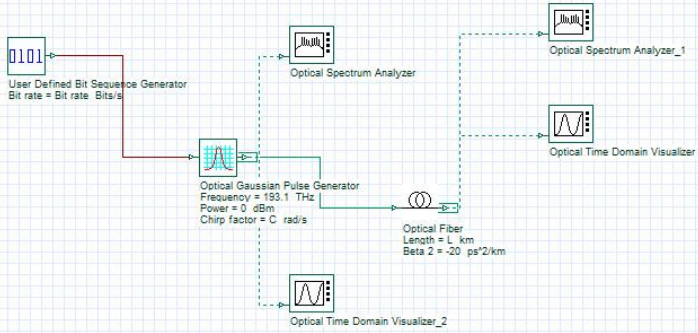
Práctica 4

**Propagación de pulsos gaussianos en fibras con dispersión de la velocidad de grupo.**



Alejandro Gómez Alanís

Francisco Porcel Rodríguez

Comunicaciones Ópticas

Curso 2015-2016

Índice del documento:

[**1 Objetivo 3**](#_Toc436593026)

[**2 Fundamento teórico 3**](#_Toc436593027)

[**3 Realización práctica 6**](#_Toc436593028)

[3.1 Caracterización del pulso inicial 6](#_Toc436593029)

[3.2 Comprobación del ensanchamiento del pulso 8](#_Toc436593030)

[3.3 Cálculo de *zmín* para *C* = 2 10](#_Toc436593031)

[**4 Conclusión 12**](#_Toc436593032)

[**Anexo I 12**](#_Toc436593033)

[**Anexo II 13**](#_Toc436593034)

# Objetivo

El objetivo de esta práctica será utilizar el simulador OptiPerformer para observar cómo varía el pulso gaussiano que transmitimos a lo largo de la fibra. Concretamente, analizaremos la anchura y amplitud del pulso al comienzo de la fibra y al final de la fibra, para distintas longitudes del enlace de fibra óptica.

# Fundamento teórico

En este apartado, explicaremos algunos parámetros importantes a la hora de analizar el pulso gaussiano que se transmite a través de la fibra óptica.

En primer lugar, establecemos la ecuación básica de propagación:

Como vemos, esta ecuación que define al pulso depende de los parámetros *β2* y *β3*. Si estos parámetros fueran nulos, la forma del pulso no cambiaría durante su recorrido. La propagación de un pulso óptico gaussiano sobre una fibra que presenta dispersión de la velocidad de grupo queda descrita en la ecuación diferencial que hemos presentado. Relaciona la forma del pulso en cualquier punto *z* de la fibra en cualquier instante de tiempo *t*. En caso de que tan solo sea nulo el parámetro *β3* (que será nuestro caso a lo largo de toda la práctica), el pulso gaussiano se mantendrá gaussiano en su propagación con la sola modificación de su potencia de pico, anchura, y chirp. En ese caso, el pulso presenta la siguiente forma:

Se encuentra caracterizado por su anchura temporal *T0*, relacionada con la anchura completa a la mitad del máximo . Además, se define el módulo al cuadrado normalizado del pulso como:

Podemos ver esa función representada en la figura 1. En ella, se ejemplifica claramente el significado de la anchura temporal *T0*, que es el intervalo de tiempo para el cual la amplitud se ha reducido en un factor 1*/e*. La anchura completa a la mitad del máximo *TFWHM* es aquel intervalo de tiempo que comprende la mitad del máximo del pulso.

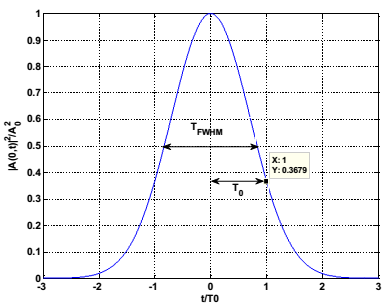


Fig. 1. Pulso gaussiano.

Cuando el pulso transcurre a lo largo de la fibra, la anchura *T0* se convertirá en una anchura *T1*, debido a que la dispersión hace que el pulso se ensanche. La relación entre la anchura final e inicial del pulso se conoce como factor de ensanchamiento y viene dado por esta expresión:

Una manera de reescribir esa expresión es definiendo un parámetro llamado longitud de dispersión *LD* = *T02* / | *β2*|:

donde *s* = *sgn* (*β2*). La potencia en cualquier punto de la fibra vendrá dada por:

En las siguientes figuras, mostraremos el comportamiento del factor de ensanchamiento en función de *z*, para los casos *C =* 0, *β2C* *>* 0 y *β2C* *<* 0. En la figura 2 vemos este comportamiento para *β2* > 0 y en la figura 3, para *β2* *<* 0.

Fig. 2. Factor de ensanchamiento para *β*2 *>* 0. Fig. 3. Factor de ensanchamiento para *β*2 *<* 0.

Analizando ambas gráficas, para un chirp nulo, se tiene que la anchura del pulso irá creciendo lentamente, sin importar el signo de *β2*. Sin embargo, cuando *β2* *>* 0 y *C <* 0, se tiene que la anchura del pulso disminuye hasta *zmín*, para continuar creciendo; esto mismo ocurre cuando *β2* *<* 0 y *C >* 0. Es interesante que el pulso disminuya su anchura hasta cierto mínimo, pues nos supondrá ventajas en cuanto a la interferencia entre símbolos consecutivos: cuanto menor sea la anchura del pulso para un mismo espacio de tiempo, menor será dicha interferencia. Finalmente, los casos en los que *β2C* *>* 0 son los menos interesantes, pues la anchura del pulso se va haciendo mayor de manera constante conforme avanza a lo largo de la fibra.

De esta manera, como ya hemos comentado, se alcanza un mínimo en la anchura cuando *β2C* *<* 0. Dicho mínimo se alcanza para una longitud:

La anchura de pulso que se obtiene para esa longitud es:

# Realización práctica

En este apartado, daremos comienzo a la realización de la práctica. Para ello, haremos uso de las medidas aportadas por el simulador *OptiPerformer*, para posteriormente introducirlas en *Matlab* y realizar los cálculos requerido fácilmente. La práctica consistirá en introducir un valor de chirp *C* y una longitud de fibra *L* en la siguiente simulación:

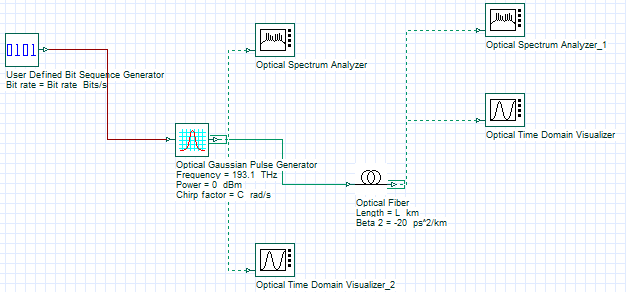


Fig. 4. Diagrama de bloque de la simulación.

Como vemos, consiste en un bitstream que llega a la fuente de pulsos ópticos gaussianos, que emitirá pulsos a una longitud de onda de 1.55 µm, con un chirp *C* que establecemos y con una potencia de 0 dBm. A la salida de la fuente, tenemos conectado un visualizador óptico en el dominio del tiempo, para poder ver el pulso al inicio de la fibra, y poder calcular su anchura *T0*, entre otros parámetros. Tras recorrer los pulsos toda la fibra, con la longitud *L* que hemos establecido y un valor de *β2* = -20 ps2/km, los observaremos mediante el visualizador óptico que hemos colocado, para hallar parámetros como la anchura *T1*.

En un primer apartado, se nos pide comprobar el valor de la anchura del pulso inicial, para poder calcular longitud de dispersión. En el segundo apartado, para un valor de *C*=0, se nos pide comprobar que el pulso va aumentando progresivamente su anchura. En el último apartado se nos pide establecer un valor de *C* = 2, y comprobar que la anchura del pulso se ha reducido para la longitud *zmín*. Además, también se nos pide calcular el nivel de potencia de pico del pulso a la salida.

## Caracterización del pulso inicial

En este apartado, comprobaremos la anchura del pulso inicial, además de calcular la longitud de dispersión *LD*. Como vamos a calcular estos valores al inicio de la fibra, no importa el chirp que establezcamos ni la longitud de la fibra. Veamos el pulso en función del tiempo. Para esto, podemos verlo a través del simulador. Sin embargo, dado que queremos tratar con los datos y hacer cálculos a partir de ellos, los exportaremos a Matlab. En la siguiente figura, vemos el pulso al inicio de la fibra en función del tiempo.



Fig. 5. Pulso inicial en función del tiempo.

Como vemos en la imagen, con los cursores podemos calcular la anchura del pulso situándonos exactamente en la mitad de la amplitud y viendo la diferencia de tiempo. Sin embargo, este puede ser un método algo inexacto, pues la precisión de estos cursores es de tan solo tres decimales. Además, como tendremos que repetir este cálculo para diferentes pulsos durante toda la práctica, decidimos crear una función que realice este cálculo, dado el vector de tiempos y la potencia del pulso. Podemos encontrar esta función en el Anexo I de la práctica. Como hemos creado una función, necesitamos pasarle los datos. Estas sentencias se encuentran en un *script*, que añadimos al Anexo II. En él, se encuentra la resolución de toda la práctica.

Gracias a la función, hallamos que la anchura inicial del pulso es *TFWHM* = 12.5 ps. De esta manera, respondemos a la primera parte de la práctica, donde nos pedía comprobar que el valor de la anchura del pulso inicial era de 12.5 ps.Además, con la relación entre *T0* y *TFWHM*, mostrada en el fundamento teórico de la práctica, tenemos que *T0* = 7.51 ps.

A continuación, se nos pide calcular la longitud de dispersión *LD*, cuya expresión también mostramos en el fundamento teórico. Recordamos que *LD* = *T02* / | *β2*|, por lo que *LD* = 2.8178 km.

## Comprobación del ensanchamiento del pulso

En este apartado, se nos pide establecer un chirp nulo y comprobar cómo el pulso se ensancha progresivamente. Como no podemos observar el pulso para cualquier recorrido, lo que haremos será ir aumentando la longitud de la fibra y medir siempre al final.

A partir de las figuras 2 y 3 del fundamento teórico, sabemos que con el chirp nulo, la anchura siempre crecerá desde el inicio de la fibra. Comprobemos este hecho con una longitud de fibra de 5 km y otro valor *z* = *LD*. Veamos los resultados en la siguiente figura, donde aparecen superpuestos los pulsos al inicio de la fibra.



Fig. 6. Pulsos para distintas longitudes de fibra.

En azul tenemos el pulso transmitido. En verde, el pulso tras recorrer una distancia *LD*. En rojo, el pulso tras recorrer una distancia de 5 km. Como vemos, a medida que el pulso recorre la fibra, se va ensanchando gradualmente, pues vemos que conforme aumenta la distancia, el pulso disminuye su amplitud, además de aumentar su anchura.

Este apartado, además, nos pide comprobar que el factor de ensanchamiento es cuando la longitud de la fibra es *L = LD*. En la siguiente gráfica, vemos el pulso para la distancia mencionada, que es el mismo que veíamos en verde en la figura 6.



Fig. 7. Pulso para una longitud de fibra *L* = *LD*.

Para calcular la anchura completa a mitad de pulso *TFWHM*, hemos de mirar cuál es la amplitud máxima del pulso. En este caso, es de 0.7 mW. La mitad sería 0.35 mW. Sin embargo, dado que la precisión de los datos aportados por el programa de simulación no es muy exacta, no podemos encontrar ese valor exacto. En la figura 7 vemos los valores más cercanos a 0.35 mW que podemos encontrar a cada lado del máximo. La función que hemos implementado nos hallará la anchura entre los valores 0.3672 mW, que vemos en la figura, puesto que recorre el vector de valores hasta encontrar uno que supere la mitad del máximo. La anchura del pulso tras recorrer una distancia *LD* es *TFWHM* = 17.19 ps, o *T1* = 10.32 ps. El valor obtenido de la anchura inicial del pulso era *T0* = 7.51 ps. De esta manera, el factor de ensanchamiento es *T1*/*T0* = 1.375.

Recordemos que este apartado también nos pide comprobar que el factor de ensanchamiento es . Veamos por qué. En el fundamento teórico, teníamos la siguiente expresión para el factor de ensanchamiento. Evaluémosla para *z* = *LD*.

Al evaluarla, vemos que obtenemos el valor arriba mencionado. En conclusión a este apartado, vemos que no obtenemos exactamente el valor que se nos pedía (y que hemos demostrado). La diferencia entre el valor obtenido y el teórico es de un 2.77%. Este error es debido a la precisión del programa de simulación que habíamos mencionado. Al no poder hallar justo la mitad del máximo, no es posible hallar el valor exacto. De todas formas, es un error asumible, de manera que aceptamos la estimación obtenida.

## Cálculo de *zmín* para *C* = 2

En este apartado se nos pide fijar un valor de *C* = 2. Este será el presentado en la figura 3, pues *β2C* < 0. Dado este hecho, se espera el factor de ensanchamiento alcance un ancho mínimo *Tmín* a una distancia *zmín*. Como ya comentamos en el fundamento teórico, es interesante que el pulso disminuya su anchura hasta cierto mínimo, pues nos supondrá ventajas en cuanto a la interferencia entre símbolos consecutivos: cuanto menor sea la anchura del pulso para un mismo espacio de tiempo, menor será dicha interferencia. La longitud de dispersión que habíamos calculado era *LD* = 2.8178 km. Calculemos la distancia *zmín* a la que el ancho del pulso se hace mínimo:

La anchura de pulso que se obtiene para esa longitud, en teoría, es:

A continuación, establecemos *C* = 2 y *L* = *zmín* = 1.1271 km en el simulador. Tras exportar los resultados a Matlab, obtenemos que la anchura *Tmín* es de 3.2843 ps. La diferencia entre el valor teórico y el simulado es del 2.17%. De nuevo, al igual que en el apartado anterior, este error es debido a la falta de precisión de los datos aportados por el simulador, ya que los pasos del muestreo no son lo suficientemente pequeños como para dar una elevada exactitud. De cualquier modo, se trata de un error reducido, por lo que aceptamos los valores aportados por el simulador.

El factor de ensanchamiento vendrá dado por *Tmín*/*T0* = 0.4375. Al ser menor que la unidad, significa que el ancho del pulso se ha reducido, como cabía esperar.

Veamos en una misma gráfica el pulso al inicio de la fibra y el pulso a la distancia *zmín*. Se presentan los resultados en la figura 8.

Analizándola, vemos que al tratarse del caso en que *β2C* < 0, el pulso reduce su anchura con respecto al pulso inicial. No solamente reduce su anchura, sino que además aumenta su potencia. De esta manera, no solo hacemos que la interferencia entre pulsos adyacentes sea reducida, sino que además el receptor será capaz de captar los pulsos más fácilmente, pues la potencia recibida se eleva.

Veamos cómo podemos hallar el pico de potencia del pulso a la salida de la fibra. Recordemos que en el fundamento teórico hemos obtenido la siguiente ecuación para hallar la potencia:

Evaluando *P*(*z*) para *z* = 0, tenemos que *P*(0) = *P0*. Así, *P0* es el pico máximo de potencia del pulso inicial. De esta forma, según la figura 8, *P0* = 1 mW.



Fig. 8. Pulso para una longitud de fibra *L* = *zmín*.

Evaluando la ecuación para *z* = *zmín*, tenemos:

De esta forma, en teoría, tendríamos un pico máximo de 2.236 mW de potencia, frente a 1 mW que es el pico de potencia del pulso inicial. Volviendo a la figura 8, vemos que el valor del pico de potencia a la distancia *zmín* es *P*(*zmín*) = 2.234 mW. De esta manera, se comprueba que obtenemos el mismo pico de potencia en la teoría y en la simulación, con un error de tan solo el 0.089%, que es un error muy aceptable.

# Conclusión

Como conclusión a esta práctica, podemos decir que nos ha servido para aprender algo más de los pulsos a transmitir a lo largo de la fibra óptica.

En el fundamento teórico, hemos hallado y mostrado una serie de ecuaciones que son clave para el cálculo de todos los parámetros de estos pulsos: anchura *TFWHM*, anchura *T0*, potencia del pulso a una longitud determinada, etc. Además, hemos mostrado dos gráficas en las que podemos comprobar perfectamente cómo varía la anchura del pulso a través de la fibra, dependiendo del factor *β2C*.

En cuanto a la realización práctica, hemos ido ejercitando lo aprendido en el fundamento teórico, pues nos hemos servido de las fórmulas mostradas para resolver los distintos apartados. Gracias a los cálculos realizados a partir de los resultados del simulador Optiwave Optiperformer y gracias a Matlab, hemos conseguido comprobar que mediante las fórmulas teóricas obtenemos el mismos resultado que con el simulador, pues el error entre ambos cálculos es muy reducido, en la mayor parte de los casos.

Finalmente, cabe mencionar que esta práctica nos ha sido útil para afianzar conceptos aprendidos en clase sobre los pulsos gaussianos con chirp, mediante el simulador proporcionado.

# Anexo I

Función que halla la anchura *TFWHM* y *T0*.

function [Tfwhm,T0] = hallar\_Tfwhm\_T0(t,amplitud)

a1=0;

i=0;

while a1==0

i=i+1;

if amplitud(i)>=max(amplitud)/2

a1=i;

end

end

a2=0;

i=length(amplitud);

while a2==0

i=i-1;

if amplitud(i)>=max(amplitud)/2

a2=i;

end

end

Tfwhm=(a2-a1)\*(t(2)-t(1));

T0=Tfwhm/(2\*sqrt(log(2)));

end

# Anexo II

En este script se implementa la resolución de toda la práctica.

load variables; % En variables.mat, tenemos los resultados del simulador

B2=-20;

%% Apartado 1

figure

plot(t,amplitud\_0)

title('Pulso inicial')

xlabel('Tiempo (s)')

ylabel('Potencia (W)')

[Tfwhm,T0]=hallar\_Tfwhm\_T0(t,amplitud\_0);

T0

axis([1.475\*10^-10 2.275\*10^-10 0 0.0011])

LD=(T0\*10^12)^2/abs(B2)

%% Apartado 2

[Tfwhm\_LD,T1\_LD]=hallar\_Tfwhm\_T0(t,amplitud\_LD\_C0);

T1\_LD

error\_raiz\_2=abs(T1\_LD/T0-sqrt(2))/sqrt(2)

figure

plot(t,amplitud\_0,t,amplitud\_LD\_C0,t,amplitud\_5km\_C0,'LineWidth',2)

title('Pulsos para distintas longitudes')

xlabel('Tiempo (s)')

ylabel('Potencia (W)')

legend('z=0','z=LD','z=5km')

axis([1.375\*10^-10 2.375\*10^-10 0 0.0011])

figure

plot(t,amplitud\_LD\_C0,'LineWidth',2)

title('Pulso para una distania L=LD')

xlabel('Tiempo (s)')

ylabel('Potencia (W)')

%% Apartado 3

C=2;

zmin=abs(C)\*LD/(1+C^2)

[Tfwhm\_zmin,T1\_zmin]=hallar\_Tfwhm\_T0(t,amplitud\_zmin\_C2);

fact\_ensan=T1\_zmin/T0;

T1\_zmin\_teorico=T0/sqrt(1+C^2);

fact\_ensan\_teorico=T1\_zmin\_teorico/T0;

error\_factor\_ensan=abs(fact\_ensan-fact\_ensan\_teorico)/fact\_ensan\_teorico

figure

plot(t,amplitud\_0,t,amplitud\_zmin\_C2,'LineWidth',2)

title('Pulsos para distintas longitudes')

xlabel('Tiempo (s)')

ylabel('Potencia (W)')

legend('z=0','z=zmín')

axis([1.675\*10^-10 2.075\*10^-10 0 0.0025])

P0=max(amplitud\_0);

P\_zmin=max(amplitud\_zmin\_C2);

P\_zmin\_teorico=P0/((1+sign(B2)\*C\*zmin/LD)^2+(zmin/LD)^2)^(1/2);