

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



BLOQUE	I.4 Transmisión de información por fibra óptica
<i>Objetivos</i>	<p>Se pretende que el alumno:</p> <ul style="list-style-type: none">• 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.
<i>Duración</i>	10 horas
 <i>Programa</i>	<p>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</p>

- Introducción
- Origen de los efectos no lineales en la fibra óptica
- Scattering Raman Estimulado, SRS
- Scattering Brillouin Estimulado, SBS
- Automodulación de fase, SPM
- Modulación cruzada de fase, XPM
- Mezclado de cuatro ondas, FWM
- Resumen y conclusiones

■ Introducción

- Scattering Raman Estimulado, SRS
- Scattering Brillouin Estimulado, SBS
- Automodulación de fase, SPM
- Modulación cruzada de fase, XPM
- Mezclado de cuatro ondas, FWM
- Resumen y conclusiones

Situaciones en las que pueden excitarse las no-linealidades en f.o.

Si la intensidad óptica aumenta puede excitarse el **régimen no-lineal**

Los láseres cada vez son de mayor potencia, se emplean tb amplificadores ópticos

La densidad de potencia en el núcleo de una f.o. es alta por ser de dimensiones reducidas (1 mW en S-SMF es 12 MW/m²)

Para alta velocidad (>2.5 Gbps), los pulsos son cortos: alta potencia de pico

En ausencia de dispersión los pulsos no se ensanchan, mantienen su potencia de pico a lo largo de la transmisión

Largas distancias, que hacen que cambios de fase se acumulen

**Hoy en día hay que estudiar las no-linealidades
(pueden aparecer con sólo 10 mW)**

Diferencias entre régimen de funcionamiento lineal y no lineal

Régimen lineal

Potencia de salida proporcional a la potencia de entrada

Cambio de fase proporcional al índice de refracción efectivo

No se generan nuevas longitudes de onda

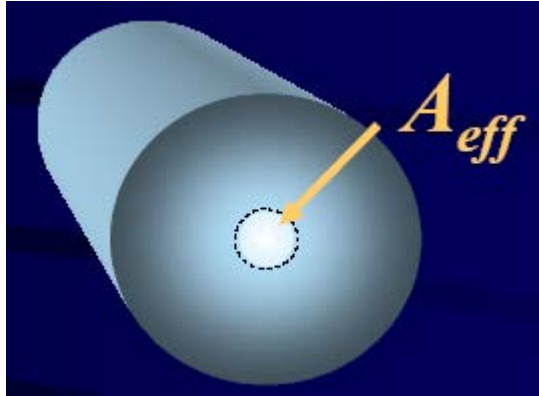
Régimen no lineal

Potencia de salida NO proporcional a la potencia de entrada (atenuación "extra")

Cambio de fase NO proporcional al índice de refracción (*chirp* "extra")

SÍ se generan nuevas longitudes de onda y las distintas portadoras (longitud de onda) interaccionan entre sí (diafonía y distorsión)

Definiciones importantes: área efectiva



Área efectiva

$$A_{\text{eff}} > A_{\text{núcleo}}$$

El área efectiva es el área que ocuparía el modo fundamental en una f.o. con la misma intensidad pero con una distribución constante de potencia en su diámetro

modal

$$A_{\text{eff}} = \frac{[\int I dA]^2}{\int I^2 dA}$$

$$A_{\text{eff}} = k \cdot \pi \cdot \left(\frac{MFD}{2} \right)^2$$

Fibra G-652 $\rightarrow k = 0,955 - 0,965$

Fibra G-653 $\rightarrow k = 0,945 - 0,960$ En la región de 1550 nm

Fibra G-655 \rightarrow calcular A_{eff} midiendo la distribución de intensidad de campo del modo fundamental

El área efectiva depende de la longitud de onda (aumenta al aumentar λ)

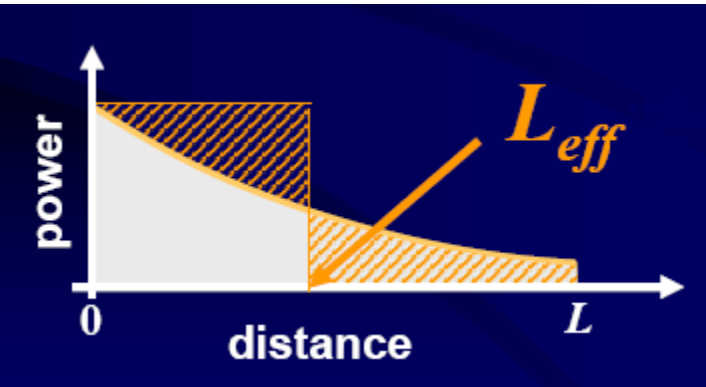
Cuanto mayor es el área efectiva, menores son los efectos de las no-linealidades

S-SMF, $A_{\text{eff}} = 80 \mu\text{m}^2$

DS-SMF, $A_{\text{eff}} = 55 \mu\text{m}^2$

(en 1550 nm)

Definiciones importantes: longitud efectiva



$$P_o L_{eff} = \int_0^L P_o e^{-\alpha z} dz$$

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha}$$

$$L_{eff} = \begin{cases} L & \text{si } \alpha L \ll 1 \\ 1/\alpha & \text{si } \alpha L \gg 1 \end{cases}$$

Longitud efectiva

Los efectos no-lineales dependen de la intensidad óptica, que disminuye con la longitud de propagación en presencia de atenuación

A partir de una distancia en torno a L_{eff} , los efectos no-lineales no serán importantes

Si $\alpha = 0.22$ dB/km, $1/\alpha = 4,5$ km

SMF en 3ª ventana

- Introducción

- Scattering Raman Estimulado, SRS

- Scattering Brillouin Estimulado, SBS

- Automodulación de fase, SPM

- Modulación cruzada de fase, XPM

- Mezclado de cuatro ondas, FWM

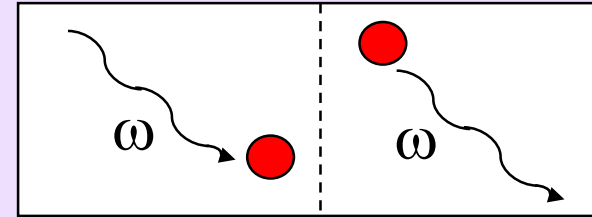
- Resumen y conclusiones

Scattering: lineal y no lineal.

El scattering produce un trasvase de potencia desde el modo guiado a campo difundido, lo que da lugar a pérdidas adicionales en la fibra óptica.

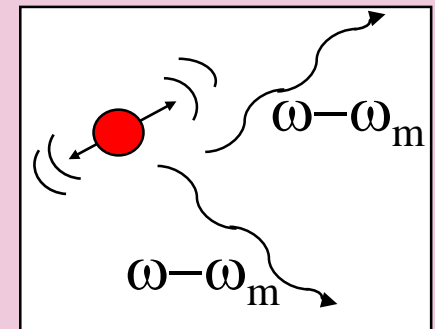
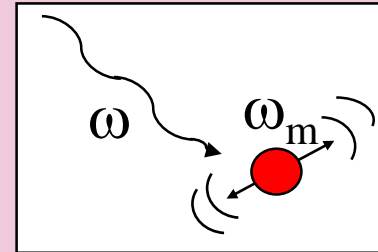
Scattering Rayleigh: naturaleza lineal

la luz dispersada es de la misma frecuencia que la incidente



Scattering no lineal: Se produce por la interacción de la luz con
Pérdidas no lineales fonones (vibraciones moleculares de la sílice)

la luz dispersada es de menor energía y por tanto menor frecuencia (mayor longitud de onda) que la incidente



Dispersión de Raman estimulada (SRS): fonón óptico

Dispersión de Brillouin estimulada (SBS): fonón acústico

Umbral en el efecto Raman

El fenómeno de SRS no es significativo para potencias de entrada por debajo de un cierto valor umbral. La **potencia umbral**, P_u , definida como la potencia incidente cuya mitad se pierde después de propagarse por una longitud de fibra L se estima:

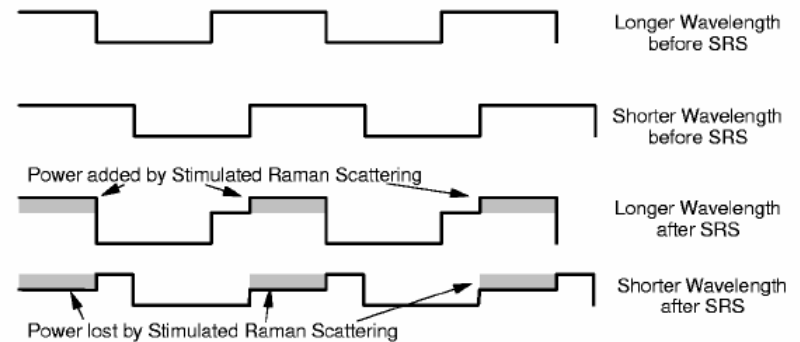
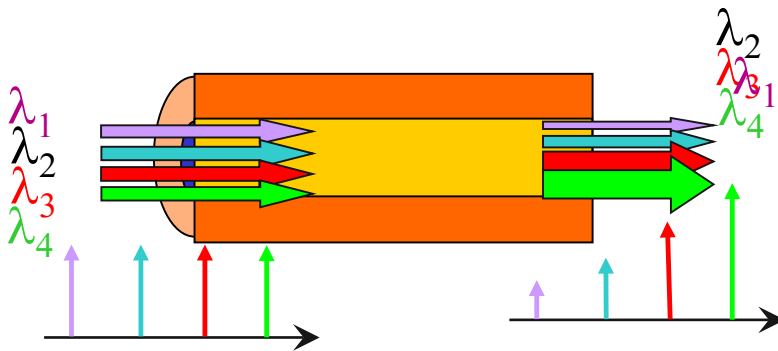
$$g_R P_u L_{eff} / A_{eff} \cong 16$$

g_R es el valor de pico de la ganancia Raman

g_R es de $6 \cdot 10^{-14}$ m/W en 1550 nm

Por ejemplo, para $L_{eff} = 20$ km, $A_{eff} = 80 \mu\text{m}$, $P_u \sim 1.8$ W (en $1.55 \mu\text{m}$), por lo que no supone una limitación en los sist. de com. ópt. de un solo canal. Sí puede serlo en sistemas de WDM.

Efecto del SRS en sist. WDM



Transferencia de potencia desde longitudes de onda menores a las superiores: aumenta con la separación de canales

Puede usarse para hacer amplificadores ópticos (ampl. Raman), pero en la tx es un ruido añadido

Umbral en el efecto Raman

El fenómeno de SRS no es significativo para potencias de entrada por debajo de un cierto valor umbral. La **potencia umbral**, P_u , definida como la potencia incidente cuya mitad se pierde después de propagarse por una longitud de fibra L se estima:

$$g_R P_u L_{eff} / A_{eff} \cong 16$$

g_R es el valor de pico de la ganancia Raman

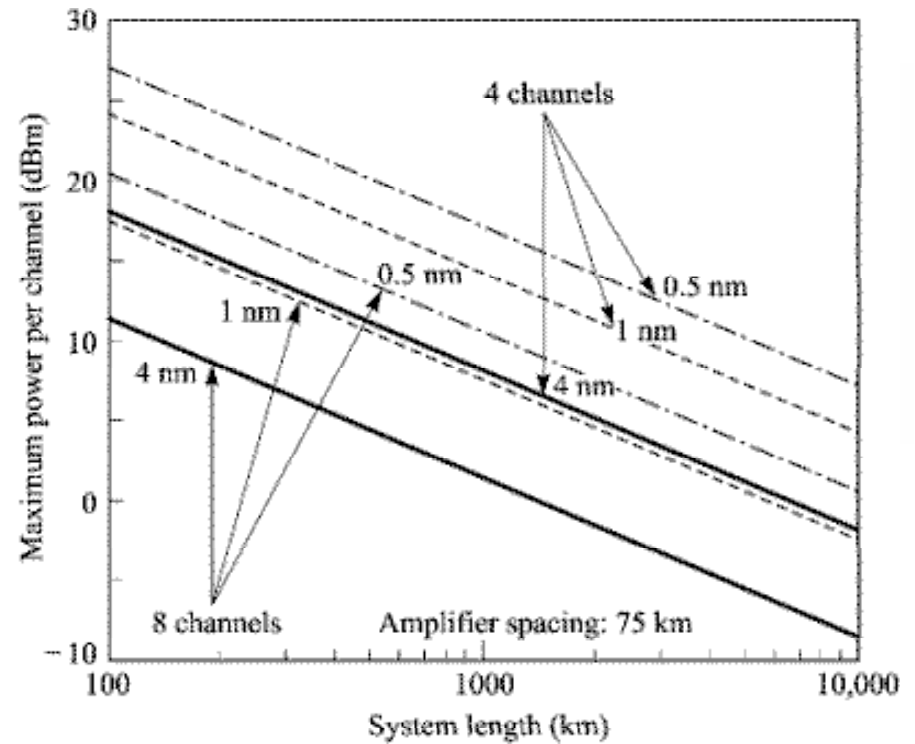
g_R es de $6 \cdot 10^{-14}$ m/W en 1550 nm

Por ejemplo, para $L_{eff} = 20$ km, $A_{eff} = 80 \mu\text{m}$, $P_u \sim 1.8$ W (en $1.55 \mu\text{m}$), por lo que no supone una limitación en los sist. de com. ópt. de un solo canal. Sí puede serlo en sistemas de WDM.

Efecto del SRS en sist. WDM

Limita la máxima potencia de cada canal (en función de su número y de su separación)

Ej: 10 canales separados 1 nm, no deben exceder los 3 mW para evitar efecto SRS



- Introducción
- Scattering Raman Estimulado, SRS
- Scattering Brillouin Estimulado, SBS
- Automodulación de fase, SPM
- Modulación cruzada de fase, XPM
- Mezclado de cuatro ondas, FWM
- Resumen y conclusiones

Umbral en el efecto Brillouin

El fenómeno de SBS no es significativo para potencias de entrada por debajo de un cierto valor umbral.

La potencia umbral, P_u , definida como la potencia incidente cuya mitad se pierde después de propagarse por una longitud de fibra L se estima:

señal CW

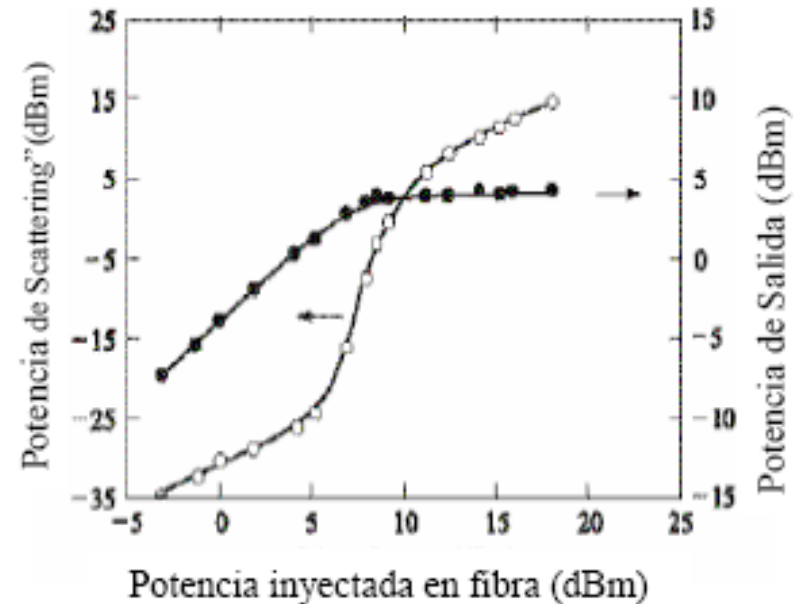
$$g_B P_u L_{ef} / A_{ef} \cong 21$$

señal modulada NRZ

$$g_B P_u L_{ef} / A_{ef} \cong 42 \left(1 + \frac{\Delta f_o}{\Delta f_B} \right)$$

g_B es el coeficiente de la ganancia Brillouin.

Δf_o ancho de línea de la fuente óptica



Típicamente $P_u \sim 1$ mW (@ 1.55 μm), pero la anchura espectral de la ganancia de Brillouin es relativamente pequeña (~10 MHz). Como los pulsos transmitidos suelen tener un espectro más ancho, una gran parte de su energía no sufre pérdidas de Brillouin (umbral efectivo en 10 mW). El umbral aumenta al modular

- Introducción
- Scattering Raman Estimulado, SRS
- Scattering Brillouin Estimulado, SBS
- Automodulación de fase, SPM
- Modulación cruzada de fase, XPM
- Mezclado de cuatro ondas, FWM
- Resumen y conclusiones

Índice de refracción no lineal

$$\bar{P}_{NL}(t) = \varepsilon_0 \varepsilon_{NL} \bar{E}(t) \quad \longrightarrow \quad \varepsilon_{NL} = \frac{3}{4} \chi^{(3)} |\bar{E}(t)|^2$$

Parte lineal

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \tilde{\chi}_{xx}^{(1)}(\omega) + \varepsilon_{NL}$$

Parte No lineal

imaginaria: ganancia o
pérdidas (SBS, SRS)

real: cambio de fase
(SPM, XPM, FWM)

Parte lineal Índice de refracción no lineal

$$\bar{n}(\omega) = n(\omega) + n_2 |\bar{E}|^2$$

$$\text{con } n_2 = \frac{3}{8n} \chi_{xxxx}^{(3)}$$

Val. Tip: $2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2 / \text{W}$

Efecto KERR

El índice de refracción que experimenta el modo fundamental en una fibra, depende débilmente de la potencia que transporta:

$$n(z) = n_o + n_2 \frac{P(z)}{A_{eff}}$$

Modelo para la propagación en presencia de SPM

Debido al efecto Kerr, cuando un pulso de suficiente potencia se propaga por la fibra experimenta un cambio de fase proporcional a dicha potencia

$$n(z) = n_o + n_2 \frac{P(z)}{A_{eff}} \quad \longrightarrow \quad \beta(z) = k_0 n(z) = \beta_L + \beta_{NL}(z) = \beta_L + \gamma P(z)$$

donde γ coeficiente no lineal de la fibra $(W.Km)^{-1}$

$$\gamma = k_0 \frac{n_2}{A_{eff}} = \frac{\omega}{c} \frac{n_2}{A_{eff}} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2}{A_{eff}}$$

Cambio de fase al propagarse una distancia L de fibra:

$$\phi_{NL} = \left(\frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \right) P(0) L_{eff} = \gamma P(0) L_{eff}$$

Matemáticamente la propagación de señales se puede expresar mediante una ecuación similar a la que tenía en cuenta la dispersión, añadiendo un nuevo término

ec Schrödinger no lineal

$$i \frac{\partial U}{\partial \xi} - \text{sgn}(\beta_2) \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial \tau^2} + N^2 |U|^2 U = 0$$
$$\text{sgn}(\beta_2) = \begin{cases} +1 & \beta_2 > 0 \\ -1 & \beta_2 < 0 \end{cases}$$

donde

$$U(z, t) = \frac{A(z, t)}{\sqrt{P_0}}$$

envolvente
normalizada

$$N^2 = \frac{L_D}{L_{NL}}$$

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0}$$

Longitud no
linealidad

Ejemplo:

$L_{NL} = 38 \text{ km}$ (10 mW);

$L_{NL} = 384 \text{ km}$ (1 mW)

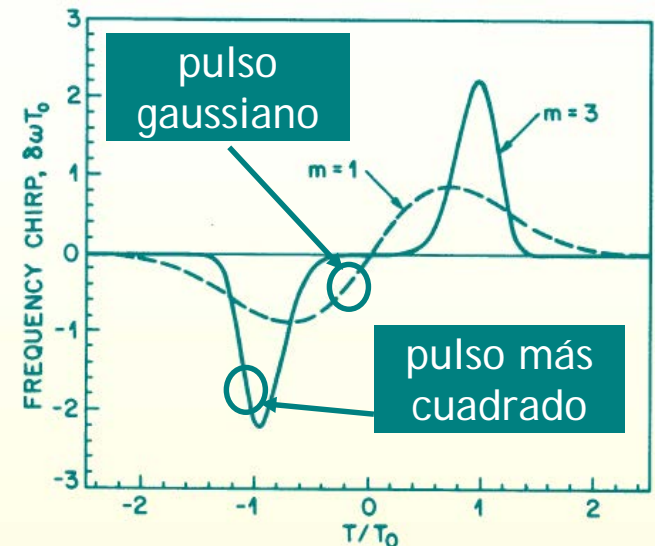
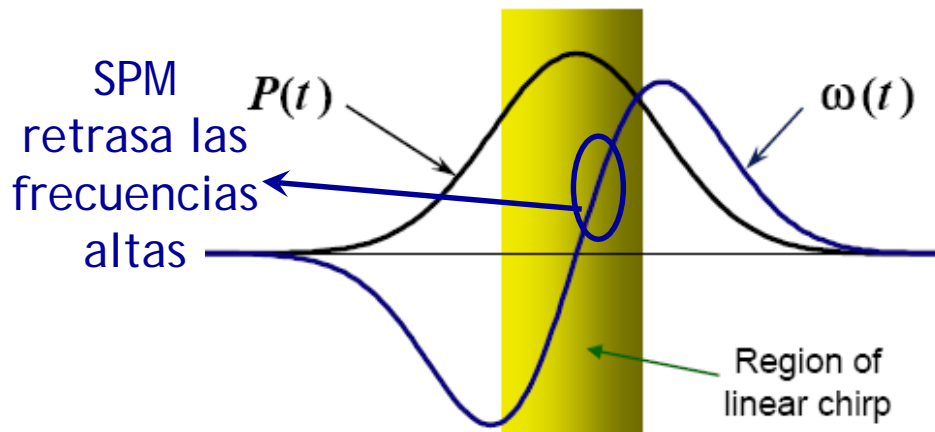
Efecto del SPM

En ausencia de dispersión, $\beta_2=\beta_3=0$, la solución a la ec. Sch. no lineal es:

$$U(z, \tau) = U(0, \tau) \exp\left(jz \frac{|U(0, \tau)|^2}{L_{NL}}\right)$$

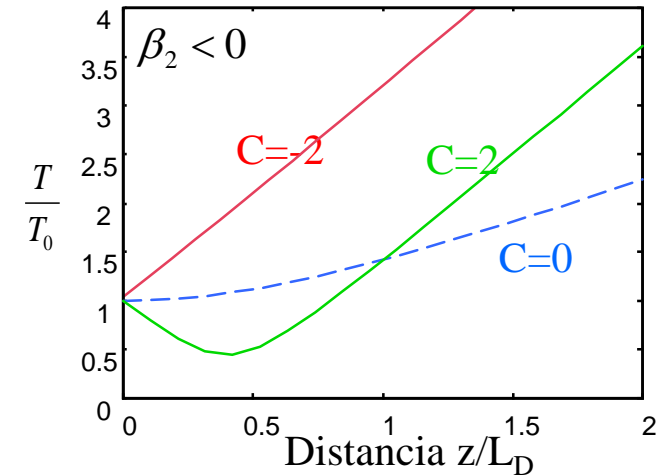
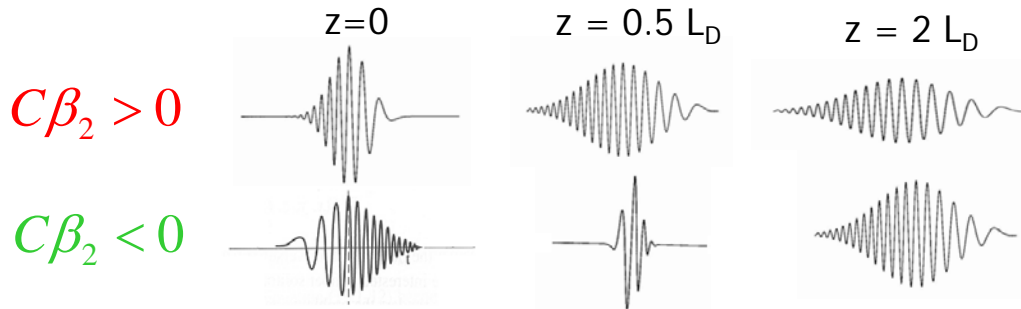
- No cambia el módulo de la señal temporal que se propaga
- Cambia la fase instantánea, es decir, "se automodula en frecuencia", la SPM genera un *chirp* que depende de cómo es la forma del pulso a la entrada

En pulsos gaussianos, aprox. lineal en el centro (amplitud alta), para pulsos más cuadrados, más concentrado en los extremos



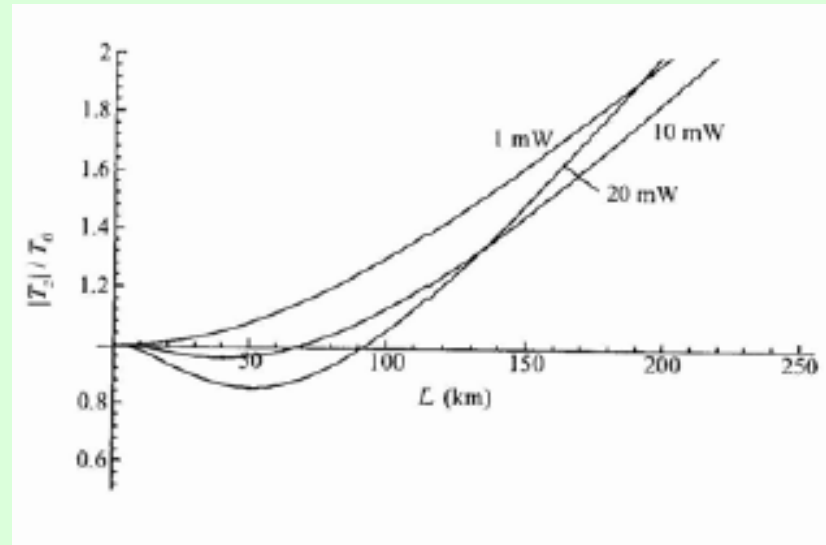
Efecto combinado SPM-dispersión

En el tema anterior, se estudió cómo el chirp (mod. frec. parásita) de las ftes influía en el efecto de la dispersión.

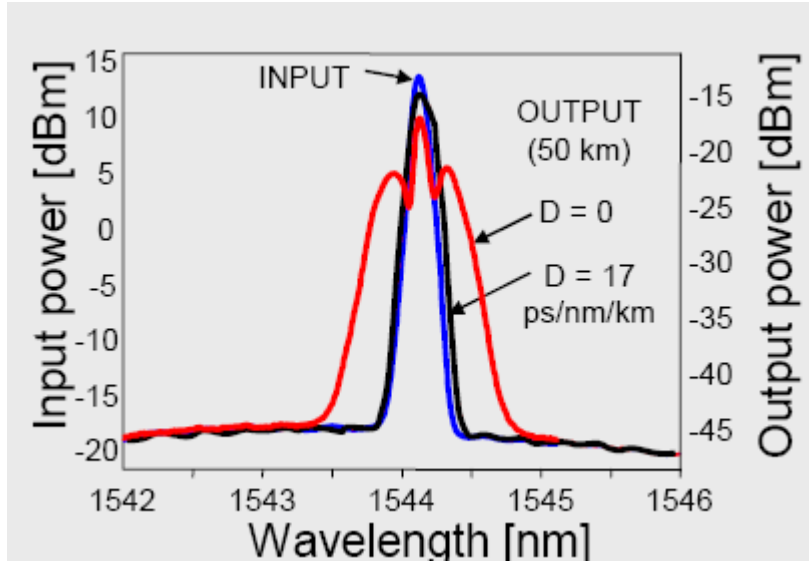


La SPM equivale a introducir un chirp, con lo que en presencia de dispersión, β_2 , el pulso se ensanchará y, en general, lo hará más rápidamente que si no hubiese automodulación de fase.

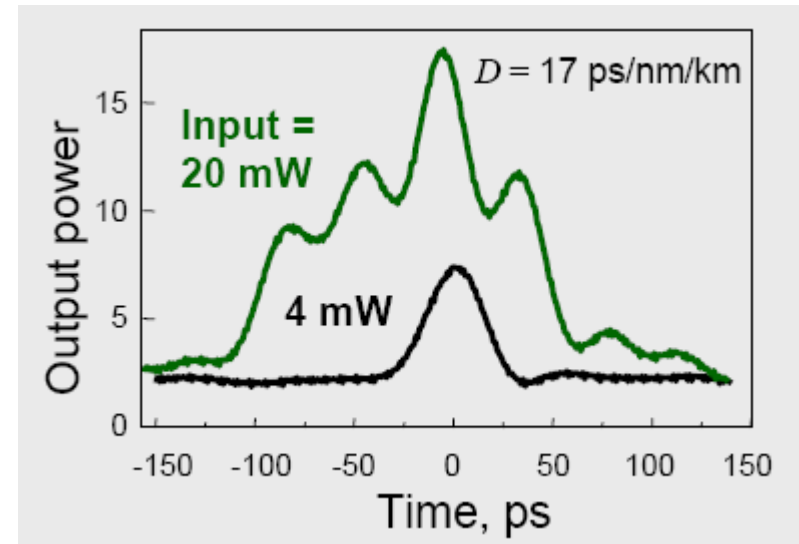
Ahora bien, si el *chirp* inducido por la SPM es de signo contrario que β_2 , puede comprimirse al principio. Esto último es lo que ocurre en tercera ventana para S-SMF y es el principio de funcionamiento de la técnica de transmisión con solitones



Efecto combinado SPM-dispersión



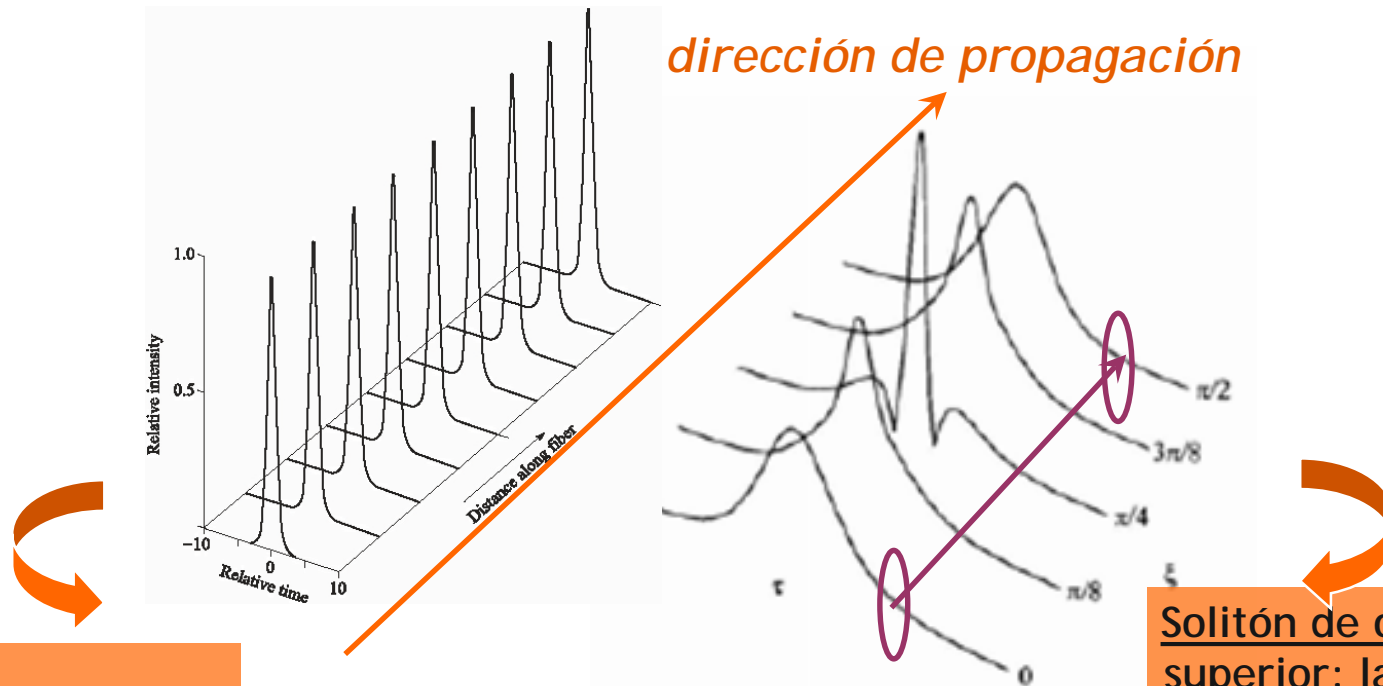
Si la dispersión es pequeña, el efecto del SPM es muy visible y se produce un gran ensanchamiento en el dominio de la frecuencia (problemas en WDM)



Si la dispersión es alta, dominará sobre el SPM y el pulso se ensancha más temporalmente (problemas a alta velocidad)

Compromiso no-linealidad y dispersión: fibras NZ-DSF

Solitones: Autovectores de la ecuación de Schrödinger no lineal
Pulsos con unas envolventes determinadas que evitan el problema de la dispersión cromática aprovechando efecto SPM



Solitón de primer orden: la SPM compensa la dispersión cromática y el pulso no cambia

Problemas: atenuación, colisión de solitones,

Solitón de orden superior: la SPM y la dispersión cromática se compensan mutuamente periódicamente

- Introducción
- Scattering Raman Estimulado, SRS
- Scattering Brillouin Estimulado, SBS
- Automodulación de fase, SPM
- **Modulación cruzada de fase, XPM**
- Mezclado de cuatro ondas, FWM
- Resumen y conclusiones

En sist. WDM: debido al efecto Kerr, el índice de refracción que un canal "ve" depende de la potencia del resto de canales

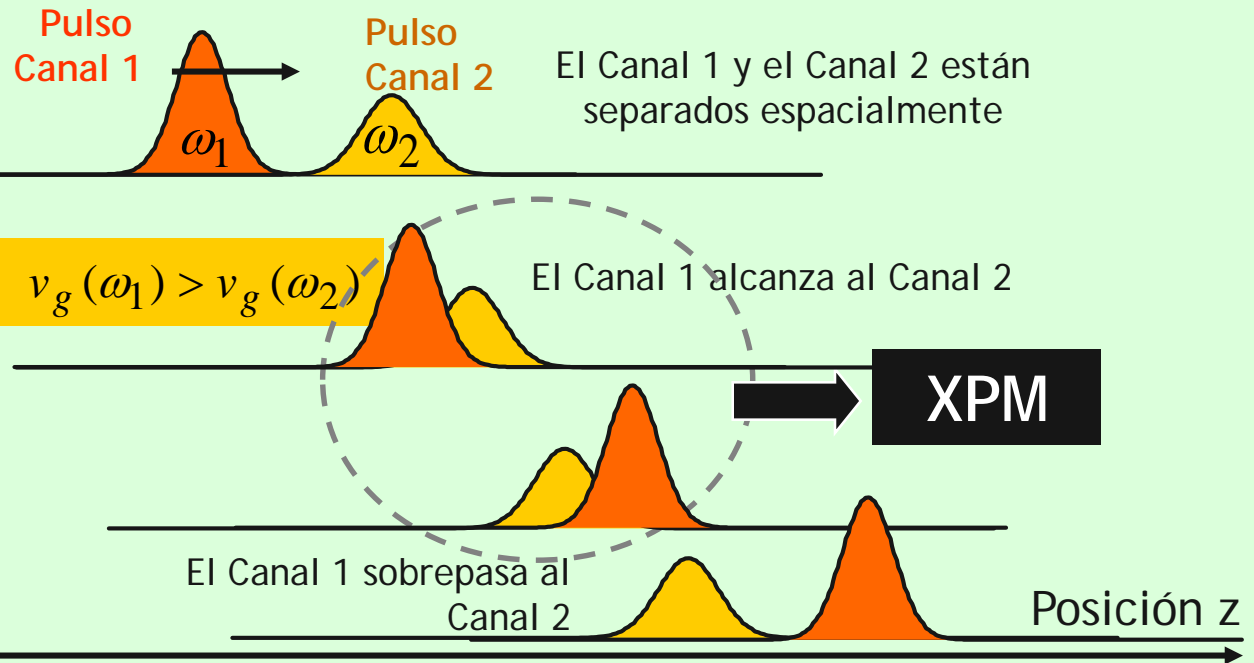
2 canales $n(z) = n_o + \frac{n_2}{A_{eff}} (P_1 + 2P_2)$ Siempre que hay XPM, habrá también SPM

Se produce un cambio de fase o *chirp* al propagarse una distancia L de fibra:

$$\phi_{NL,j} = \left(\frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \right) \left(P_j(0) + 2 \sum_{m \neq j} P_m(0) \right) L_{eff} = \gamma L_{eff} \left(P_j(0) + 2 \sum_{m \neq j} P_m(0) \right)$$

La interacción entre canales depende de la velocidad de propagación relativa y por lo tanto de la dispersión

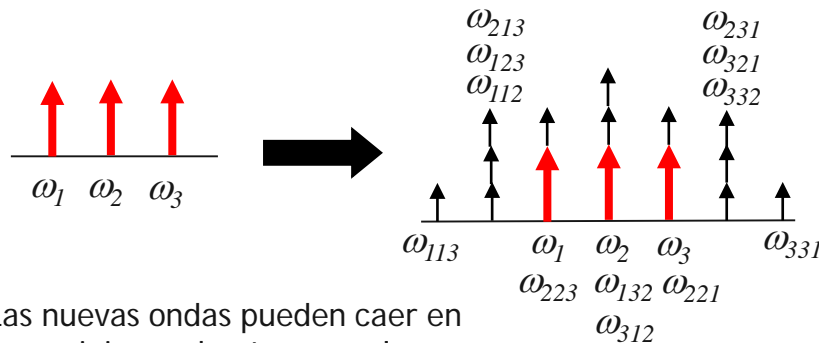
Si $D \uparrow \rightarrow XPM \downarrow$



- Introducción
- Scattering Raman Estimulado, SRS
- Scattering Brillouin Estimulado, SBS
- Automodulación de fase, SPM
- Modulación cruzada de fase, XPM
- Mezclado de cuatro ondas, FWM
- Resumen y conclusiones

Conceptos básicos

- Se debe al efecto Kerr (dependencia del índice de refracción con la intensidad de la señal óptica transportada)
- Se produce en sistemas WDM
- Generación de nuevas ondas ópticas a frecuencias: $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$ siendo las frecuencias i, j, k , tres componentes de un sistema de N portadoras ópticas



Las nuevas ondas pueden caer en las posiciones de otros canales e interferirlos

Condiciones:

- Elevado nivel de potencia TOTAL
- Crece al acercarse los canales ópticos
- Crece al reducirse la dispersión

La energía transferida a las nuevas longitudes de onda se traduce en una pérdida de potencia en los canales transmitidos y también produce diafonía

Origen de la mezcla de cuatro ondas

$$\hat{E} = \hat{x} \frac{1}{2} \sum_{j=1}^4 E_j \exp[i(k_j z - \omega_j t)] + c.c. \Rightarrow \hat{P}_{NL} = \varepsilon_0 \chi^{(3)} : \hat{E} \hat{E} \hat{E} \hat{E} \Rightarrow$$

$$P_4 = \frac{3\varepsilon_0}{4} \chi_{xxxx}^{(3)} \left\{ \left[|E_4|^2 + 2(|E_1|^2 + |E_2|^2 + |E_3|^2) \right] E_4 + 2E_1 E_2 E_3 \exp(i\theta_+) + 2E_1 E_2 E_3^* \exp(i\theta_-) + \dots \right\}$$

**Términos relacionados con la Auto
Modulación y Modulación Cruzada de
Fase (SPM y XPM)**

**Responsables de la aparición de nuevas
componentes de campo a la frecuencia
 ω_4 generadas por el resto de frecuencias**

con $\theta_+ = (k_1 + k_2 + k_3 - k_4)z - (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 - \omega_4)t$
 $\theta_- = (k_1 + k_2 - k_3 - k_4)z - (\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4)t$

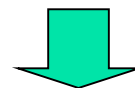
La eficiencia con que los términos P_4 y E_4 son capaces de acoplarse para alimentar la onda a ω_4 dependerá de la fase relativa entre éstos dos, es decir de θ_+ y θ_- . De forma más concreta, las fases relativas deberán anularse para conseguir un nivel alto de eficiencia en el acoplamiento. La condición anterior es lo que se conoce como **Condición de Fase**.

Cond, de Constantes
de Propagación



$$\Delta k = (k_1 + k_2 - k_3 - k_4) = 0$$

Cond, de Frecuencias



$$\omega_4 + \omega_3 = \omega_1 + \omega_2$$

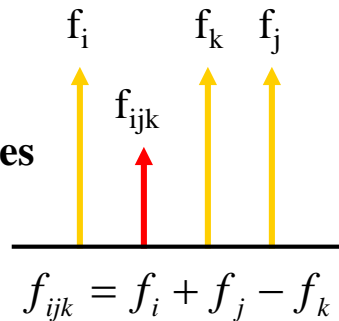
Frecuencias generadas por FWM

Descripción general de la condición de frecuencia

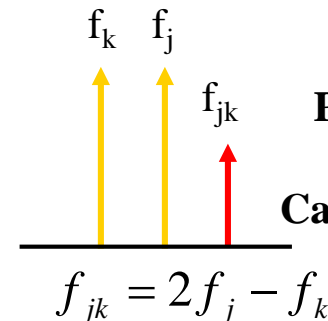
$$\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k \quad \leftarrow k \neq i, j$$

$$\omega_{jk} = 2\omega_j - \omega_k \quad \leftarrow i = j \text{ (caso degenerado)}$$

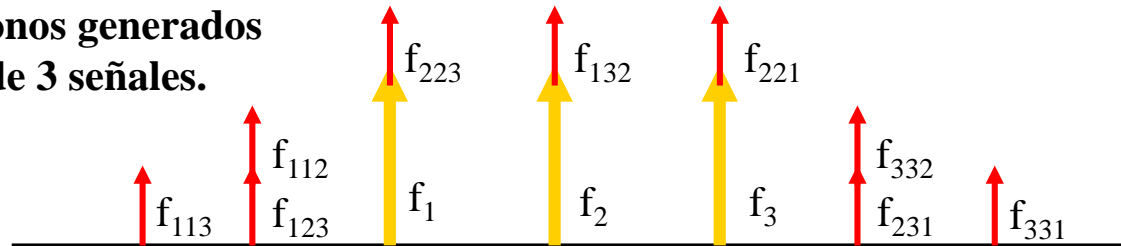
Producto de tres frecuencias



**Producto de dos frecuencias
Caso degenerado $i=j$**



Conjunto total de tonos generados por FWM a partir de 3 señales.



Para un número de tonos de señal N ,
el número de tonos de FWM generados M es:

$$M = \frac{1}{2}(N^3 - N^2)$$

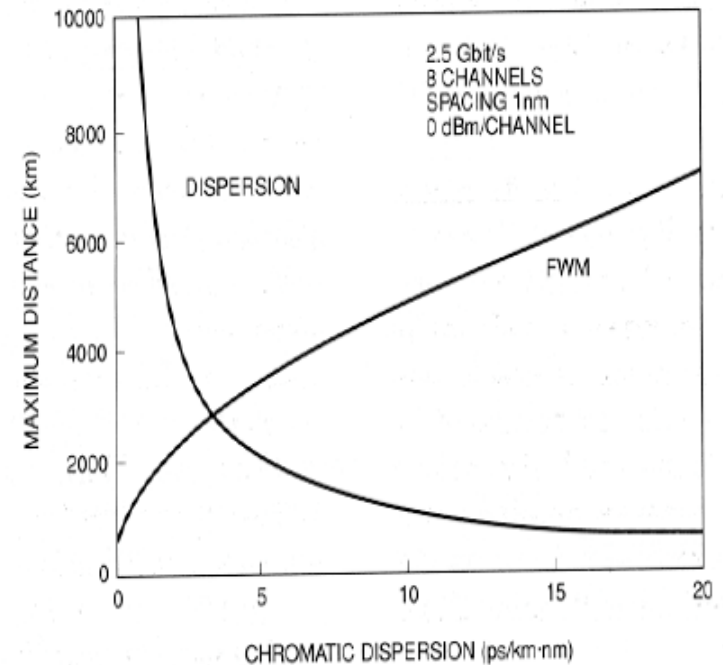
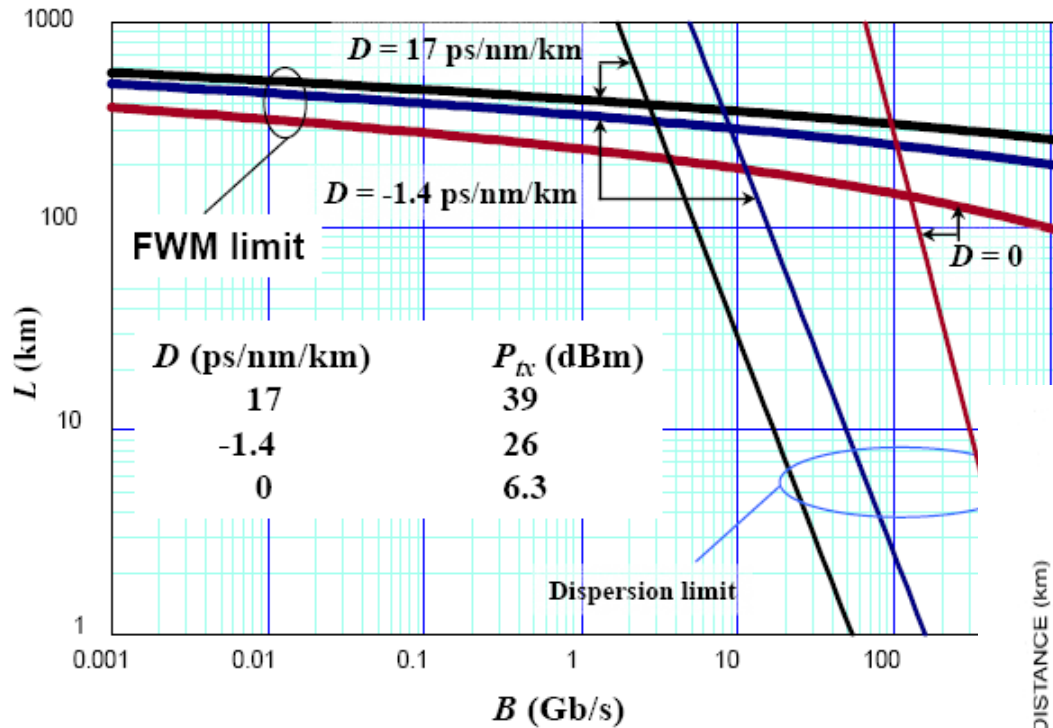
$N=2$ -----> $M=2$

$N=3$ -----> $M=9$

$N=4$ -----> $M=24$

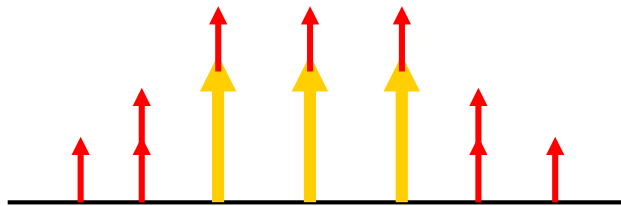
$N=8$ -----> $M=224$

Compromiso entre dispersión cromática y FWM

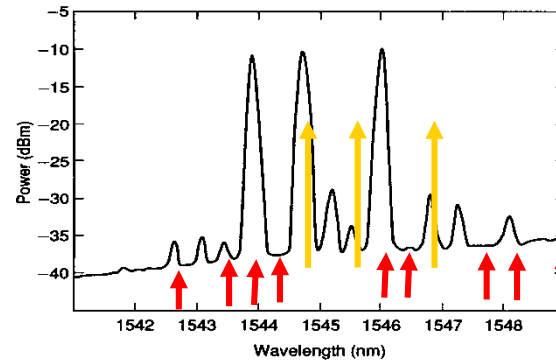


Eficiencia del proceso FWM: efecto de la posición de los canales

Canales Equiespaciados

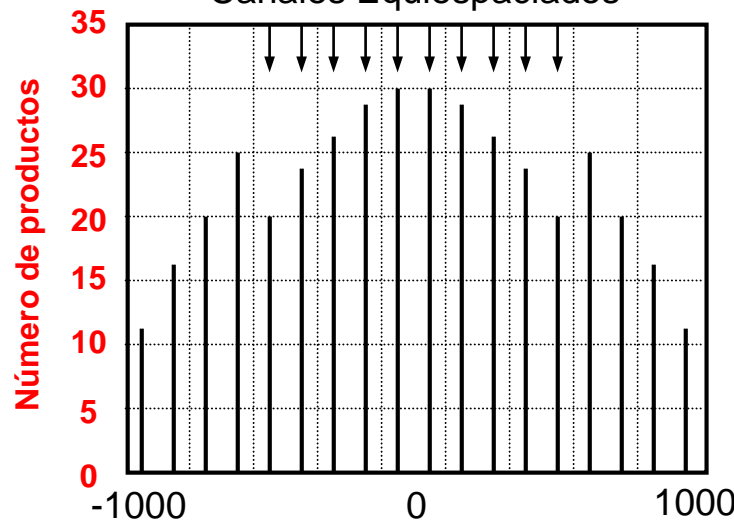


Canales No Equiespaciados

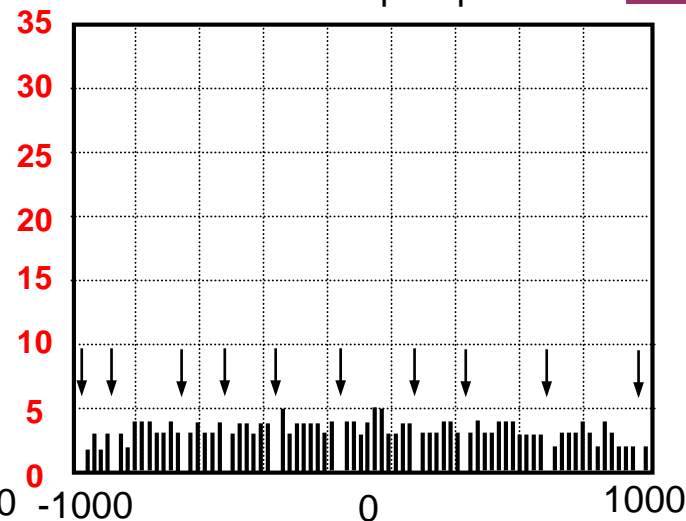


Importancia de
un buen plan de
frecuencias

Canales Equiespaciados



Canales No Equiespaciados



Frecuencias relativas de canal (GHz)

Comparación entre sistemas con espaciado uniforme y no uniforme (mediante simulación por ordenador)

Parámetros del sistema:

- WDM con 8 canales
- 500 km de fibra
- Amplificadores cada 50km
- Canales modulados a 10Gb/s
- Potencia media por canal = 1mW

Entrada al sistema

Espectro óptico

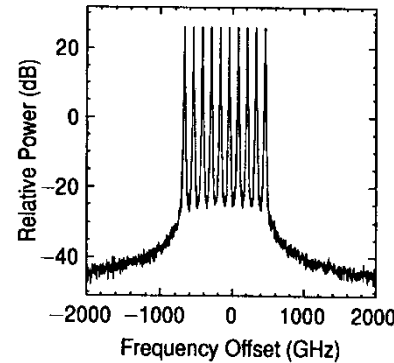
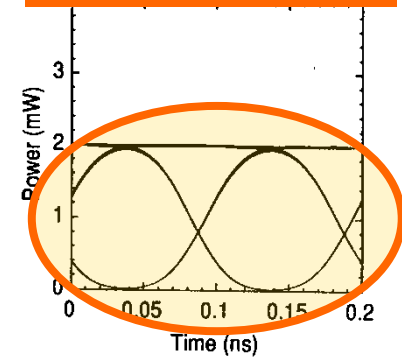


Diagrama de Ojos



Salida con espaciado uniforme

Espectro óptico

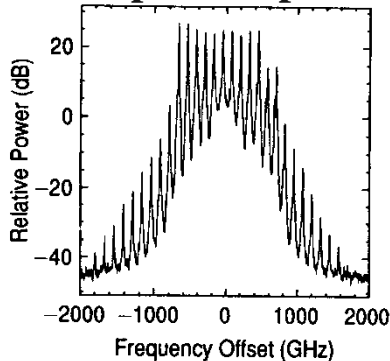
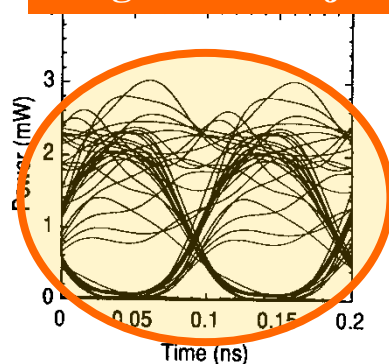


Diagrama de Ojos



Salida con espaciado NO uniforme

Espectro óptico

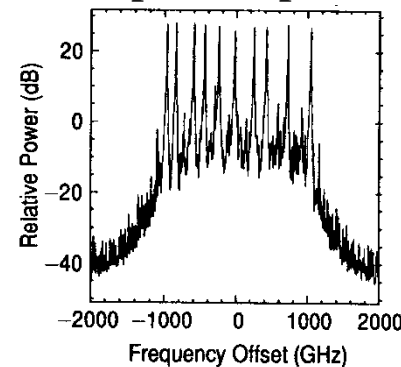
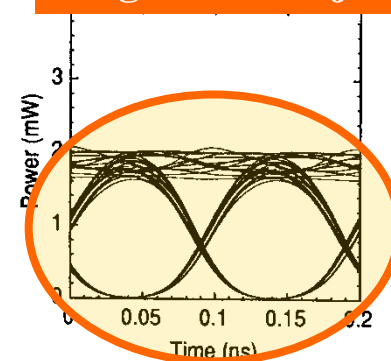
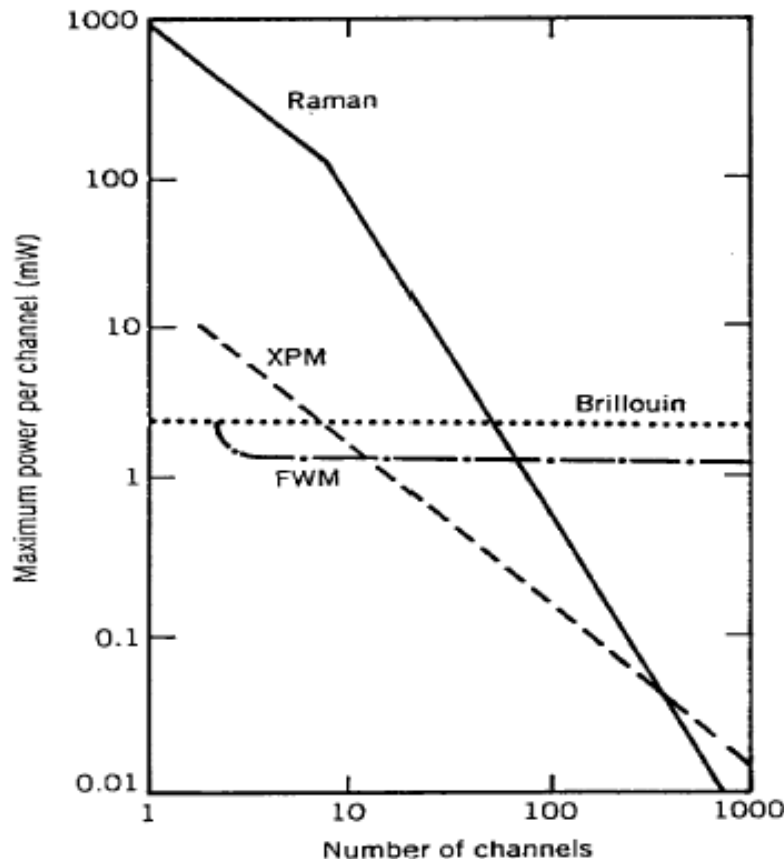


Diagrama de Ojos





From A.R. Chraplyvy, *J. Lightwave Technology*,
vol. 8, p. 1548, 1980.

Cuál es el factor que más limita de todos los factores no-lineales en la fibra es muy difícil de determinar por ser muchas las variables implicadas

Es necesario hacer un estudio por simulación previo

- Introducción
- Scattering Raman Estimulado, SRS
- Scattering Brillouin Estimulado, SBS
- Automodulación de fase, SPM
- Modulación cruzada de fase, XPM
- Mezclado de cuatro ondas, FWM
- Resumen y conclusiones

- ❑ Además de los efectos lineales en la propagación -atenuación y dispersión-, cuando la potencia inyectada en la fibra óptica es alta se excitan otros efectos no-lineales que serán, en general, nocivos para la tx. de señales
- ❑ Cuanto mayor es la concentración de la potencia espacialmente en una fo. (menor área efectiva) mayor es la posibilidad de excitar las no-linealidades. Su efecto es acumulativo con la distancia pero, por la presencia de atenuación, sólo hasta un cierto valor, estimado con la longitud efectiva.
- ❑ Cuando se propaga un solo canal el efecto no-lineal presente es la automodulación de la fase que produce un chirp que interactúa con la dispersión. Es la base de la propagación por solitones
- ❑ Cuando se transmiten varios canales, WDM, son más los efectos no-lineales que pueden excitarse: FWM, XPM, SBS, SRS
- ❑ En general, la consecuencia es un deterioro de la calidad de la transmisión que obliga a limitar la potencia de emisión o el número de canales multiplexados en longitud de onda
- ❑ Para evitarlos en lo posible, hay que buscar fibras con alta área efectiva y dispersión no nula -NZDSF-