Tema que se va a presentar

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

BLOQUE	*TÍTULO*
Tema 0	Introducción a las Comunicaciones Ópticas
BLOQUE I	La transmisión de información por enlaces básicos de comunicación por fibra óptica
I.1.-	Generación de la portadora: fuentes de luz
I.2.-	Modulación de la portadora óptica con la información
I.3.-	Multiplexación de varias fuentes de información
I.4.-	Transmisión de información por la fibra óptica
I.5.-	La detección de la información: receptores ópticos
I.6.-	Componentes activos y pasivos

Tema que se va a presentar

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

BLOQUE	*I.4 Transmisión de información por fibra óptica*
Objetivos	Se pretende que el alumno: • Sepa cuáles son los parámetros que caracterizan a una fibra óptica. • Entienda las ventajas y limitaciones de este tipo de guía. • Conozca las ventanas de transmisión y sepa por qué se utiliza cada una. • Identifique los factores que influyen en la dispersión y cómo afecta la fuente empleada. • Comprenda la no-linealidad del sistema y explique la diferencia en este sentido entre sistemas eléctricos y ópticos. • Sepa cuáles son los efectos no-lineales más perjudiciales. • Sea capaz de enumerar los distintos tipos de fibras ópticas y elegir la idónea para cada tipo de aplicación. • Pueda describir los procesos en la industria de manufactura y cableado de f.o. • Diferencie los conectores empleados para la conexión de f.o. y sepa cómo se hace y cómo se caracteriza una unión de fibras.
Duración	10 horas
Programa	**Tema I.4.1: Características y atenuación en fibras ópticas** **Tema I.4.2: Propagación lineal de señales por la fibra óptica** Atenuación, dispersión **Tema I.4.3: Propagación no lineal de señales por fibra óptica** SPM, XPM, FWM, SBS, SRS **Tema I.4.4: Amplificación y compensación de dispersión** **Tema I.4.5: Aspectos comerciales y tecnológicos** Fabricación, cableado, conexiones, oferta comercial **Resumen y conclusiones**

Índice

- Introducción: Modos en fibra óptica
- Dispersión intermodal
- Dispersión cromática
- Dispersión por modo de polarización
- Resumen y conclusiones

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

- Análisis basado en teoría electromagnética
  - Para analizar la propagación en una fibra monomodo la aproximación de teoría de rayos **no sirve**. Se necesita una herramienta más potente para el análisis de los modos que se propagan en la estructura guiaonda dieléctrica.
  - Como en todas las guías electromagnéticas, cada modo que se propaga por la fo., más que por el rayo asociado, viene caracterizado completamente por un **patrón de variación espacial** en el plano transversal a la dirección de propagación y por una **constante de propagación**
  - Esta información se obtiene a partir de la solución de la guiaonda circular dieléctrica mediante **Teoría Electromagnética**, es decir, resolviendo las ecuaciones de Maxwell para la geometría concreta de la fibra óptica

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Proceso de análisis con TE de fibra de salto de índice

El punto de partida son las ecuaciones de Maxwell

$$\nabla x E = -\frac{\partial B}{\partial t} \qquad \nabla x H = \frac{\partial D}{\partial t} \qquad D = \varepsilon_0 E + P$$

$$\nabla . D = 0 \qquad \nabla . B = 0 \qquad B = \mu_0 H + M$$

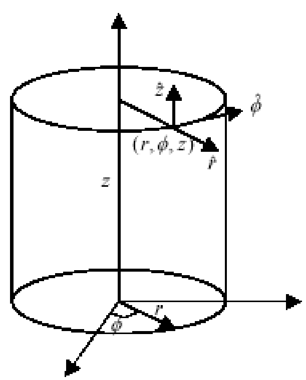
En un material homogéneo (índice de refracción de constante) resultan en la ecuación de Hemholtz

$$\nabla^2 \tilde{E} + \varepsilon(\bar{r}, w)\frac{w^2}{c^2}\tilde{E} = 0$$

Ha de cumplirse tanto en el núcleo como en la cubierta

La solución (distribución transversal de potencia) y constante de propagación se obtiene resolviendo ec. Hemholtz en núcleo y en cubierta e imponiendo las condiciones de contorno en la interfaz de separación (Fresnel)

Se descompone el campo en las componentes según coordenadas cilíndricas y se impone que el campo se propague a lo largo del eje axial, z. Se usa separación de variables



$$\tilde{E}(r,\theta,z) = \tilde{E}_r(r,\theta,z)\hat{r} + \tilde{E}_\theta(r,\theta,z)\hat{\theta} + \tilde{E}_z(r,\theta,z)\hat{z}$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{E}_z(r,\theta,z) \\ \tilde{H}_z(r,\theta,z) \end{bmatrix} = \psi(r) e^{\pm jl\theta} e^{-j\beta z}$$

$$\beta = \frac{\omega}{v} = k_0 n_{eff}$$

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

La solución exacta de la propagación en una fibra de salto de índice es, en general, muy compleja y da lugar a modos híbridos (HE y EH), en los cuales ninguna de sus componentes vectoriales es nula.

Forma de los campos

Núcleo:

$$E_z(\bar{r},t) = AJ_l(hr)e^{jl\theta}e^{j(wt-\beta z)}$$

$$H_z(\bar{r},t) = BJ_l(hr)e^{jl\theta}e^{j(wt-\beta z)}$$

Cubierta:

$$E_z(\bar{r},t) = CK_l(hr)e^{jl\theta}e^{j(wt-\beta z)}$$

$$H_z(\bar{r},t) = DK_l(hr)e^{jl\theta}e^{j(wt-\beta z)}$$

Por la simetría cilíndrica la dependencia con la posición radial sigue las funciones de Bessel

Oscilatoria en el núcleo y evanescente en la cubierta, siempre que

$k_o n_{cl} < \beta < k_o n_{co}$ *(modos guiados)*

A,B,C,D y β se determinan aplicando las condiciones de contorno, que exigen la continuidad de los campos tangenciales en r=a.

Constante de propagación

Ecuación característica, cuya solución permite conocer β

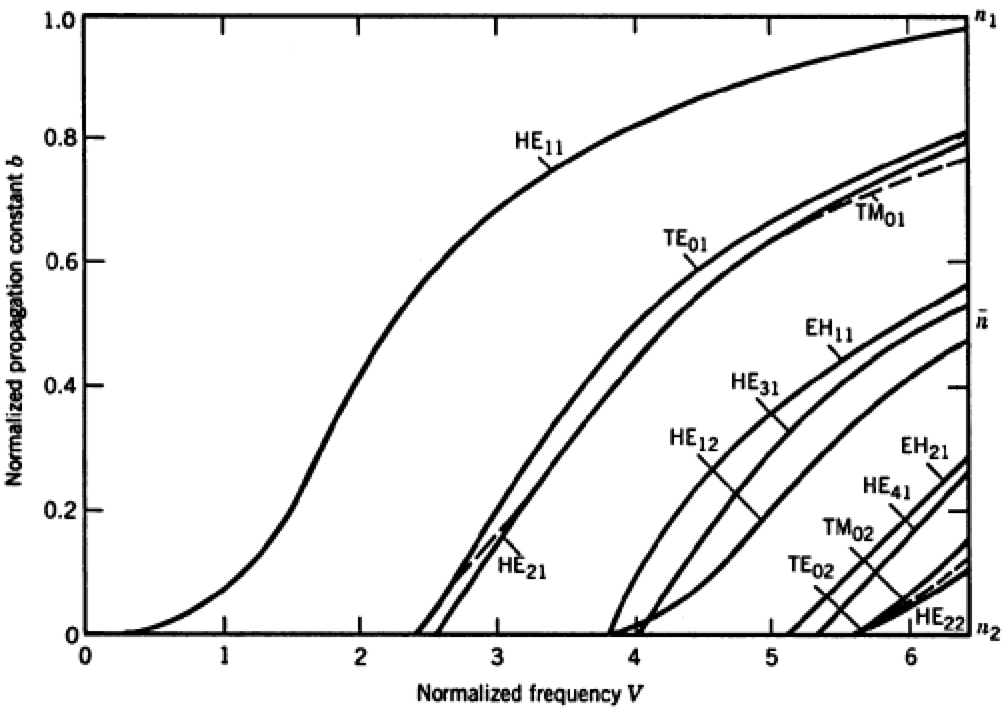
$$\left[\frac{J_l'(ha)}{hJ_l(ha)} + \frac{K_l'(qa)}{qK_l(qa)}\right]\cdot\left[\frac{n_1^2}{h}\frac{J_l'(ha)}{J_l(ha)} + \frac{n_2^2}{q}\frac{K_l'(qa)}{K_l(qa)}\right] = \left(\frac{l\beta}{k_o}\right)^2\left[\left(\frac{1}{qa}\right)^2 + \left(\frac{1}{ha}\right)^2\right]$$

$$q = \sqrt{\beta^2 - \left(\frac{n_2 w}{c}\right)^2} \qquad h = \sqrt{\left(\frac{n_1 w}{c}\right)^2 - \beta^2}$$

Para resolver la ecuación característica de forma general (independiente de las dimensiones e índices de refracción), se definen los siguientes parámetros

Frecuencia normalizada, *V*
$$V=\frac{2\pi a}{\lambda}\sqrt{n_1^2-n_2^2}$$

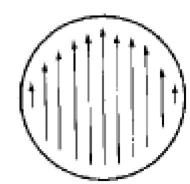
Cte propagación normalizada, *b*
$$b=\frac{n_{eff}-n_2}{n_1-n_2}=\frac{\beta/k_o-n_2}{n_1-n_2}$$



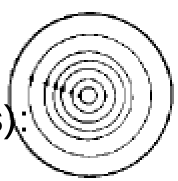
El guiado se produce si

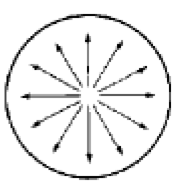
$$\frac{n_2 w}{c}=n_2 k_0\le\beta\le n_1 k_0=\frac{n_1 w}{c}$$

HE11:Modo ftal: siempre se propaga

HE$_{11}$


Siguientes modos (casi-degenerados): se propagan si V>2.405


TE$_{01}$


TM$_{01}$


HE$_{21}$

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Como acaba de verse, en general, en una fibra óptica se propagan modos híbridos HE, con componente no nula en la dirección de propagación

Sin embargo, $0.1\% < \Delta < 1\%$ $\quad n_1 \approx n_2$

APROXIMACIÓN DE GUIADO DÉBIL

Modos linealmente polarizados o *LP*

Sólo poseen una componente de campo eléctrico y otra de campo magnético no nula

Existen varios modos exactos con la misma cte. de propagación (degenerados) que se agrupan en modos aproximados LP

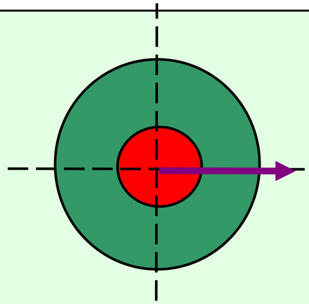
La aproximación asume que ni el campo eléctrico ni el campo magnético tienen componente en la dirección de propagación: MODOS TEM

Ing. Telec., CC.OO.: tx. por fibra óptica
Análisis con aproximación de guiado débil

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Forma de los campos

Polarizado en x



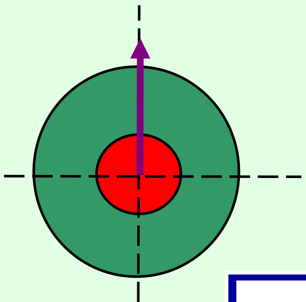
NÚCLEO

$$E = \begin{cases} E_x = AJ_l(hr)e^{jl\theta}e^{j(wt-\beta z)} \\ E_y = 0 \\ E_z \approx 0 \end{cases}$$

CUBIERTA

$$E = \begin{cases} E_x = BK_l(qr)e^{jl\theta}e^{j(wt-\beta z)} \\ E_y = 0 \\ E_z \approx 0 \end{cases}$$

Polarizado en y



$$E = \begin{cases} E_x = 0 \\ E_y = AJ_l(hr)e^{jl\theta}e^{j(wt-\beta z)} \\ E_z = 0 \end{cases}$$

$$E = \begin{cases} E_x = 0 \\ E_y = BK_l(qr)e^{jl\theta}e^{j(wt-\beta z)} \\ E_z \approx 0 \end{cases}$$

Oscilatoria en el núcleo y evanescente en la cubierta, siempre que

$k_o n_{cl} < \beta < k_o n_{co}$ *(modos guiados)*

A,B, y β se determinan aplicando las condiciones de contorno, que exigen la continuidad de los campos tangenciales en r=a.

Constante de propagación

Ecuación característica, cuya solución permite conocer β

$$ha\frac{J_{l-1}(ha)}{J_l(ha)} = -qa\frac{K_{l-1}(qa)}{K_l(qa)}$$

$$q = \sqrt{\beta^2 - \left(\frac{n_2 w}{c}\right)^2} \qquad h = \sqrt{\left(\frac{n_1 w}{c}\right)^2 - \beta^2}$$

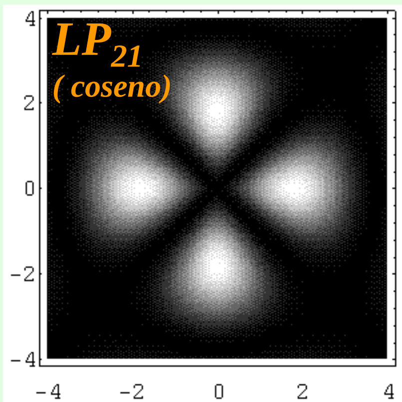
M.J. Erro
U.Púb.Navarra

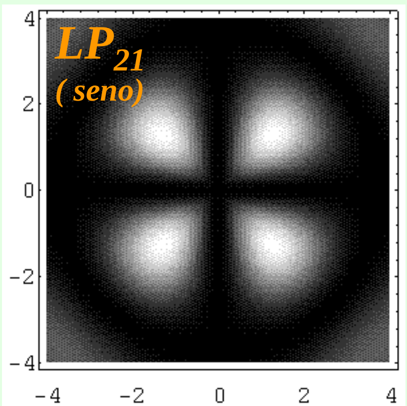
Los modos se denominan **LP** o ***linealmente polarizados***. El patrón de cada modo se identifica mediante una pareja de números enteros (m,n) que caracterizan la variación radial y acimutal.

Designación: $\mathbf{LP}_{lm}$ → **Maximos en acimut/2** (l) → **Maximos en un radio** (m)

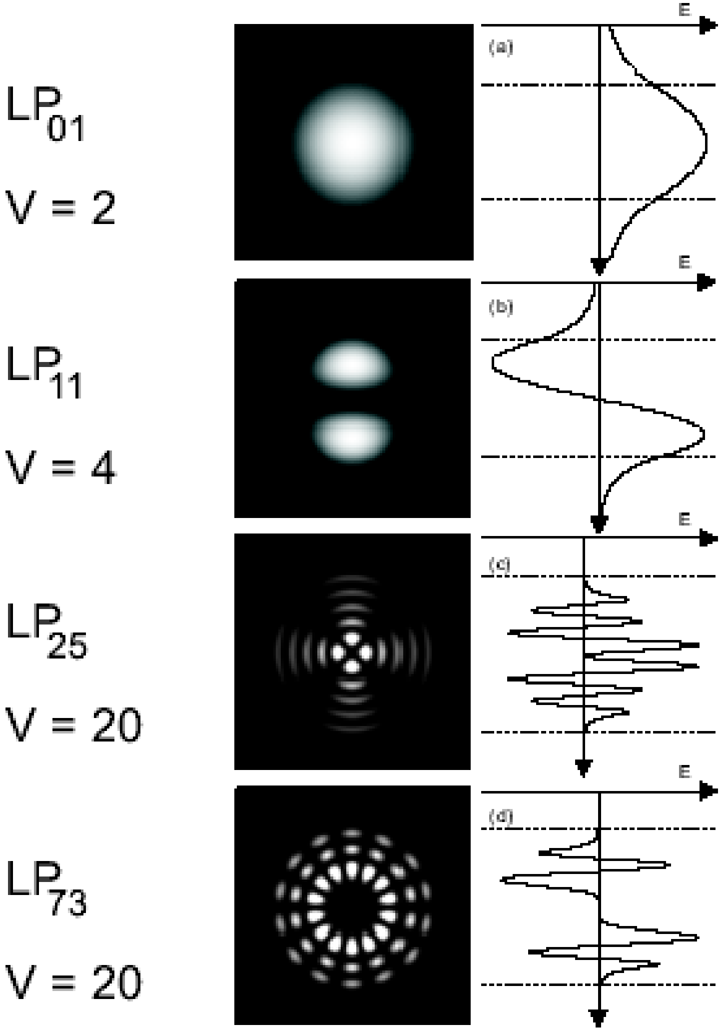
Cada modo puede variar según acimut en forma de función seno o coseno. El factor de degeneración por acimut es 2 salvo si *l=0*

Además puede ser pol. vertical o pol. horizontal



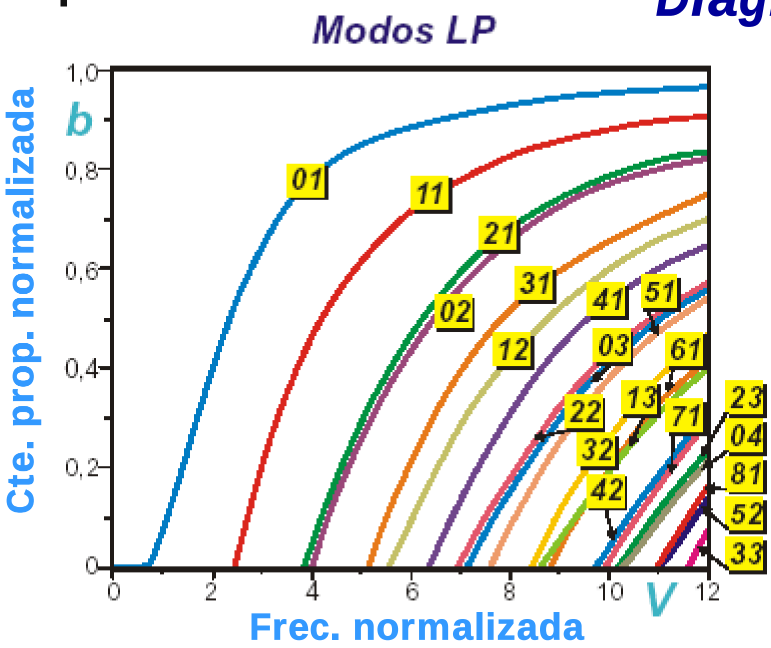


Forma de los campos, modos LP



M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Diagrama b-V



El valor de *b* (cte. propag.) para cada modo depende de las condiciones de trabajo (la long. de onda de operación) y parámetros de la fibra (tamaño del núcleo y salto de índice) expresados a través del valor de *V*

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda}\sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi}{\lambda} a \cdot AN$$

La constante de propagación *b* de un modo está comprendida entre 0 (al corte) y 1 (muy confinado)

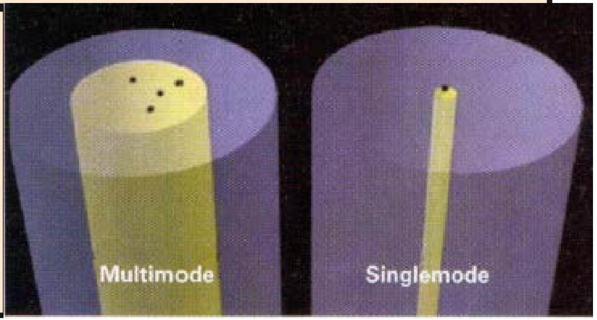
El corte del modo LP_{11} (el fundamental, LP_{01}, siempre se propaga) se produce para *V* = 2.405 ⇨ condición de propagación monomodo ($V \leq 2.405$)

Longitud de onda de corte:

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{2.405} a \cdot AN$$

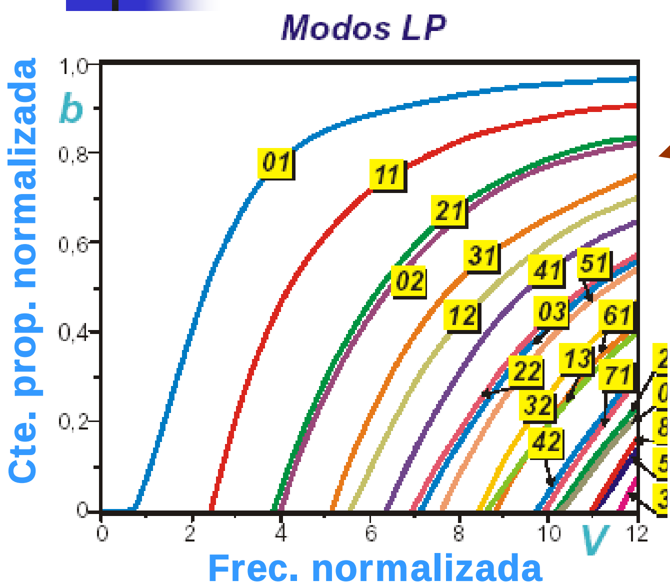
Depende del radio del núcleo: SMF: a=4 μm,λc=1280 nm

MMF: a=50 μm, λc=16000nm



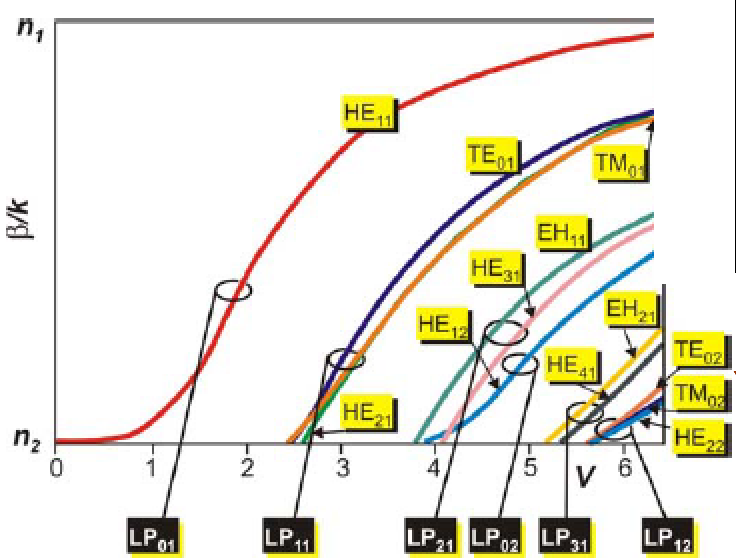
Análisis con aproximación de guiado débil

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

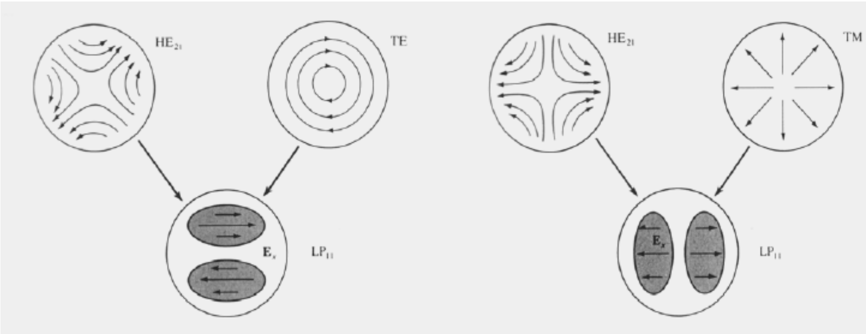


Aproximación

Modos LP (ordenados por frecuencia de corte)	Modos exactos y número	Nº de modos total en el modo LP
LP_{01}	$HE_{11} \times 2$	2
LP_{11}	TE_{01}, TM_{01}, $HE_{21} \times 2$	4
LP_{21}	$EH_{11} \times 2$, $HE_{31} \times 2$	4
LP_{02}	$HE_{12} \times 2$	2
LP_{31}	$EH_{21} \times 2$, $HE_{41} \times 2$	4
LP_{12}	TE_{02}, TM_{02}, $HE_{22} \times 2$	4
LP_{41}	$EH_{31} \times 2$, $HE_{51} \times 2$	4
LP_{22}	$EH_{12} \times 2$, $HE_{32} \times 2$	4
LP_{03}	$HE_{13} \times 2$	2
LP_{51}	$EH_{41} \times 2$, $HE_{61} \times 2$	4
LP_{1m}	TE_{0m}, TM_{0m}, $HE_{2m} \times 2$	4
LP_{lm} ($l \neq 0$ ó 1)	$EH_{l-1,\,m} \times 2$, $HE_{l+1,\,m} \times 2$	4

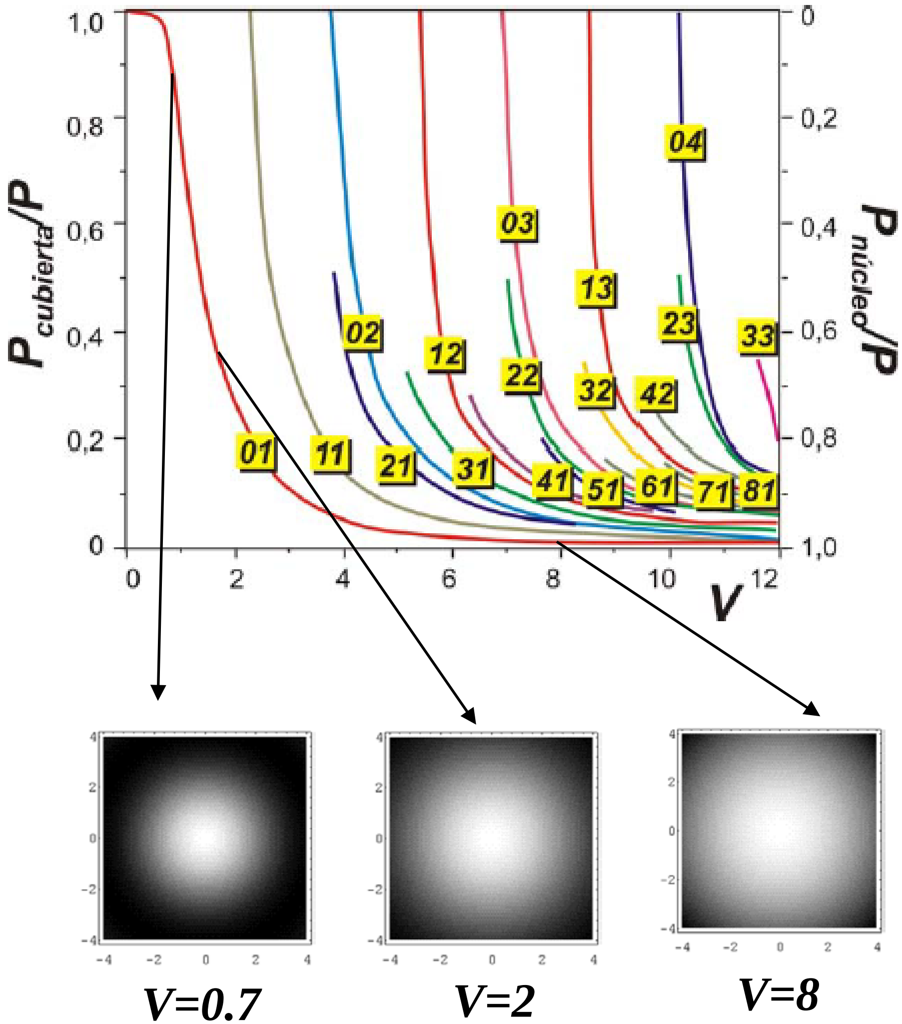


Exacto



M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Confinamiento de la potencia



Modo LP01 (fundamental)

La potencia en cada modo se distribuye por toda la fibra. Es decir, no sólo hay potencia óptica en el núcleo sino <u>también por la cubierta se propaga parte de la potencia.</u>

El confinamiento de la luz en el núcleo es mayor cuanto más cerca del corte está

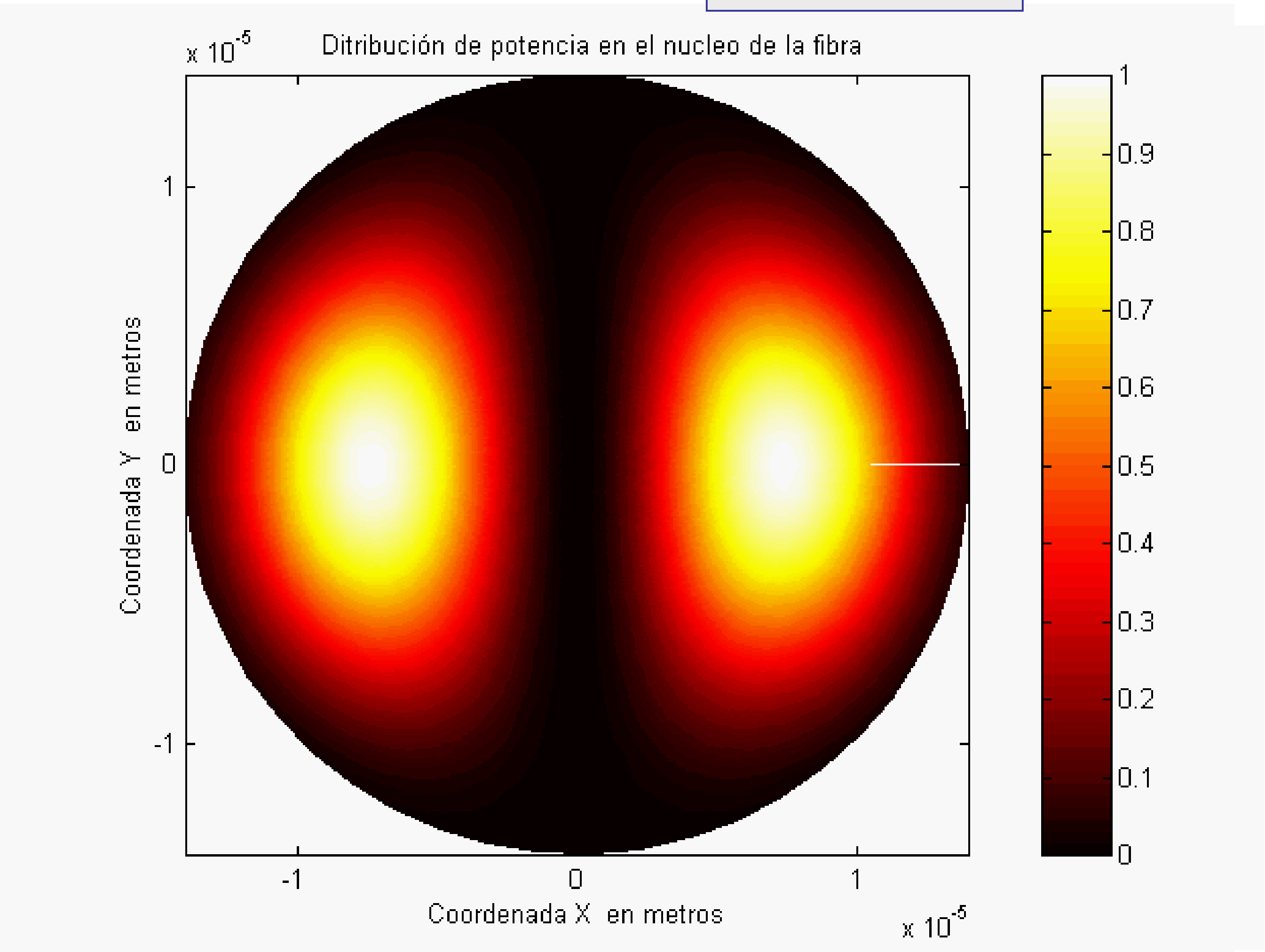
Interesa que la luz esté confinada porque habrá menos pérdidas por curvaturas y porque la dispersión de guíaonda es menor

Para SMF, se busca operación cerca del corte: V<2.405, pero V~2.405.

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Confinamiento de la potencia

Modo LP_{11}



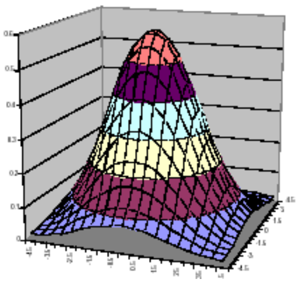
V=2.5

V=4

V=7

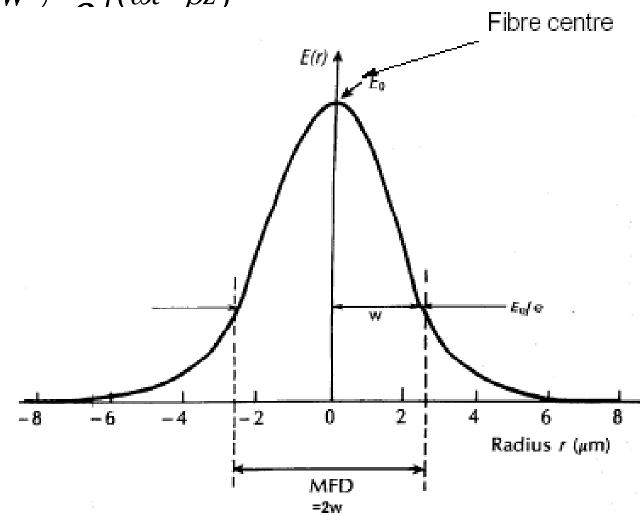
M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Diámetro modal del modo fundamental, LP_{01}

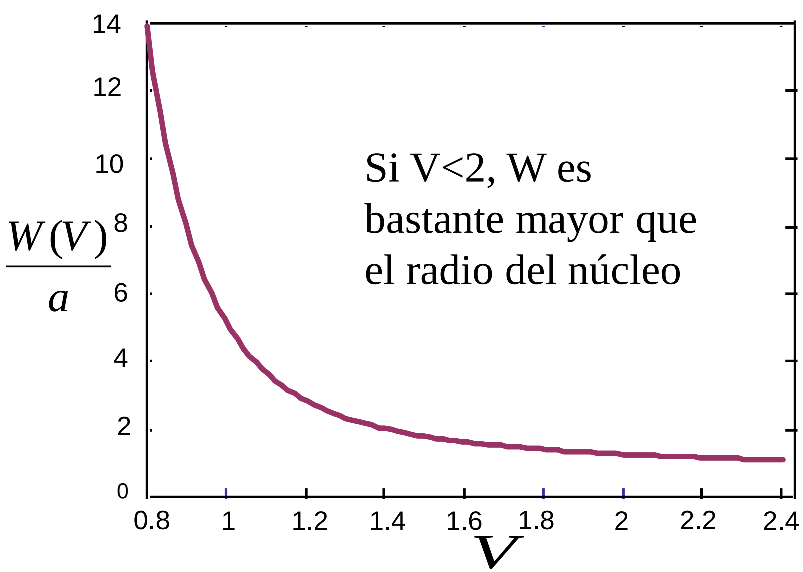


La distribución de campo transversal puede aproximarse por una gaussiana

$$E = AJ_0(hr)e^{j(\omega t-\beta z)} \approx Ae^{-\left(\frac{r}{W}\right)^2} e^{j(\omega t-\beta z)}$$



Diámetro modal (informa de confinamiento) **MFD=2W**, se define como el valor para el que la potencia se reduce a $1/e^2$ del máximo



Una aproximación para calcular el valor de w_0 *(Marcuse, 1977)*:

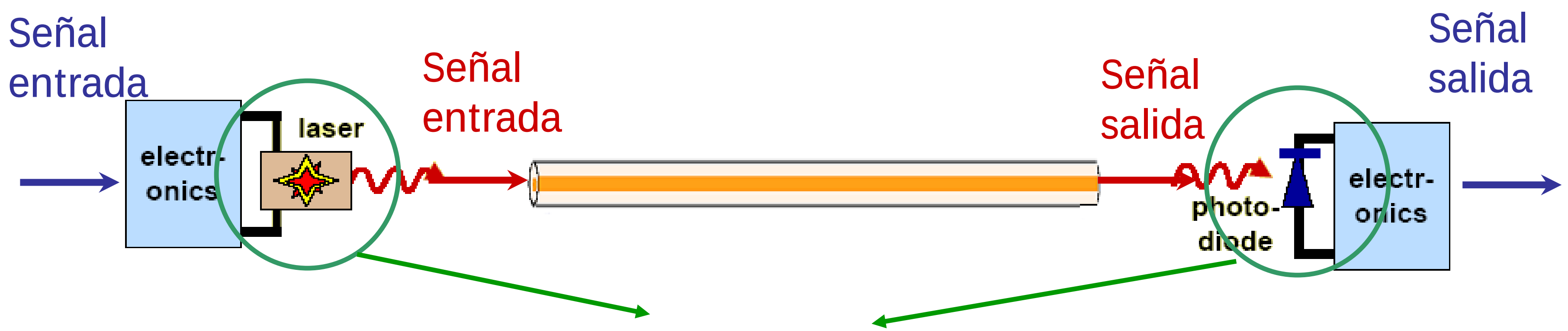
$$\boxed{\frac{w_0}{a} \approx 0.65 + \frac{1.619}{V^{3/2}} + \frac{2.879}{V^6}}$$

con $0.8 \le V \le 2.5$

Por ejemplo:

$n_{co} = 1.4542$;	$\lambda = 1.3$;
$n_{cl} = 1.45$;	$V = 2.40208$;
$a = 4.5$;	$w_0 = 4.95$;

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

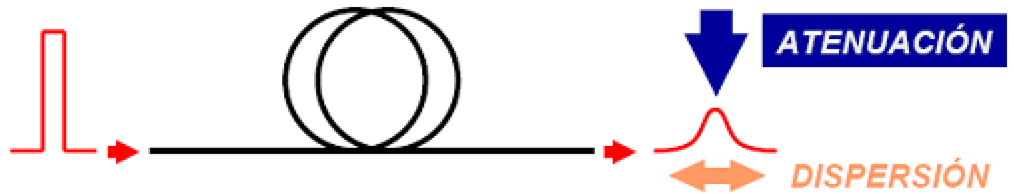


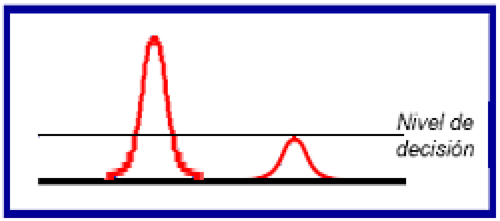
Conversión E/O y O/E: procesos no lineales

- PROPAGACIÓN POR UNA FIBRA ÓPTICA: sistema LTI
  despreciando las no-linealidades, efectos de polarización:

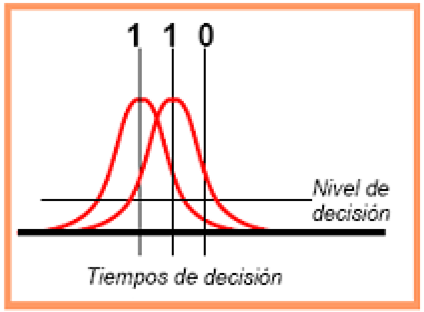
$$H_{fo}(\omega) = \frac{E_{out}(\omega)}{E_{in}(\omega)}$$

M.J. Erro
U.Púb.Navarra





$$H_{fo}(\omega) = A(\omega, L)\exp(j\beta(\omega)L)$$



$$A(\omega, L) = A(L)$$

Atenuación

No depende de la frecuencia.

Factor constante, no distorsiona

$$\exp(j\beta(\omega)L)$$

Dispersión cromática

Filtrado de fase en el dominio de la frecuencia

Distorsión (ensanchamiento) en el dominio del tiempo

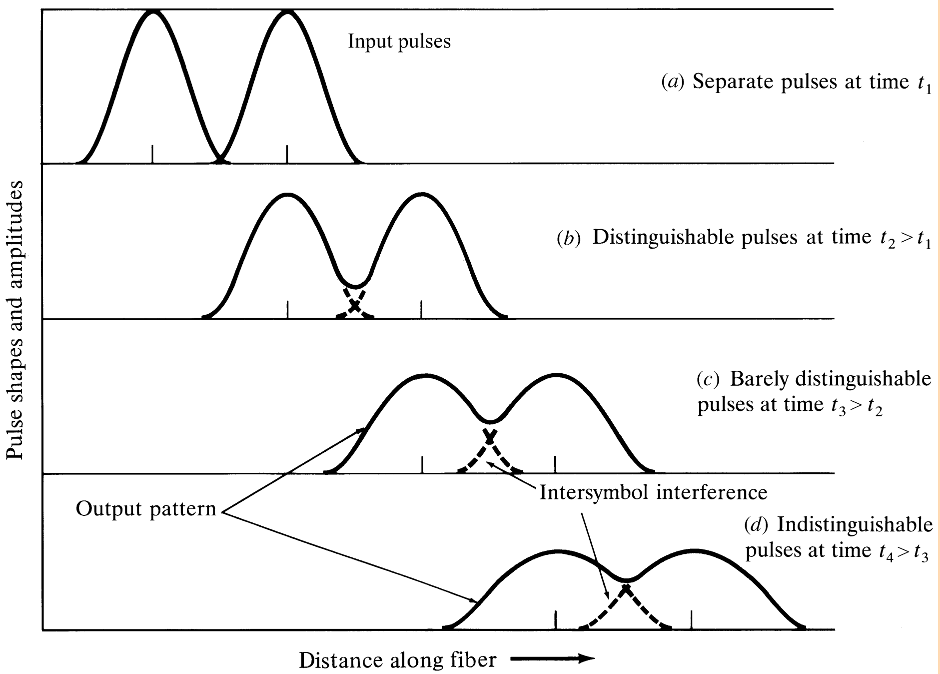
M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Dispersión: efecto en los sistemas y tipos

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

El efecto de la dispersión sobre las señales digitales es el ensanchamiento de cada uno de los pulsos empleados para codificar los “1”: ISI-interferencia entre símbolos

Limita el producto velocidad de transmisión x distancia



Tipos de dispersión que se producen en las fibras ópticas

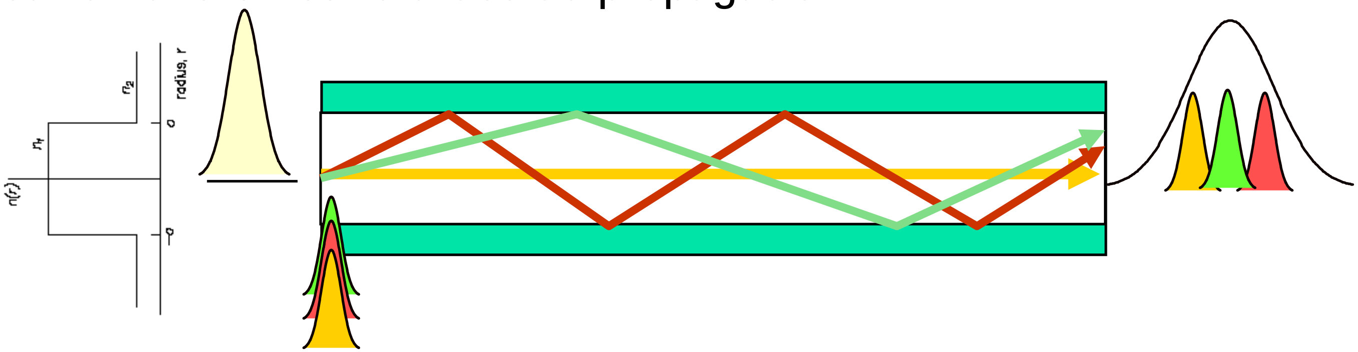
- Dispersión intermodal (dispersión multicamino)
- Dispersión intramodal (o cromática): suma de la dispersión de guiaonda y de la dispersión del material
- Dispersión por modo de polarización, PMD

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Dispersión Intermodal en Fibras Ópticas Multimodo de Salto de Índice:SI-MMF

La energía de un pulso se acopla a los diferentes rayos (modos) guiados en la entrada

Los distintos rayos recorren diferentes distancias a la misma velocidad, c/n_1, luego sufren diferentes retardos de propagación



Diferencia entre tiempos de llegada

$$\Delta T = \frac{n_1}{c}\left(\frac{L}{\operatorname{sen}\varphi_c} - L\right) = \frac{L}{c}\frac{n_1^2}{n_2}\Delta$$

$$B.\Delta T < 1 \rightarrow \; B.L \le \frac{n_2}{n_1^2}\frac{c}{\Delta} = 2\frac{n_2 c}{AN^2}$$

Ejemplos

n1 = 1.5, n2 = 1 ....BL < 0.4 Mb/s km
n1 = 1.5, n2 = 1.3 ....BL < 1.3 Mb/s km
n1 = 1.5, n2 = 1.49 ....BL < 29.8 Mb/s km

n1 = 1.5, n2 = 1 ....P/Po =1
n1 = 1.5, n2 = 1.3 .... P/Po = 0.56
n1 = 1.5, n2 = 1.49 .... P/Po = 0.029

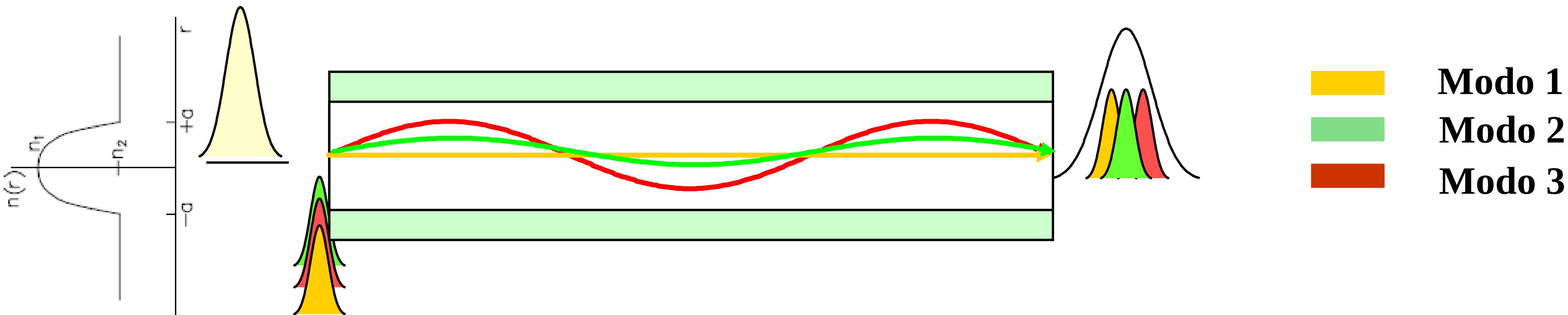
Estos datos están subvalorados ya que los modos más externos sufren mayor atenuación

Solución de compromiso

Dispersión Intermodal en Fibras Ópticas Multimodo de Índice Gradual:IG-MMF

La energía de un pulso se acopla a los diferentes rayos (modos) guiados en la entrada

Los distintos rayos recorren diferentes distancias, pero a distintas velocidades, c/n(r), de forma que el rayo que recorre el camino más largo lo hace a mayor velocidad



Para igualar los retardos, se necesita un perfil parabólico, α=2, fibras SELFOC

Diferencia entre tiempos de llegada $\Delta T = \frac{L}{8}\frac{n_1}{c}\Delta^2$

$B.\Delta T < 1 \rightarrow \quad B.L \leq \frac{8}{n_1}\frac{c}{\Delta^2}$

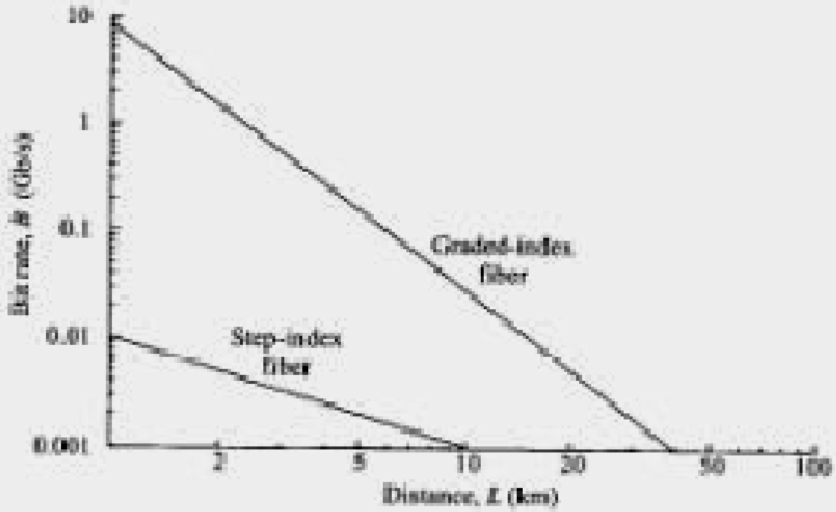


Figure Limit on the bit rate–distance product due to modal dispersion in a step-index and a graded-index fiber. In both cases, $\Delta = 0.01$ and $n_1 = 1.5$. [1]

Índice

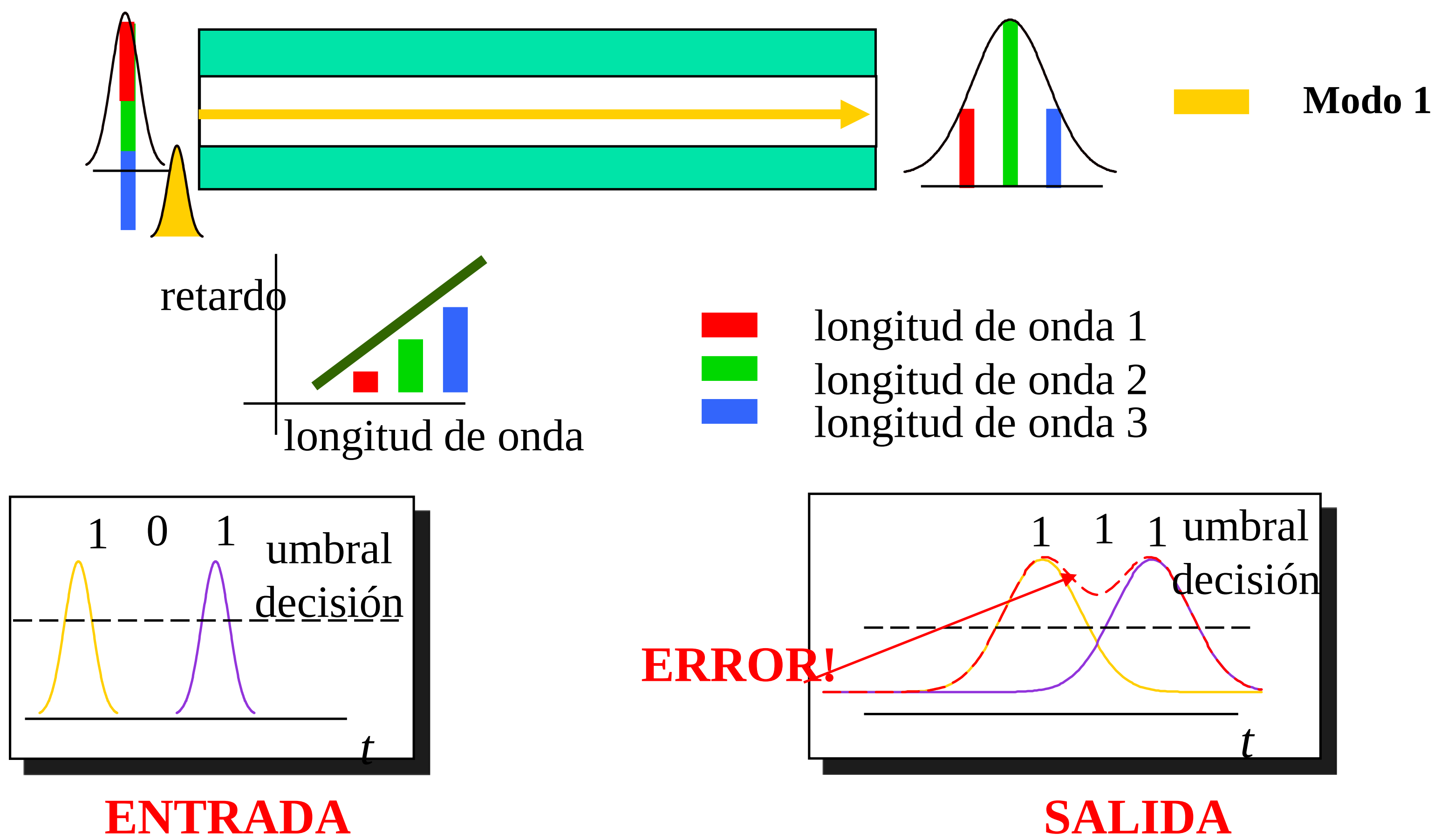
M.J. Erro
U.Púb.Navarra

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Dispersión Intramodal en Fibras Ópticas Monomodo

La energía de un pulso se acopla en un modo, pero tiene varias componenetes en frecuencia

Las diferentes frecuencias (long. de onda) recorren igual distancia a diferente velocidad, c/neff(ω), luego sufren diferentes retardos de propagación



M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Dispersión cromática: descripción matemática

La dispersión cromática o intramodal se debe a la dependencia de la constante de propagación, β, con la frecuencia, ω.

Dicha dependencia es en general compleja de modelar, por ello se acude a una aproximación en serie de Taylor, ya que el ancho de banda de las señales que se transmiten (~GHz) es mucho menor que la frecuencia de la portadora (~200 THz)

$$\beta(\omega) = \beta(\omega_o) + \left.\frac{d\beta}{d\omega}\right|_{\omega_o}(\omega-\omega_o) + \frac{1}{2}\left.\frac{d^2\beta}{d\omega^2}\right|_{\omega_o}(\omega-\omega_o)^2 + \frac{1}{6}\left.\frac{d^3\beta}{d\omega^3}\right|_{w_o}(\omega-\omega_o)^3 + \ldots$$

términos dispersivos

retardo de grupo por unidad de longitud τ_g/L

El retardo de grupo por unidad de longitud también depende, en consecuencia, de la frecuencia:

$$\frac{\tau_g(\omega)}{L} = \frac{d\beta}{d\omega} = \beta_1\big|_{\omega o} + \beta_2\big|_{\omega o}(\omega-\omega_o) + \frac{1}{2}\beta_3\big|_{\omega o}(\omega-\omega_o)^2 =$$

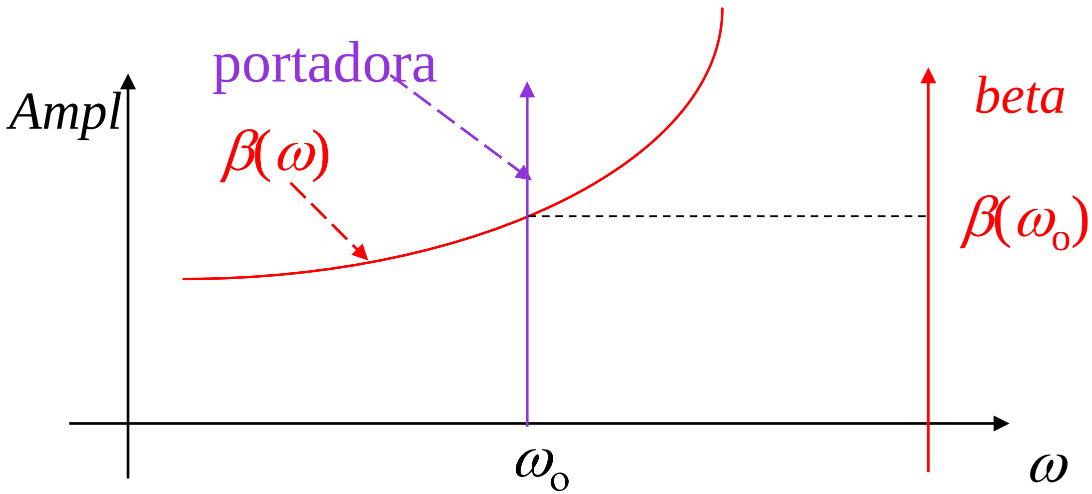
$$= \left(\tau_g/L\right)_{\omega o} + \left.\frac{d\left(\tau_g/L\right)}{d\omega}\right|_{\omega o}(\omega-\omega_o) + \frac{1}{2}\left.\frac{d^2\left(\tau_g/L\right)}{d\omega^2}\right|_{\omega o}(\omega-\omega_o)^2$$

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Efecto de β_0, velocidad de fase

- PROPAGACIÓN DE UNA ONDA MONOCROMÁTICA EN SMF

$$\vec{E}(x,y,z,t)=\vec{J}(x,y)\cos(\omega_o t-\beta(\omega_o)z)$$



- La velocidad de propagación viene dada por la velocidad de fase, v_f

$$v_f=\frac{\omega_o}{\beta(\omega_o)}=\frac{\omega_o}{\frac{\omega_o}{c}n_{eff}(\omega_o)}=\frac{c}{n_{eff}(\omega_o)}$$

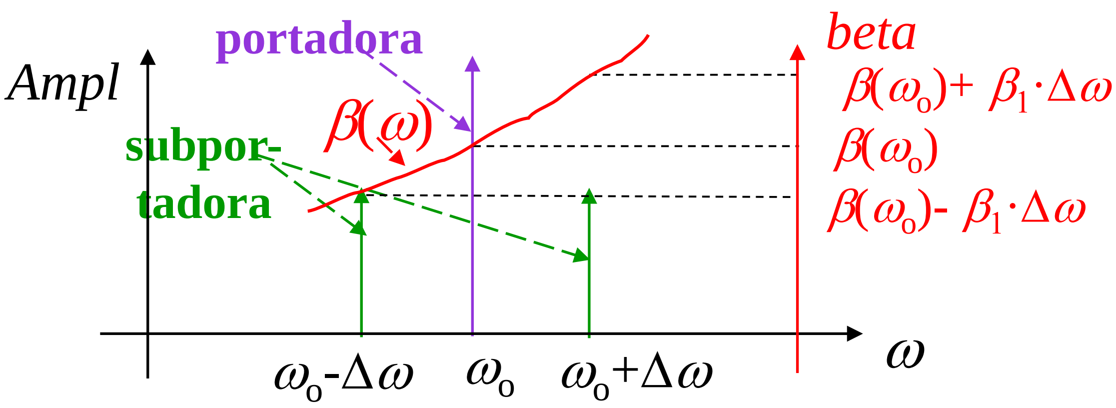
índice de refracción efectivo

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Efecto de β_1, velocidad de grupo

- PROPAGACIÓN DE UNA ONDA MODULADA CON UNA SUBPORTADORA

$$\vec{E}(x,y,z,t)=\vec{J}(x,y)\left[\cos\left((\omega_o+\Delta\omega)t-\beta(\omega_o+\Delta\omega)z\right)+\cos\left((\omega_o-\Delta\omega)t-\beta(\omega_o-\Delta\omega)z\right)\right]$$



- Como $\Delta\omega<<\omega_0$, $\beta(\omega)\sim\beta_o+\beta_1\cdot\Delta\omega$, con $\beta_o=\beta(\omega_o)$ y $\beta_1=\delta\beta/\delta\omega|_{\omega=\omega o}$ y

$$\vec{E}(x,y,z,t)\cong 2\vec{J}(x,y)\underbrace{\cos(\Delta\omega t-\beta_1\Delta\omega z)}_{\text{envolvente}}\underbrace{\cos(\omega_o t-\beta_o z)}_{\text{variación rápida}}$$

- La velocidad de propagación de la envolvente viene dada por la <u>velocidad de grupo</u>, v_g

$$v_g=\frac{\Delta\omega}{\Delta\omega\beta_1}=\frac{1}{\beta_1}=\left(\left.\frac{\partial\beta}{\partial\omega}\right|_{\omega=\omega_o}\right)^{-1}=\frac{c}{n_g(\omega_o)}$$

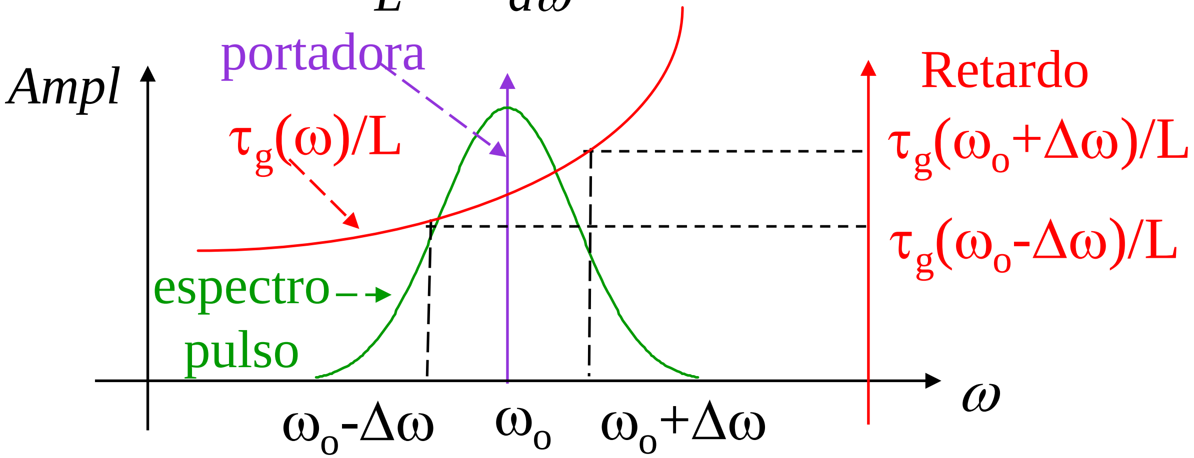
$$n_g=n_{eff}+\omega\frac{\partial n_{eff}}{\partial\omega}$$

índice de refracción de grupo

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Efecto de β_2, dispersión cuadrática, ensanchamiento

$$\frac{\tau_g(\omega)}{L} = \frac{d\beta}{d\omega} = \beta_1\big|_{\omega o} + \beta_2\big|_{\omega o}(\omega - \omega_o)$$



Lejos del pto. de mínima dispersión $\beta_2 >> \beta_3$

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda_o^2}\beta_2$$

parámetro de dispersión (ps/(km.nm))

$$\Delta T = (\tau_g(\omega_o + \Delta\omega)/L - \tau_g(\omega_o - \Delta\omega)/L) \cdot L$$

$$\Delta T = |\beta_2| \cdot L \cdot 2\Delta\omega = |D| \cdot L \cdot 2\Delta\lambda$$

Más ensanchamiento cuanto mayor es *D*, cuanto más largo es el enlace y cuanto mayor es el ancho de banda de la señal transmitida

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Efecto de β_2, dispersión cuadrática, ensanchamiento

Ensanchamiento debido a la dispersión de segundo orden

$$\Delta T = \left|\beta_2\right| \cdot L \cdot 2\Delta\omega = \left|D\right| \cdot L \cdot 2\Delta\lambda$$

Si exigimos $B.\Delta T < 1 \rightarrow \quad B.L \leq \dfrac{1}{\left|D\right| \cdot \Delta\lambda}$

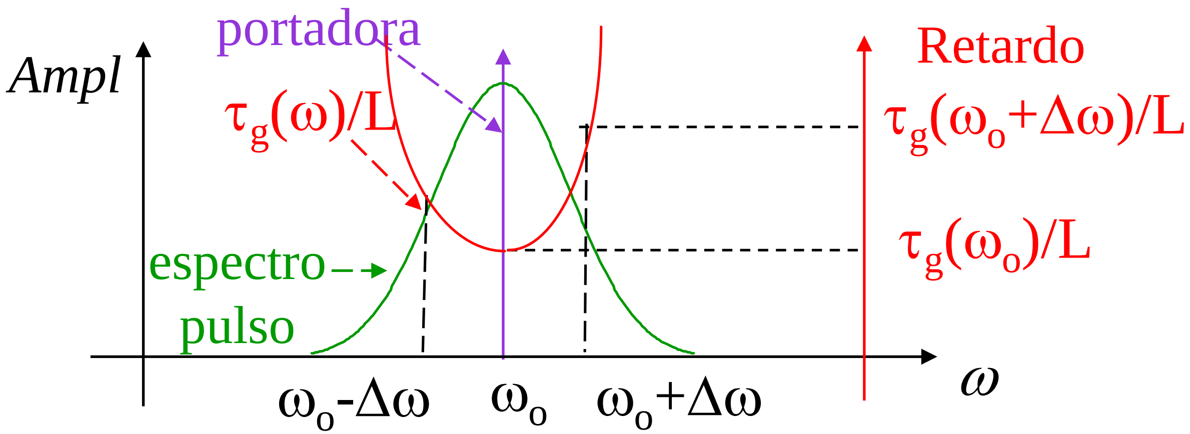
1ª estimación sencilla

λo	Δλ	Δf	Dispersión	**BL máx**
1300 nm	30 nm	5325 GHz	1 ps/nm·km (S-SMF)	**33 Gb/s·km**
1300 nm	2 nm	355 GHz	1 ps/nm·km (S-SMF)	**500 Gb/s·km**
1300 nm	0.1 nm	18 GHz	1 ps/nm·km (S-SMF)	**10 Tb/s·km**
1550 nm	2 nm	250 GHz	17 ps/nm·km (S-SMF)	**29 Gb/s·km**
1550 nm	2 nm	250 GHz	5 ps/nm·km (NZDS-SMF)	**100 Gb/s·km**
1550 nm	0.1 nm	12.5 GHz	17 ps/nm·km (S-SMF)	**588 Gb/s·km**
1550 nm	0.1 nm	12.5 GHz	5 ps/nm·km (NZDS-SMF)	**2 Tb/s·km**
1550 nm	30 nm	3750 GHz	5 ps/nm·km (NZDS-SMF)	**6.5 Gb/s·km**

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Efecto de β_3, dispersión cúbica (pendiente de dispersión), ensanchamiento

$$\frac{\tau_g(\omega)}{L} = \frac{d\beta}{d\omega} = \beta_1\big|_{\omega o} + \beta_2\big|_{\omega o}(\omega-\omega_o) + \beta_3\big|_{\omega o}(\omega-\omega_o)^2$$



Pto. de mínima dispersión $\beta_2 = 0, \quad \beta_3 \neq 0$

$$\Delta T = (\tau_g(\omega_o+\Delta\omega)/L - \tau_g(\omega_o)/L)\cdot L$$

$$\Delta T = \frac{1}{8}\left|\beta_3\right|\cdot L\cdot(2\Delta\omega)^2 = \frac{1}{8}\left|S\right|\cdot L\cdot(2\Delta\lambda)^2$$

$$S = \left(\frac{2\pi c}{\lambda_o^2}\right)^2 \beta_3$$

pendiente de dispersión ($ps/(km.nm^2)$)

Más ensanchamiento cuanto mayor es *S*, cuanto más largo es el enlace y cuanto mayor es el ancho de banda de la señal transmitida

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Efecto de β_3, dispersión cúbica (pendiente de dispersión), ensanchamiento

Ensanchamiento debido a la dispersión de segundo orden

$$\Delta T = \frac{1}{8}|\beta_3| \cdot L \cdot (2\Delta\omega)^2 = \frac{1}{8}|S| \cdot L \cdot (2\Delta\lambda)^2$$

1ª estimación sencilla

Si exigimos $B.\Delta T < 1 \rightarrow B.L \leq \dfrac{8}{|S| \cdot (\Delta\lambda)^2}$

λo	Δλ	Δf	Pendiente dispersión	**BL máx**
1300 nm	30 nm	5325 GHz	0.12 ps/nm^2·km	**71.5 Gb/s·km**
1300 nm	2 nm	355 GHz	0.12 ps/nm^2·km	**16 Tb/s·km**
1300 nm	0.1 nm	18 GHz	0.12 ps/nm^2·km	**6400 Tb/s·km**
1550 nm	2 nm	250 GHz	0.09 ps/nm^2·km	**22 Gb/s·km**
1550 nm	0.1 nm	12.5 GHz	0.09 ps/nm^2·km	**9000 Gb/s·km**
1550 nm	30 nm	3750 GHz	0.09 ps/nm^2·km	**99 Gb/s·km**

Efecto de la dispersión cromática, modelo riguroso

IN

$$G(0,t) \leftrightarrow \tilde{G}(0,\omega)$$

$$\overline{E}(0,\omega) = \hat{x} J_{LP01}(x,y)\tilde{G}(0,\omega)$$

$$H_{fo}(\omega) = \exp(j\beta(\omega)z)$$

OUT

$$G(z,t) \leftrightarrow \tilde{G}(z,\omega)$$

$$\overline{E}(z,\omega) = \hat{x} J_{LP01}(x,y)\tilde{G}(z,\omega)$$

$$\tilde{G}(z,w) = \tilde{G}(0,w)e^{j\beta(\omega)z}$$

No cambia el módulo de la señal en frecuencia, sí su fase y, por tanto, también la señal en tiempo cambia

La información viene de una señal eléctrica, no de la portadora óptica

$$G(0,t) = \mathrm{Re}\left\{A(0,t)e^{-j\omega_0 t}\right\} \qquad G(z,t) = \mathrm{Re}\left\{A(z,t)e^{-j\omega_0 t - j\beta(\omega_o)t}\right\}$$

La envolvente, $A(z,t)$, contiene la información

Aplicando TF, TF-1, se puede conocer la evolución de la envolvente con la propagación:

$$A(z,t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} d(\Delta\omega)\tilde{A}(0,\omega)\times e^{\left[j\beta_1 z\Delta\omega + \frac{j}{2}\beta_2 z(\Delta\omega)^2 + \frac{j}{6}\beta_3 z(\Delta\omega)^3 - j\Delta\omega t\right]}$$

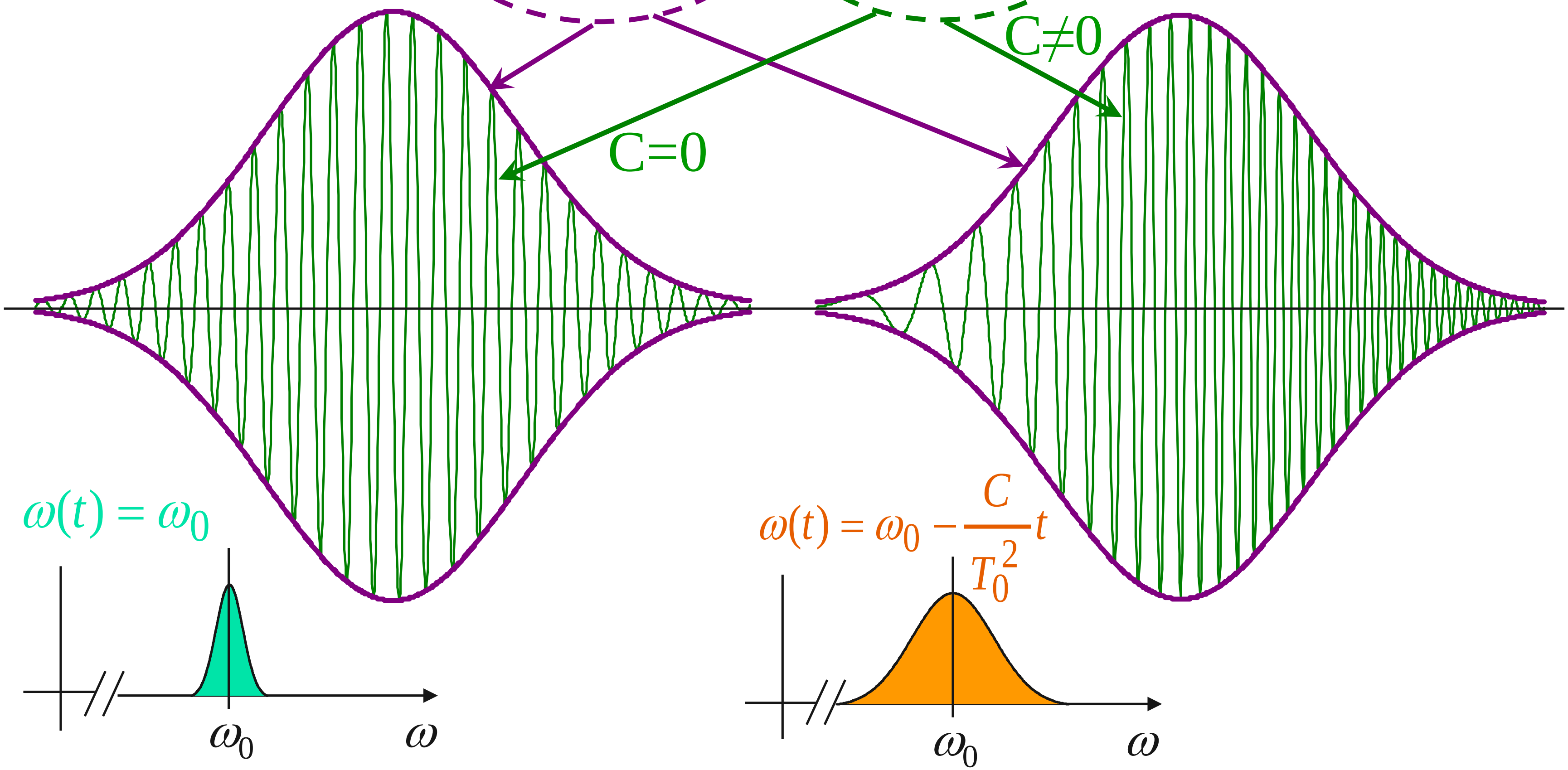
El efecto final sobre la señal, lógicamente, depende tanto de la fibra óptica como de la señal de entrada

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

PULSOS GAUSSIANOS CON CHIRP

pulso chirp portadora óptica

$$G(0,t)=A_0\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{T_0}\right)^2\right]\exp\left[-\frac{jC}{2}\left(\frac{t}{T_0}\right)^2\right]\exp\left[jw_0t\right]$$



M.J. Erro
U.Púb.Navarra

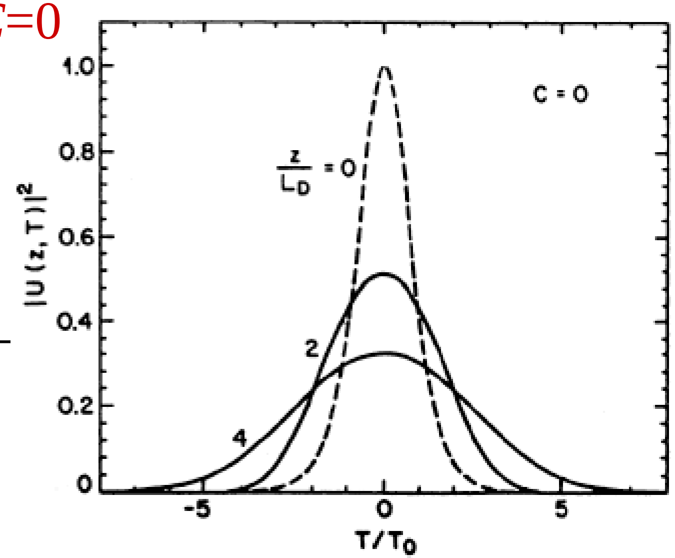
dispersión cromática: efecto en tx digital, pulsos gaussianos

Después de una distancia de fo, *z*, si sólo hay dispersión de segundo orden, el pulso sigue siendo gaussiano de distinta amplitud máxima, distinta anchura y con distinto *chirp*

$$A(z,t) = A_1 \exp\left(j \cdot cte\right) \exp\left[-\frac{1+jC_1}{2}\left(\frac{t}{T_1}\right)^2\right]$$

Particularizando para un pulso sin *chirp* a la entrada, $C=0$

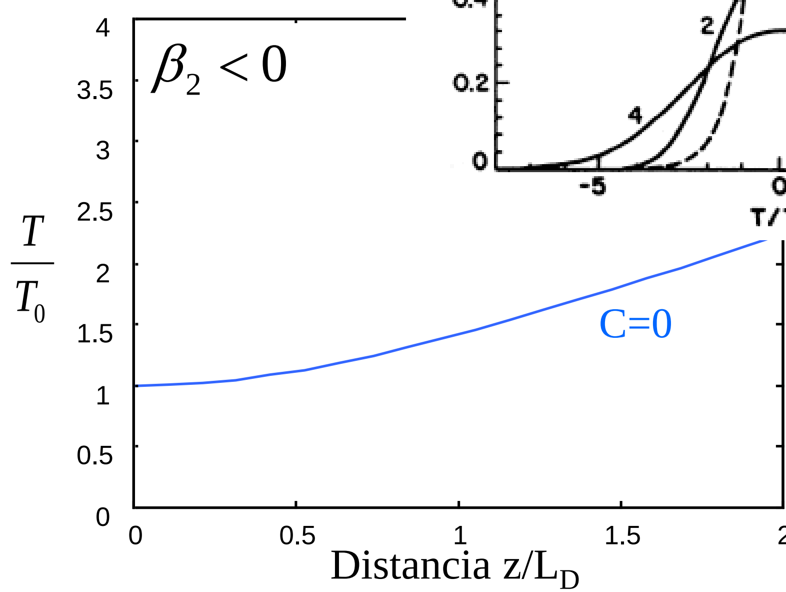
Factor de Ensanchamiento: $\frac{T_1}{T_0} = \left[1+\left(\frac{z}{L_D}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$



Amplitud máxima:

$$A_1 = A_0 \Big/ \left[1+\left(\frac{z}{L_D}\right)^2\right]^{\frac{1}{4}}$$

Chirp: $C_1 = \mathrm{sgn}(\beta_2)\frac{z}{L_D}$



Longitud de dispersión: $L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}$

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

dispersión cromática: efecto en tx digital, pulsos gaussianos

Después de una distancia de fo, z, si sólo hay dispersión de segundo orden, el pulso sigue siendo gaussiano de distinta amplitud máxima, distinta anchura y con distinto *chirp*

$$A(z,t) = A_1 \exp\left(j \cdot cte\right) \exp\left[-\frac{1+jC_1}{2}\left(\frac{t}{T_1}\right)^2 \right]$$

Si el pulso sí que tiene *chirp* a la entrada, el ensanchamiento depende de ese *chirp*

Factor de Ensanchamiento:

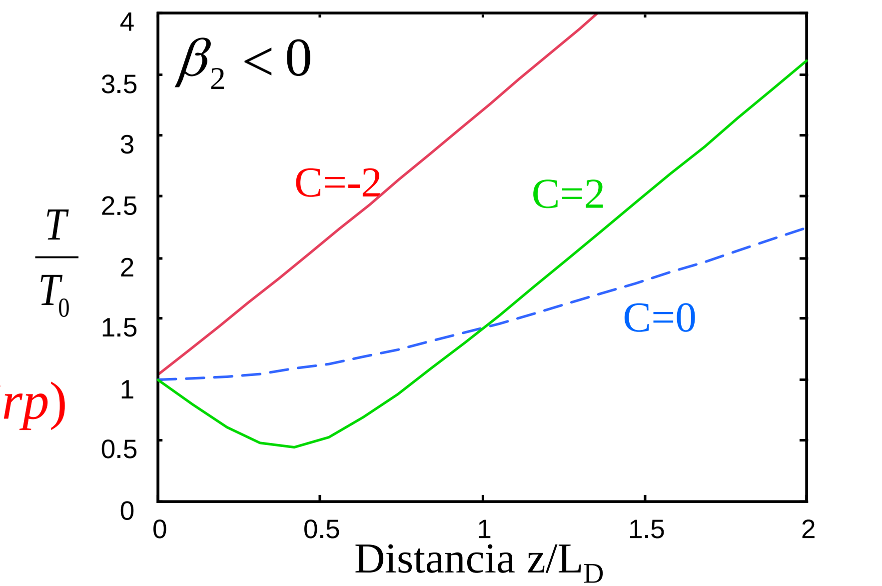
$$\frac{T_1}{T_0} = \left[\left(1 + C\,\mathrm{sgn}(\beta_2)\frac{z}{L_D}\right)^2 + \left(\frac{z}{L_D}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$C = 0$ Ensanchamiento

$C\beta_2 > 0$ Ensanchamiento (mayor que sin *chirp*)

$C\beta_2 < 0$ Compresión inicial del pulso

Técnica de prechirp



M.J. Erro
U.Púb.Navarra

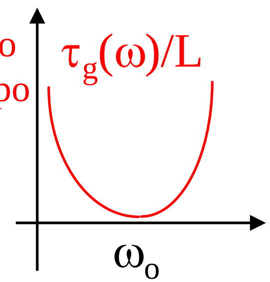
dispersión cromática: efecto en tx digital, pulsos gaussianos

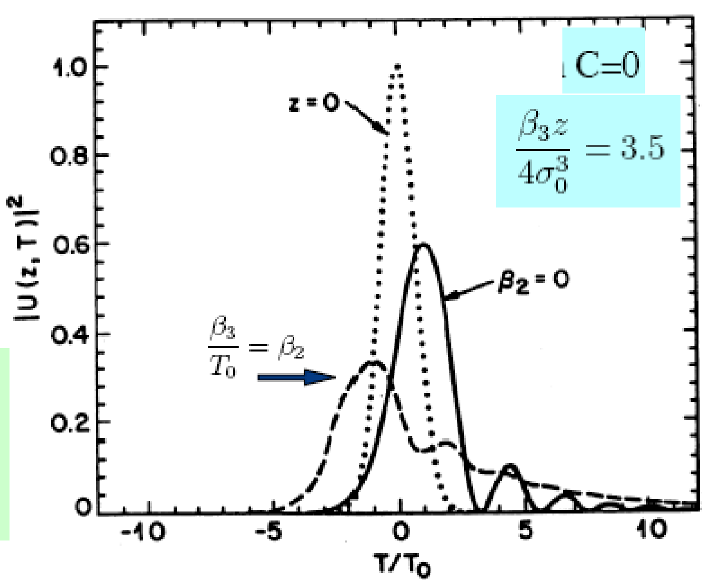
Cuando se incluye la dispersión de orden superior (β_3), el pulso pierde su forma gaussiana (temporal) durante la propagación. Se define un nuevo parámetro, la anchura rms, para estimar la anchura del pulso cuando este no es gaussiano

Factor de Ensanchamiento:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_0} = \left[\left(1 + \frac{C\beta_2 z}{2\sigma_0^2}\right)^2 + \left(\frac{\beta_2 z}{2\sigma_0^2}\right)^2 + (1+C^2)\frac{1}{2}\left(\frac{\beta_3 z}{4\sigma_0^3}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

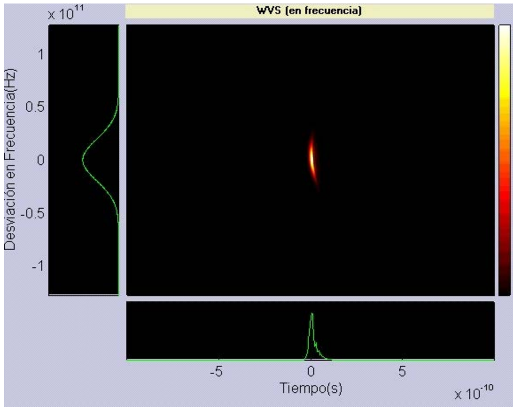
Para un pulso sin *chirp* a la entrada, $C=0$ y con $\beta_3 > 0$ (S > 0), típico en S-SMF en 3ª ventana



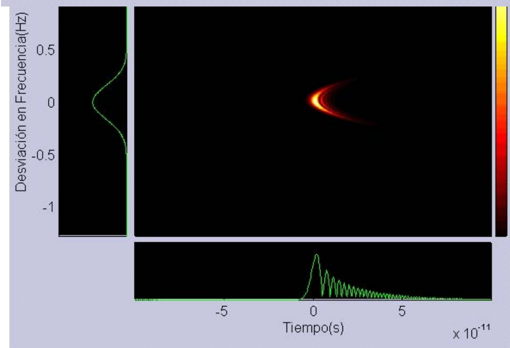


Su efecto es sólo significativo si D=0

$\beta_2 < 0$
$\beta_3 > 0$

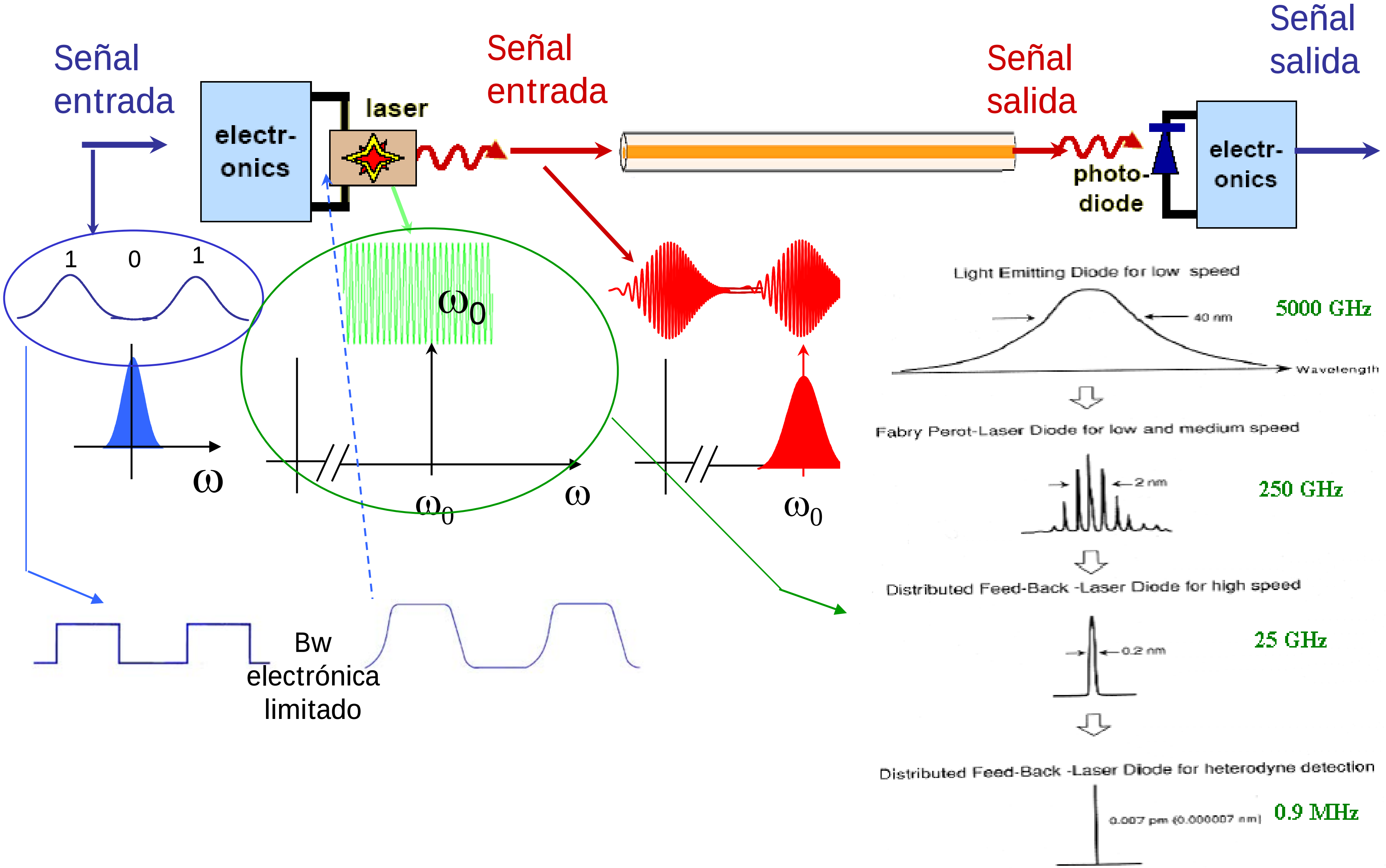


$\beta_2 = 0$
$\beta_3 > 0$



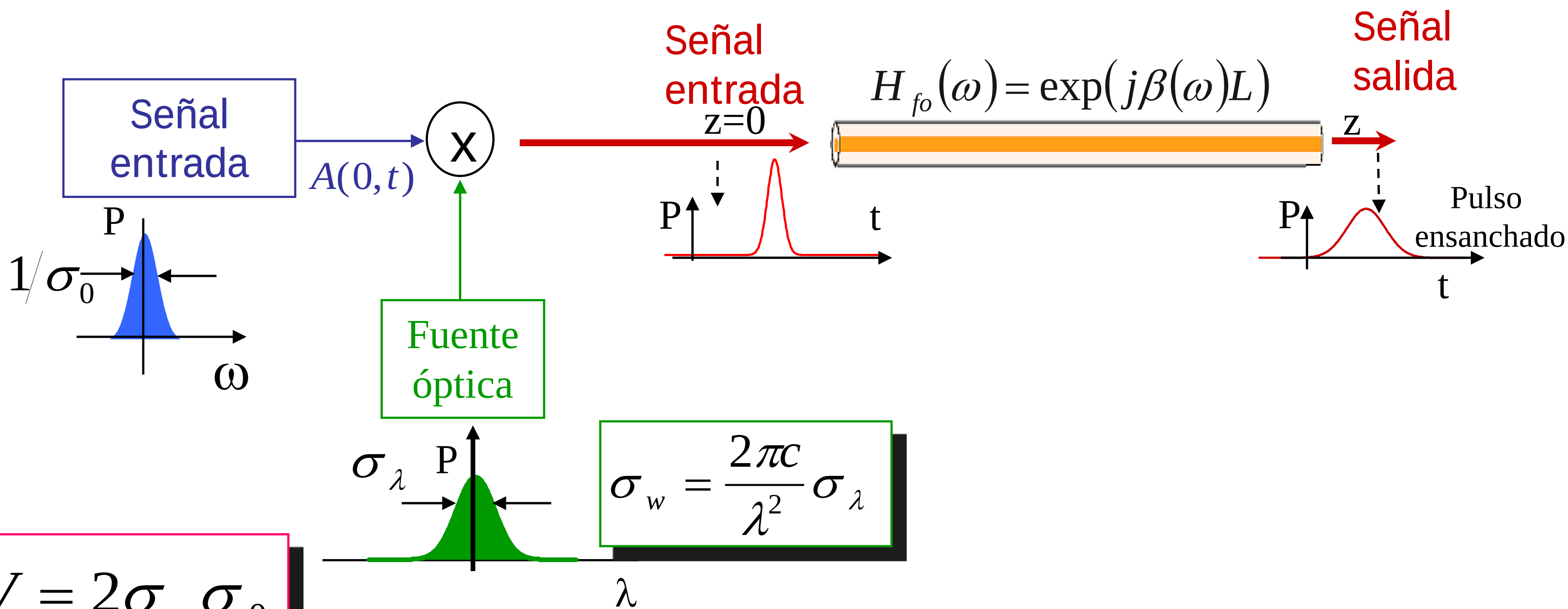
M.J. Erro
U.Púb.Navarra

¿Es correcto el análisis anterior?



M.J. Erro
U.Púb.Navarra

DISPERSIÓN: efecto en tx digital, anchura fuente



$$\sigma_w = \frac{2\pi c}{\lambda^2}\sigma_\lambda$$

$$V = 2\sigma_w\sigma_0$$

El parámetro *V* relaciona los anchos espectrales de la fuente óptica sin modular y señal moduladora A(0,t)

a) Si *V<<1* $\sigma_w << (1/\sigma_0)$
Fuente óptica casi monocromática en comparación con la moduladora

b) Si *V>>1* $\sigma_w >> (1/\sigma_0)$
El ancho espectral se debe fundamentalmente a la **fuente óptica**, y no a la modulación en sí.

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Ensanchamiento (para el caso general: anchura rms, fuentes no monocromáticas, chirp, β_2, β_3)

Relaciona las anchuras rms (puesto que ya no se puede asegurar pulsos gaussianos a la entrada de la fibra):

Para el pulso de entrada, σ_0; para el pulso de salida, σ_L

$$\frac{\sigma_L}{\sigma_0}=\left[\left(1+\frac{C\beta_2 L}{2\sigma_0^2}\right)^2+(1+V^2)\left(\frac{\beta_2 L}{2\sigma_0^2}\right)^2+(1+C^2+V^2)\ \frac{1}{2}\left(\frac{\beta_3 L}{4\sigma_0^3}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

Aparecen dos términos nuevos con respecto al caso de fuentes casi monocromáticas

Para relacionar los factores de ensanchamiento con la máxima velocidad de modulación digital BR=1/T_B se utiliza un criterio del tipo $\sigma_L \leq (T_B/4)$

$\Rightarrow$ $4BR\sigma_L \leq 1$

Se trata de un criterio bastante conservador, el cual asegura que el 95% de la potencia de cada pulso está contenida en su intervalo de bit.

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Caso 1a: Fuente óptica ancha (LED, LD F-P), con β_2

$$V >> 1$$
$$\beta_2 \neq 0, \beta_3 = 0$$

$$\frac{\sigma_L}{\sigma_0} = \left[1 + \left(\frac{\beta_2 L \sigma_w}{\sigma_0}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} = \left[1 + \left(\frac{D L \sigma_\lambda}{\sigma_0}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_L = \left(\sigma_0^2 + \sigma_D^2\right)^{1/2} \rightarrow \sigma_D = |D| L \sigma_\lambda$$

$$\sigma_L \approx \sigma_D \rightarrow BR \cdot L \leq \frac{1}{4|D|\sigma_\lambda}$$

BR es función de 1/L

Caso 2a: Fuente óptica estrecha (LD DFB), con β_2

$$V << 1$$
$$\beta_2 \neq 0, \beta_3 = 0$$
$$C = 0$$

$$\sigma_L = \left[\sigma_0^2 + \left(\frac{\beta_2 L}{2\sigma_0}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} = \left[\sigma_0^2 + {\sigma_D}^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_L = \left(\sigma_0^2 + \sigma_D^2\right)^{1/2} \rightarrow \sigma_D = \frac{|\beta_2| L}{2\sigma_0}$$

$$\sigma_0 \ \text{óptimo} \rightarrow \frac{\partial \sigma_L}{\partial \sigma_0} = 0 \ \rightarrow \text{óptimo} \ \sigma_{0,\text{opt}} = \sigma_D = \sqrt{\frac{\beta_2 L}{2}}$$

$$\sigma_{L,opt} = \sqrt{\beta_2 L} \rightarrow BR \cdot \sqrt{L} \leq \frac{1}{4\sqrt{|\beta_2|}}$$

BR es función de 1/L$^{1/2}$

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Caso 1b: Fuente óptica ancha (LED, LD F-P), cuando la dispersión de segundo orden es mínima β_2=0

$$V >> 1$$

$$\beta_2 = 0, \beta_3 \neq 0$$

$$\frac{\sigma_L}{\sigma_0} = \left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{\beta_3 L \sigma_w^2}{\sigma_0}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} = \left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{S L \sigma_\lambda^2}{\sigma_0}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_L = \left(\sigma_0^2 + \sigma_D^2\right)^{1/2} \rightarrow \sigma_D = \frac{|S| L \sigma_\lambda^2}{\sqrt{2}}$$

$$\sigma_L \approx \sigma_D \rightarrow BR \cdot L \leq \frac{1}{\sqrt{8}|S|\sigma_\lambda^2}$$

BR es función de 1/L

Caso 2b: Fuente óptica estrecha (LD DFB), cuando la disp. segundo orden es mínima, β_2=0

$$V << 1$$

$$\beta_2 = 0, \beta_3 \neq 0$$

$$C = 0$$

$$\sigma_L = \left[\sigma_0^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\beta_3 L}{4\sigma_0^2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} = \left[\sigma_0^2 + {\sigma_D}^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_L = \left(\sigma_0^2 + \sigma_D^2\right)^{1/2} \rightarrow \sigma_D = \frac{|\beta_3| L}{4\sqrt{2}\sigma_0^2}$$

$$\sigma_0 \ \text{óptimo} \rightarrow \frac{\partial \sigma_L}{\partial \sigma_0} = 0 \ \rightarrow \text{óptimo} \ \sigma_{0,\text{opt}} = \left(\frac{|\beta_3| L}{4}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\sigma_{L,opt} = (3/2)^{1/2} (|\beta_3| L / 4)^{1/3} \rightarrow BR \cdot L^{1/3} \leq \frac{0.324}{|\beta_3|^{1/3}}$$

BR es función de $1/L^{1/3}$

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

DISPERSIÓN: efecto en tx digital, limitación

LÍMITES DE RÉGIMEN BINARIO: EJEMPLOS

- Consideremos un sistema de comunicaciones ópticas que usa como fuente de luz un LED para el cual $\sigma_\lambda \approx 15$nm, V>>1
  - Considerando D = 17 ps/km-nm en 1.55 μm, resulta un factor limitante BL < 1Gb/s-km.
  - Sin embargo, si este mismo sistema fuera diseñado para trabajar en un punto de dispersión nula (λ_{ZD}), el producto BL podría ser incrementado a 20 Gb/s-km., para un valor típico de S = 0.08 ps/(km-nm^2)
- Consideremos un sistema de comunicaciones ópticas que usa como fuente de luz un DFB con modulación externa para el cual $\sigma_\lambda \approx 1$pm, V<<1
  - Considerando β_2 = -20 ps^2/km en 1.55 μm, resulta un factor limitante $B^2L < 3000$ (Gb/s)^2-km (2.5 Gb/s hasta 480 km, 10 Gbs hasta 30 km)
  - Sin embargo, si este mismo sistema fuera diseñado para trabajar en un punto de dispersión nula (λ_{ZD}), con β_3 = 0.1 ps^3/km, se aumenta la capacidad hasta $B^3L < 3 \cdot 10^8$ (Gb/s)^3-km (50 Gb/s hasta 2700 km, 100 Gbs hasta 340 km)

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Resumiendo, resulta claro que la capacidad de un sistema de comunicaciones por fibras ópticas puede ser mejorado considerablemente al operar estos en una longitud de onda cercana al punto de dispersión nula (λ_{ZD}), con fuentes ópticas de ancho espectral relativamente estrecho ($V < 1$).

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

LÍMITES DE RÉGIMEN BINARIO: EJEMPLOS

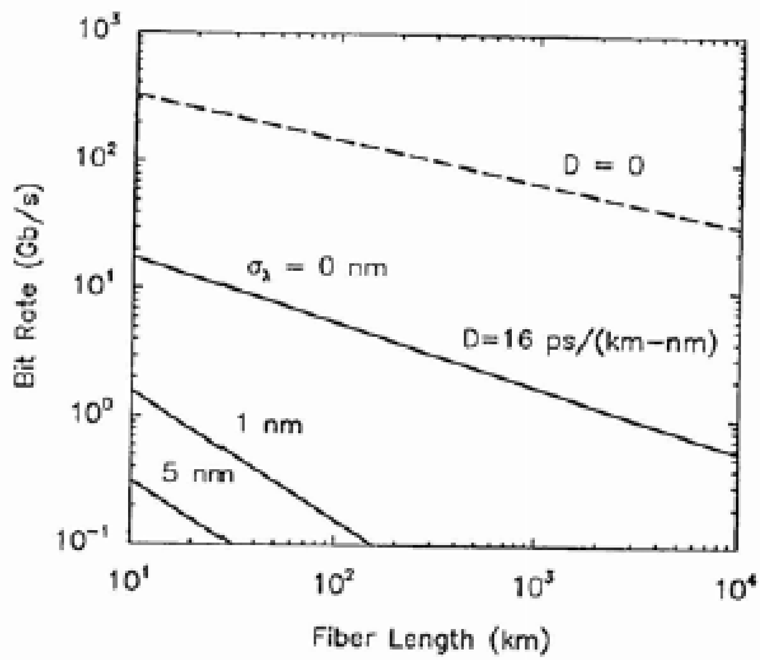
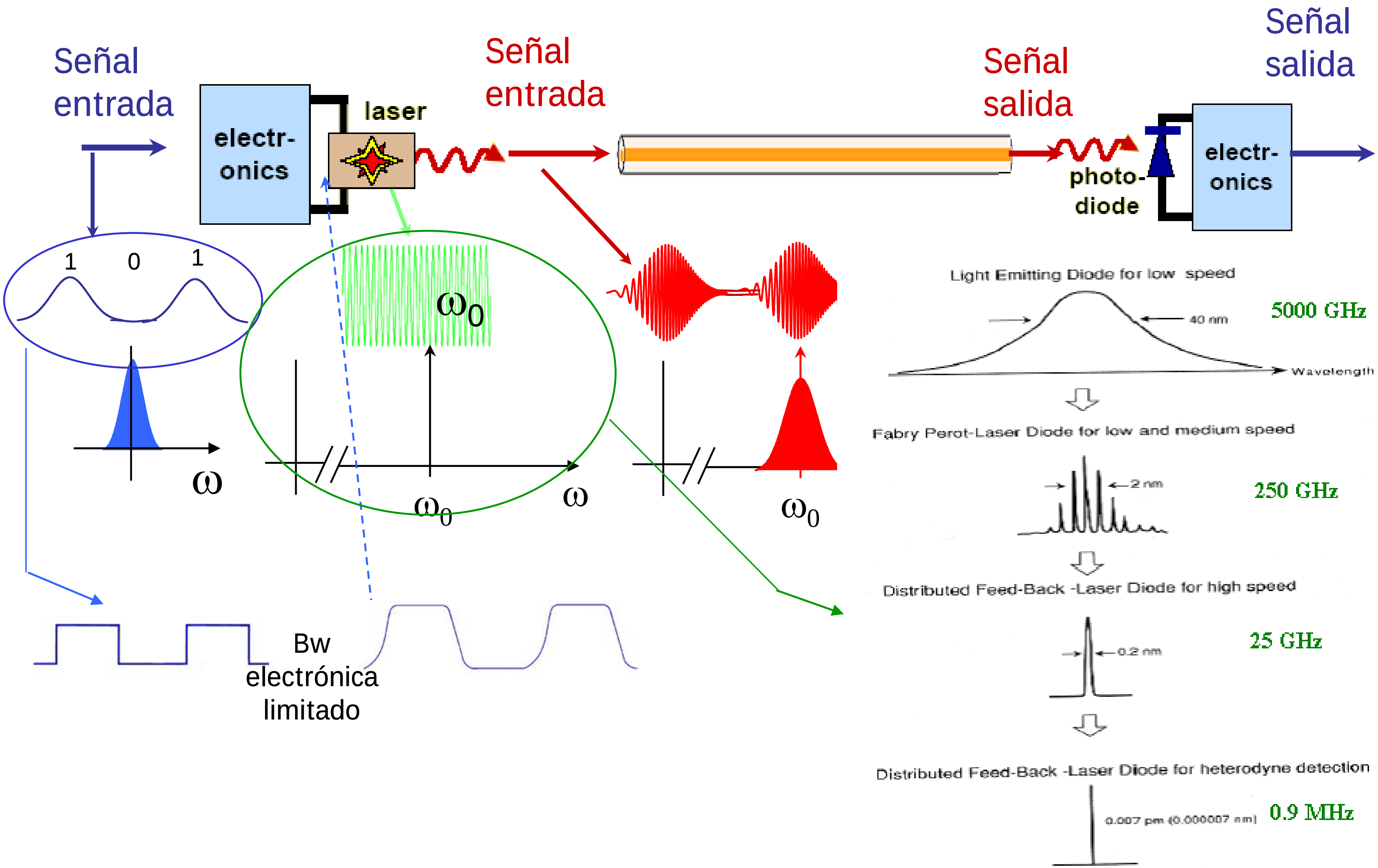


Figure Limiting bit rate of single-mode fibers as a function of the fiber length for $\sigma_\lambda = 0$, 1, and 5 nm. The case $\sigma_\lambda = 0$ corresponds to the case of an optical source whose spectral width is much smaller than the bit rate.

$\beta_3 = 0.1\ ps^3/km$

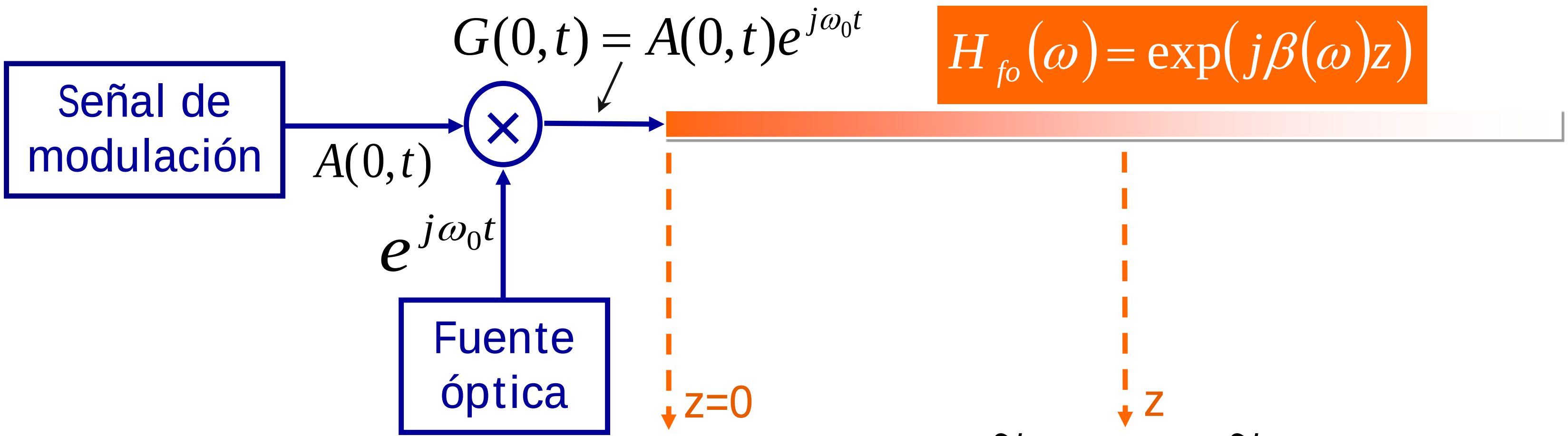
Ing. Telec., CC.OO.: tx. por fibra óptica
Dispersión: disp. intramodal o cromática

M.J. Erro
U.Púb.Navarra



M.J. Erro
U.Púb.Navarra

DISPERSIÓN: efecto en tx analógica



$$G(0,t) \leftrightarrow \tilde{G}(0,\omega) \qquad \tilde{G}(z,\omega) = \tilde{G}(0,\omega)e^{-j\beta z}$$

$$\boxed{G(z,t) \leftrightarrow \tilde{G}(z,\omega)}$$

Señal de entrada $G(z=0,t) = \left[1 + m\cos\Omega t\right] sen\,\omega_o t$

Si m<<1 y domina la dispersión de 2º orden, la señal de salida es:

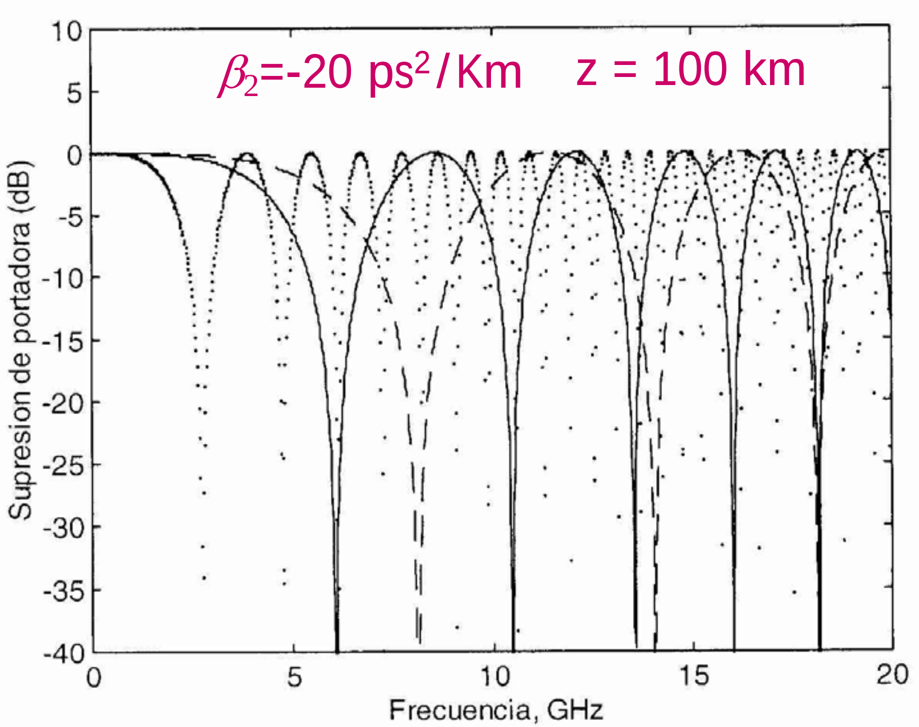
$$G(z,t) \approx \left(1 + m\cos\left(\frac{\beta_2 z\Omega^2}{2}\right)\cos\left[\Omega\left(t - \beta_1 z\right)\right]\right) sen\left[\omega_o t + \psi(z,t)\right]$$

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Comparando, se llega a la siguiente función de transferencia:

$$\boxed{|H(\Omega)| = \cos\left(\frac{\beta_2 z\Omega^2}{2}\right)}$$

El sistema actúa desde el punto de vista de la información como un filtro paso bajo



___ sin chirp ..... chirp positivo

_ _ _ chirp negativo

Se suprimen las frecuencias que cumplen:

$$\Omega = \sqrt{\frac{(2k+1)\pi}{\beta_2 z}} \qquad f_{sp} = \sqrt{\frac{c(2k+1)}{2D\lambda_o^2 z}}$$

Efecto de supresión de la portadora (eléctrica)

Una señal analógica cuyo espectro se extienda mas allá del primer cero se distorsionará al propagarse ya que parte de su espectro se suprime

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

DISPERSIÓN: términos de la dispersión

Para el Modo Fundamental: $n_{ef} = n_2 + b(n_1 - n_2) \cong n_2(1 + b\Delta).$

$$n_{ef} = n_{ef}(\omega) \rightarrow n_2 = n_2(\omega), b = b(V)$$

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2}\frac{d^2\beta}{d\omega^2} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2}\frac{d}{d\omega}\left(\frac{1}{v_g}\right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2}\frac{d}{d\omega}\left(\frac{n_g}{c}\right) = -\frac{2\pi}{\lambda^2}\left(2\frac{dn_{ef}}{d\omega} + \omega\frac{d^2 n_{ef}}{d\omega^2}\right)$$

$$D \cong .\frac{1}{c}\frac{dn_{2g}}{d\lambda} - \frac{2\pi\Delta}{\lambda^2}\left(\frac{n_{2g}^2}{n_2\omega}\frac{Vd^2(Vb)}{dV^2} + \frac{dn_{2g}}{d\omega}\frac{d(Vb)}{dV}\right) = D_{mat} + D_{wg}$$

Dispersión del material

Se produce porque los medios materiales que componen el núcleo y la cubierta son dispersivos, es decir, su constante dieléctrica (o índice de refracción) dependen del valor de la frecuencia de trabajo.
Esta propiedad es independiente de que los materiales constituyan o no una guiaonda.

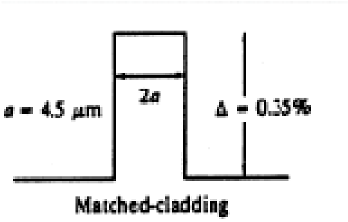
Dispersión de Guiaonda

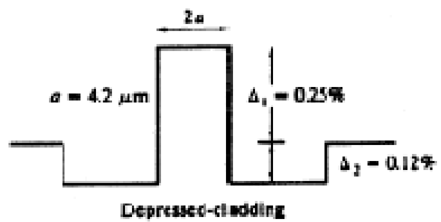
Se produce porque aunque los materiales que componen la fibra se supongan no dispersivos, la constante de propagación b es función de V y por lo tanto de ω, por el hecho de formar una guiaonda

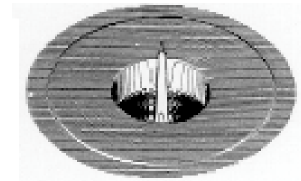
M.J. Erro
U.Púb.Navarra

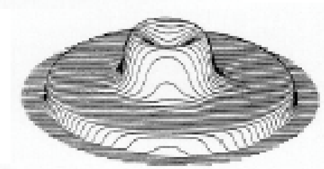
DISPERSIÓN: Control de D con perfil de índice

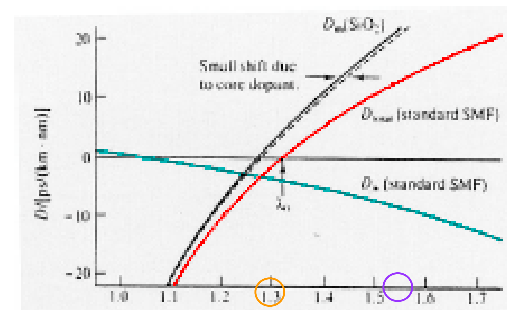
Estándar S-SMF



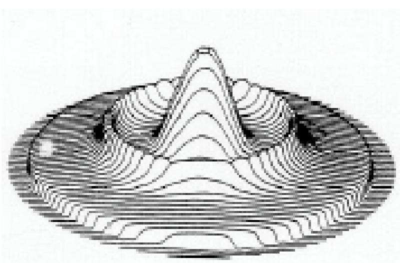


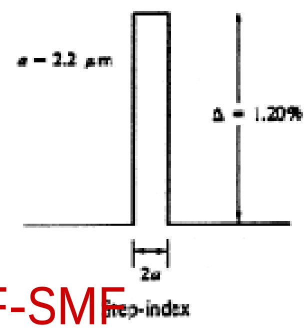


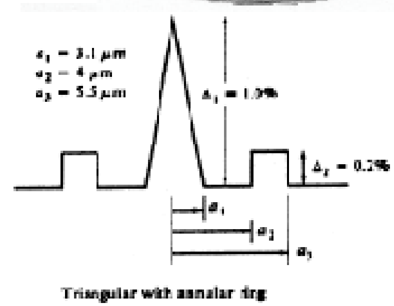


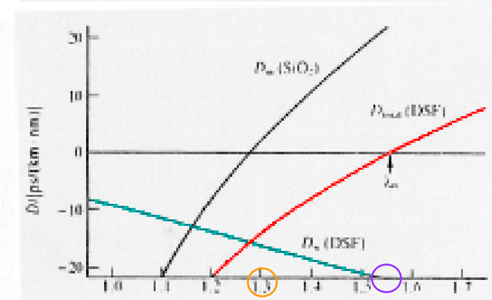


Dispersión desplazada DS-SMF

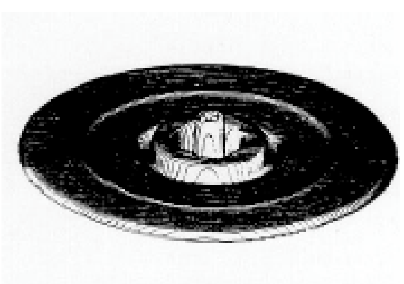


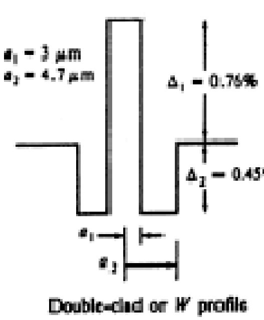


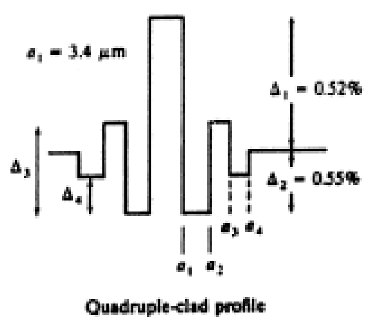


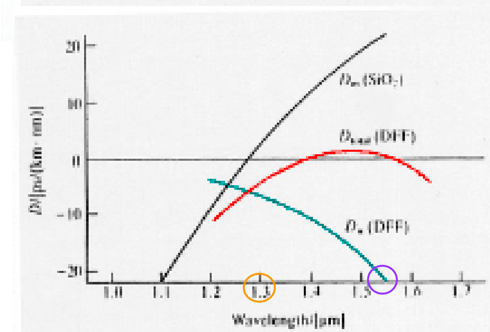


Dispersión aplanada DF-SMF









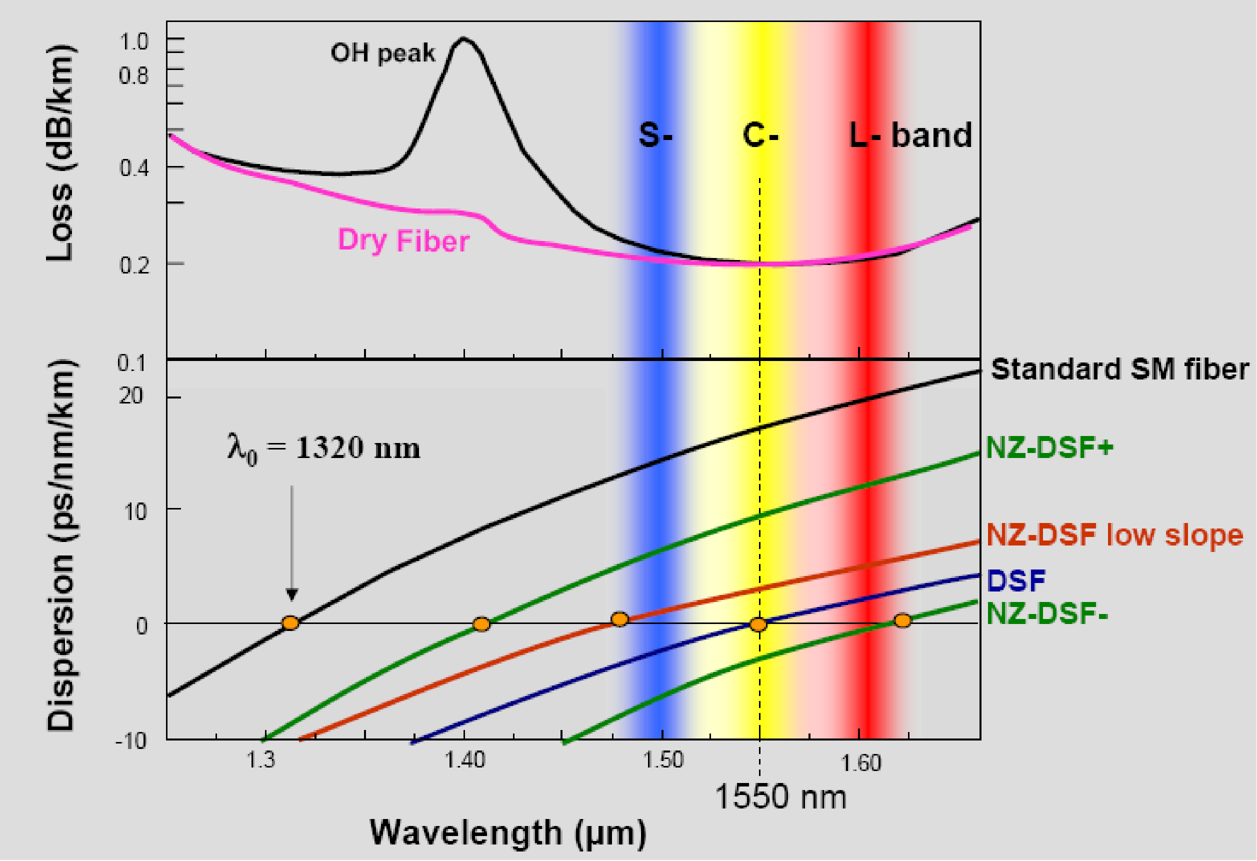
2ª ventana (1.3 μm)

3ª ventana (1.55 μm)

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

DISPERSIÓN: Tipos de fibras según el valor D

Existen **cuatro tipos fundamentales** de fibra instaladas como medio de transmisión en los sistemas de comunicaciones ópticas, **todas con atenuaciones entre 0.2 y 0.21 dB/km**. Las diferencias fundamentales residen en la **Dispersión Cromática** de las mismas.



S-SMF: 1er tipo de fibra que aparece; el 85% de la fibra instalada. Problemas debido a su **alta dispersión** a partir de 10Gb/s.

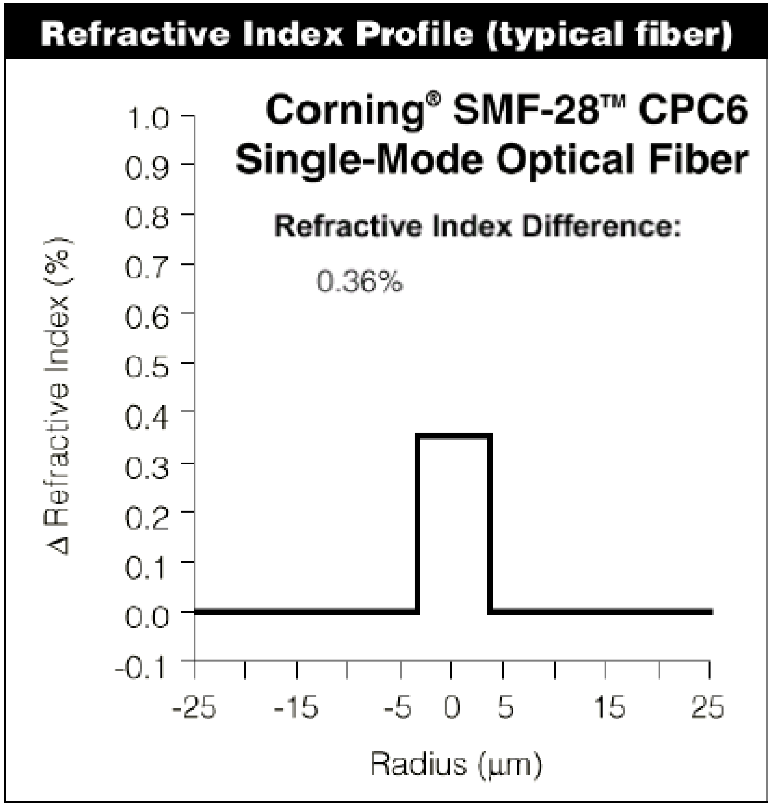
DSF: Se concibe para eliminar el problema de la alta dispersión. Buena opción para sist. de una sola portadora; en WDM presenta importantes e**fectos no lineales** como FWM (*Four Wave Mixing*) por su baja dispersión.

NZDSF±: *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber.* Baja dispersión pero no nula. Se reduce el efecto del FWM

Ejemplo típico de fibra óptica monomodo

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Especificaciones *Corning*



Core Diameter:

8.3 µm

Numerical Aperture:

0.13

NA was measured at the one percent power angle of a one-dimensional far-field scan at 1310 nm.

- **Cable Cutoff Wavelength (λ_{ccf})**

  λ_{ccf} < 1260 nm

Fibra monomodo a partir de 1260 nm

- **Mode-Field Diameter**

  8.80 to 9.80 µm at 1310 nm
  9.50 to 11.50 µm at 1550 nm

Zero Dispersion Wavelength (λ_0):
1301.5 nm $\leq \lambda_0 \leq$ 1321.5 nm

Índice

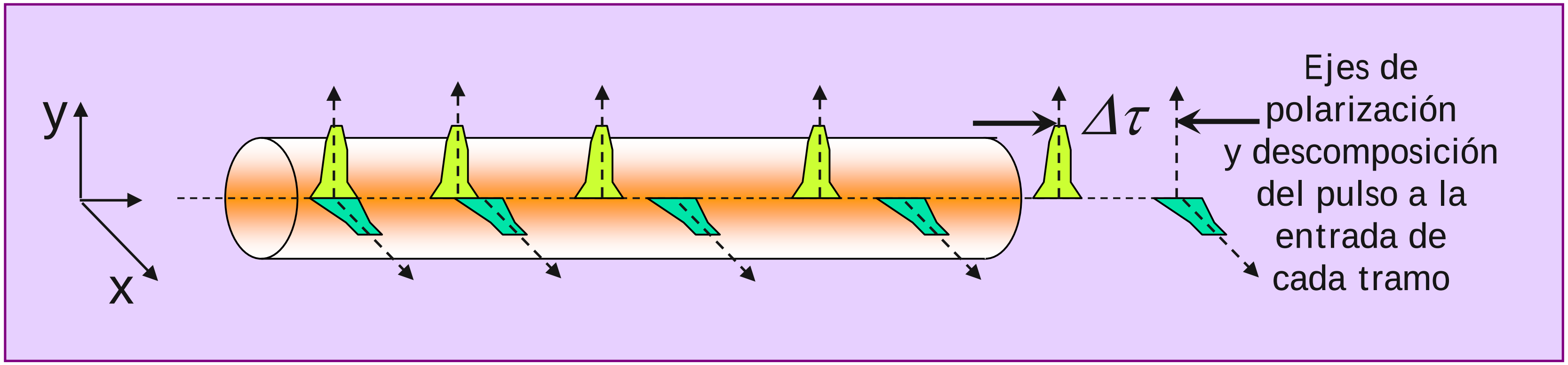
M.J. Erro
U.Púb.Navarra

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Origen y significado de la PMD (disp. por modo de polarización)

La energía de un pulso se acopla a las dos polarizaciones lineales posibles del modo fundamental (LP_{01})

Cada polarización viaja a diferente velocidad, $c/\overline{n}_{01}^{x}$ y $c/\overline{n}_{01}^{y}$, debido a la **birrefringencia** $B = \left|\overline{n}_{01}^{x} - \overline{n}_{01}^{y}\right|$ Típicamente, $B \sim 10^{-5} - 10^{-6}$

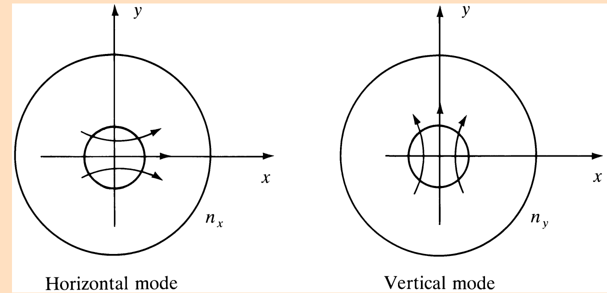


La dispersión por modo de polarización es, en primera aproximación, proporcional a *L*. SIN EMBARGO, hay que tener en cuenta que en enlaces largos hay cambios en el estado de polarización (SOP), es decir, se acopla potencia entre las dos polarizaciones

M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Birrefringencia

Incluso en la SMF pueden propagarse dos modos, o más bien, se propaga el modo fundamental tanto polarizado vertical como horizontalmente



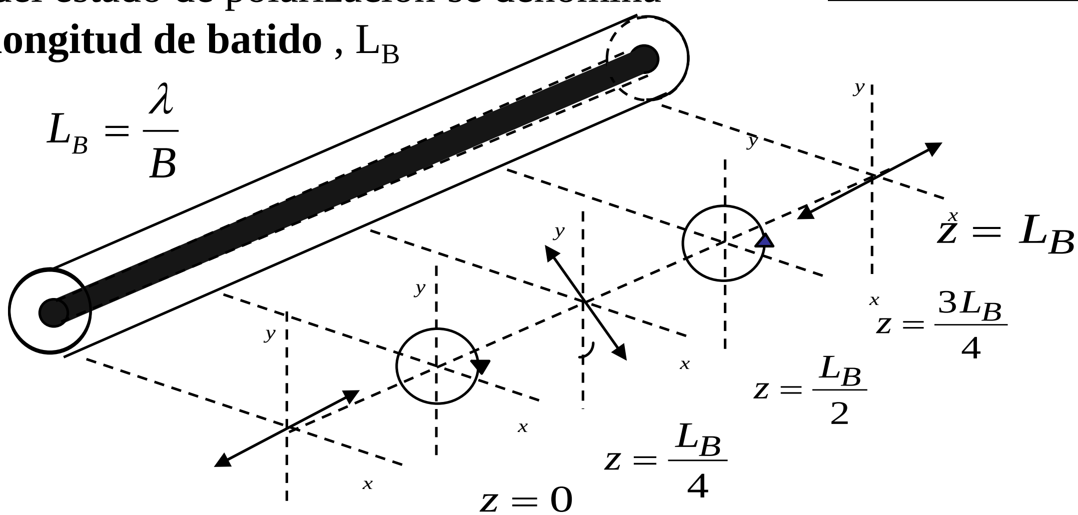
Se conoce con el nombre de **birrefringencia** al hecho de que el índice efectivo para la pol. vertical y para la pol horizontal sea diferente. Esto supone diferentes velocidades de propagación para estos modos y por tanto dispersión-dispersión por modo de polarización- y cambio en el SOP con la propagación

La longitud que define el periodo de variación del estado de polarización se denomina **longitud de batido** , L_B

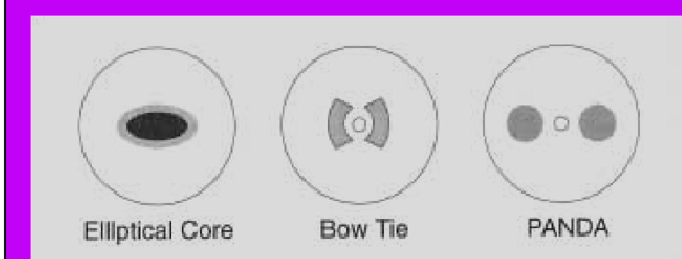
$$B = \left| \overline{n}_{01}^{x} - \overline{n}_{01}^{y} \right|$$

Típicamente, B ~ $10^{-5} - 10^{-6}$

$$L_B = \frac{\lambda}{B}$$



Fibras mantenedoras de polarización



M.J. Erro
U.Púb.Navarra

Importancia y valores de la PMD

Se trabaja con los llamados estados principales de polarización y se calcula el retardo entre ellos a la salida del enlace, $\Delta\tau$ (DGD: differential group delay)

La dificultad estriba en que $\Delta\tau$ es una variable aleatoria. Su fdp es de tipo Maxwelliano y su valor medio viene dado por:

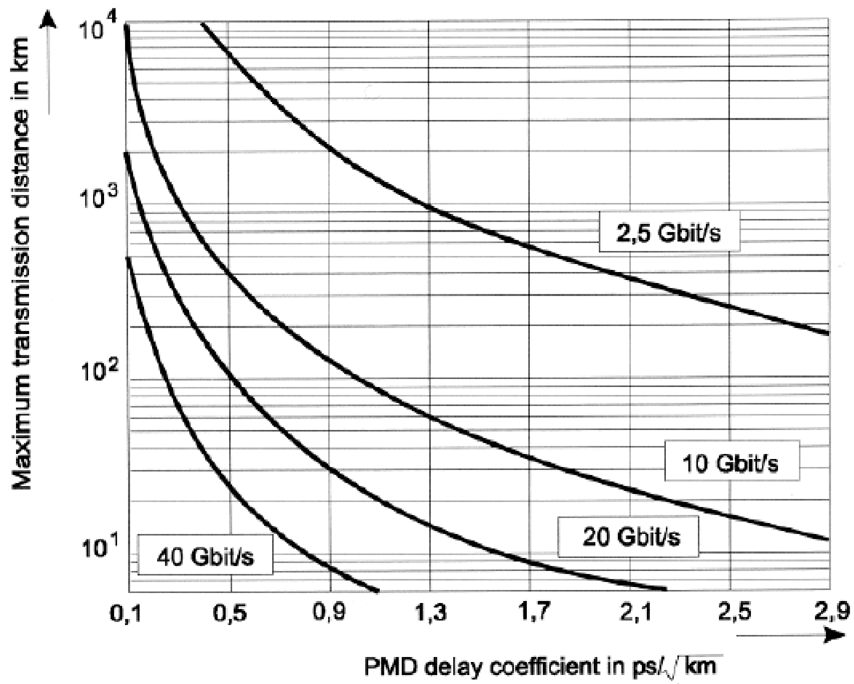
$$\langle \Delta\tau \rangle = \frac{d(\Delta\beta)}{dw}\sqrt{l_c L} = PMD\sqrt{L}$$

La dispersión por modo de polarización (PMD) es un fenómeno estadístico y es proporcional a $L^{1/2}$

Se exige que la penalización no sea superior a 1 dB mas de 30´ al año

$$PMD \leq \frac{0{,}14}{B\sqrt{L}} \qquad B^2 L \leq \left(\frac{0{,}14}{PMD}\right)^2$$

Importante: en sistemas sin dispersión cromática, altas velocidades, fibras antiguas



Índice

Resumen y conclusiones

- **Desde el punto de vista de la tx., la fibra óptica se puede modelar (a baja potencia) como un filtro de fase**
- **La dispersión es muy diferente de unas fibras a otras. Supone, dada una longitud del enlace, un límite en la velocidad de transmisión de señales digitales y un límite en el ancho de banda de señales analógicas**
- **La dispersión intermodal hace que las MMF sólo puedan usarse para enlaces cortos de bajas veloc. de tx. o bajos anchos de banda**
- **La dispersión cromática es el factor limitante en SMF y es especialmente nociva con fuentes de alta anchura espectral. Con diferentes perfiles de índice puede controlarse este valor, lo que da lugar a diferentes fibras típicas (S-SMF, DS-SMF, NZD-SMF)**
- **La dispersión por modo de polarización es menos limitante que las anteriores. Sólo es problemática en enlaces de muy altas prestaciones.**