

УДК 681.3

В.В. МОРОЗ

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ТА МЕТОДИ ПОБУДОВИ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ПАРАЛЕЛЬНИХ ВОЛОКОННО- ОПТИЧНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ

*Вінницький національний технічний університет
95б Хмельницьке шосе, Вінниця, 21021, Україна*

Анотація. Показані методи побудови високошвидкісних паралельних волоконно-оптичних інтерфейсів. Розглянуто структурні схеми та моделі волоконно-оптичних паралельних інтерфейсів для створення середовищ високошвидкісного передавання інформації.

Abstract. The methods for constructing high-speed parallel optical fiber interfaces. The structural patterns and fiber-optic parallel interface to create high-speed transmission media were observed.

Анотация. Показаны методы построения высокоскоростных паралельных волоконно-оптических интерфейсов. Рассмотрены структурные схемы и модели волоконно-оптических паралельных интерфейсов для создания сред высокоскоростной передачи информации.

Ключові слова: волоконно-оптичні інтерфейси, KVP- перетворення, паралельна передачі інформації

ВСТУП

Основним і традиційним принципом підвищення швидкодії процесів обчислення та передачі є забезпечення природного паралелізму, в якому незалежні один від одного і однорідні процеси розвиваються в часі збільшуючи загальну масштабованість і швидкодію операцій оброблення або передавання інформації. У поєднанні з оптичними та оптико-електронними швидкодійними методами, принцип природного паралелізму каналів дає подвійний вигаш в техніці оброблення та передавання даних і повинен розглядатись як базовий при розробленні методу побудови волоконно-оптичних інтерфейсів.

ПРИНЦИПИ ПАРАЛЕЛІЗМУ ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ТА СТВОРЕННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ КАНАЛІВ ДЛЯ СЕРЕДОВИЩ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

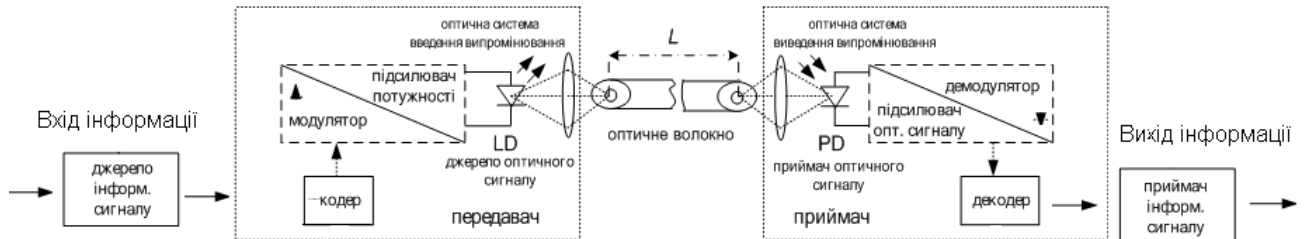
На фізичному рівні організації до складу волоконно-оптичних інтерфейсів передачі інформації входять такі основні блоки:

- джерела випромінювання на основі напівпровідникових лазерних діодів (світлодіодів), з довжинами хвиль у основних вікнах прозорості оптичного волокна ($\lambda_1=0.85\text{мкм}$, $\lambda_2=1.31\text{мкм}$, $\lambda_3=1.55\text{мкм}$);
- фотоприймачі на основі лавинних (APD) або p-i-n фотодіодів, з аналогічними довжинами хвиль;
- волоконно-оптичне середовище (оптичне волокно): одномодове SMF (Single Mode Fiber) або багатомодове MMF (Multi Mode Fiber);
- оптика введення-виведення випромінювання, що виходить від джерел або з самого оптичного волокна у фотоприймачі;
- електронні драйвери та кодерний контроллер введення (використовується на передавальному кінці для забезпечення модуляції оптичного випромінювання у відповідність із формою сигналів даних);
- електронні операційні підсилюючі схеми, демодулятори та контролер декодування (застосовується на приймальному кінці інтерфейсу для підсилення електричного сигналу від фотоприймачів та його декодування).

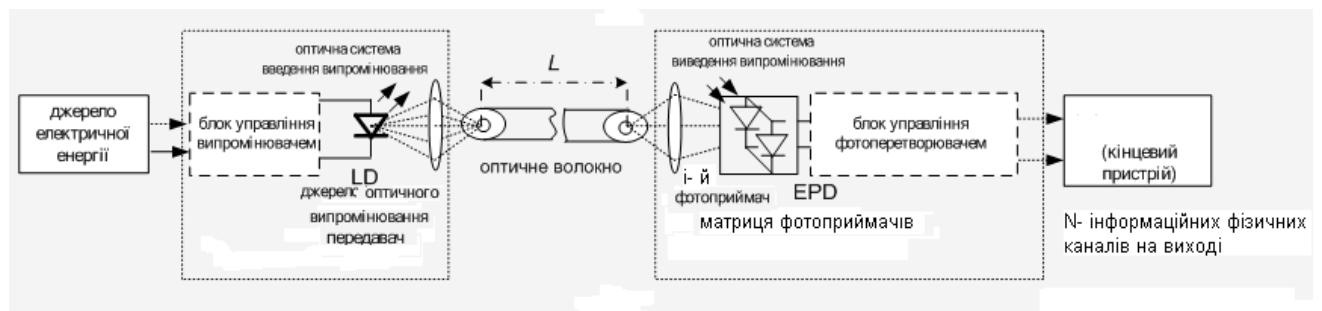
Для більшої ефективності прийому світлової енергії і вищої швидкості передавання інформації доцільно застосовувати вертикально-випромінюючі лазерні діоди (VCSEL-лазери з вертикальним оптичним резонатором), які мають високу квантову ефективність ($\eta > 0.8$) високі швидкості модуляції ($F=10-12\text{GHz}$) та стабільні теплові характеристики і все частіше використовуються у сучасних

високошвидкісних ВОЛЗ. В якості фотоприймачів доцільним є застосування р-і-n-фотодіоди останніх типів з малими бар'єрними ємностями р-n – переходу, що дозволяє досягти високих швидкостей модуляції ($F < 10\text{GHz}$).

Узагальнену структурну схему одиничного інформаційного каналу ВОЛЗ представлено на рис. 1а. За допомогою джерела оптичного сигналу LD модульований і закодований інформаційний сигнал вводиться в ОВ через оптичну систему введення. При проходженні довжини каналу L на виході оптичний сигнал (рис. 1,а) фокусується оптичною системою виведення на приймачі PD (APD, p-i-n - фотодіод), після чого підсилюється високочутливим підсилювачем та декодується.



а) для передавання інформаційних даних по одному каналу;



б) для мультиканального передавання енергії живлення

Рис. 1 Узагальнені структурні моделі волоконно-оптичних каналів.

Аналогічно структурі одиничного інформаційного каналу ВОЛЗ (рис.1, а), функціонує структура мультиканального ВОЛ (рис. 1, б), в основу якої покладено принцип розділення сигналів по формі, частоті або фазі у різних фізично – відокремлених фотоприймачах. В цінцевому варіанті використовується матриця фотоприймачів сигналів мультиканалу.

За допомогою масиву лазерних джерел, випромінювання декількох N каналів з оптичною потужністю $P_{N\text{інформ.}} = P_{N\text{інф}} = \sum_{i=1}^N P_i$ для передачі на відстань L може бути введено у одне оптичне

волокно для збільшення його пропускної здатності за допомогою технології WDM [1]. При цьому блоком управління випромінювача здійснюється контроль рівня оптичного випромінювання джерела LD. Випромінювання на приймальному кінці, яке виходить з оптичного волокна через оптичну систему виведення, освітлює матрицю EPD (Electronic PhotoDiode) на основі лавинних (APD) фотоелектричних діодів, які перетворюють світлові сигнали із ВОЛ в електричні. У кінцевому приймальному тракті ці в електричні сигнали виводиться для передачі і оброблення кінцевим інформаційним обладнанням і контроллерам оптичного інтерфейсу.

СТРУКТУРНІ СХЕМИ ТА МОДЕЛІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ПАРАЛЕЛЬНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ СЕРЕДОВИЩ ВИСОКОШВИДКІСНГО ПЕРЕДАВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ

На рис. 2а представлена структура одиничного однонаправленого волоконно-оптичного інтерфейсу. Двонаправленість передачі даних реалізується шляхом встановлення аналогічної структури інтерфейсу але в зворотному напрямку. При цьому можливим є використання спільного волоконно-оптичного середовища, шляхом розділенням і виділенням прямого і зворотного оптичних потоків за допомогою оптичних розгалужувачів або суматорів (рис. 2,б).

Вразливим місцем оптичних систем передачі інформації є ділянки оптико-електронним перетворенням, де світлові сигнали конвертуються в електронні з втратою швидкодії (за рахунок реактивних властивостей електронних елементів на високих частотах).

Тому тут перспективним є використання низьковольтних високошвидкісних електронних інтерфейсів LVDS (Low Voltage Differential Signaling, струмова петля), які за рахунок використання різниць напруг низького рівні ($U_d = 350$ мВ, $I = 3,5$ мА) для передачі сигналів 0 та 1 мають високу швидкодію (до 20 Гбіт/с), оскільки реактивний вплив електронних елементів на таких напругах є мінімальним.

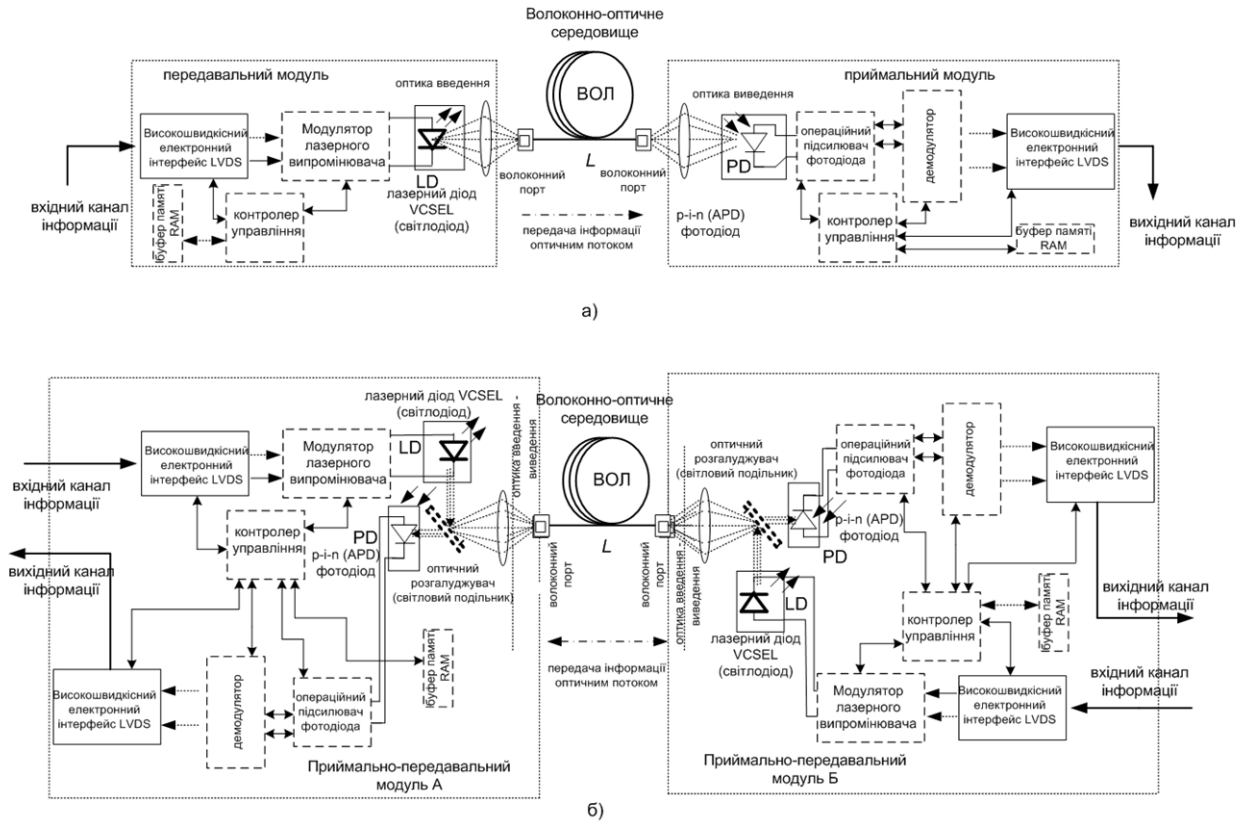


Рис.2 Структура одиничного високошвидкісного волоконно-оптичного інтерфейсу передачі даних типу типу «точка-точка»:

- а) односторонньої передачі інформації (однонаправлений інтерфейс);
- б) двосторонньої передачі даних (двонаправлений інтерфейс)

Для отримання високої смуги пропускання волоконно-оптичного середовища B ($B = 0.44/\tau_z$, де τ_z – загальна дисперсія оптоволокна), а відповідно і високої швидкості передачі інформації, в якості оптичних волокон необхідно використовувати лише одномодові світловоди з мінімальним значенням загальної дисперсії τ_z .

В якості такого волокна може бути використано одномодове оптоволокно з ненульовою зміщеною дисперсією типу NZDSF SMF 8/125 (Non Zero Dispersion Shifted Fiber Single Mode), яке оптимізоване для побудови високошвидкісних ліній 10-40 Гбіт/с ($B = 1,2 \cdot 10^6$ МГц/км) на великі дальності до 40 км. А також може бути використане в волоконно-оптичних інтерфейсах з WDM та DWDM-мультиплексуванням.

Це в сукупності дозволяє досягати швидкостей передачі інформації до 100-120 Гбіт/с на один волоконно-оптичний канал.

У випадку матричного розміщення каналів швидкість передачі інформації збільшиться наближено на добуток елементів матриці $N[N \times N]$ волоконно-оптичних каналів, і складатиме:

$$Bit\ rate \sim N \times N \cdot (B \cdot \log_2 V) = N \times N \cdot (B \cdot \log_2 2), \quad (1)$$

де V – кількість рівнів сигналу ($V=2$); B – смуга пропускання оптоволокна $B = 0.44/\tau_z$.

У випадку використання DWDM-мультиплексування розмір матриці оптоволокон паралельного волоконно-оптичного інтерфейсу може бути збільшений до $M_i \times M_j$ (рис.3), причому

$$N_i \times N_j = \sum_{i=1}^{M_i} \sum_{j=1}^{M_j} M_i \times M_j, \quad (2)$$

де M_i -кількість каналів передачі інформації масиву VCSEL-лазерних діодів що надходять на матрицю DWDM-мультиплексорів розмірність якої $N_i \times N_j$.

Швидкість передавання інформації за умов лінійної цифрової модуляції ($V=2$) значно збільшиться пропорційно до розміру матриці $M[M_i \times M_j]$, тобто:

$$Bit\ rate(DWDM) \approx M_i \times M_j \cdot (B_i \log_2 V) = \sum_{i=1}^M M_i \sum_{j=1}^M M_j \times \left(\frac{0.44}{\tau_{zN}} \cdot \log_2 2 \right) = \frac{0.44}{\tau_{zN}} \sum_{i=1}^M M_i \sum_{j=1}^M M_j \quad (3)$$

Такий підхід є найбільш оптимальним для досягнення максимально можливої швидкості передачі інформації паралельного інтерфейсу. За допомогою методу евристичного синтезу отримано структурну модель високошвидкісного паралельного волоконно-оптичного інтерфейсу передачі даних матричного типу (рис. 3).

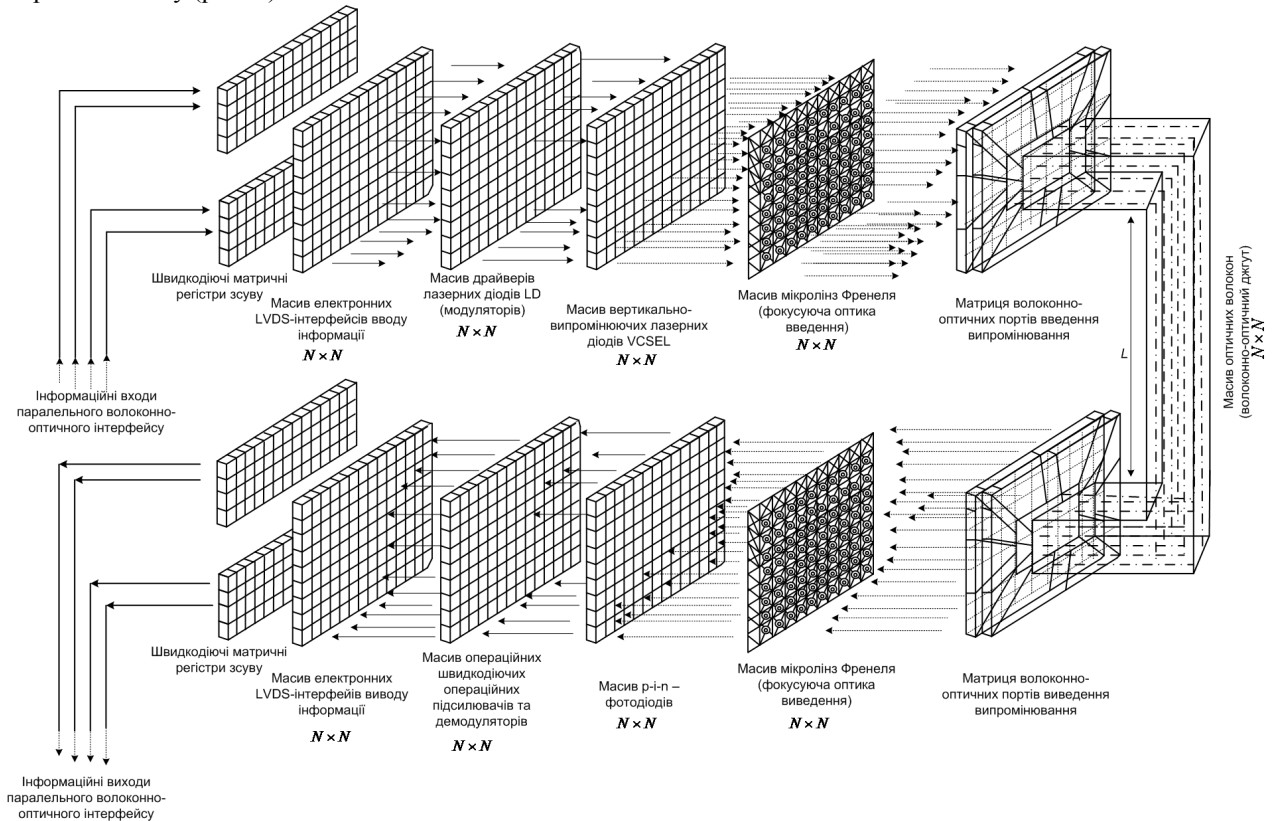


Рис.3 Структурна модель високошвидкісного паралельного волоконно-оптичного інтерфейсу передачі даних (ВПВОІ) з розрядністю $N \times N$

На передавальному кінці ВПВОІ інформаційні дані у вигляді двійкових електричних сигналів вводяться в послідовному форматі на швидкодіючі матричні регістри зсуву, які перетворюють інформацію із послідовного коду у паралельний, у вигляді розрядного зрізу, та подаються у вигляді матриці розмірністю $N \times N$ на масив електронних LVDS-інтерфейсів введення інформації такої ж розмірності.

Масив LVDS-інтерфейсів введення передає матрицю інформаційних даних у паралельному форматі до масиву драйверів лазерних діодів, який у відповідності до рівнів інформаційних сигналів (0 або 1) у кожному розряді масиву забезпечує модуляцію відповідних елементів – VCSEL-лазерів, що перетворюються інформаційні дані з електронної форми в оптичну з малим часом латентності ($\tau_L \rightarrow \tau_{Lmin}=5-10$ пс) в кожному розряді. Масив мікролінз Френеля при цьому забезпечує ефективне введення випромінювання у кожне з окремих оптичних волокон волоконно-оптичного джгута розмірністю $N \times N$ через оптичні порти вводу випромінювання.

Введені розрядні зрізи світлових сигналів паралельно передаються по окремим оптоволоконкам по волоконно-оптичному джгуту до приймального кінця ВПВОІ, де аналогічно, але в зворотному порядку світлові сигнали виводяться за допомогою другого масиву мікролінз Френеля на відповідні окремі p-i-n – фотодіоди, які перетворюють інформацію з оптичної в електричну форму.

Для забезпечення високої швидкодії як окремих каналів, так і всієї системи вцілому, важливо щоб час латентності масиву p-i-n – фотодіодів відповідав часу латентності масиву VCSEL-лазерів та був

мінімальним.

Масив операційних підсилювачів та демодуляторів підсилюють послаблені в результаті оптичних втрат сигнали розрядного зрізу та демодулюють їх. Після чого через масив LVDS-інтерфейсів виведені сигнали у вигляді розрядних зрізів $N[N \times N]$ з високою швидкістю передачі подаються до швидкодіючих матричних регістрів зсуву, які перетворюють інформаційні зрізи у послідовний кодовий формат та передають отриману інформацію по декільком високошвидкісним шинам до приймальних пристроїв на іншому кінці ВПВОІ.

Для забезпечення максимально можливої швидкодії розроблено структурну модель ВПВОІ з використанням щільного оптичного хвильового мультиплексування DWDM (Dens Wave Division Multiplexing) зрізів інформаційних оптичних сигналів (рис.4).

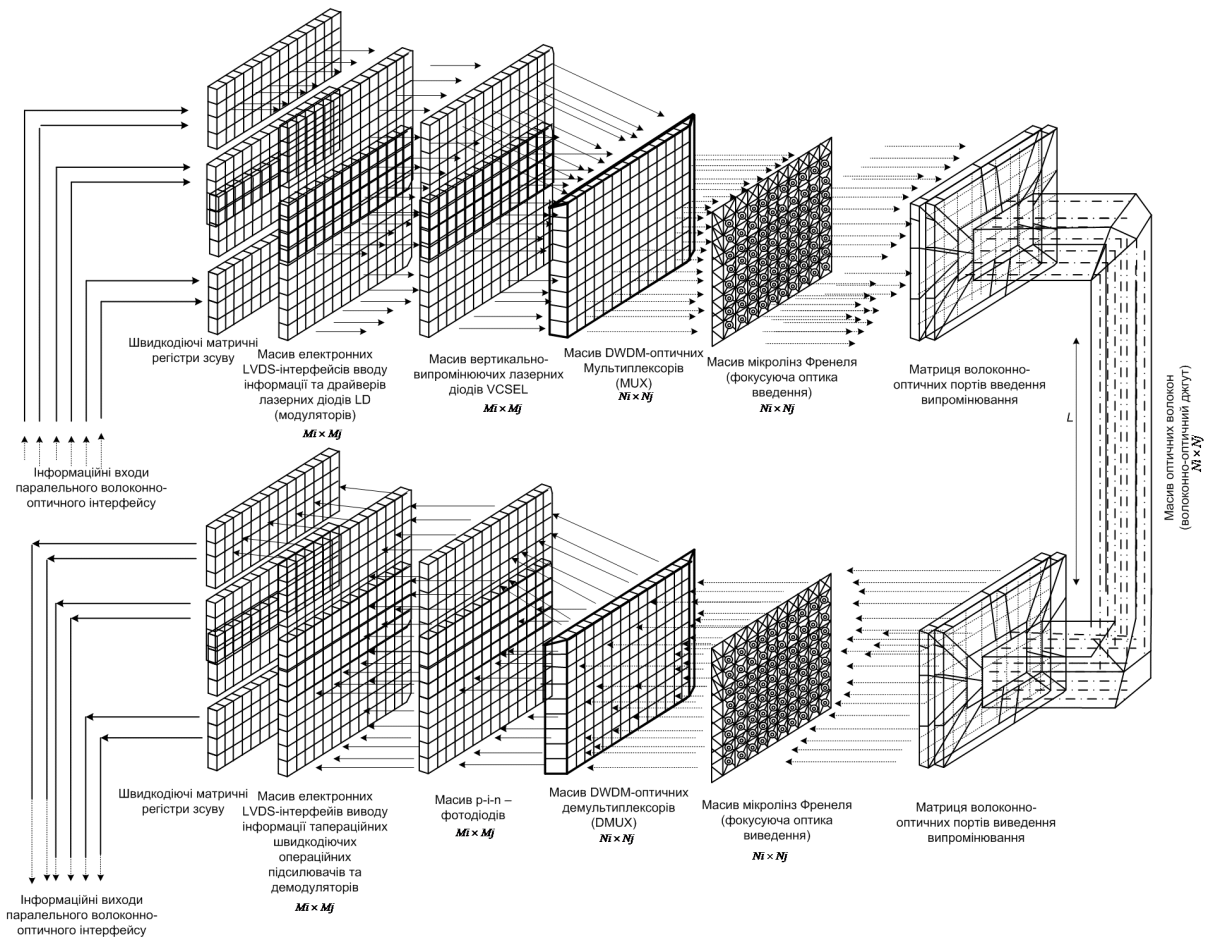


Рис.4 Структурна модель високошвидкісного паралельного волоконно-оптичного інтерфейсу передачі даних з підвищеним числом розрядних зрізів $M[M_i \times M_j]$ за рахунок використання масиву оптичних DWDM-мультиплексорів розрядністю $M_i \times M_j$

В запропонованих структурних моделях передбачається використовувати універсальний метод передавання, який базується на представленні інформаційних сигналів двома інформаційними параметрами: амплітудою та тривалістю імпульсного коду та методом КVP-перетворення.

ДОДАТКОВІ ОБМЕЖУЮЧІ ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА ФУНКЦІОНАЛЬНІСТЬ І ШВИДКОДІЮ ПАРАЛЕЛЬНИХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ

Окрім смуги пропускання і характеристики оптичних втрат, які є основними показниками, які вносять обмеження на використання ВПВОІ по параметрам швидкодії та дальності, існують ще декілька факторів, що обмежують їх функціональність:

- вплив температури та параметрів навколишнього середовища;
- вплив сусідніх волоконно-оптичних каналів в масиві ВПВОІ;
- процес та ефективність введення-виведення оптичного випромінювання у волоконні канали ВПВОІ.

Оскільки оптичні волокна в масиві ВПВОІ щільно розташовані поряд у вигляді волоконно-

оптичного джгуту, то відбувається обмін потужностями між поверхневими модами оболонки оптоволокон джгута. При цьому може відбуватися обмін оптичними потужностями між сусідніми волоконно-оптичними каналами в масиві ВПВОІ в процесі передачі сигналів.

Обмін потужностями між модами одного каналу можна визначити, якщо позначити через I_1 – початкову інтенсивність, яка існує в каналі 1 (канал, що впливає), а через I_2 інтенсивність, яка виникає в каналі 2 (канал на який впливає інший канал), яку можна визначити за формулою:

$$I_2 = \frac{I_1 \cdot \sin^2 L_v \sqrt{\delta^2 + \chi^2}}{1 + \left(\frac{\delta}{\chi^2} \right)}, \quad (4)$$

де $\delta = \frac{\beta_1 - \beta_2}{2} = \frac{\Delta\beta}{2}$ – параметр фазового розлаштування каналу 1 та 2; L – довжина відрізка взаємодії; β – параметр розповсюдження; χ – коефіцієнт зв'язку каналів в масиві ВПВОІ.

Коефіцієнт зв'язку χ визначає характер взаємодії двох сусідніх каналів у (1.4) як:

$$\chi = \frac{2 \cdot r^2 \cdot \gamma \cdot \exp(-\gamma \cdot L_v)}{\beta \cdot \omega \cdot (\gamma^2 + r^2)}, \quad (5)$$

де γ – показник затухання амплітуди хвилі у сердцевині; r – радіус сердцевини оптичного волокна; L_v – довжина взаємодії; ω – відстань між границями хвильових фронтів каналів у радіальному напрямку.

Враховуючи матричну структуру ВПВОІ і аналізуючи можливі варіанти взаємодії сусідніх каналів, можна визначити, що будуть мати місце 2 випадки взаємодії каналів у матрицях квадратної та прямокутної форми, в залежності від їх розташування:

- 1) волоконний канал на який відбувається вплив знаходиться на боковій грані волоконно-оптичного джгута (кількість каналів, з боку яких відбувається вплив рівна $n=3$) (рис.5, а);
- 2) волоконний канал на який відбувається вплив знаходиться в середині масиву волоконно-оптичного джгута і оточений сусідніми аналогічними каналами з 4-сторів (кількість каналів, з боку яких відбувається вплив рівна $n=4$) (рис.5, б).

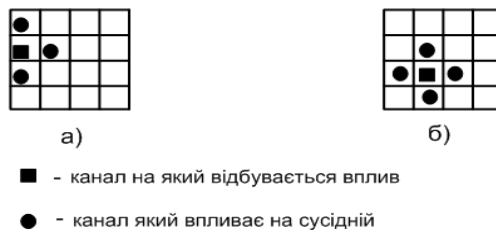


Рис.5 Варіанти взаємодії оптичних каналів в процесі обміну оптичних потужностей в масиві ВПВОІ

Якщо спрощено врахувати, що середні оптичні потужності у всіх каналах масиву ВПВОІ є приблизно рівними, тоді для першого випадку формула (4) переписеться з врахуванням кількості каналів, що впливають:

$$I_2 = \frac{3I_1 \cdot \sin^2 L_v \sqrt{\delta_s^2 + \chi_s^2}}{1 + \left(\frac{\delta_s}{\chi_s^2} \right)}. \quad (6)$$

Параметри δ_s , χ_s є середніми параметрами фазового розлаштування і коефіцієнту зв'язку між 3-ма каналами, які впливають та одним каналом на який відбувається вплив, і визначаються як:

$$\delta_s = \frac{\beta_1 - 3\beta_2}{2}; \chi_s = \frac{6 \cdot r^2 \cdot \gamma_{sq} \cdot \exp(-\gamma_{sq} \cdot L_v)}{\beta \cdot \omega_{sq} \cdot (\gamma_{sq}^2 + r^2)}, \quad (7)$$

де γ_{sq} , ω_{sq} – середньоквадратичні величини відповідників показників.

Важливою умовою при побудові паралельних волоконно-оптичних інтерфейсів є висока

ефективність введення потужності випромінювання в оптичне волокно.

Структуру оптичної системи введення випромінювання представлено на рис. 6

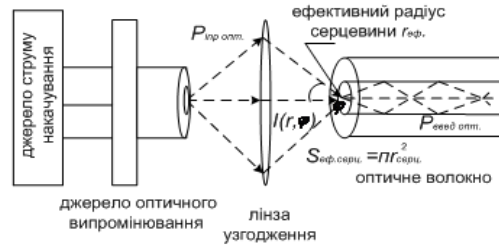


Рис.6 Структура оптичної системи введення випромінювання у оптичне волокно

При введенні оптичного потоку у волокно, не вся частина вхідної потужності ефективно фокусується лінзою в сердцевині, а лише її частка, що відповідає значенню $P_{in} = k_{\eta} \cdot D_{LD}$, де k_{η} – коефіцієнт введення випромінювання; D_{LD} – оптична потужність джерела. Оптична потужність корисного сигналу, що введена в оптичне волокно при цьому визначається тілесним кутом куту введення φ та радіусом сердцевини $r_{серц.}$:

$$P_{\text{ввод.}} = \int_0^r \int_0^{\varphi} P_{in}(r, \varphi) dr d\varphi \quad (8)$$

Значення коефіцієнта введення випромінювання k_{η} обчислюється з вищеприведених співвідношень враховуючи інтеграли перекриття хвильового фронту падаючого на сердцевину волокна світлового потоку $I(r, \varphi)$:

$$k_{\eta} = \iint_{r, \varphi} I(r, \varphi) \cdot \text{COS}(\varphi) dr d\varphi \quad (9)$$

Схеми введення/виведення випромінювання у волоконно-оптичні канали показано на рис. 7.

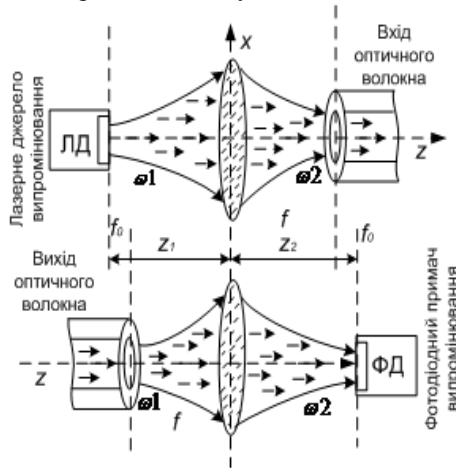


Рис. 7. Схеми введення-виведення випромінювання у волоконно-оптичних каналах масиву ВПВОІ

При безпосередньому узгодженні волоконно-оптичних структур ВПВОІ, зокрема джерел оптичного випромінювання і фотоприймачів з самим оптичним волокном можуть виникати достатньо великі оптичні втрати, які обумовлені різними лінійними розмірами активних світловипромінюючих або світлопоглинаючих площадок лазерів та фотоприймачів.

Тому необхідним є використання вискоефективних узгоджуючих елементів, на основі мікролінз Френеля (збиральні плоскі лінзи), або технології плавних волоконних переходів.

Крім того до таких лінз пред'являються високі вимоги по забезпеченню високого світлопропускання шляхом нанесення просвітлюючих покриттів, які зменшують втрати на розсіювання випромінювання.

ВИСНОВКИ

На основі проведеного аналізу по вищевказаним паралельним волоконно-оптичним інтерфейсам можливо передавати й зображення та образну інформацію шляхом паралельного введення багатопіксельного зображення, з розрахунку – один піксель зображення на волоконний канал.

Задачі передачі зображення без його стиснення та кодування при передачі та відновлення при прийманні, що значно підвищує машинний час та час латентності є дуже актуальними в техніці оброблення образної інформації та систем розпізнавання образів і штучного інтелекту.

Використання структурних моделей ВПОІ з конкретизованими параметрами дозволить значно підвищити швидкість та стабільність передавання інформації по таких системам, а також дозволить застосування більш досконалих зорових каналів сприйняття та передавання відеоінформації паралельними методами в образних оптичних комп'ютерах.

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. Воеводин В. В. Параллельные вычисления / В. В. Воеводин, В. В. Воеводин. – СПб, БХВ-Петербург, 2004. – 608с. – ISBN 5-94157-160-7.
3. Майоров С. А. Оптические методы обработки информации / С. А. Майоров, А. А. Акаев. – М.: Высшая школа, 1988. – 238 с.
4. Семенов А.Б. Волоконная оптика в локальных и корпоративных сетях связи / А. Б. Семенов. – М.: КомпьютерПресс, 1998. – 302 с.
5. 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.
6. Михаил Гук. Интерфейсы устройств хранения. ATA, SCSI и другие. Энциклопедия : [Текст] / Гук Михаил. – СПб.: Питер, 2006. – 448 с. – ISBN 5-469-01531-9.
7. Суприган В. А. Математичне моделювання процесу паралельного передавання зображень за допомогою масиву ВОЛЗ / В. А. Суприган, Абу Даїя Усама Фаузі.
8. 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 14.10.2013р

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