Особливості розповсюдження світла в оптичному волокні.
Розділ1 . Дисперсія інформаційного сигналу.

Одним із найважливіших фундаментальних процесів, який негативно впливає інформаційні можливості оптичного каналу зв'язку являється дисперсія. В оптиці поняття дисперсії пов'язується, як правило, з залежністю показника заломлення оптичного середовища від довжини хвилі, або частоти оптичного випромінювання. В волоконній оптиці на це явище дивляться значно ширше , з практичної сторони. Оскільки основною задачею цифрового оптичного каналу зв'язку є передача цифрової послідовності без спотворень, а точніше, щоб на приймальному вузлі ВОЛЗ біт інформації був прийнятий тим же бітом, що й на вході. Під дисперсією інформаційного сигналу у ВОЛЗ розуміють всі явища, що призводять до уширення біта в цифровій послідовності і, як наслідок, пи певній максимальній швидкості передачі призводять до неможливості його ідентифікації. Явище дисперсії є основним негативним чинником, що обмежує максимальну швидкість передачі інформаційного сигналу.

Людина сприймає лише аналоговий тип інформації. Нагадаємо основні принципи перетворення аналогового сигналу в бітову послідовність. Будь-який стандартизований аналоговий сигнал (телефонний, телевізійний , радіо) характеризується такими нормативними параметрами як смуга частот $\Delta f[Гц]$ та динамічний діапазон. Останній характеризується величиною відношення амплітуди сигналу A_s до амплітуди шуму A_n. Як правило, цей параметр визначається в децибелах $X[дб]=20Lg(A_s/A_n)$.

Згідно теореми Котельнікова для повного інформаційного відтворення в цифровій формі аналогового сигналу частота його дискретизації повинна задовольняти умові: $f_d \geq 2\Delta f$. Враховуючи цю умову та динамічний діапазон аналогового сигналу, аналітичний вираз теореми Котельнікова виглядає наступним чином:

$$B[біт/сек] = 2\Delta f \log_2 (1+(\frac{A_s}{A_n})^2]^{\frac{1}{2}} = \Delta f \log_2 [1+(\frac{A_s}{A_n})^2]; \qquad (1)$$

На практиці зручно користуватися інженерним варіантом цієї формули.

$$B[біт/сек] = 0{,}332X[дб]\cdot\Delta f[Гц]. \qquad (2)$$

Формули (1) та (2) необхідно розуміти так: для передачі без втрати інформації аналогового сигналу, що займає смугу частот Δf та має динамічний діапазон $X[дб]$ в цифровій формі, треба забезпечити швидкість передачі бітових імпульсів $B[біт/сек]$.

Приклад:

1) Телефонний стандарт аналогового сигналу займає смугу частот $\Delta f_{Тф} \approx 3.3кГц$ та повинен мати динамічний діапазон $X \approx 30дб$. Підставляючи ці параметри в (2), отримаємо:

$$B_{тф}[біт/сек] = 0{,}332 \cdot 30 \cdot 3300 \approx 33 Кбіт/сек .$$

На практиці прийнята інша швидкість дискретизації цього аналогового стандарту. Телефонний сигнал дискретизується з частотою 8 кГц, а не 6 кГц. Це відповідає інтервалу дискретизації 125 мксек. Кожна виборка кодується 8 розрядним словом. Таким чином , нормована швидкість передачі в цифровому форматі аналогового телефонного сигналу є

$$B_{тф} = 64\,Кбіт/сек.$$

Цій швидкості кратні всі вищі по ієрархії формати цифрової передачі інформаційного сигналу.

2) Повний телевізійний сигнал при 625 строках черезстрокової розгортки займає смугу частот Δf=6.0 МГц. Для реалізації нормального зображення необхідно реалізувати динамічний діапазон TV сигналу не менше 50 дб.

$$B_{TV} = 0{,}332 \cdot \ 50 \cdot 6 \cdot 10^6 = 99.6 Мбіт/сек$$

Телевізійний стандарт швидкості передачі TV сигналу значно менший $B_{TV} = 68 Мбіт/сек.$ Чому? При створенні цифрового формату TV сигналу використовується той факт, що суміжні TV кадри часто майже не відрізняються один від одного. Немає сенсу повністю оцифровувати кожний кадр телевізійного сигналу. Таким чином теорема Котельнікова має суто рекомендаційний, якісний характер. У кожному конкретному випадку швидкість B вибирається з практичних, реальних міркувань.

Таким чином, в волоконній оптиці інформаційним сигналом вважається бітовий оптичний імпульс тривалістю τ_s, що передається з швидкістю $B\,[біт/сек]$, або з частотою $F[Мгц]$ (Рис.1)

Саме цей бітовий імпульс має бути переданий по оптичній лінії передачі без спотворень. Спотворення як амплітудні так і частотні можуть бути і вони є, але вони не повинні призвести до втрати бітовим імпульсом його інформаційної суті (нуль має бути нулем, а одиниця – одиницею).

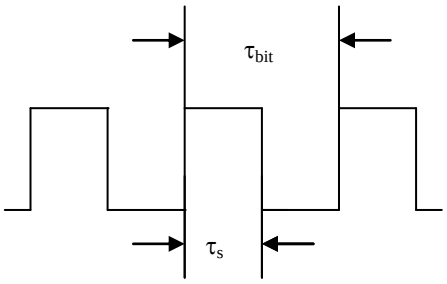


Рис.1 Послідовність бітових імпульсів.

Кожна оптична лінія передачі характеризується максимально можливою швидкістю передачі $B\,[біт/сек]$ бітових імпульсів на певній довжині цієї лінії без спотворень. Ця швидкість обмежується уширенням бітового імпульсу, яке визначається наступним чином: $\tau_{dis}^2 = \sqrt{\tau_{out}^2 - \tau_{in}^2}$. Для характеристики

можливостей інформаційної лінії вводять параметр-ширину смуги пропускання $W[Мгц \cdot км]$.

$$W = f \cdot l[Мгц \cdot км] \qquad (2)$$

Фізичний зміст цього параметра: f - максимальна частота модуляції оптичної несучої на довжині лінії передачі в один кілометр. Якщо уширення на цій довжині лінії вважати шириною деякого імпульсу $\tau_{dis} = \tau_s$, то максимальну частоту модуляції f можна ввести наступним чином: $f = 1/\tau_{bit} = 1/2\tau_{dis} = 0.5/\tau_{dis}$. Таким чином, надалі для ширини смуги пропускання будемо користуватися виразом:

$$W = \frac{0.5 \cdot l}{\tau_{dis}}[Мгц \cdot км]. \qquad (3)$$

В цьому виразі довжина лінії передачі l **завжди дорівнює одному кілометру.**

Ми пов'язали ширину смуги пропускання з шириною імпульсу. Поняття ширини імпульсу не є однозначним. Вона залежить від форми імпульсу

Для імпульсу гаусової форми (таку форму мають більшість оптичних випромінювачів в оптоелектроніці) користуються при розрахунках смуги пропускання формулою

$$W = 0{,}44/\tau_{dis}[МГц \cdot км] \qquad (4)$$

Означимо основні фізичні явища, які призводять до уширення (дисперсії) інформаційного сигналу (Рис.2).

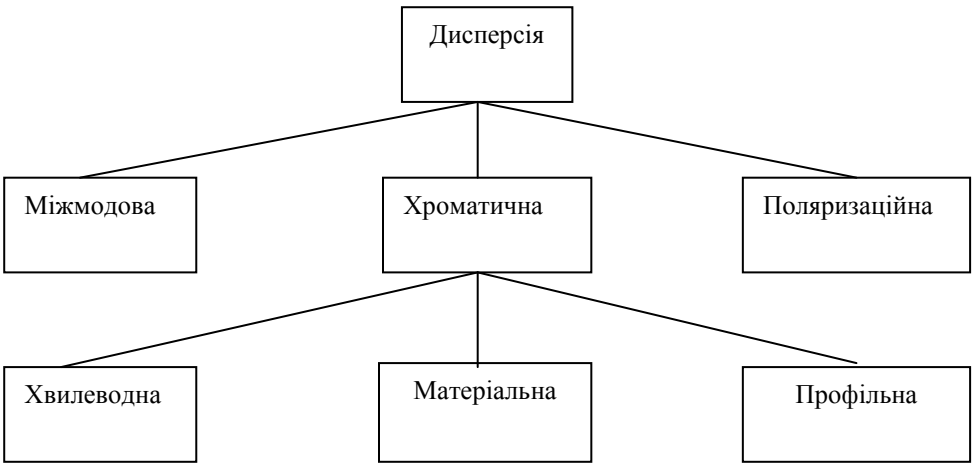


Рис.2 Основні джерела уширення інформаційного сигналу.

Найбільш спотворюючим (уширюючим) дисперсійним явищем являється міжмодова дисперсія. З самої назви, що вона має місце у випадку розповсюдження у хвилеводній структурі декількох оптичних мод. Розглянемо типовий багатомодовий ступінчатий оптичний волоконний світловод

Серцевина і оболонка такого волокна (і всіх інших типів) виготовляється з кварцового скла. Оболонка – з чистого кварцу, а серцевина - з кварцю, легованого іншими матеріалами. Наприклад, барієм, германієм, або фтором. Технологія виготовлення оптичного волокна буде розглянута у відповідному розділі. Типові параметри такого волокна: 2a=50 мкм, Δn = 0,01, n=1,5.

Підрахуємо кількість хвилеводних мод, що збуджуються в такому волокні на довжині хвилі λ=1,3 мкм.

$$V_{MMF} = \frac{2\pi}{\lambda} a\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx \frac{2\pi}{\lambda}(2n\Delta n)^{1/2} = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot (2 \cdot 1{,}5 \cdot 0{,}01)^{1/2}}{1{,}3} \approx 20$$

$$N_m = \frac{V^2}{2} \sim \frac{20^2}{2} \sim 200 \, мод$$

Таким чином, в багатомодовому волокні збуджується величезна кількість оптичних мод, які рухаються з різною фазовою швидкістю. Для оцінки міжмодової дисперсії досить розглянути лише дві крайні моди: найшвидшу і найповільнішу.

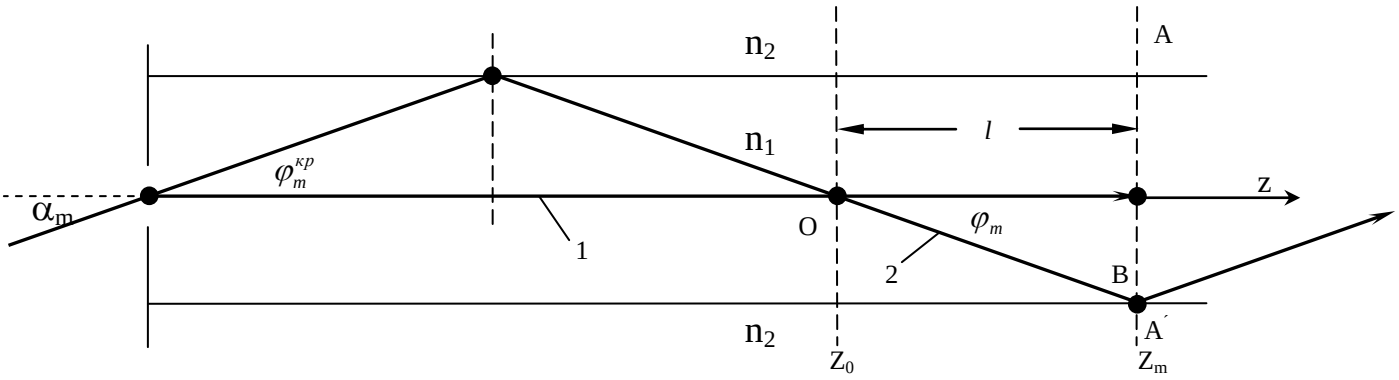


Рис. 2 Утворення міжмодової дисперсії в багатомодовому волокні.

Весь спектр хвилеводних мод лежить між осьовою модою та модою, що утворюється при граничному куті $\varphi_m = \arccos(n_2 / n_1)$.

Звичайно обидві моди по матеріалу волокна розповсюджується з однією фазовою швидкістю $v_ф = \frac{c}{n_1}$. Розглянемо час, коли ці моди перетинають переріз AA’ хвилеводу при русі з точки O. З цієї точки обидві моди стартують одночасно. Відстань OO’= l осева, основна мода проходить за час $t_0 = \frac{l}{v_ф} = \frac{l \cdot n_1}{c}$, крайня мода високого порядку з конуса числової структури перетинає переріз AA’ в момент часу $t_m = \frac{OB}{v_ф} = \frac{l \cdot n_1}{\cos\varphi_m \cdot c} = \frac{n_1^2 \cdot l}{n_2 \cdot c}$. Таким чином промені, введені в

оптичне волокно одночасно, на виході будуть спостерігатися впродовж часу $\tau_{dis}^{MMF}(l) = t_m - t_0$

$$\tau_{dis}^{MMF}(l) = \frac{l \cdot n_1}{c} - \frac{l \cdot n_1^2}{n_2 \cdot c} = \frac{l \cdot n_1}{c}(1 - \frac{n_1}{n_2}) = \frac{l \cdot n_1}{c \cdot n_2}(n_1 - n_2) = \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{l}{c} \cdot \Delta n .$$

Таким чином, світловий імпульс, утворений групою мод буде розмитий в часі при проходженні відстані *l* на величину, що визначається виразом:

$$\frac{\tau_{dis}^{MMF}(l)}{l} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{\Delta n}{c} [\frac{мксек}{км}] \qquad (6)$$

Це уширення (6) відомо як міжмодова дисперсія. Оцінимо величину розпливання імпульсу внаслідок міжмодової дисперсії:

$$\frac{\tau_{dis}^{MMF}(l)}{l} \approx \frac{\Delta n}{c} = \frac{0{,}01}{3 \cdot 10^5 \frac{км}{сек}} = 34 \cdot 10^{-9} \frac{сек}{км} = 34 [\frac{мксек}{км}]$$

Оцінимо її вплив на інформаційні можливості каналу зв'язку, побудованого на такому волокні. Згідно виразу (4) смуга пропускання такого каналу зв'язку визначається виразом:

$$W \approx \frac{c}{2\Delta n} [МГц \cdot км] \qquad (7)$$

Для типового ступінчатого багатомодового волокна смуга пропускання -

$$W_{MMF}^{step} = \frac{c}{2\Delta n} = \frac{3 \cdot 10^5 \frac{км}{сек}}{2 \cdot 0{,}01} = 1{,}5 \cdot 10^{7} \frac{км}{сек} = 15 [МГц.км]$$

Така смуга дає можливість передавати на відстані в один кілометр більше двох сотень телефонних каналів і жодного телевізійного каналу. Таким чином, інформаційні можливості багатомодового ступінчатого хвилеводу вкрай обмежені. Таке волокно тепер не використовують в телекомунікаційних мережах. Перші спроби створення надширокосмугової оптичної лінії зв'язку були дуже невтішні. Як подолати цей фундаментальний бар'єр? Як було зазначено вище, при нормованій частоті V<2,405 реалізується одномодовий режим розповсюдження світла в волокні, для якого міжмодова дисперсія відсутня. Теоретики знали про цей факт дуже давно, але технології виготовлення волокна з серцевиною d=2a ≤10 мкм на той час ще не існувало. Фізики теоретики запропонували реалізувати оригінальну ідею, а саме: створити волокно з градієнтом показника заломлення по серцевині (рис.3б).

В такому волокні основна мода, що розповсюджується по осі хвилеводу є найбільш повільною, оскільки в центрі серцевини найбільша величина показника заломлення. Найбільш швидка мода тепер реалізується при $\varphi = \varphi_m$. Наявність градієнту показника заломлення призводить до того, що міжмодова дисперсія не накопичується з відстанню, а в деякому перерізі волокна компенсується до нуля і далі картина періодично повторюється, як це показано на рис.3б. Профіль показника заломлення в градієнтному багатомодовому волокні, як правило, параболічний.

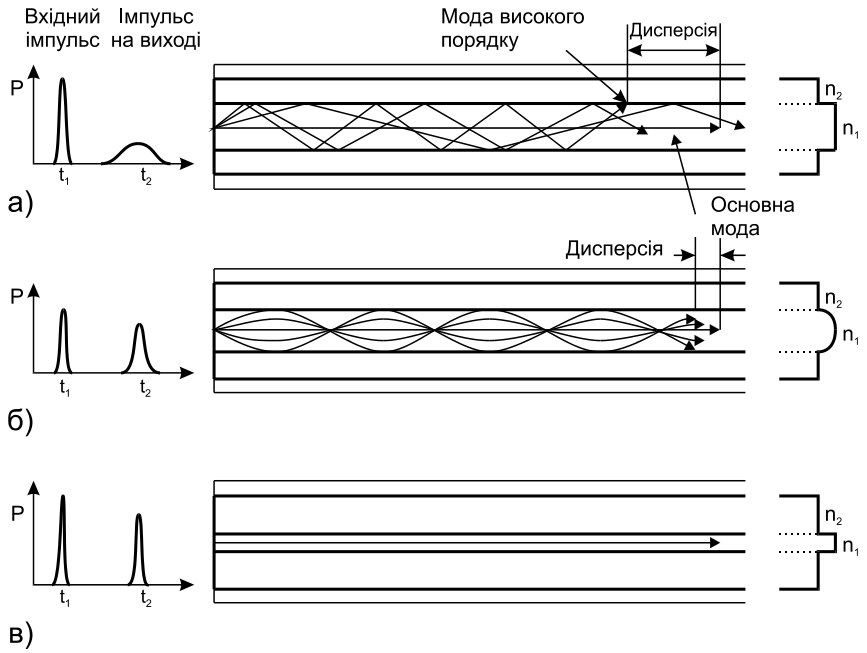


Рис.3. Поширення світла вздовж волокон різних типів:
а) багатомодовому східчастому, б) багатомодовому градієнтному,
в) одномодовому східчастому волокну

У багатомодовому градієнтному волокні смуга пропускання в діапазоні λ = 1300 нм W > 200 [МГц км], що більше ніж на порядок перевищує смугу пропускання східчастого багатомодового волокна. Таке волокно широко застосовується в локальних, абонентських та непротяжних комунікаційних мережах. Його позначають в довідниках абревіатурою MMF (multymode fiber)