM та N для WDM, як $S_{сигн} = M \cdot N$.

Збільшення кількості каналів, які мультиплексується можна визначити за умови відповідності з'єднання кожного хвильового мультиплексора WDM – з одним мультиплексором TDM, як загальну кількість $S_{заг.мультипл}$ вхідних сигналів $S_{iTMX} 1...N$ у ВОЛ:

$$S_{TDM-WDM} = N \cdot \sum_{i=1}^M S_{TMXi} \quad (2)$$

Пропорційне збільшення одиничного волоконного каналу ВПОІ дозволить підвищити кількість каналів та відповідно й швидкість ще на один рівень.

Принцип об'єднання технологій TDM та WDM не новий, і відомий ще з початку 2000-х років [1, 5, 7]. Він є ефективним засобом підвищення швидкодії сучасних ВОЛЗ та збільшення ефективності і рентабельності їх використання.

Але, поєднання технологій ущільнення TDM та WDM не дає у повній мірі використати переваги по підвищенню швидкості передавання та пропускної здатності сучасних волоконно-оптичних ліній. Це викликано в першу чергу неможливістю використати паралелізм формування сигналів в різних часових вікнах в ланках ущільнення TDM (рис. 7).

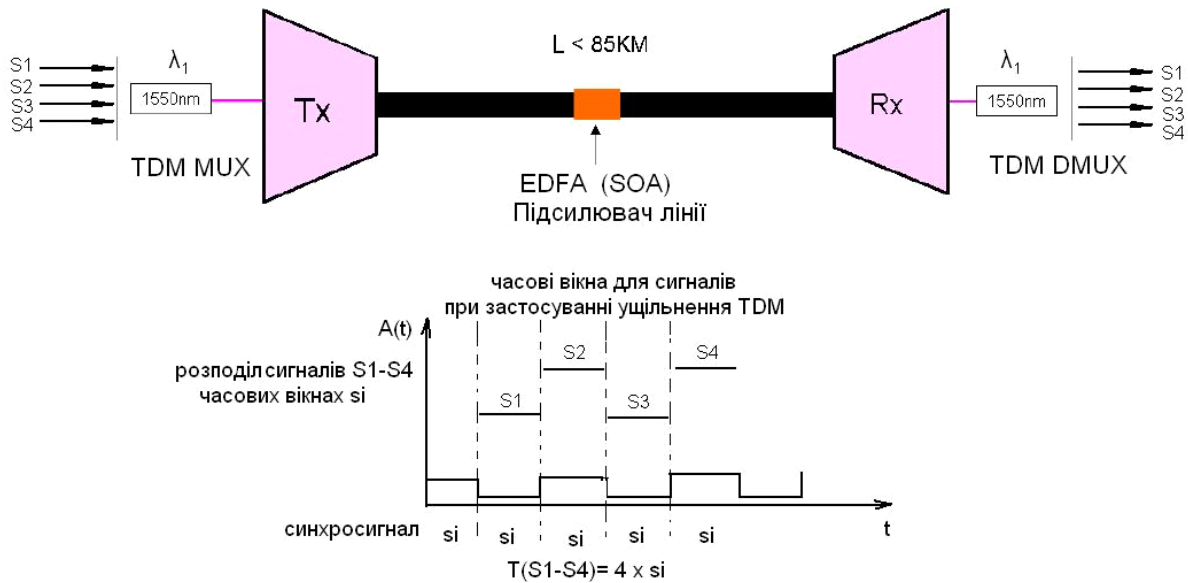


Рис.7. Обмеження при використанні технології TDM у волоконно-оптичних лініях

Як видно з рис. 7, у зв'язку з тим, що сигнали направляються послідовно у лінію ВОЛ, то часові затрати зростають пропорційно кількості направлених сигналів. Для 4-х сигналів TDM, які займають 4 часових вікна, часова затримка основного несучого сигналу також збільшується в 4 рази.

Якщо гіпотетично, представити паралельний процес формування основного ущільненого сигналу на одній довжині хвилі ($\lambda_1=1550\text{nm}$) із чотирьох сигналів, які надходять у ВОЛЗ, то часовий вииграш, був би більший на число каналів системи TDM (для даного випадку 4, див. рис. xx). Відповідно й вииграш по швидкодії ВОЛЗ був би пропорційним числу каналів, що надходять на вхід системи TDM.

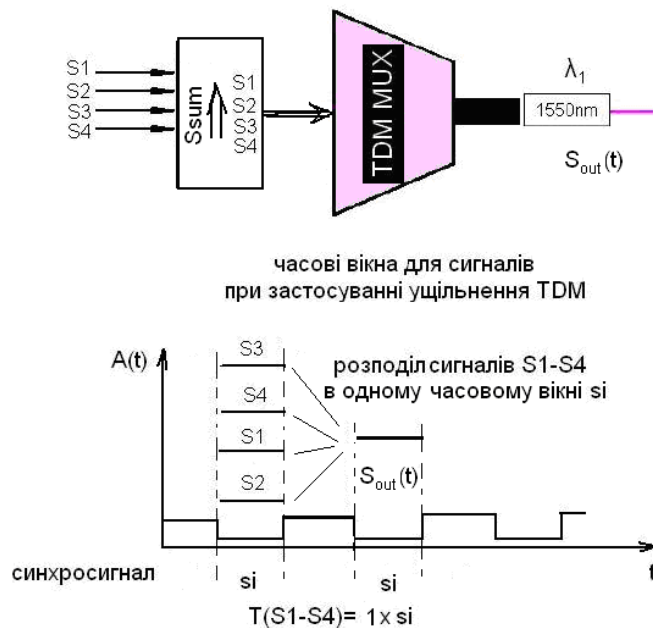


Рис.8. Умовний (гіпотетичний) принцип паралельного формування вихідного сигналу при TDM ущільненні у волоконно-оптичних лініях

Оскільки на рис .8 вхідні інформаційні сигнали $S_1(t) - S_4(t)$ надходять у одному часовому вікні S_i і формують вихідний сигнал $S_{OUT}(t)$, то відбувається економія часу пропорційна кількості необхідних часових вікон при TDM-ущільненні, тобто – кількості вхідних каналів. Якщо гіпотетично реалізувати паралельне формування вихідного сигналу $S_{OUT}(t)$ із суми вхідних $S_1(t) - S_4(t)$, то можна було реалізувати принцип паралельної передачі даних з ущільненням в кожному каналі WDM ВПОІ.

Для оцінки можливості паралельного стиснення потоків даних у вхідних TDM каналах ВПОІ

необхідно розглянути можливості методів паралельного представлення сигналів, зокрема KVP-перетворення.

Метод KVP-перетворення [6] базується на оригінальному способі перетворення інформації тривалостями часових інтервалів, який максимально наближений до природного паралельного введення і оброблення, за рахунок відокремлення одночасно деякої кількості визначників різних типів та інформації, що міститься у них.

KVP-перетворення базується на основі таких основних положень:

1) використання принципу квантування часу (реалізується як правило на оптоелектронних елементах затримки – квантронах) для будь-якого типу сигналів (електричних, оптичних, акустичних тощо) на часові інтервали. Тобто перехід до логіко-часових функцій (ЛЧ-функцій) [6], в яких інформація представляється у вигляді тривалостей імпульсів, а не їх рівнем;

2) використання універсальної ЛЧ-функції ключової-функції, яка дозволяє повністю описувати вхідну інформацію (інформаційний сигнал) незалежно від типу вхідного сигналу;

3) паралельне оброблення вхідних масивів інформації у вигляді тривалостей часових інтервалів (ЛЧ-функцій);

4) використання простих операцій (додавання, віднімання, множення) за допомогою тривалостей часових інтервалів (багатозначна логіка);

5) забезпечення внутрішньої класифікації ЛЧ-функцій способом формування та відокремлення окремих інтервалів ЛЧ-функцій та формування первинних визначників вхідних даних, з подальшим визначенням їх якісних та кількісних характеристик.

KVP-перетворення складається з чотирьох етапів [6]:

- а) надходження вхідної інформації;
- б) перетворення сигналів на ЛЧ-функції;
- в) виділення визначників об'єкта аналізу;
- г) якісний розподіл визначників.

За методом оброблення даних процес KVP-перетворення поділяють на:

- 1) паралельне оброблення;
- 2) оброблення зі зв'язністю.

Перевагою KVP-перетворення як методу представлення даних є використання ЛЧФ передумовлює застосування квантових перетворень сигналів на логіко-часові функції (ЛЧФ). Це обумовлює відсутність помилок, які виникають при переході від обробки сигналів одного типу до іншого, а також при втратах або спотворенні амплітуд сигналів. Універсальний ЛЧ-сигнал дозволяє значно підвищити точність результату та уникнути методичної помилки при обробці вхідних інформаційних паралельних сигналів. Логіко-часові функції (ЛЧФ) – це послідовність часових виразів, які описують вхідну інформацію тільки на визначених проміжках. Наявність часових тотожностей в ЛЧФ дозволяє описати будь-які часові функції або сигнали, які не описуються традиційними перемикаючими функціями.

При паралельному представленні логіко-часової інформації у методі KVP-перетворення застосовується математичний апарат, який базується на операціях над величинами, які є неперервними функціями часу. Так, логіко-часова функція (ЛЧФ) для опису інформації, може бути представлена як [6]:

$$f(t, t_i, a_i) = \begin{cases} t - t_i, & t_i \leq t \leq t_i + a_i \\ 0, & t_i > t > t_i + a_i \end{cases} \quad (3)$$

де t , t_i – поточне та початкове значення часового аргументу; a_i – період існування, еквівалент вхідної інформації у вигляді суми значень елементів дискретизації відрізка існування часового аргументу.

Елементарна ЛЧФ має квантований мінімальний часовий інтервал з однаковою амплітудою. Найпростіша ЛЧФ – це функція квантована за рівнем зі значимістю 2 – приймає значення “0” або “1”. За основу математичної моделі опису ЛЧФ можна взяти математичний апарат функції Хаара або Уолша [6]:

$$\sum_{\alpha \in H} \chi_{\alpha}(x) = \begin{cases} h, & x = 0; \\ 0, & x \neq 0. \end{cases} \quad (4)$$

де $\chi_{\alpha}(x)$ – функція Уолша, H – група заданих функцій, h – значення кінцевої функції.

Змінна x це функція, яка залежить від зміни часу – $x(t)$.

При порівнявши формул (3) та (4) [6] можна побачити, що незважаючи на зовнішню схожість, функції Хаара та Уолша залежать від значення заданих функції, а ЛЧФ залежить від зміни часу, тобто інформацію несе в собі час, а не функція, яка залежить від нього.

В оптоелектронних системах ЛЧФ отримуються шляхом квантування світлового випромінювання часом за допомогою квантронів – елементів на основі оптичного зворотнього зв'язку.

Метод KVP-перетворення, який описаний у великій кількості робіт та використовується як основний у пристроях око-процесорного типу, використовує принципи природного паралелізму. Це може дозволити ефективно використати його у TDM тракті ВПВОІ. Зокрема принцип природного паралельного представлення логіко-часового переходу: отримання одного сигналу по визначеному правилу із довільного перерізу масиву вхідних сигналів за одну операцію та за одиницю часу для всіх точок зображення.

Для виконання операції перетворення вхідних сигналів у TDM тракті ВПВОІ необхідно створити єдину ЛЧФ системи сигналів $F_i(\omega_i, a_i, p_i)$, яка б об'єднувала в собі всі властивості всіх сигналів. Тоді виникає необхідність опису аналітичної залежності єдиної функції сумарного TDM-сигналу для передавання по каналу ВОЛ.

Згідно теорії KVP-перетворення формування кінцевої єдиної ЛЧФ на базі декількох інформаційних параметрів відбувається за формулою:

$$F_i(\omega_i, a_i, p_i) = \int_m F_i d\omega_i = \int_m (a_i \vee \Psi_{j=1}^m p_j) d\omega_i, \quad (5)$$

де F_i – зведена інтегрована ЛЧФ – ключова функція; a_i – інформація, яка міститься в i -му визначнику; $\Psi_{j=1}^m$ – оператор впливу визначників один на одного; m – кількість функцій, що були отримані; p_j – змінна, яка характеризує фізичний зміст функції, що містить кількісно-якісну інформацію; j – вагові

коефіцієнти функцій систем визначників; \vee – знак операції кон'юнкції; $\int_m F_i$ – оператор узагальненого інтегрування кількісного результату паралельних вхідних змінних з визначенням фізичних розмірностей та неявно виражених визначників.

Тривалість часового інтервалу, що фіксується часом дії вхідного сигналу, перетворюється в цифровий код ЛЧС, що відповідає кількості збуджених за цей час елементів перетворювача.

Така функція у фізичному змісті повинна максимально повно описувати інформаційний сигнал, який призначений для передавання. Результуюче значення функції $F_i(\omega_i, a_i, p_i)$ у (5) містить повну інформацію із набору функцій визначників a_i та формує кінцеве результуючі значення функції по кожному з визначників. Це досягається за допомогою того, що змінні визначників p_j під дією оператора впливу діють на різноманітних рівнях суперпозиції, що дозволяє формувати ЛЧФ складної конфігурації [6]. А рівні суперпозиції визначаються за ваговими коефіцієнтами кожного з визначників. Для врахування впливу кожного визначника один на одного вводиться нова математична функціональна залежність, яка називається оператором впливу. За його допомогою описується формування функції, яка буде характеризувати конкретну систему визначників.

Теорія і методи логіко-часових функцій добре зарекомендували себе в області оброблення зображень і візуальної інформації, завдяки паралельності формування визначників в методі KVP-перетворення, що забезпечує вираш по швидкодії. KVP-перетворення [6] дало значні результати по підвищенню продуктивності обробки образної і візуальної інформації та різного роду зображень.

Переваги методу KVP-перетворення, зокрема природній паралелізм, можна використати й для області високошвидкісних волоконно-оптичних інтерфейсів, попередньо модифікувавши метод із орієнтацією на передавання сигналів.

Якщо порівняти масиви інформації елементів зображень та масиви сигналів у волоконно-оптичних трактах ВПВОІ, то можна помітити схожість у представленні даних картинного типу у вигляді двовимірних матриць.

При цьому, розглядаючи ВПОІ, якщо взяти інформацію із кожного каналу масиву волоконно-оптичного джгуту і закодувати її i -м визначником a_i { $a_i \in 0; 1, i = 1 .. N$ }, то проводячи KVP-перетворення вхідного потоку даних (з масиву розмірністю N -каналів ВОЛ) з елементами a_i , сформувати вихідний логіко-часовий сигнал $S_f(t, a_i, N)$, що включає повну інформацію вхідного масиву і елементами a_i . Необхідно відразу ввести поняття логіко-часового сигналу.

Логіко-часовий сигнал (ЛЧС) – сигнал, який сформований у розмірності тривалостей часових інтервалів на основі логіко-часової функції.

Для одиничного логіко-часового сигналу, згідно KVP-перетворення (5) справедливим буде математичне співвідношення:

$$S_{Fsum}(t, S_i(t), p_i) = \int_m F_i(t, p_i, S_i(t, a_i) \omega_i) d\omega_i, \quad (6)$$

де, $S_i(t)$ – вхідний сигнал; a_i – інформація, яка міститься в i -му визначнику; ω_j – коефіцієнти ваги

функції визначника для i -каналу.

Причому формула (5) є прямим KVP-перетворенням і використовується на передавальній стороні для ущільнення і кодування групи сигналів $S_1(t) \dots S_N(t)$.

Якщо, згідно вищеприписаного правила сформуванню визначників на базі каналів вхідної інформації $S_1(t) \dots S_N(t)$ ($i=1..N$) TDM-тракту, то можна перейти до розмірності сигналів, та із врахуванням їх масиву розмірністю N (5) записати в аналітичній формі:

$$S_{sum}(t, S_1(t)..S_N(t), p_i) = \hat{\uparrow} F_i(t, p_i, \sum_{i=1}^N Si(t, \omega_i, a_i,)). \quad (7)$$

При перетворенні вхідної інформації у ЛЧФ виконується формування визначників, які описують конкретні фізичні характеристики сигналів (форма, рівні, амплітуда, тривалість, період, границі). За допомогою визначників можна також здійснювати маніпуляцію (модуляцію) інформаційним параметром сигналу.

Після закінчення генерації визначників, які визначено за допомогою функції комутації, формується система визначників. У даному випадку як визначник працює ЛЧФ, яка описує властивості визначників за допомогою своєї формуальної функції.

Враховуючи, що масив вхідних сигналів тракту TDM може бути представлений у вигляді деяких функцій визначників помножених на їх коефіцієнти (тобто: $S_i(t) = f(t, a_i \times k_i)$), то загальний вигляд сумарного вихідного логіко-часового сигналу, сформованого із вхідного масиву $S_1(t) \dots S_N(t)$, із врахуванням (5) та (6) матиме вигляд:

$$S_{sum}(t, S_1(t)..S_N(t), p_i) = \hat{\uparrow} \int_m F_i(t, p_i, \sum_{i=1}^N Si(t, \omega_i, a_i,)) d\omega_i = \hat{\uparrow} \int_m (\sum_{i=1}^N a_i \times k_i \vee \Psi_{j=1}^m p_j) d\omega_i;$$

$\hat{\Delta} \hat{\Delta} \hat{\Delta}$

$$S_{sum}(t, S_1(t)..S_N(t), p_i) = \hat{\uparrow} \int_m \sum_{i=1}^N F_i(t, p_i, Si(t, \omega_i, a_i,)) d\omega_i = \hat{\uparrow} \int_m \sum_{i=1}^N (a_i \times k_i \vee \Psi_{j=1}^m p_j) d\omega_i, \quad (8)$$

де F_i – інтегрована ЛЧФ; a_i – інформація i -го визначника відповідного сигналу $S_i(t)$; $\Psi_{j=1}^m$ – оператор впливу визначників один на одного; m – кількість ЛЧС, що були отримані в результаті KVP-перетворення; p_j – змінна, фізичного змісту функції кожного вхідного сигналу (p_j містить кількісно-якісну інформацію); ω_j – вагові коефіцієнти функцій систем визначників; k_i – коефіцієнти налаштування визначників кожного з каналів $S_1(t) \dots S_N(t)$; \vee – знак операції кон'юнкції; $\int_m F_i$ – оператор узагальненого інтегрування кількісного результату паралельних вхідних змінних з визначенням фізичних розмірностей та неявно виражених визначників; $\hat{\uparrow}$ – знак паралельного виконання операцій із масивами сигналів та визначників.

Для отримання зворотного процесу декодування вихідного потоку ЛЧС із WDM-демультиплексора, для кожному конкретного ЛЧС повинно бути застосоване зворотнє KVP-перетворення і відтворення сигналу $S_i(t)$ із сумарного сигналу $S_{sum}(t, S_1(t)..S_N(t), p_i)$. Таке перетворення також повинно здійснюватися паралельно і одночасно повинні відтворюватись всі сигнали $S_i(t)$ ($i \in 1..N$). В узагальненому вигляді цей процес можна представити як:

$$Si(t, \omega_i, a_i,) = \hat{\uparrow} f_i(t, S_{sum}(t, S_1(t)..S_N(t), p_i)) = \hat{\uparrow} f_i(t, S_{sum}(t, a_i, p_i)) \quad i = 1..N, \quad (9)$$

де $f_i(t, S_{sum}(t, a_i, p_i))$ – функція зворотнього перетворення ЛЧС; $\hat{\uparrow}$ – знак паралельного виконання операцій із масивами сигналів та визначників.

Якщо застосувати обернену до інтегрування операцію (оскільки в прямому KVP-перетворенні на

передавальній стороні ВПОІ був використаний оператор узагальненого інтегрування $\int F_i) -$ диференціювання до сумарного ЛЧС, то із врахуванням отриманого сигналу можна записати аналітичний вираз для зворотного KVP-перетворення в тракці TDM-демультиплексування на приймальній стороні ВПОІ :

$$S'i(t, \omega_i, a_i,) = \hat{\uparrow} df_i(t, S_{sum}(t, S_1(t) \cdot S_N(t), p_i) d\omega_i = \hat{\uparrow} df_i(t, \sum_{i=1}^N a_i \times k_i \wedge \Psi_{j=1}^m p_j) d\omega_i \quad i = 1..N, \quad (10)$$

де $S'i(t, \omega_i, a_i,)$ – відтворений інформаційний сигнал із набору $i = 1..N$, в одиничному ЛЧС в тракці TDM ВПОІ; df_i – оператор узагальненого диференціювання ЛЧС (обернена ЛЧФ до прямого KVP – перетворення над логіко-часовим сигналом); \wedge – знак операції диз'юнкції; $\hat{\uparrow}$ – знак паралельного виконання операцій із масивами сигналів та визначників.

Математичний апарат інтегрування та диференціювання логіко-часових функцій, як функцій перемикання добре досліджений в роботах [11-12, волонт].

Формула (10) є математичною моделлю оберненого перетворення з паралельним відновленням сигналів $S_i(t, \omega_i, a_i,)$ в кожному TDM-каналі. Залежність (10) описує паралельний зворотній процес отримання групи сигналів $S_1(t) \dots S_N(t)$ ($i=1..N$) в тракці TDM-демультиплексування ВПОІ. Очевидно, що процес передачі інформації та отримання вихідного сигналу $S'i(t, \omega_i, a_i,)$ за допомогою KVP-перетворення буде відбуватись із деякими втратами, які необхідно буде оцінити.

Процес передавання та перетворення сигналів за допомогою KVP-перетворення можна зобразити на узагальненій структурі високошвидкісного волоконно-оптичного інтерфейсу (рис. 9).

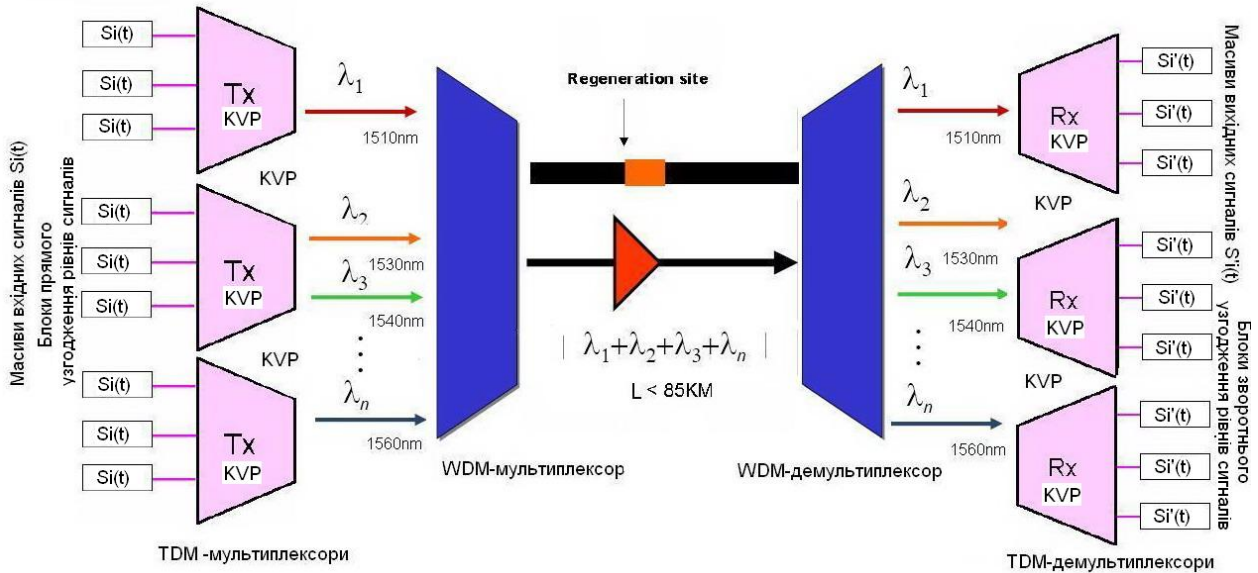


Рис.9. Узагальнена структура ВПОІ із 2-х ступінчатим ущільненням TDM - WDM та KVP-перетворенням для передавання інформації

Формули (8) та (10) є математичною моделлю сумарного ЛЧС і описує процес прямого (8) та зворотного (10) формування вихідного ЛЧС від групи сигналів. Такий процес враховує спотворення сигналів $S_1(t) \dots S_N(t)$ при передавання їх в складі структури ВПОІ (рис.2.xx), що надійшли в тракці TDM системи ВПОІ. Коефіцієнти впливу k_i на визначники описують вплив середовища на сигнал.

Оскільки кожен вихід цього тракту є тільки одним із входів j ($j \in 1.. M$) оптичного хвильового мультиплексора WDM, то доцільно вважати, що повна кількість вхідних каналів системи ВПОІ зі

сторони TDM визначається масивом розмірністю $[M \times N]$. Для моделі ВПВОІ математична модель масиву сигналів у ВПВОІ враховуючи (8) буде записана у вигляді:

$$S_{TDM-WDM}[M \times N] = \sum_{j=1}^M S_{sum}(t, S_1(t) \dots S_N(t), p_i) = \uparrow \sum_{j=1}^M \int (\sum_{i=1}^N a_i \times k_i \vee \Psi_{j=1}^m p_j) d\omega_i, \quad (11)$$

де j ($j \in 1..M$) – розмірність каналів та відповідно вихідних ЛЧС сигналів після проведення KVP-перетворення в TDM-тракті. Ця величина відповідає кількості вхідних каналів оптичного хвильового мультиплексора WDM; ω_i, k_i – вагові коефіцієнти та коефіцієнти налаштування у визначників кожного з каналів $S_1(t) \dots S_N(t)$ каналів на TDM тракті ущільнення ВПОІ; \vee – знак операції кон'юнкції; \uparrow – знак паралельного виконання операцій із масивами сигналів та визначників.

Формула (11) є узагальненою математичною моделлю ВПВОІ із комплексом застосування технологій TDM та WDM ущільненням каналів та KVP-перетворенням вхідних масивів інформації. Математична модель описує паралельний процес формування ЛЧС та передавання їх шляхом оптичного хвильового мультиплексування WDM по джгуту волоконно-оптичних ліній.

Виходи і входи трактів TDM ВПВОІ, на яких формуються вхідні $S_1(t) \dots S_N(t)$ та вихідні $S'_1(t) \dots S'_N(t)$ ($i=1..N$) сигнали підключаються до зовнішнього комутатора каналів. Кількість, ж масивів від кожного TDM тракту відповідає кількості вхідних каналів оптичного хвильового мультиплексора WDM. Тому, із врахуванням цього для підвищення швидкості передавання всіх сигналів масиву $[M \times N]$ системи ВПВОІ, умови отримання логіко-часових сигналів повинні враховувати паралельність каналів в кожній ланці, що показують формули (8), (10) та (11).

Інформація a_i в кожному визначнику (детермінаторі) вхідного сигналу, представляється в якості узагальненої функції від його основних інформаційних параметрів: амплітуди, періоду та тривалості імпульсу:

$$a_i = f(A(t), t_i, T_i, \varphi_i), \quad (12)$$

де $A(t)$ – амплітуда сигналу; t_i – тривалість інформаційного імпульсу; T_i – період сигналу; φ_i – фаза.

У випадку інформаційних сигналів, які по визначенню є не детермінованими (не мають чітко визначеного періоду) і переносять інформацію, інформація a_i в детермінаторі буде описуватись функцією двох змінних, тобто формула (12) прийме вигляд:

$$a_i = f(A(t_i), t_i, \varphi_i), \quad (13)$$

У випадку використання основного інформаційного параметру для представлення і подання інформації в сигналах ВПВОІ – тривалості τ_i та амплітуди сигналу $A(\tau_i)$ сигналу $S(t)$, інформація a_i в кожному детермінаторі представляється поточним значенням тривалості $a_i = f(A(\tau_i), \tau_i)$, при класичному поданні сигналу $S(t) = A(\tau_i) \cdot \sin(\omega t_i + \varphi_i)$. А у випадку перетворення відразу групи N вхідних сигналів

$\sum_{i=1}^N S_i(t)$ із інформацією масиву де термінаторів a_{ij} в один ЛЧС, перетворення вхідної інформації

повинно відбуватись паралельно, згідно основного принципу і орієнтації методу KVP-перетворення.

З формул (8), (11) випливає, що формування вихідного ЛЧС (логіко-часового сигналу) з групи вхідних сигналів $S(t)$, а також зворотній процес – формування вихідних сигналів із ЛЧС на виході ВПВОІ, відбувається паралельно, що є основною концептуальною відмінністю від традиційного симбіозу технологій організації каналів на базі TDM та WDM ущільнення. Кожний сформований ЛЧС подається на кожний j -й вхід WDM-мультиплексора, чим теоретично можна досягнути стиснення інформації та підвищення швидкодії, пропорційно відношенню кількості вхідних $S'(t)$, сигналів до кількості вихідних ЛЧС. Якщо позначити вираз по швидкодії кількісною величиною Δt в часовій області, і враховувати ідеальні умови: процес логіко-часового перетворення відбувається в повній мірі паралельно. Аналітично це можна представити як:

$$\Delta V t = k \cdot T_{Si} \cdot N_{Si(t)} / T_{S, ЛЧС} \cdot N_{ЛЧС} \quad (14)$$

де k – коефіцієнт пропорційності та паралельності, який враховує невідповідність кількості масивів сигналів; $T_{Si}, T_{S, ЛЧС}$ – середні часові тривалості одиничного вхідного $S_i(t)$ та ЛЧС сигналів; $N_{Si(t)}, N_{ЛЧС}$ – кількості вхідних $S_i(t)$ та ЛЧС сигналів в тракті KVP-перетворення системи ВПОІ.

Розглядаючи обмеження у формулі (14), можна визначити, що вона має змісти тільки про не нульовій тривалості імпульсів ЛЧС $T_{S,ЛЧФ} \neq 0$. В іншому випадку, знаменник у (14) приймає значення 0 і формула немає фізичного сенсу. Виграш по швидкості перетворення сигналів і формування єдиного ЛЧС з групи вхідних сигналів $S_i(t)$ буде обернено пропорційний тривалості логіко-часового сигналу $T_{S,ЛЧФ}$ і прямопропорційний відношенню кількостей вхідних сигналів до кількості ЛЧС $N_{S_i(t)} / N_{ЛЧФ}$. Частковим випадком формули (2.17) для одиничного тракту КВП-перетворення є умови, коли кількість вихідних ЛЧС в такій ланці дорівнює 1, тобто $N_{ЛЧФ} = 1$. В таких умовах формула (14) матиме вигляд:

$$\Delta V t_{TDM} = k \cdot T_{S_i} \cdot N_{OS_i(t)} / T_{S,ЛЧФ} \quad (15)$$

де $N_{OS_i(t)}$ – оптимальна кількість групи вхідних сигналів $S_i(t)$ (із всієї їх кількості N , $i=1..N$) у структурі ВПВОІ для формування єдиного ЛЧС.

Формула (15) є показником виграшу тракту КВП-перетворення за умов паралельності формування ЛЧС. Важливою умовою є визначення оптимальна кількість групи вхідних сигналів $S_i(t)$ на одну сформовану ЛЧС, тобто величини $N_{OS_i(t)}$. Повний виграш по швидкодії. Із врахуванням WDM-оптичного ущільнення може бути визначений повний виграш по швидкодії ВПВОІ $\Delta t_{TDM-WDM}$. Якщо врахувати рівень WDM-ущільнення, тобто відношення вихідних вхідних каналів до вихідних оптичних каналів $L_{N/M} = N/M$ ($i = 1.. N$; $j = 1.. M$). В такому випадку, формула (15) переписеться:

$$\Delta V t_{TDM-WDM} = L_{N/M} \cdot k \cdot T_{S_i} \cdot N_{OS_i(t)} / T_{S,ЛЧФ} \quad (16)$$

де $L_{N/M}$ – рівень WDM-ущільнення каналів, який визначається відношенням вхідних N до вихідних M оптичних каналів на WDM-мультиплексорі, $L_{N/M} = N/M$ ($i = 1.. N$; $j = 1.. M$).

Для здійснення паралельності процесу формування і генерації ЛЧС, може бути використаний спосіб паралельного додавання [6], в якому виконується багатократне формування загальних частин. Така операція також отримала назву ієрархічного додавання [6], оскільки операції здійснюються відповідно до побудови ієрархії.

Принцип квантування часу світловим променем [6], запропонований професором Кожем'яко В.П., полягає у перетворенні часового інтервалу кількістю безперервно спрацювавших послідовно один за одним з однаковим часом перемикання дискретних оптоелектронних елементів – квантронів при подачі на них сигналу про початок перетворення. Цей принцип з успіхом може бути використаний в паралельних волоконно-оптичних інтерфейсах для ущільнення групи каналів із відповідним приростом швидкодії.

Для реалізації паралельності процесу, необхідно використовувати переваги оптоелектронної елементної бази, зокрема можливість побудови квантронів і виконання КВП-перетворення на основі оптоелектронних модулів.

ВИСНОВКИ

Таким чином, використання методу передавання інформації у ВПВОІ передбачає подвійне (2-х ступінчасте) перетворення та стиснення інформаційних сигналів в каналах на основі TDM-WDM мультиплексування.

КВП-перетворення виступає в даному методі в якості ланки часового ущільнення TDM, яка дає часовий виграш, за рахунок паралельності процесу перетворення масиву сигналів в масив ЛЧС меншої розмірності. Повний часовий виграш оцінюється ще й оптичним хвильовим ущільненням WDM, яке проводиться ще й по довжині хвилі.

В результаті використання цього методу передавання даних дозволяє передавати масиви вхідних сигналів, розмірність яких значно більша за розмірність масиву волоконно-оптичного джугу, що дозволяє підвищити пропускну здатність ВПВОІ при пропорційній економії апаратурних витрат та розмірності масиву волоконно-оптичного тракту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Никульский И.Е. Оптические интерфейсы цифровых коммутационных станций и сети доступа : [Монография] / Никульский И.Е. – М.: Техносфера, 2006. – 256с. – ISBN 5-94836-087-3.
2. Майоров С. А. Оптические методы обработки информации / С. А. Майоров, А. А. Акаев. – М.: Высшая школа, 1988. – 238 с.
3. Семенов А.Б. Волоконная оптика в локальных и корпоративных сетях связи / А. Б. Семенов. – М.: КомпьютерПресс, 1998. – 302 с.
4. Кожем'яко В.П. Принципи побудови та структурна організація каналів для повністю оптичних геоінформаційно-енергетичних мереж / Кожем'яко В.П., Маліновський В.І. // Вісник ВПІ.-2008.- №1-С.95-101.
5. Михаил Гук. Интерфейсы устройств хранения. ATA, SCSI и другие. Энциклопедия : [Текст] / Гук

- Михаил. – СПб.: Питер, 2006. – 448 с. – ISBN 5-469-01531-9.
6. Кожемяко В.П. Оптоэлектронные логико-временные информационно-вычислительные среды / В.П. Кожемяко и др. – Тбилиси: Ганатлеба, 1984. – 357 с.
 7. Дмитриев С. А. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и перспективы / С. А. Дмитриев, Н. Н. Слепов. – М.: Изд. Connect, 2005. – 360 с.

Надійшла до редакції 14.06.2014р.

КОЖЕМ'ЯКО В.П. – д.т.н., професор, академік АІНУ, завідувач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

МАЛІНОВСЬКИЙ В.І. – к.т.н., науковий співробітник, старший викладач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

МОРОЗ В.В. – здобувач кафедри лазерної і оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.