

**ПОКРАЩЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ТРАКТІВ
НА ОСНОВІ КОМПЕНСАЦІЇ ХРОМАТИЧНОЇ ДИСПЕРСІЇ**

**УЛУЧШЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНЕЙНЫХ ТРАКТОВ
НА ОСНОВЕ КОМПЕНСАЦИИ ХРОМАТИЧЕСКОЙ ДИСПЕРСИИ**

**IMPROVEMENT OF PARAMETERS OF FIBER-OPTICAL LINEAR PATHES ON THE BASIS
OF INDEMNIFICATION OF THE CHROMATIC DISPERSION**

Анотація. Розглянуто шляхи створення моделей волоконно-оптичних лінійних трактів (ВОЛТ) з підвищеною пропускною здатністю на основі розробки методів широкопasmової компенсації хроматичної дисперсії і дисперсійних карт для ВОЛТ із самокомпенсацією дисперсії.

Аннотация. Рассмотрены пути создания моделей волоконно-оптических линейных трактов (ВОЛТ) с повышенной пропускной способностью на основе разработки методов широкопasmовой компенсации хроматической дисперсии и дисперсионных карт для ВОЛТ с самокомпенсацией дисперсии.

Summary. Ways of creation of models of fiber-optical linear pathes (FOLP) with the raised throughput on the basis of development of methods of broadband indemnification of a chromatic dispersion and dispersive maps for FOLP with self-indemnification of a dispersion are considered.

При передаванні по оптичному волокну цифрового сигналу у вигляді послідовності оптичних імпульсів останні зазнають спотворення – змінюється їхня ширина в часі, спотворюється їхня форма тощо. Це ускладнює відновлення імпульсів на приймальному кінці і збільшує рівень помилки в бітах, що є характеристикою якісної роботи волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) та призводить до зменшення довжини регенераційної ділянки і швидкості передавання. Хроматична дисперсія оптичного імпульсу в лінійному одномодовому оптичному волокні (ООВ) є ключовим фактором у вирішенні проблеми підвищення пропускної здатності ВОЛТ. З одного боку, довжина регенераційної ділянки обернено пропорційна величині питомої хроматичної дисперсії лінійного волокна і, за рахунок нарощування швидкості передавання TDM (Time Division Multiplexing)-сигналу в N разів, зменшується приблизно в N разів у випадку невисокої швидкості передавання та в N^2 разів – за високої швидкості, коли спектральна ширина оптичного імпульсу від передавача визначається ефективною шириною модуляції. Отже, дисперсія лінійного волокна має бути якомога меншою. Але за високої швидкості передавання для TDM-сигналу та у WDM (Wavelength Division Multiplexing)-системах мають місце нелінійні явища. Зокрема, у WDM-системах нелінійна взаємодія між окремими каналами досягає максимуму при нульовому коефіцієнті хроматичної дисперсії волокна, що може стати причиною підвищення коефіцієнта помилок при передачі сигналу. Тому DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing)-системи потребують лінійних оптичних волокон з компромісними дисперсійними характеристиками: дисперсія в робочому діапазоні хвиль повинна бути достатньо мала, але не дорівнювати нулю.

Таким чином, максимізація пропускної здатності ООВ та довжини регенераційної ділянки при забезпеченні високої якості роботи ВОСП на сучасному етапі досягаються добре відомими активними методами компенсації дисперсії сигналу – пристроями компенсації дисперсії чи групуванням оптичних кабелів на базі волокон з додатною і від'ємною дисперсією [1].

Однак, розробка методів широкопasmової пасивної компенсації дисперсії у ВОЛТ з організацією управління дисперсії в лінійному тракті ВОЛЗ ще не розроблені повною мірою.

Метою даної статті є віднайдення розгорнутих аналітичних виразів, що описують змінення тривалості і фази оптичного імпульсу за його руху по ООВ, що дозволить сформулювати основні принципи широкопasmової компенсації хроматичної дисперсії та принципи створення ВОЛТ із самокомпенсацією хроматичної дисперсії і наведеної нею частотної модуляції (ЧМ) імпульсу.

Розглянемо еволюцію поширюваного по ООВ оптичного імпульсу, утвореного суперпозицією плоских хвиль з неперервним спектром. Електричне поле імпульсу на вході у волокно подамо

змінною в часі t скалярною проекцією комплексного вектора напруженості на напрямок лінійної поляризації поля:

$$E(z, t)|_{t=0} = E(0, t) = a(t) \exp(i\omega_0 t), \quad (1)$$

де z – поздовжня вісь волокна, в напрямку якої поширюється імпульс;

$a(t)$ – обвідна імпульсу, що враховує амплітудну модуляцію носійної хвилі з частотою ω_0 .

Кожна спектральна складова імпульсу на шляху z її пробігу по волокну зазнає зменшення амплітуди згідно з коефіцієнтом погонних втрат оптичної потужності та набуває погонної фазової затримки $\tau_\phi(\omega) = 1/v_\phi(\omega) = 1/(\omega/\beta(\omega))$ відповідно до коефіцієнта фази $\beta(\omega)$ основної моди волокна. Нехай дисперсійна залежність $\beta = \beta(\omega)$ допускає розклад в ряд Тейлора в околі ω_0 і $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots$ – її похідні відповідного порядку, $v_\phi = \omega_0/\beta_0$ – фазова швидкість моди, обчислені на носійній частоті ω_0 . Обвідна імпульсу рухається уздовж осі z з груповою швидкістю v_{gp} хвильового пакета

$$v_{gp} = \frac{1}{\beta_1} = \left[\left(\frac{d\beta(\omega)}{d\omega} \right)_{\omega=\omega_0} \right]^{-1}. \quad (2)$$

При урахуванні в розкладі дисперсійної залежності $\beta(\omega)$ лише перших 3-х членів, змінення форми та фази імпульсу знаходяться в замкненій формі, зокрема, для вхідного імпульсу гауссової форми, що має обвідну

$$a(t) = \exp \left[-t^2 (1 + i\alpha) / (2T_0^2) \right], \quad \int_{-\infty}^{\infty} |a(t)|^2 dt = \sqrt{\pi} T_0, \quad (3)$$

де T_0 – напівширина імпульсу на рівні $e^{-1/2}$ його амплітуди;

$\alpha = \text{const}$, рад – параметр привнесеної лінійної ЧМ (ЛЧМ) вхідного імпульсу.

За фіксованого z відхилення від ω_0 миттєвої частоти вздовж імпульсу,

$$\Delta\omega(z, T) = d[\omega_0 t + \varphi(z, T)] / dt - \omega_0 = -T \left[\alpha - (1 + \alpha^2) \beta_2 z / T_0^2 \right] / T_1^2(z), \quad (4)$$

лінійно змінюється в часі від переднього фронту імпульсу ($T < 0$) до його заднього фронту, і для змінних величин параметра ЛЧМ та ширини імпульсу отримано, [2]:

$$\alpha_1(z) = \alpha - (1 + \alpha^2) \beta_2 z / T_0^2 = \pm \sqrt{(1 + \alpha^2) T_1^2(z) / T_0^2 - 1}, \quad (5)$$

$$T = t - z/v_{gp}, \quad T_1(z) = T_0 \sqrt{(1 - \alpha \beta_2 z / T_0^2)^2 + (\beta_2 z / T_0^2)^2}, \quad \sigma_t(z) = T_1(z) / \sqrt{2}, \quad (6)$$

де $T = t - z/v_{gp}$ – час у системі відліку, що рухається разом з імпульсом (який зберігає гауссову форму) із груповою швидкістю на центральній частоті ω_0 ;

$T_1(z)$ та $\sigma_t(z)$ – напівширина імпульсу на рівні $e^{-1/2}$ та середньоквадратичне значення тривалості імпульсу на шляху z його пробігу у волокну;

β_2 – дисперсія групових швидкостей,

$$\beta_2 = \left(\frac{d^2\beta(\omega)}{d\omega^2} \right)_{\omega=\omega_0} = \left[\frac{d\tau(\omega)}{d\omega} \right]_{\omega=\omega_0} = -\frac{1}{v_{gp}^2} \left[\frac{dv_{gp}(\omega)}{d\omega} \right]_{\omega=\omega_0}, \quad \text{пс}^2/\text{км}, \quad (7)$$

$\tau(\omega) = 1/v_{gp}(\omega)$, пс/км – погонна групова затримка спектральної складової імпульсу.

В аналогічний спосіб, при збереженні в розкладі дисперсійної залежності $\beta = \beta(\omega)$ в ряд Тейлора наступного члена ряду, здобудемо розгорнений вираз для середньоквадратичного значення $\sigma_{\Delta t}$ змінення тривалості імпульсу, з урахуванням дисперсії 2-го порядку, β_3 , а також і ширини спектра оптичного джерела, [3]:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta t}^2(L) &= \sigma_t(L)^2 - \sigma_{t0}^2 = D^2 L^2 (\sigma_\lambda^*)^2 + 2\alpha D L \sigma_{t0} \sigma_\lambda + L^2 (S + 2D/\lambda_0)^2 (\sigma_\lambda^*)^4 / 2 = \\ &= D^2 L^2 (\lambda_0^2 / c)^2 \sigma_v^{*2} + 2\alpha D L (\lambda_0^2 / (4\pi c)) + L^2 (S + 2D/\lambda_0)^2 (\lambda_0^2 / (4\pi c))^4 \sigma_v^{*4} / 2 \end{aligned} \quad (8)$$

де $\sigma_t(L)$ та $\sigma_{t0} = T_0/2^{1/2}$ – відповідно середньоквадратичні значення тривалості імпульсу на шляху L його пробігу у волокну та вхідного імпульсу;

$D, S = dD(\lambda)/d\lambda$ – відповідно коефіцієнт хроматичної дисперсії волокна і крутизна дисперсії на довжині λ_0 несучої хвилі, $\lambda_0 = 2\pi c/\omega_0 = c/v_0$ і v_0 – частота хвилі в герцах

$$D = -2\pi c\beta_2 / \lambda_0^2, \quad (9)$$

що пов'язані з дисперсією 2-го порядку формулою

$$\beta_3 = \left(\frac{d\beta_2(\omega)}{d\omega} \right)_{\omega=\omega_0} = \frac{\lambda_0^4}{(2\pi c)^2} \left(S + \frac{2D}{\lambda_0} \right), \text{ пс}^3/\text{км}; \quad (10)$$

σ_v^* (чи σ_λ^*) – середньоквадратичне значення ширини спектра вхідного імпульсу в герцах (чи в нанометрах), з урахуванням його додаткової ЧМ в оптичному передавачі, ефективної ширини модуляції σ_v , ширини δ_v спектра оптичного джерела,

$$\sigma_v^* = \sqrt{(1 + \alpha^2) / (4\pi\sigma_{t0})^2 + \delta_v^2}, \sigma_v = 1 / (4\pi\sigma_{t0}), \sigma_\lambda \approx (\lambda_0^2 / c)\sigma_v. \quad (11)$$

Із формул (5), (6) випливають умови самокомпенсації дисперсії і наведеної нею лінійної частотної модуляції імпульсу при проходженні ним пари волокон 1, 2 із дисперсією протилежних знаків, з урахуванням ЛЧМ імпульсу на вході. Згідно з виразами (4) при $\alpha = 0$ та (7), за додатного значення дисперсії D волокна ($\beta_2 < 0$) короткохвильовим складовим спектра імпульсу відповідають більші групові швидкості порівняно з довгохвильовими, тому після проходження по ОВ імпульсу (без початкової ЛЧМ) його спектр буде перегрупованим у такий спосіб, що на передньому фронті імпульсу будуть короткохвильові складові спектра (високочастотні), а на задньому фронті довгохвильові – імпульс набуде аномальної дисперсії. Наступне проходження розширеного імпульсу з перегрупованим у такий спосіб спектром по волокну з від'ємною дисперсією D призведе на початковому етапі до звуження імпульсу і зворотного перегруповання його спектра – на передньому фронті будуть міститися його довгохвильові складові, за подальшого проходження імпульсу по цьому волокну він знову розшириться. Чергуванням волокон з дисперсією протилежних знаків стає можливим досягнення самокомпенсації дисперсії у ВОЛТ.

За допомогою формул (5), (6) знайдено закон зміни параметра ЛЧМ імпульсу, $\alpha_1(z_2)$, залежно від величини z_2 його пробігу у волокну 2 та розгорнений вираз для змінення квадрата середньоквадратичного значення тривалості імпульсу на шляху z_2 пробігу по волокну 2, порівняно з його значенням на вході у волокно 1, [2]:

$$\alpha_1(z_2) = \alpha - (1 + \alpha^2)(\beta_{21}L_1 + \beta_{22}z_2) / T_0^2, \quad (12)$$

$$\sigma_{\Delta t}^2(z_2, L_0) = \sigma_t^2(z_2) - \sigma_t^2(L_0) = (1 + \alpha^2)(\beta_{21}L_1 + \beta_{22}z_2)^2 / (2T_0^2) - \alpha(\beta_{21}L_1 + \beta_{22}z_2). \quad (13)$$

Звідси випливає, що за умови

$$\beta_{21}L_1 = -\beta_{22}L_2 \Leftrightarrow D_{21}L_1 = -D_{22}L_2, \quad (14)$$

після проходження імпульсом пари волокон 1, 2 відновлюється як його форма на вході у волокно 1, так і початкове значення α -параметра ЛЧМ, тобто має місце самокомпенсація дисперсії і відновлення фази імпульсу; за наявності ЛЧМ вхідного імпульсу, відносно змінення його тривалості, (13), залежить від шляху пробігу вздовж кожного волокна нелінійно, на відміну від випадку, коли $\alpha = 0$. Зазначимо, що вирази (12), (13) отримуються із відповідних формул (5), (6) за формальної заміни $\beta_2 z$ на $(\beta_{21}L_1 + \beta_{22}z_2)$.

Здобуті результати уможливають більш коректні дослідження, пов'язані з розробкою ефективних методів ширококугової пасивної компенсації дисперсії у ВОЛТ та з організацією дисперсійного менеджменту при розробці дисперсійних карт (ДК) для високошвидкісних ВОСП – управління дисперсією в лінійному тракті ВОЛЗ дозволяє підвищити пропускну здатність ВОЛТ та створювати розгалужені мережі з великою протяжністю оптичного шляху без використання спеціальних пристроїв компенсації дисперсії, які потребують додаткових оптичних підсилювачів. ДК для ВОЛТ ВОЛЗ становлять собою чергування відрізків волокон з додатною і від'ємною дисперсією, підібраних у такий спосіб, щоб величини відносних нахилів їхньої дисперсії, S/D , були максимально близькими між собою в широкому діапазоні λ , а довжини і питомі дисперсії кожної пари послідовних волокон задовольняли умові (14) повної самокомпенсації дисперсії, – це забезпечує рівномірну компенсацію як дисперсії, так і наведеної нею ЛЧМ багатоканального сигналу.

Вирази (5), (8), що описують змінення фази та тривалості оптичного імпульсу за його руху по волокну, є базовими для розробки також і активного методу компенсації хроматичної дисперсії у ВОЛТ, з використанням граничних можливостей системи передачі – без застосування пасивних пристроїв її компенсації. Метод базується на використанні попередньої ЧМ імпульсу в оптичному

передавачі. При використанні лазерів з внутрішньою модуляцією, коли амплітудна модуляція застосовується безпосередньо до струму накачування лазера, може відбутися інтенсивне динамічне розширення спектра генерованого імпульсу, що супроводжується зміщенням у цілому короткохвильових (високочастотних) спектральних складових уздовж імпульсу до його переднього фронту, а довгохвильових (низькочастотних) складових – до заднього фронту. При цьому генеровані імпульси називаються імпульсами з додатним чірпом. Кількісно міра чірпування модульованого сигналу описується за допомогою α -параметра чірпа передавача:

$$\alpha = \frac{d\varphi}{dt} / \left(\frac{1}{2P} \frac{dP}{dt} \right), \quad (15)$$

де φ і $d\varphi/dt$ – фаза імпульсу відносно значення $\omega_0 t$ і відповідно відхилення миттєвої частоти вздовж імпульсу від його середньої частоти, ω_0 ;

P – потужність оптичного випромінювання вздовж імпульсу, Вт;

α – параметр ЧМ імпульсу, рад.

За зовнішньої модуляції лазерного випромінювання можливі значення α -параметра ЧМ належать діапазону від мінус 1 до 1 радіана, а знак та величина чірпа можуть бути регульованими; при внутрішній модуляції α може сягати значно більших і лише додатних значень, від 10 до 100 радіан. Якщо початковий імпульс зазнає в передавачі додаткової ЧМ із зсувом у часі його спектральних складових, протилежних за характером їхньому зсуву, що наводиться хроматичною дисперсією в даному волокні, то спільна дія цих ефектів може призвести до компенсації дисперсії, подібно тому, як це відбувається за проходження імпульсу через послідовні ділянки волокон з дисперсією протилежних знаків.

Отримана формула (8) дозволяє розробити узагальнену математичну модель розрахунку обмеженої хроматичною дисперсією дистанції передавання та активний метод компенсації дисперсії в ОЛТ. При розробці алгоритму розрахунку використаємо системний параметр "епсілон". Як вказано в Рекомендації ІТУ–Т Rec.G.957, [4], для спричиненого дисперсією погіршення оптичного сигналу (за потужністю) після проходження ним ОЛТ, існує верхня межа, за даного коефіцієнта BER (Bit error ratio) помилок в приймачі. Вона має місце, коли максимальне розширення імпульсу стає рівним певній частині $\varepsilon < 1$ тактового інтервалу NRZ-імпульсу, $(\sigma_{\Delta t}(L))_{\max} = \varepsilon / B$, де B – швидкість передавання бітів. Величина ε залежить від використовуваних на практиці системних параметрів.

За лінійного кодування RZ вхідний імпульс має тривалість f/B , яка складає певну частину тривалості NRZ-імпульсу, де $f < 1$ – імпульсний коефіцієнт. Оскільки реальні імпульси відрізняються від імпульсів гауссової форми, в інженерних розрахунках вводять формпараметр N : середньоквадратичне значення тривалості вхідного імпульсу N разів розміщується на часовому проміжку робочого циклу, $N\sigma_{t,0} = f/B$. Наприклад, робочий цикл f/B містить: при $N = 4$ – 95,4 % потужності гауссового імпульсу, при $N = 2\sqrt{3} \approx 3,46$ – всю потужність імпульсу прямокутної форми.

Підставивши $\sigma_{t,0} = f/(BN)$ і максимальне розширення імпульсу, ε/B , у вираз (8), отримаємо співвідношення між швидкістю передавання, шириною спектра оптичного джерела та дистанцією передавання, величини яких обмежує хроматична дисперсія. Розв'язавши це співвідношення як рівняння відносно величини $|D|L$, отримаємо узагальнену формулу розрахунку дистанції передавання, що враховує ширину δ_v спектра оптичного джерела і ширину смуги модуляції (посередньо величини $NB/(4\pi f)$), додаткову ЧМ імпульсу в передавачі, формфактор N та імпульсний коефіцієнт f і величину системного параметра ε (за нехтування дисперсією 2-го порядку):

$$L \cdot |D| = \frac{15,68076 \cdot 10^5 \cdot (\varepsilon / B)^2 \cdot (1,55 / \lambda_0)^2}{\pm \alpha + \sqrt{\left[\delta_v^2 + (1 + \alpha^2) \left(NB / (4\pi f) \right)^2 \right] (4\pi \varepsilon / B)^2 + \alpha^2}}, \text{ пс/нм}, \quad (16)$$

де B та δ_v – в ГГц; значення $15,68076 \cdot 10^5$ в км/(мкм²·с); величина λ_0 в мкм.

За результатами аналізу проведених розрахунків виявлено існування оптимального значення параметра α чірпа імпульсу в оптичному передавачі, за якого досягається максимальна довжина лінійного тракту між передавачем та приймачем. Ефект активної компенсації дисперсії в ОЛТ за рахунок попередньої ЧМ імпульсу в оптичному передавачі може мати місце лише за умови $\alpha \cdot D < 0$. Отже, у випадку ВОЛТ на найпоширенішому стандартному ООВ (категорії G.652), за використання

оптичного передавача з прямою модуляцією оптичного джерела, коли α -параметр має лише додатне значення, активна компенсація дисперсії в околі довжини хвилі $\lambda = 1,55$ нм – неможлива, оскільки типові значення коефіцієнта D дисперсії волокна на цій довжині хвилі також є додатним і становить ≈ 17 пс/(нм·км); за високого додатного α суттєво зменшується обмежена дисперсією дистанція передачі порівняно з її розрахунком при нехтуванні привнесеною в оптичному передавачі частотною модуляцією імпульсу – це може призвести до суттєвого помилкового перевищення проектних величин дистанцій, швидкості передавання і ширини спектра оптичного джерела. Наприклад, у випадку лазера із внутрішньою модуляцією, що має на несучій хвилі 1,55 мкм ширину спектра $\Gamma_v \approx 6,0697\delta_v = 125$ ГГц і величину параметра ЧМ $\alpha = +10$ рад, та лінійного стандартного ООВ з коефіцієнтом дисперсії $D \approx 17$ пс/(нм·км), за передачі цифрового сигналу NRZ (Non Return to Zero)-формату зі швидкістю $B = 2,5$ Гбіт/с, розрахункове значення максимальної дистанції передавання за розробленою формулою (16) складає $L \approx 30,4$ км ($N = 4, f = 1, \varepsilon = 0,306$); натомість, нехтування наявною ЧМ імпульсу в передавачі призводить до завищення в $\approx 1,4$ рази розрахункового значення обмеженою дисперсією дистанції передавання.

Оптимальний вибір типу лінійного волокна та оптичного передавача з відповідними значеннями ширини спектра оптичного джерела і параметра попередньої ЧМ вхідного імпульсу, за яких досягається максимальна довжина лінійного тракту, доцільно проводити з урахуванням аналізу розрахунків на базі узагальненої формули (16), який показує зростання значення $|D|L$ (за збереження всіх інших параметрів розрахунку): приблизно в 2-3 рази, за крайніх можливих значень α -параметра ЧМ при переході величини $\alpha \cdot \text{sign}(D)$ від +1 до мінус 1 рад (зовнішня модуляція оптичного джерела); приблизно в 1,2-1,4 рази за оптимального значення α -параметра ЧМ порівняно із випадком його нульового значення. Для прикладу, за швидкості передавання 10 Гбіт/с ($\lambda = 1550$ нм, $\Gamma_v \approx 0$), довжину ОЛТ на стандартному ООВ, обмежену за дисперсією величиною близько 60 км (при $\alpha \approx 0$), використанням SML (submonolayer)-лазера з від'ємним значенням параметра ЛЧМ, $\alpha \approx -0,63$, близьким до оптимального, можна збільшити \approx до 86 км.

У висновку зауважимо що, на основі віднайдених формул для опису динаміки оптичного імпульсу при його русі по ООВ та розробленого узагальненого алгоритму розрахунку обмеженої хроматичною дисперсією дистанції передавання, запропоновано способи створення моделей ВОЛТ з підвищеною пропускнуою здатністю. Впровадження здобутих результатів слугуватиме поглибленому розумінню фахівцями реальних процесів, що виникають за експлуатації ВОЛЗ, та сприятиме вирішенню задачі підвищення пропускнуої здатності ВОЛТ, за створення нових й удосконалення існуючих високошвидкісних ліній зв'язку.

Література

1. *Волоконно-оптические кабели*. Теоретические основы, конструирование и расчет, технология производства и эксплуатация: [монография] / [Иоргачев Д.В., Бондаренко О.В., Дашенко А.Ф., Усов А.В.]. – Одесса: Астропринт, 2000. – 536 с. – ISBN 966-549-542-9.
2. *Каток В.Б.* Аналіз оптичних лінійних трактів із компенсацією хроматичної дисперсії / В.Б. Каток, Н.В. Омецинська // Зв'язок. – 2007. – Вип. № 5. – С. 13 – 20.
3. *Агравал Г.* Нелинейная волоконная оптика; пер. с англ.; под ред. П. В. Мамышева. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
4. *Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy*. ITU-T Recommendation G.957. – 2006.