

УДК 621.39

І.В. Горбатий

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра телекомунікацій

## ПЕРЕДАВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ У ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ ТА ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ

Ó Горбатий І.В., 2011

I.V. Gorbatyy

## TRANSMISSION OF INFORMATION IN THE FIBER OPTIC TELECOMMUNICATION SYSTEMS WITH THE USE OF MODERN METHODS OF FORMING AND PROCESSING OF SIGNALS

Ó Gorbatyy I.V., 2011

Запропоновано адаптивний метод передавання інформації у волоконно-оптичній системі передавання інформації (ВОСП) з використанням різновидів модуляції (бінарної фазової маніпуляції – БФМн, квадратурної фазової маніпуляції – КФМн та квадратурної амплітудної модуляції – КАМ) ортогонально-поляризованих складових оптичної хвилі та структурні схеми передавального й приймального пристроїв ВОСП.

*Ключові слова: адаптивний метод передавання інформації, волоконно-оптична система передавання інформації, ортогонально-поляризовані складові.*

Adaptive method of the transmission of information in the fiber optic telecommunication system (FOTS) with the use of varieties of modulation (binary phase manipulation – BPSK, quadrature phase manipulation – QPSK and quadrature amplitude modulation – QAM) of orthogonal-polarize components of optical wave and flow diagrams of transmitting and receiving devices of FOTS were offered.

*Key words: adaptive method of the transmission of information, fiber optic telecommunication system, orthogonal-polarize components.*

### Вступ

Одним з основних напрямків розвитку телекомунікаційних систем та мереж є вдосконалення магістральних ВОСП. Використовуючи сучасне обладнання, по одній волоконно-оптичній лінії зв'язку (ВОЛЗ) передають інформацію зі швидкістю до 10 Гбіт/с. Останнім часом провідні компанії світу активно проводять дослідження з метою досягнення швидкості передавання 40 Гбіт/с та 100 Гбіт/с. Окремі зразки такого обладнання почали випробовувати [1].

Роботи з досягнення вищої швидкості передавання здійснюють у двох напрямках. Ethernet Alliance вдосконалює мережі передавання інформації на основі проекту стандарту Ethernet IEEE 802.3ba, що передбачає об'єднання 4 або 10 паралельних ліній зв'язку по 10 Гбіт/с, що дозволить забезпечити швидкості 40 Гбіт/с або 100 Гбіт/с [2]. Такий напрямок підвищення швидкості передавання інформації є простим, проте, він вимагає значних затрат на облаштування додаткових ліній та розроблення спеціального обладнання на приймальній і передавальній сторонах.

Другий напрямок є перспективнішим. Optical Networking Forum (ONF) розробляє стандарти передавання інформації зі швидкістю 25 Гбіт/с та 28 Гбіт/с, що в перспективі дасть змогу

об'єднати чотири потоки в один для забезпечення швидкості 100 Гбіт/с, використовуючи сучасні види модуляції сигналів [3]. OIF пропонує створити нову систему передавання інформації зі швидкістю 100 Гбіт/с за технологією DWDM із використанням двополяризаційної 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.

Для подальшого підвищення швидкості передавання інформації ВОЛЗ необхідно вивчати можливість використання інших високоефективних різновидів модуляції сигналу. У зв'язку із цим актуальним завданням є розроблення ВОСПІ з використанням нових методів модуляції ортогонально-поляризованих складових оптичної хвилі.

Метою роботи є розроблення адаптивного методу передавання інформації у ВОСПІ з використанням різновидів модуляції (БФМн, КФМн та КАМ) ортогонально-поляризованих складових оптичної хвилі та структурних схем приймального й передавального пристроїв ВОСПІ, що дозволить передавати інформацію по одній ВОЛЗ зі швидкістю до 350 Гбіт/с.

### Оптичні модулятори

Сьогодні найпоширенішим є електрооптичний модулятор на основі комірки Поккельса, принцип дії якої заснований на електрично збуджуваному у відповідних кристалах двоприменезаломленні [4]. Комірки Поккельса поділяють на комірки поздовжнього й поперечного типів залежно від того, як (паралельно чи перпендикулярно) прикладають електричне поле відносно напрямку руху світлової хвилі в кристалі. Популярним матеріалом для таких комірок є KDP (хімічна формула  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ). У такому разі амплітудний оптичний модулятор, що виконаний на комірці Поккельса, складається з поляризатора, комірки Поккельса й аналізатора. Принцип дії модулятора такий. У початковому стані, коли до комірки не прикладена напруга, вона прозора для оптичної хвилі, і хвиля блокується аналізатором, тому що останній розміщений під кутом  $90^\circ$  до поляризованого вхідного випромінювання. У разі збільшення напруги у комірці Поккельса здійснюється перетворення лінійної поляризації вхідної оптичної хвилі в кругову, еліптичну чи лінійну. За досягнення певної максимальної напруги комірка здійснює повертання поляризації вхідної оптичної хвилі на  $90^\circ$ , при цьому значення максимальної напруги залежить від типу кристала та конструкції комірки. У цьому разі аналізатор стає повністю прозорим для вихідної оптичної хвилі. Отже, напруга, що прикладена до комірки Поккельса, визначає рівень інтенсивності оптичної хвилі на виході пристрою, а його зміна приводить до амплітудної модуляції оптичної хвилі. Недолік звичайних комірок Поккельса полягає в необхідності використання високої модулюючої напруги (сотні Вольт). Для усунення цього недоліку розроблено інтегральні модулятори, в яких за допомогою мікроелектронних технологій виготовлено одномодові оптичні хвилеводи, що розгалужують світловий потік на дві хвилевідні гілки, вбудовані в комірку Поккельса. Це дає змогу збільшити швидкість поширення світлової хвилі в одній хвилевідній гілці й зменшити в другій. Переважно, достатньо прикласти близько 8 В, щоби досягнути повного ослаблення, що має місце за різниці фаз світлових хвиль, що поширюються обома гілками, яка дорівнює  $180^\circ$ . Інколи один із двох хвилеводів виконують на чверть довжини хвилі  $\lambda/4$  довший від другого для того, щоби забезпечити можливість застосування біполярного модулюючого сигналу, при цьому повне проходження світлової хвилі досягають за напруги модулюючого сигналу  $+4$  В, зменшення на половину при  $0$  В і повне ослаблення – при мінус  $4$  В.

Використання  $\text{LiNbO}_3$  також забезпечує електрично збуджуване двоприменезаломлення, котре лежить в основі роботи фазових модуляторів, що використовують у когерентних ВОСПІ з фазовою маніпуляцією сигналу (ФМн). У таких модуляторах під дією прикладеного електричного поля змінюється показник заломлення, що використовують для зміни фази оптичної хвилі.

Електрооптичні модулятори випускають на багатьох підприємствах. Зокрема, модулятори виробництва фірми SHF Communication Technologies AG працюють у режимі амплітудної або фазової маніпуляції світлової хвилі та забезпечують передавання даних зі швидкістю 25 Гбіт/с і більше [5].

### Квадратурні модулятори й демодулятори

Функційна схема квадратурного модулятора для формування КФМн- або КАМ-сигналу наведена на рис. 1 [6].

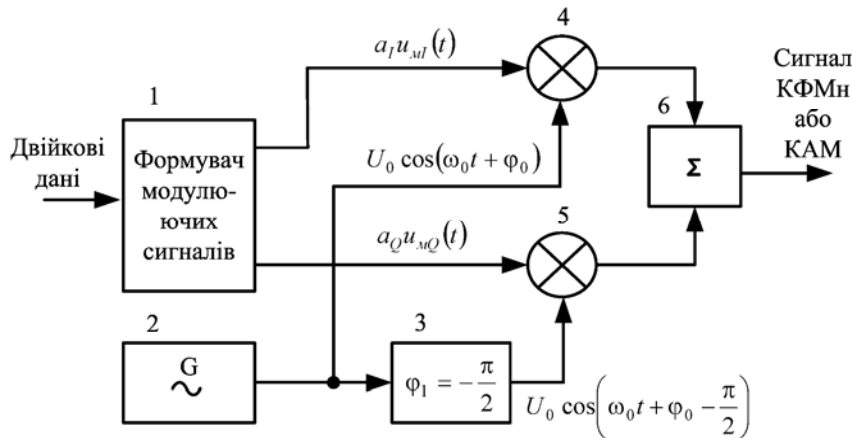


Рис. 1. Функційна схема квадратурного модулятора

Для здійснення КФМн або КАМ у квадратурному модуляторі за допомогою формувача модулюючих сигналів 1 формують перший  $a_I u_{mI}(t)$  та другим  $a_Q u_{mQ}(t)$  дискретні модулюючі інформаційні сигнали з  $M_u$  можливими рівнями амплітуди, використовуючи змінні в часі  $t$  вхідні двійкові дані  $u_{\partial}(t)$ , за допомогою опорного генератора 2 формують першу гармонічну складову  $U_0 \cos(\omega_0 t + \phi_0)$  із круговою частотою  $\omega_0$  й початковою фазою  $\phi_0$  носійного коливання та з використанням фазоповертача 3 другу гармонічну складову  $U_0 \cos(\omega_0 t + \phi_0 - \frac{\pi}{2})$ . За допомогою перемножувачів 4 і 5 та суматора 6 формують інформаційний сигнал на вхід середовища передавання, що дорівнює сумі добутків першого модулюючого інформаційного сигналу  $a_I u_{mI}(t)$  і першої гармонічної складової  $U_0 \cos(\omega_0 t + \phi_0)$  та другого модулюючого інформаційного сигналу  $a_Q u_{mQ}(t)$  і другої гармонічної складової  $U_0 \cos(\omega_0 t + \phi_0 - \frac{\pi}{2})$  відповідно до співвідношення

$$u_{\text{КФМн}}(t) = U_0 a_I u_{mI}(t) \cos(\omega_0 t + \phi_0) + U_0 a_Q u_{mQ}(t) \cos(\omega_0 t + \phi_0 - \frac{\pi}{2}). \quad (1)$$

Функційна схема квадратурного демодулятора для демодуляції КФМн або КАМ-сигналу наведена на рис. 2.

Для здійснення демодуляції КФМн- або КАМ-сигналу у квадратурному демодуляторі перемножують за допомогою перемножувачів 3 і 4 на гармонічні сигнали  $U_0 \cos(\omega_0 t + \phi_0)$  та  $U_0 \cos(\omega_0 t + \phi_0 - \frac{\pi}{2})$ , сформовані за допомогою опорного генератора 1 і синхронізовані за фазою відновленим носійним коливанням передавання за допомогою системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ).

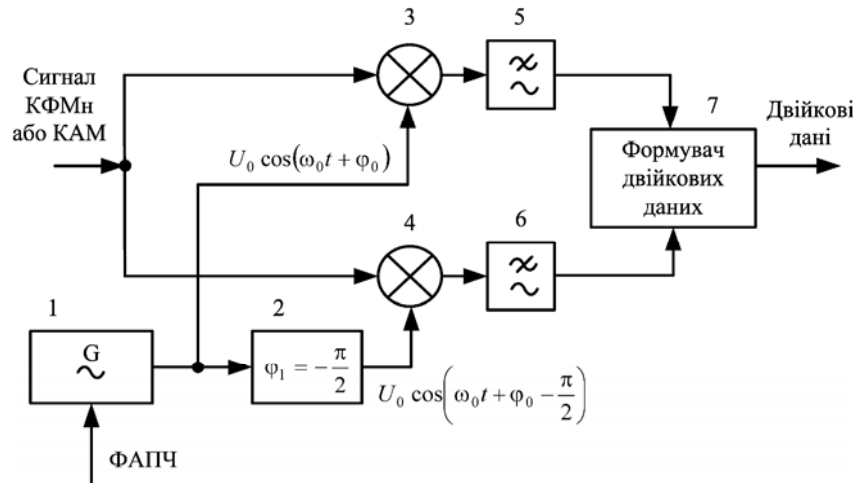


Рис. 2. Функційна схема квадратурного демодулятора

Сигнал на виході перемножувача 1 дорівнює

$$s_{nm1}(t) = \left( U_0 a_I u_{mI}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + U_0 a_Q u_{mQ}(t) \cos\left(\omega_0 t + \varphi_0 - \frac{\pi}{2}\right) \right) \times \cos(\omega_0 t + \varphi_0) =$$

$$= \frac{U_0 a_I u_{mI}(t)}{2} + \frac{U_0 a_I u_{mI}(t)}{2} \cos(2(\omega_0 t + \varphi_0)) + \frac{U_0 a_Q u_{mQ}(t)}{2} \cos\left(2(\omega_0 t + \varphi_0) - \frac{\pi}{2}\right). \quad (2)$$

Сигнал на виході перемножувача 2

$$s_{nm2}(t) = \left( U_0 a_I u_{mI}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + U_0 a_Q u_{mQ}(t) \cos\left(\omega_0 t + \varphi_0 - \frac{\pi}{2}\right) \right) \times \cos\left(\omega_0 t + \varphi_0 - \frac{\pi}{2}\right) =$$

$$= \frac{U_0 a_I u_{mI}(t)}{2} \cos\left(2(\omega_0 t + \varphi_0) - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{U_0 a_Q u_{mQ}(t)}{2} + \frac{U_0 a_Q u_{mQ}(t)}{2} \cos\left(2\left(\omega_0 t + \varphi_0 - \frac{\pi}{2}\right)\right). \quad (3)$$

Із сигналів, отриманих на виходах перемножувачів, виділяють модулюючі інформаційні сигнали  $u_{mI}(t)$  та  $u_{mQ}(t)$  за допомогою фільтрів нижніх частот 5 і 6 (ФНЧ) та використовують їх для формування даних  $u_D(t)$  у формувачі двійкових даних 7.

При цьому сигнали після ФНЧ 1 ФНЧ 2 відповідно дорівнюють

$$s_{dM1}(t) = U_0 a_I u_{mI}(t) / 2, \quad s_{dM2}(t) = U_0 a_Q u_{mQ}(t) / 2. \quad (4)$$

Описані вище модулятор і демодулятор придатні для формування БФМн-сигналу, при цьому в модуляторі формують лише перший модулюючий сигнал, а в демодуляторі використовують лише перемножувач 1 та ФНЧ 1. Наведені принципи побудови квадратурних модулятора й демодулятора використані під час проектування передавального та приймального пристроїв запропонованої структурної схеми ВОСП.

### Запропоновані адаптивний метод та структурна схема ВОСП

Запропонований адаптивний метод передавання інформації у ВОСП з використанням різновидів модуляції ортогонально-поляризованих складових оптичної хвилі полягає в тому, що генерують оптичну хвилю, розгалужують її на дві. Двійкові дані на виході джерела інформації кодують та розділюють на два потоки, кожен з яких використовують для формування одного або двох модулюючих сигналів, необхідних для здійснення БФМн, КФМн чи КАМ окремо кожної оптичної хвилі. Кожну оптичну хвилю модулюють сформованими модулюючими сигналами. Після цього здійснюють поворот площини поляризації на  $90^\circ$  однієї з хвиль, одержані дві ортогональні модульовані хвилі підсумовують і подають в оптичне середовище передавання. На виході такого середовища з оптичної хвилі виділяють окремо хвилі з вертикальною та горизонтальною поляризаціями та демодулюють їх відповідно до раніше застосованого

методу модуляції. Дві пари I та Q сигналів (або лише I сигнал під час демодуляції БФМн), одержаних після демодуляції, використовують для формування двох потоків, які з'єднують в один потік, після декодування якого одержують двійкові дані. Адаптивність цього методу полягає в тому, що залежно від якості ВОЛЗ (ослаблення сигналу, дисперсія сигналу, рівень шуму) у приймальному пристрої контролюють імовірність бітової (символьної) помилки та на підставі результатів контролю застосовують такий різновид модуляції, що забезпечить найвищу ефективність ВОСПІ за даних умов передавання. У разі зміни в часі згаданих вище умов передавання змінюють різновид застосованої модуляції.

Запропонована ВОСПІ з використанням БФМн, КФМн чи КАМ ортогонально-поляризованих складових оптичної хвилі складається із джерела інформації, передавального пристрою (рис. 3), ВОЛЗ, приймального пристрою (рис. 4) та одержувача інформації.

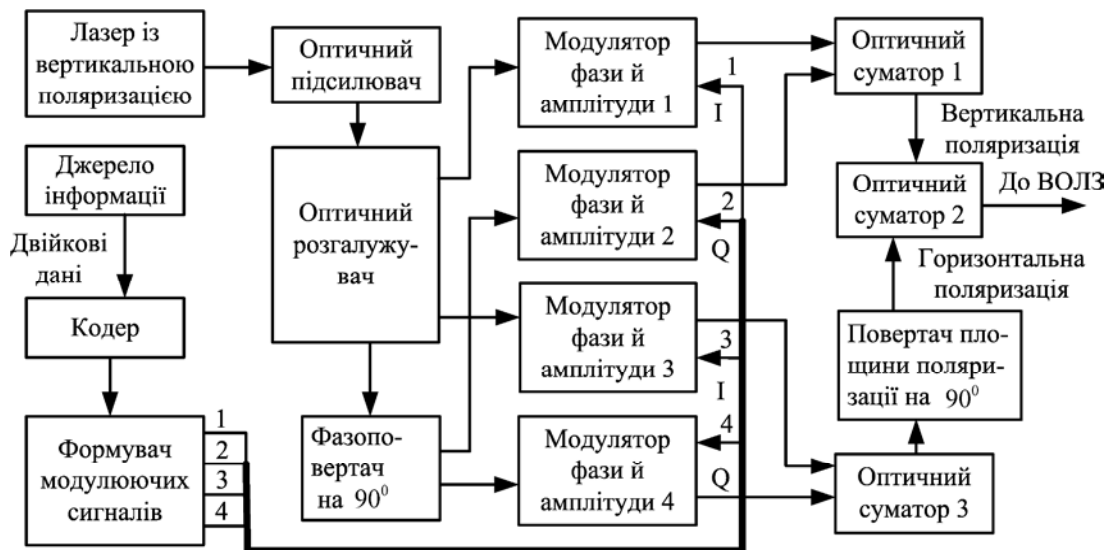


Рис. 3. Структурна схема передавального пристрою ВОСПІ

У передавальному пристрої джерелом оптичної хвилі використовують лазер із вертикальною поляризацією. Оптичний підсилювач підсилює оптичну хвилю за інтенсивністю. Під час застосування лазера з достатньою інтенсивністю оптичний підсилювач не використовують. Потім розгалужують оптичну хвилю на три за допомогою оптичного розгалужувача. Із двох виходів розгалужувача оптичні хвилі подають на модулятори фази й амплітуди 1 і 3, а із третього виходу розгалужувача оптичну хвилю подають через фазоповертач на  $90^\circ$  на модулятори фази й амплітуди 2 і 4. На другі входи всіх модуляторів фази й амплітуди подають модулюючі сигнали, утворені формувачем модулюючих сигналів із двійкових даних на виході джерела інформації, попередньо закодованих завадостійким кодом. Модульовані оптичні хвилі з вертикальною поляризацією на виходах модуляторів фази й амплітуди 1 і 2 підсумовують оптичним суматором 1. Модульовані оптичні хвилі на виходах модуляторів фази й амплітуди 3 і 4 підсумовують оптичним суматором 3, повертають площину поляризації сумарної хвилі на  $90^\circ$ , тобто отримують модульовану оптичну хвилю з горизонтальною поляризацією. Модульовані оптичні хвилі з горизонтальною й вертикальною поляризаціями підсумовують за допомогою оптичного суматора 2 і подають на вхід ВОЛЗ, що виконують на основі одномодового волокна зі збереженням поляризації випромінювання (ГОСТ 26793-85), відомого в зарубіжній літературі як РМ або hi-bi волокно [4].

З виходу ВОЛЗ оптичні хвилі подають на вхід приймального пристрою. На вході приймального пристрою встановлено оптичний розгалужувач 1, що розділює оптичну хвилю на дві однакові. З однієї з них за допомогою підстроюваного аналізатора вертикальної поляризації виділяють оптичну хвилю з вертикальною поляризацією, а з іншої за допомогою підстроюваного аналізатора горизонтальної поляризації – з горизонтальною поляризацією. Підстроювані аналізатори забезпечують корекцію відповідної поляризації для одержання максимальної інтенсивності оптичної хвилі на їх виходах, що необхідно для

компенсації паразитної зміни поляризації хвилі під час проходження через середовище передавання (зміна поляризації хвилі спричинена температурними й механічними впливами на кабель, його конструктивними особливостями та іншими факторами). При цьому для забезпечення автоматичної корекції вертикальної поляризації використовують сигнал із формувача двійкових даних і службових сигналів, фільтр 1 та підсилювач 2, а для горизонтальної поляризації – відповідний сигнал із формувача двійкових даних і службових сигналів, фільтр 3 та підсилювач 3.

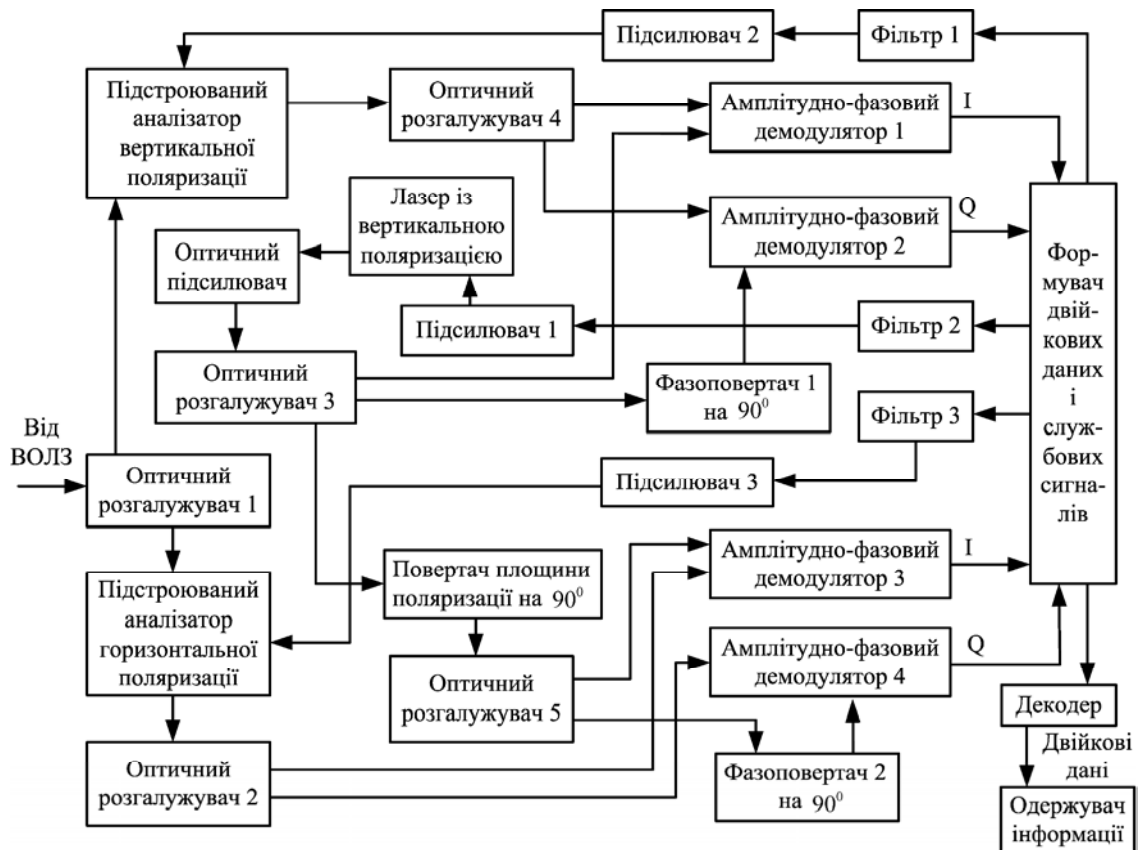


Рис. 4. Структурна схема приймального пристрою ВОСП

Приймальний пристрій виконаний за схемою з оптичним змішуванням прийнятих оптичних хвиль з оптичними хвилями опорного лазера. За допомогою підстроюваних аналізаторів вертикальної чи горизонтальної поляризації забезпечують, щоб поляризація прийнятої оптичної хвилі та поляризація оптичної хвилі опорного лазера збіглися. Оптичну хвилю з лазера з вертикальною поляризацією подають через оптичний підсилювач та оптичний розгалужувач 3 на амплітудно-фазові демодулятори 1 та 2 для демодуляції прийнятої оптичної хвилі з вертикальною поляризацією й через повертач площини поляризації на  $90^\circ$  та оптичний розгалужувач 5 на амплітудно-фазові демодулятори 3 та 4 для демодуляції прийнятої оптичної хвилі з горизонтальною поляризацією. Для отримання квадратурних опорних сигналів на амплітудно-фазові демодулятори 2 і 4 подають сигнали опорного лазера через фазоповертачі 1 та 2 на  $90^\circ$ .

Структурна схема амплітудно-фазового демодулятора наведена на рис. 5.



Рис. 5. Структурна схема амплітудно-фазового демодулятора

Амплітудно-фазові демодулятори виконані за схемою діодного балансного дискримінатора й складаються з оптичного відгалужувача, двох фотодіодів і диференційного лінійного підсилювача. Перевагою балансної схеми є те, що в ній флуктуації інтенсивності опорного лазера мало впливають на амплітуду вихідного сигналу. В оптичному відгалужувачі відбувається змішування прийнятої оптичної хвилі на вході 1 та оптичної хвилі опорного лазера на вході 2 демодулятора. У результаті змішування таких хвиль за допомогою оптичного відгалужувача за умови, що обидві хвилі є когерентними, плоскими, паралельними й мають однакову поляризацію, спостерігається явище інтерференції хвиль. З виходів оптичного відгалужувача змішана оптична хвиля надходить на фотодіоди 1 та 2.

Струми фотодіодів 1 і 2 є сигналами на виході фотодіодів, що містять інформацію про передане повідомлення. Фотодіоди працюють у лінійному режимі для забезпечення коректної амплітудно-фазової демодуляції оптичної хвилі. Диференційний лінійний підсилювач зі зворотним зв'язком дозволяє визначити різницю сигналів, одержаних із фотодіодів 1 і 2, забезпечити автоматичне регулювання підсилення різницевого сигналу, компенсацію температурного дрейфу й захист фотодіодів від перевантаження вхідними сигналами. Вихід підсилювача є виходом амплітудно-фазового демодулятора.

З виходів амплітудно-фазових демодуляторів 1, 2, 3 і 4 сигнали надходять на входи формувача двійкових даних, у якому такі сигнали використовують для формування потоку даних, після декодування якого відповідно до обраного методу завадостійкого кодування одержують двійкові дані для одержувача інформації.

Додатково необхідно зазначити, що в запропонованій схемі здійснюють автопідстроювання частоти й фази опорного лазера відносно прийнятої оптичної хвилі для забезпечення коректної амплітудно-фазової демодуляції. Для цього використовують сигнал із формувача двійкових даних, який через фільтр 2 нижніх частот і підсилювач 1 подають для підстроювання опорного лазера.

Отже, у запропонованій ВОСПІ в якості вхідних потоків амплітудно-фазових модуляторів використовують два потоки, наприклад, по 25 Гбіт/с (застосовуючи модулятори, описані у [3]) у режимі двополяризаційної БФМн (ДП БФМн), чотири потоки по 25 Гбіт/с у режимі ДП КФМн і чотири потоки по 50...87,5 Гбіт/с у режимі двополяризаційної КАМ (ДП КАМ). Можлива швидкість передавання інформації в запропонованій системі залежно від виду модуляції, одержана на основі проведених теоретичних розрахунків, наведена в таблиці.

### Швидкість передавання інформації в запропонованій ВОСПІ залежно від виду модуляції

Вид модуляції	ДП БФМн	ДП КФМн	ДП 16-КАМ	ДП 32-КАМ	ДП 64-КАМ	ДП 128-КАМ
Швидкість передавання, Гбіт/с	50	100	200	250	300	350

Отже, розроблені адаптивний метод та структурна схема ВОСПІ з використанням нового різновиду модуляції ДП КАМ, дозволяють забезпечити швидкість передавання інформації до 350 Гбіт/с, що в 3,5 раза більша, ніж при використанні модуляції ДП КФМн.

### Висновки

У роботі запропоновано адаптивний метод, що дає змогу підвищити ефективність ВОСПІ, змінюючи швидкість передавання інформації в оптичному середовищі за рахунок використання різновидів модуляції ортогонально-поляризованих складових оптичної хвилі, а також розроблено структурні схеми передавального та приймального пристроїв ВОСПІ, що дозволяє передавати інформацію зі швидкістю до 350 Гбіт/с.

1. <http://www.3dnews.ru/about/> 2. <http://www.ieee802.org/3/ba/> 3. 100G Ultra Long Haul DWDM. Framework Document / Optical Networking Forum / <http://www.oiforum.com>. 4. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999. – 672 с. 5. <http://www.shf.de/> 6. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – 2-е изд., испр.: Пер. с англ. – М.: Изд. дом “Вильямс”, 2004. – 1104 с.