

Redes de difracción de Bragg

Pablo González y Jose Luís Medrán

11 de diciembre de 2017

Índice

1. Introducción	2
2. Comprobación teórica del simulador	2
3. Instrucciones GUI implementada	3
4. Resultados	4
4.1. FBG uniforme	5
4.1.1. Coeficiente de acoplamiento (k_0) constante	5
4.1.2. Reflectividad (R) constante	6
4.2. FBG enventanada	9
4.3. FBG con chirp lineal (LCFBG)	13

Resumen

Análisis de redes de difracción de Bragg mediante la resolución de las ecuaciones de acoplo contra direccional de modos utilizando el método de Runge-Kutta. Diseño y posterior verificación de una FBG con chirp lineal (LCFBG) haciendo uso del simulador desarrollado.

1. Introducción

A lo largo de esta práctica se estudiará el desarrollo e implementación de una herramienta basada en MATLAB con el objetivo de observar el comportamiento de las redes de difracción de Bragg, las cuales se han convertido en un componente fundamental para la mayor parte de las aplicaciones relacionadas con las comunicaciones ópticas, tales como: compensación de la dispersión cromática de una fibra, enrutamiento, filtrado, control y amplificación de señales ópticas dentro de la nueva generación de redes de telecomunicación de alta densidad basadas en WDM.

Las redes de difracción de Bragg son segmentos cortos de fibra óptica que reflejan unas longitudes de onda particulares y permiten la transmisión del resto. Esto se consigue creando variaciones periódicas del índice de refracción del núcleo de la fibra, lo cual genera los reflectores de Bragg a unas determinadas longitudes de onda. La longitud de onda central de la refracción se conoce como longitud de onda de Bragg, y está definida por la relación:

$$\lambda_B = 2n_e\Lambda \quad (1)$$

donde n_e es el índice efectivo del núcleo y Λ es el periodo espacial.

Las redes de difracción de Bragg se fabrican mediante una exposición parcial de la fibra a luz ultravioleta, siguiendo un patrón establecido de intensidad. La incidencia de luz ultravioleta provoca en el núcleo de la fibra la ruptura de los enlaces atómicos del cristal de óxido de silicio dopado con germanio que lo compone, cambiando el índice de refracción. Mediante este proceso se consigue generar una modulación del índice efectivo de refracción de los modos que se transmite por la fibra óptica, a lo largo de una longitud establecida.

Una de sus principales características reside en la flexibilidad a la hora de conseguir diversas respuestas espectrales. Para ello se pueden modificar varios parámetros físicos de su estructura, tales como, longitud, apodización, chirp e índice de refracción. Con ayuda del programa realizado en MATLAB podremos observar cómo afecta la variación de estos parámetros al resultado final.

2. Comprobación teórica del simulador

En primer lugar se ha desarrollado un *script* de MATLAB (*tarea1.m*) para verificar el correcto funcionamiento de la implementación del método de Runge-Kutta para la resolución de un sistema de ecuaciones acopladas que nos permitirán el análisis de diferentes estructuras FBG.

Para realizar esta comprobación se ha recurrido al caso de la FBG más sencilla, es decir, una red de difracción de Bragg uniforme ($k(z) = k_0 = cte$ y $\phi(z) = cte$). La elección de esta estructura en particular no ha sido aleatoria, sino que se ha escogido esta porque es la única cuya solución analítica es conocida:

$$R(\delta) = \frac{k_0^2 \sinh^2 \left(L_{gr} \sqrt{k_0^2 - \delta^2} \right)}{\delta^2 \sinh^2 \left(L_{gr} \sqrt{k_0^2 - \delta^2} \right) + (k_0^2 - \delta^2) \cosh^2 \left(L_{gr} \sqrt{k_0^2 - \delta^2} \right)} \quad (2)$$

Los resultados obtenidos con el simulador implementado son los que se recogen en la imagen (1) que, como se puede comprobar, coinciden perfectamente con la expresión teórica para las frecuencias próximas a la central.

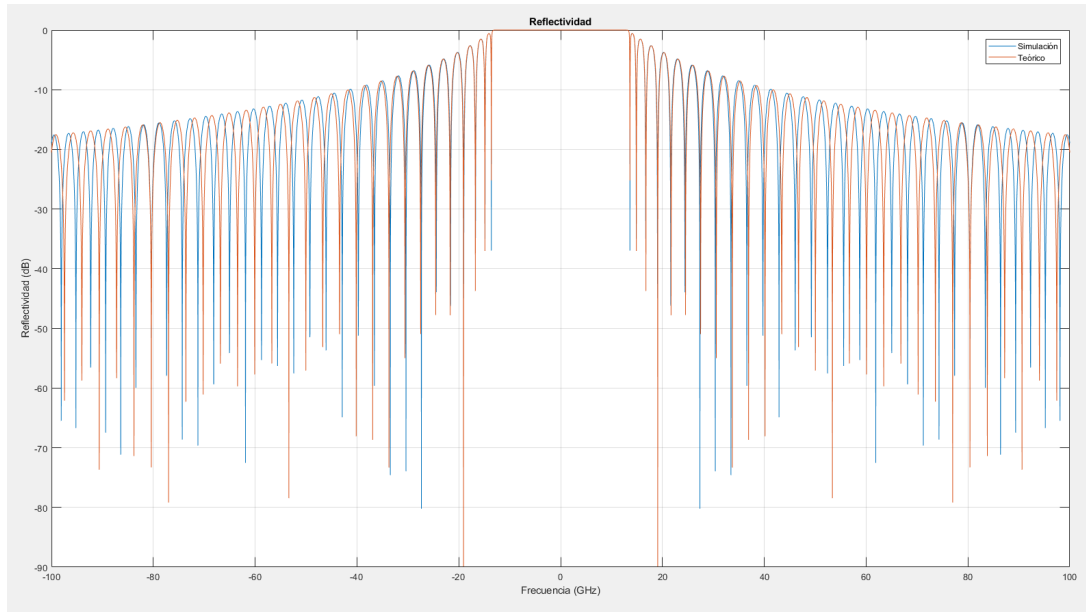


Figura 1: Comparación simulación-teoría.

3. Instrucciones GUI implementada

Para facilitar la realización de todos los apartados del módulo de aprendizaje se decidió implementar una interfaz gráfica (GUI) con la herramienta que MATLAB proporciona para ello. En el caso anterior, para comprobar el funcionamiento del método de Runge-Kutta se ha utilizado un paso fijo en cada iteración, pero a partir de este momento emplearemos un simulador más complejo que hará uso de un paso adaptativo, con lo que se conseguirá un error por debajo de un umbral (Tolerancia) y además, la simulación será más rápida.

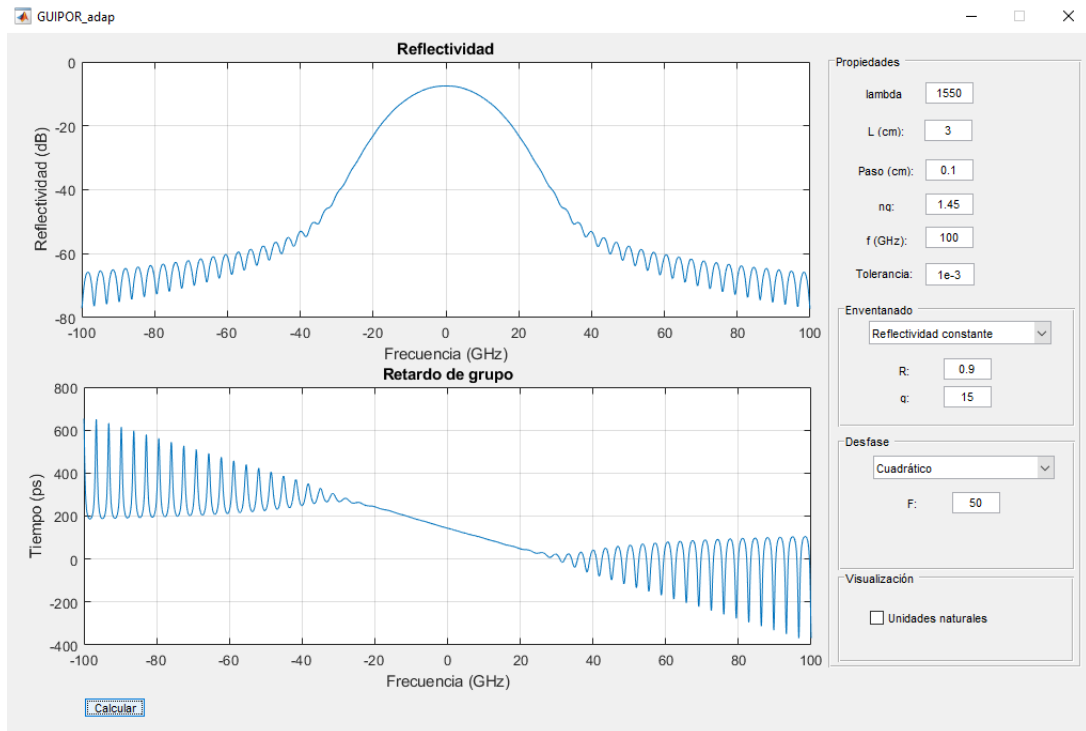


Figura 2: Apariencia inicial del entorno gráfico.

Esta GUI permite modificar diversos parámetros correspondientes a las redes de difracción de Bragg

que a continuación se describirás con más detalle.

En primer lugar, se puede ver en la figura (2) como en el lateral derecho de la interfaz se encuentran situados cuatro paneles: propiedades, enventanado, desfase y visualización.

La sección de propiedades contiene la información básica de la FBG:

- **lambda** (nm): longitud de onda de trabajo.
- **L** (cm): tamaño de la red de difracción.
- **Paso** (cm): tamaño del paso inicial para analizar la red de difracción mediante el método de Runge-Kutta.
- **n_g**: índice de refracción.
- **f** (GHz): límite del rango de frecuencias en el que realizará la simulación.
- **Tolerancia**: máximo error permitido para cada iteración.

A continuación se encuentra otro panel en el cual se puede manipular los parámetros referidos al enventanado de la red de difracción. En primer lugar aparece un menú desplegable (*popupmenu*) que permite seleccionar el tipo de enventanado entre: Gaussiano, Lineal o de Reflectividad constante. Dependiendo de qué tipo se haya escogido, se modificarán los parámetros que se podrán modificar. Seguidamente se enumeran todos los posibles campos que se pueden editar y se indica en que tipo de enventanado aparecen:

- **k₀** (1/m): coeficiente de acoplo (Gaussiano y Lineal).
- **g**: valor para aumentar/disminuir la apodización Gaussiana (3), en el extremo $g = 0$ se consigue eliminar este efecto y se obtiene una FBG uniforme (Gaussiano y Reflectividad constante).
- **R**: valor de la reflectividad (Reflectividad constante).

La apodización Gaussiana tanto en el caso en que la k_0 o la R sean constantes se define como:

$$\text{apodizacion} = e^{-g \left(\frac{z + \frac{L}{2}}{L} \right)^2} \quad (3)$$

El siguiente panel en el que se permite modificar características de la FBG es el correspondiente al desfase, en éste, al igual que en el anterior, se puede escoger mediante un menú desplegable el tipo de fase que debe tener la red de difracción y dependiendo del tipo escogido se podrán modificar unos parámetros u otros. A continuación se muestran los posibles campos que se pueden cambiar y se indica en que ocasiones aparecen:

- **F**: factor multiplicativo de la función de fase (4) (Cuadrático).
- **Desfase** (rad): desfase introducido (Escalón).
- **Longitud** (cm): en que punto de la FBG se introduce el desfase (Escalón).

$$\phi_z = F \left(\frac{z + \frac{L}{2}}{L} \right)^2 \quad (4)$$

Finalmente se muestra un pequeño panel con una opción para la visualización de las gráficas, en el aparece un botón (*checkbox*) que permite representar los resultados en unidades naturales (botón activado) o en dB (botón desactivado).

4. Resultados

En este apartado se analizarán todas las estructuras FBG propuestas y se comentarán los resultados obtenidos. Para ello se hará uso del simulador previamente explicado y se mencionarán los parámetros empleados para realizar cada una de las gráficas.

4.1. FBG uniforme

En primer lugar se resolverán las FBG más sencillas, es decir, las uniformes. Para ello las dividiremos en dos grupos, las de coeficiente de acoplamiento constante ($k_0 = \text{cte.}$) y las de reflectividad ($R = \text{cte.}$).

4.1.1. Coeficiente de acoplamiento (k_0) constante

Para realizar este apartado se han escogido los siguientes valores en la sección de propiedades:

Cuadro 1: Propiedades.

lambda (nm)	L (cm)	Paso (cm)	n_g	f (GHz)
1550	3	0.01	1.45	100

En el panel correspondiente a enventanado se ha escogido la opción de Gaussiano pero, como se ha comentado en las instrucciones, se elige el valor de $g = 0$ para que la exponencial del apodizado Gaussiano desaparezca y se obtenga así una $k(z) = k_0 = \text{cte.}$

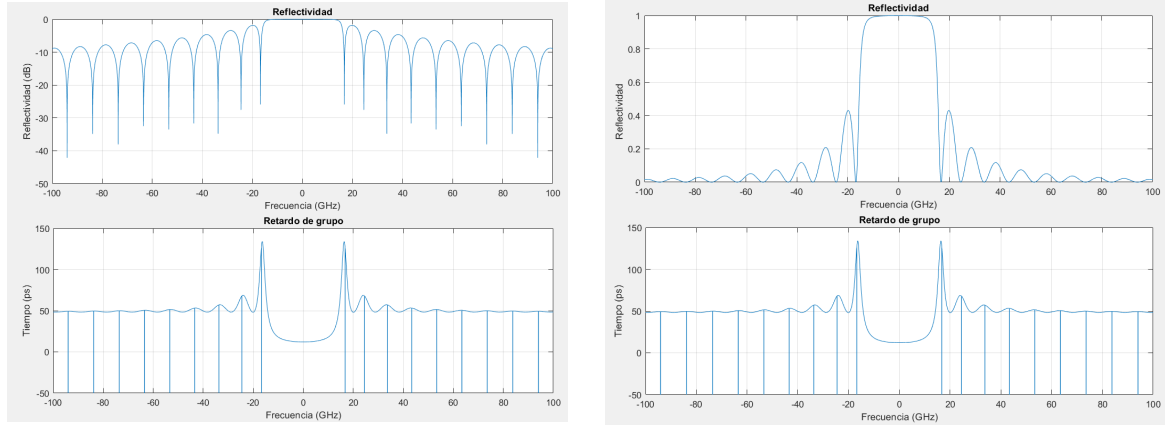


Figura 3: FBG uniforme $k_0 = 400 \text{ m}^{-1}$

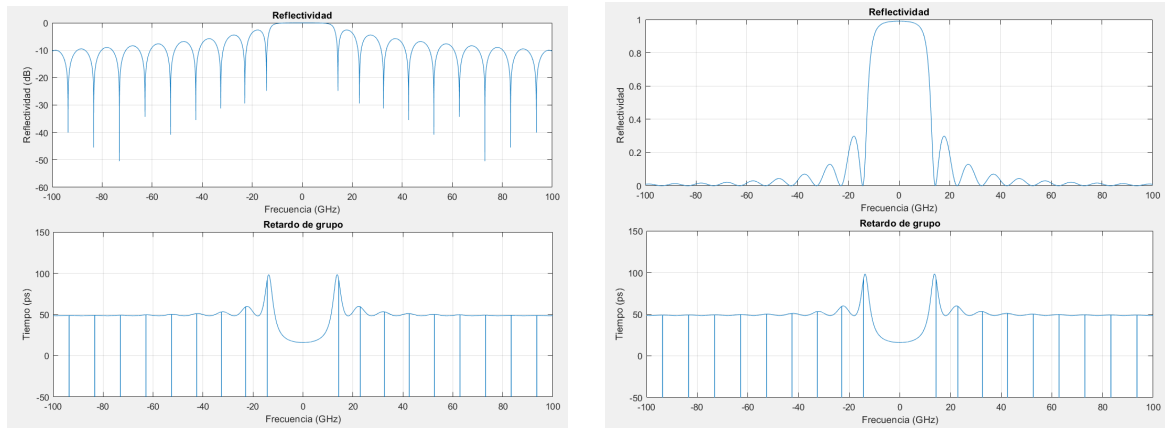


Figura 4: FBG uniforme $k_0 = 300 \text{ m}^{-1}$

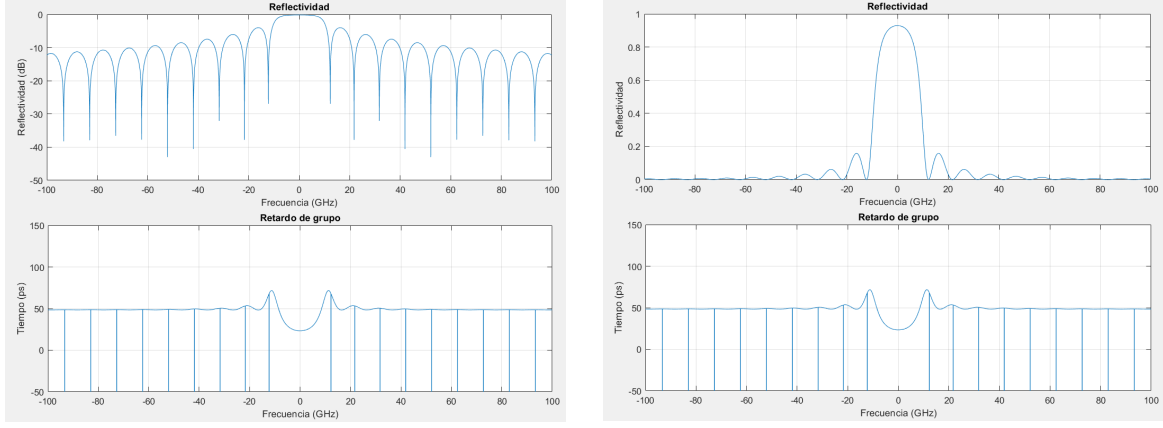


Figura 5: FBG uniforme $k_0 = 200 \text{ m}^{-1}$

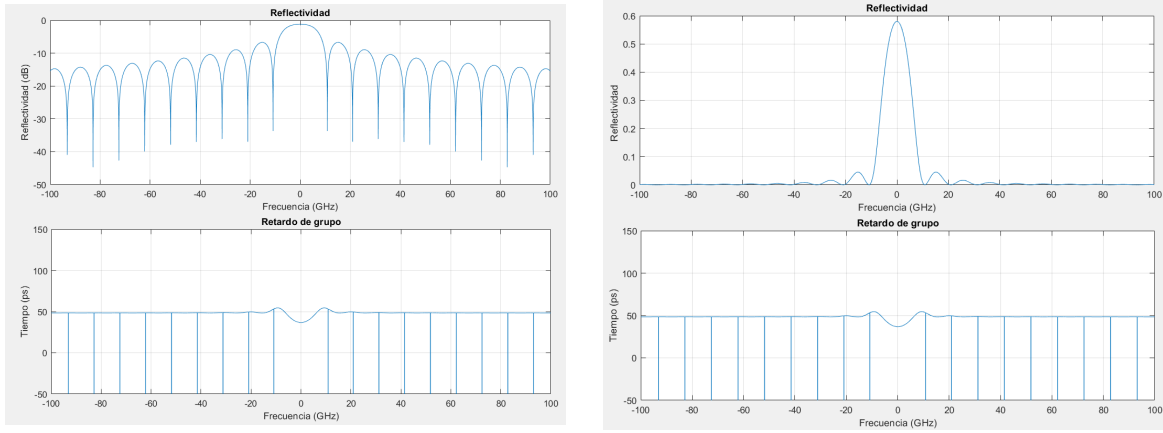


Figura 6: FBG uniforme $k_0 = 100 \text{ m}^{-1}$

Tras modificar únicamente la constante de acoplo desde 400 m^{-1} hasta 100 m^{-1} se pueden sacar una serie de conclusiones acerca de cómo afecta este valor a la reflectividad de la FBG. En primer lugar se observa que la reflectividad máxima se reduce siguiendo la fórmula $R = (\tanh(k \cdot L_g))^2$, la relación lóbulo principal a secundario se ve aumentada con la reducción de los lóbulos secundarios. La banda reflejada también se observa que se reduce con la constante de acoplo siguiendo la forma de la $|\text{sinc}(w)|$ correspondiente a la transformada de Fourier de un $\text{rect}(t)$.

Es importante considerar también cómo afecta a la reflexión sino también a la respuesta óptica en términos de fase o retardo de grupo. Observando los resultados se ve que la FBG es más fuerte en tanto k aumenta, de esta manera reduciendo la constante de acoplo se reducirá también el impacto en el retardo introducido por la FBG.

4.1.2. Reflectividad (R) constante

En primer lugar se comprobará como varía el comportamiento de una FBG cuya reflectividad se ha fijado a $R = 0,9$ y se ha modificado la longitud de manera decreciente desde 10mm a 1mm. Para mantener la reflectividad constante se ha hecho uso de la siguiente expresión:

$$R(0) = \tanh^2(k_0 L_{gr}) \rightarrow k_0 L_{gr} = \text{cte}. \quad (5)$$

En este caso se utilizarán unos parámetros similares a los mostrados en la tabla (1) a excepción de la L que será la variable en este caso. Además en el menu correspondiente al inventariado se escogerá a opción correspondiente a reflectividad constante forzando nuevamente el valor de g a 0.

Los resultados se pueden visualizar en las imágenes siguientes:

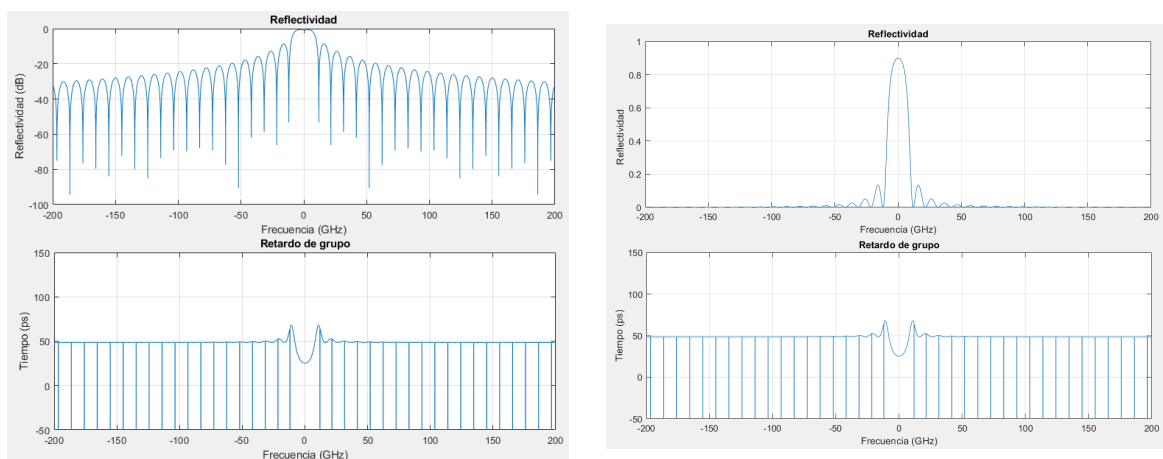


Figura 7: FBG uniforme $L = 10 \text{ mm}$

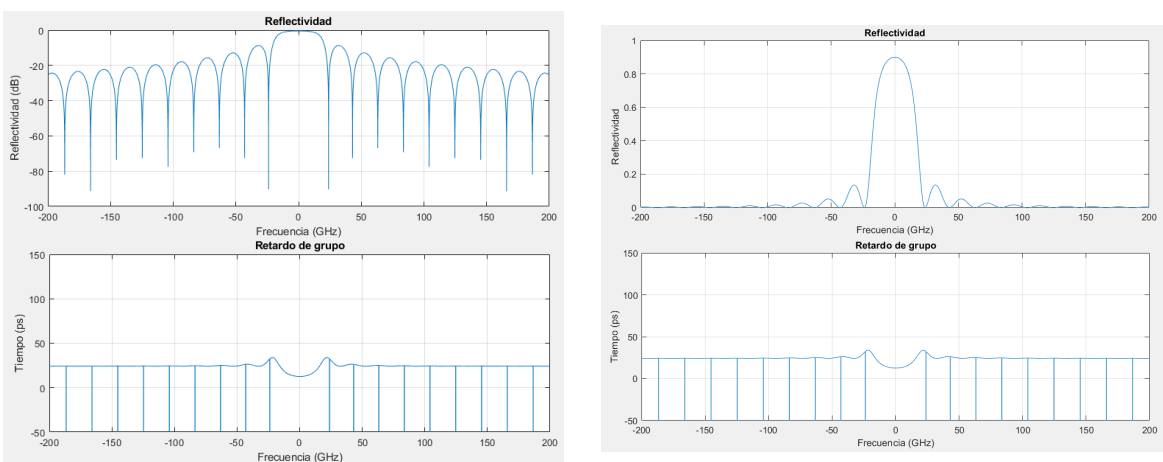


Figura 8: FBG uniforme $L = 5 \text{ mm}$

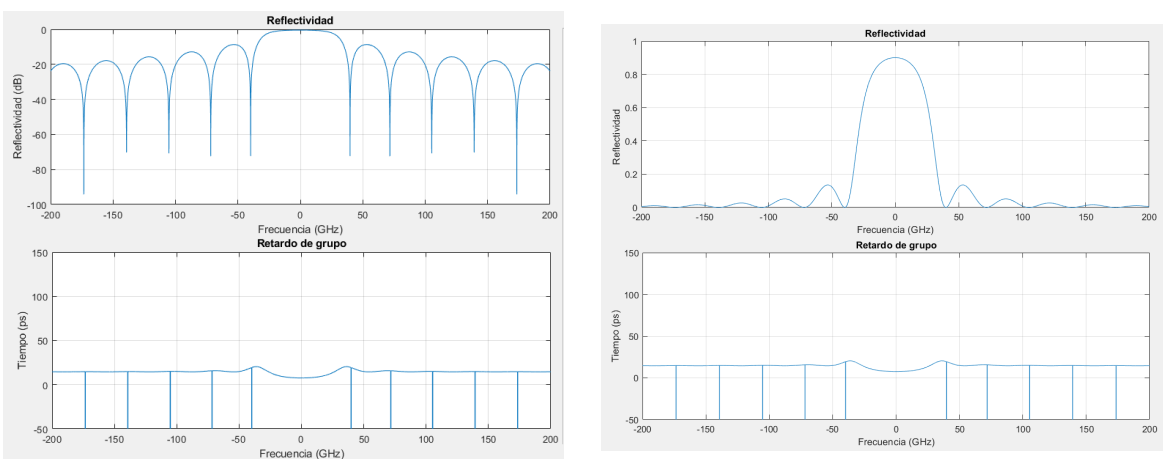


Figura 9: FBG uniforme $L = 3 \text{ mm}$

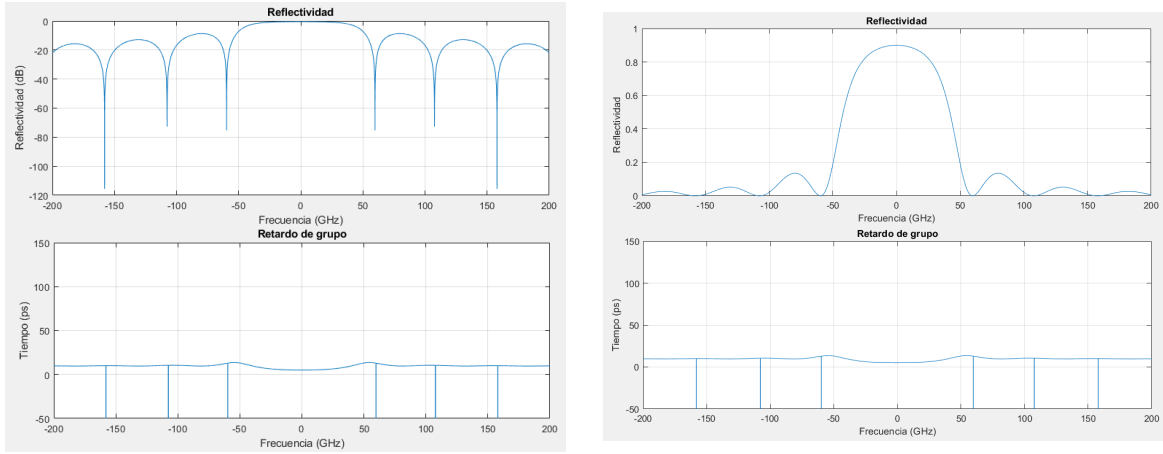


Figura 10: FBG uniforme $L = 2 \text{ mm}$

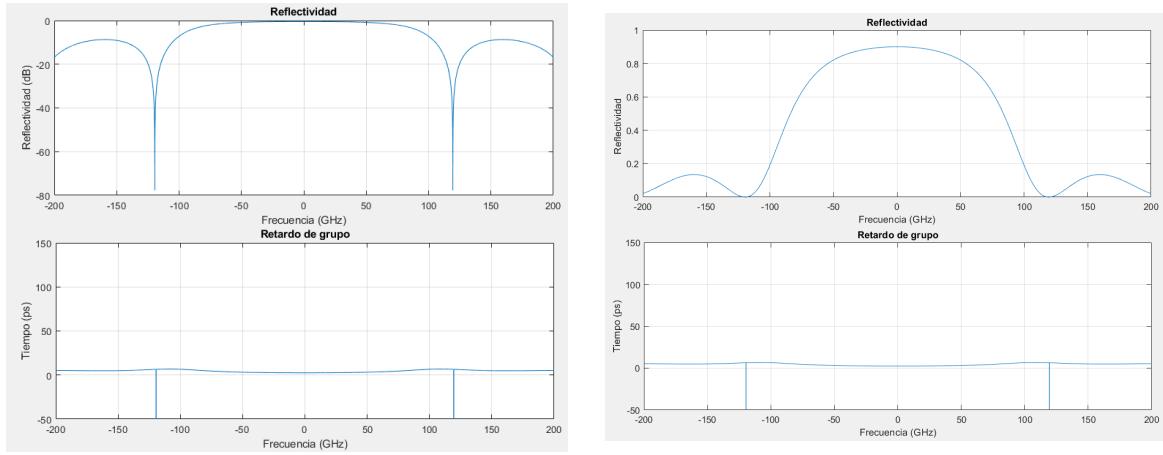


Figura 11: FBG uniforme $L = 1 \text{ mm}$

A continuación se analizarán los casos extremos (1mm, 10mm y 10cm). Los resultados de los dos primeros casos se pueden encontrar en las figuras anteriores (11 y 7 respectivamente). Las imágenes correspondientes a la FBG de 10cm se muestran a continuación:

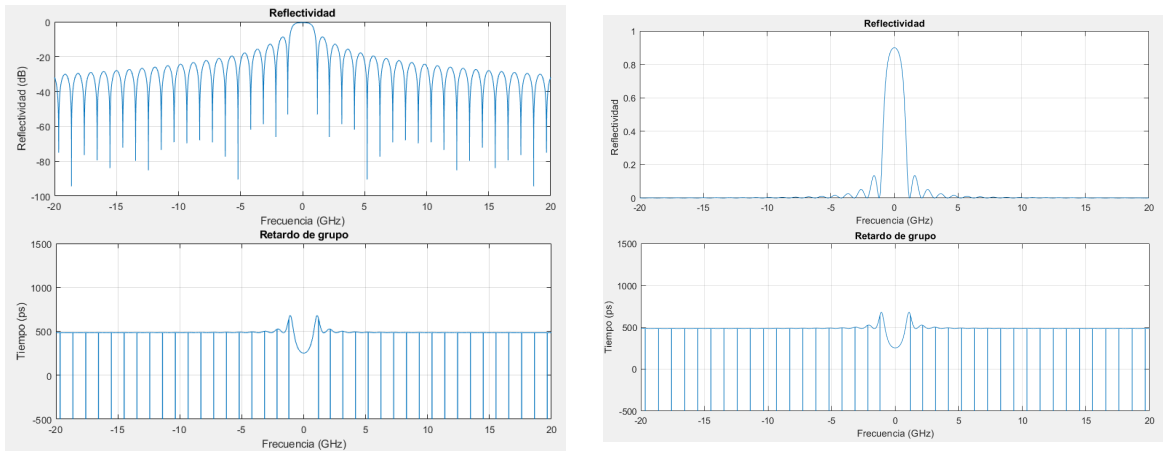


Figura 12: FBG uniforme $L = 10 \text{ cm}$

En este caso, como ya se ha comentado se ha fijado la relación kL_g de tal forma que $R = 0,9$. Observando los resultados para los distintos valores de L_g (1mm, 2mm, 3mm, 5mm, 10mm y 10cm) se

presentan una serie de conclusiones. En primer lugar se observa que el ancho de banda de la FBG es inversamente proporcional al tamaño de la misma, siendo mayor para menores longitudes. Esto se puede verificar matemáticamente con la definición del FWHM:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\pi n_{eff}} \sqrt{\kappa^2 + \frac{\pi}{L_g}} \quad (6)$$

Se observa que este se hace mayor cuando k aumenta o L_g se reduce, siendo predominante la contribución de k . En este apartado, ya que se mantiene la relación kL_g constante, cuando se reduce L_g se aumenta k , y por ende el ancho de banda aumenta.

4.2. FBG enventanada

En este apartado se observarán las implicaciones que tiene apodizar o enventanar la FBG, en este caso con una ventana Gaussiana.

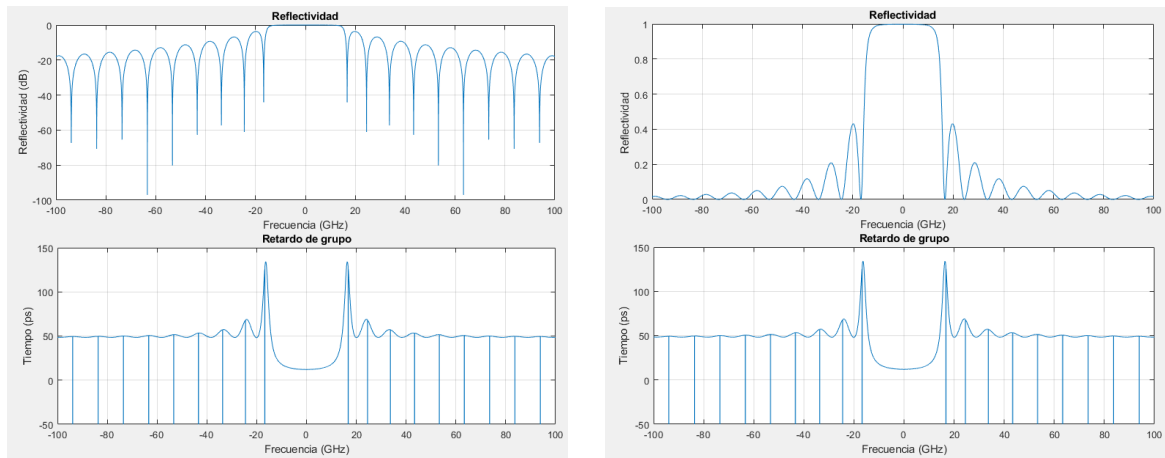


Figura 13: FBG enventanada Gaussiana $g = 0$

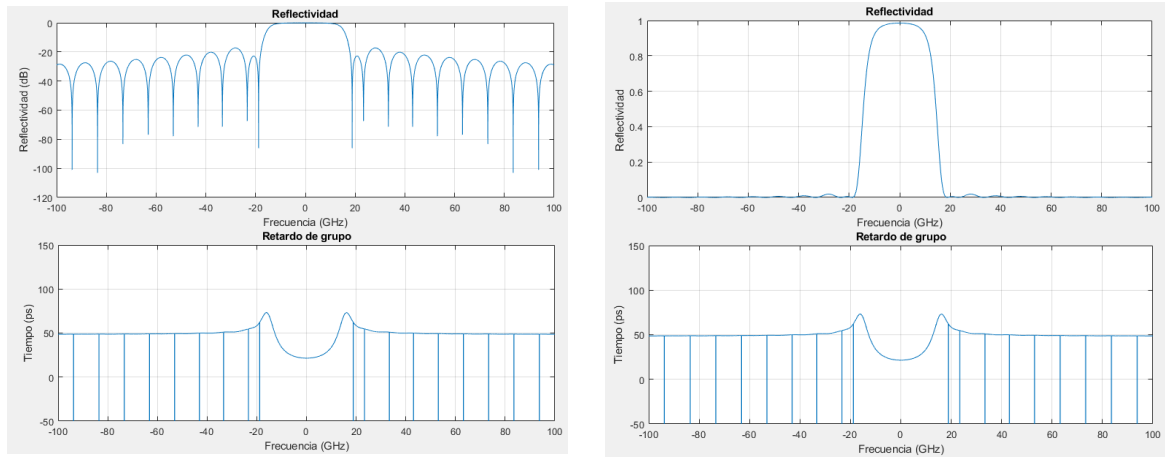


Figura 14: FBG enventanada Gaussiana $g = 5$

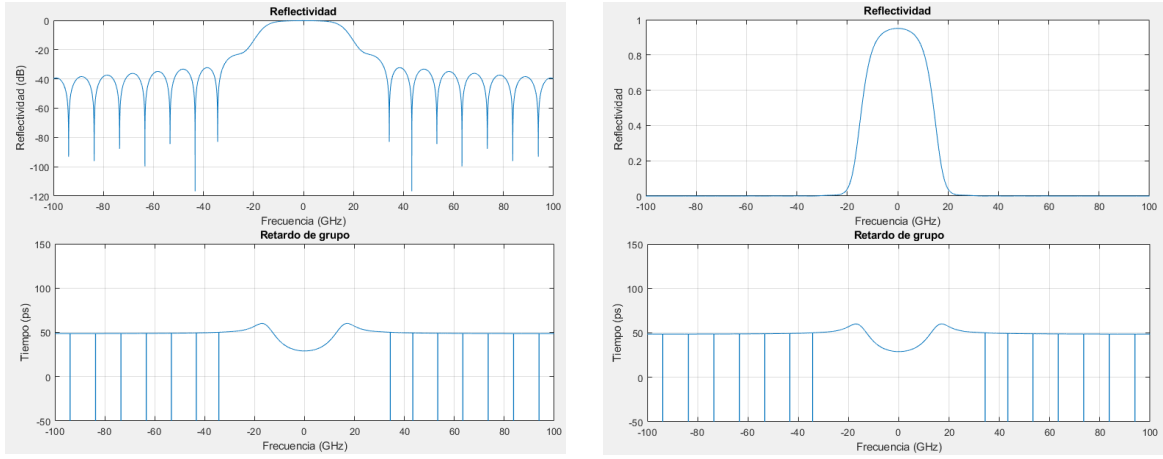


Figura 15: FBG enventanada Gaussiana $g = 10$

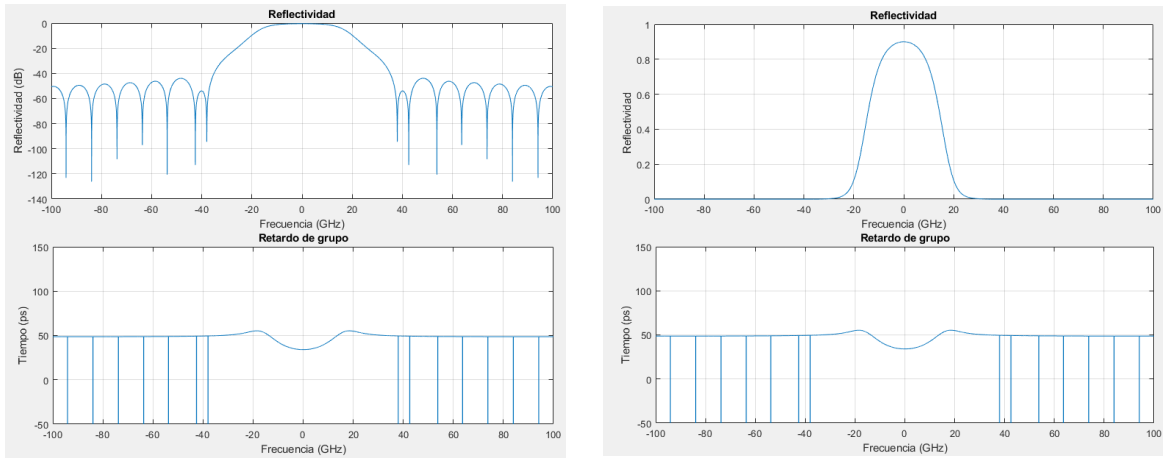


Figura 16: FBG enventanada Gaussiana $g = 15$

Aumentando la longitud de la FBG:

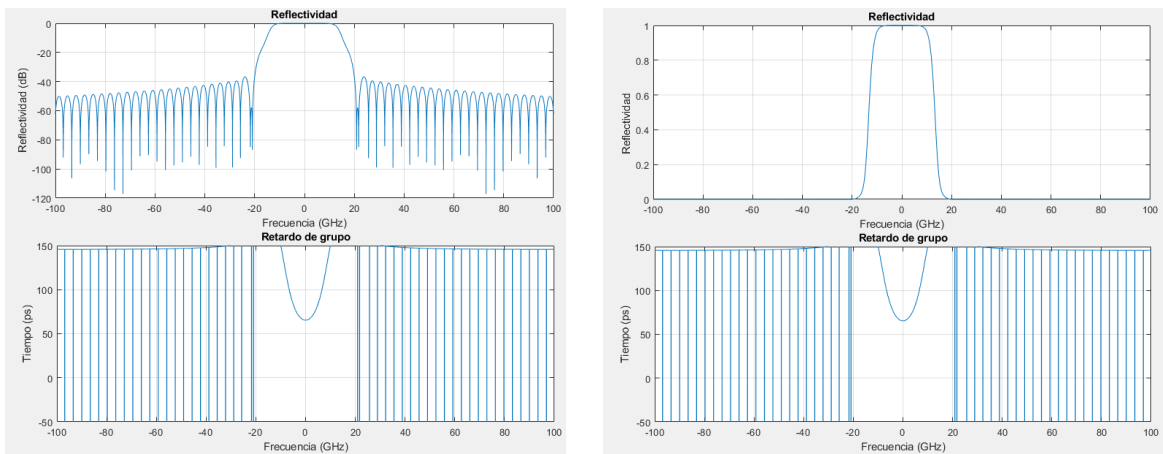


Figura 17: FBG enventanada Gaussiana $g = 15$ y $L = 3 \text{ cm}$

Variando el índice de refracción (n_g):

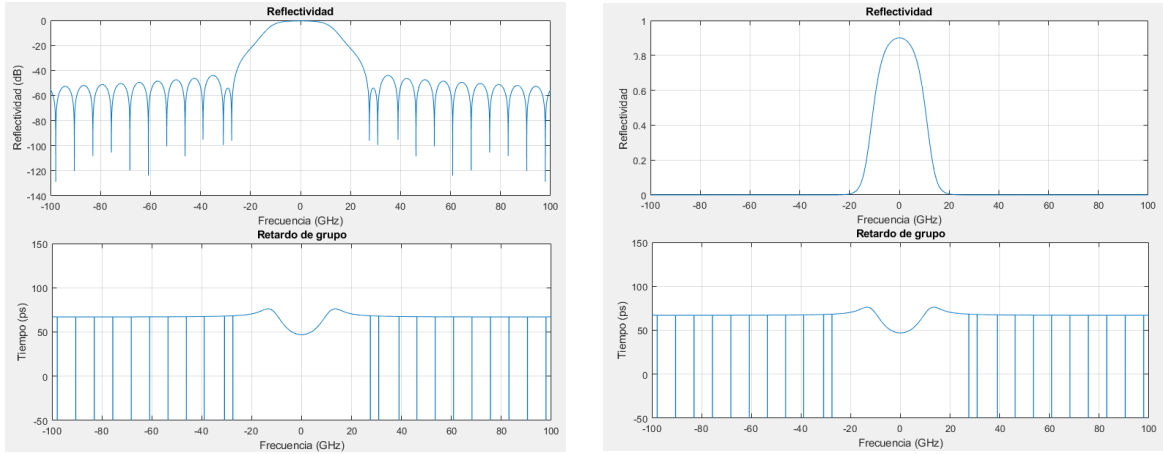


Figura 18: FBG enventanada Gaussiana $g = 15$ y $n_g = 2$

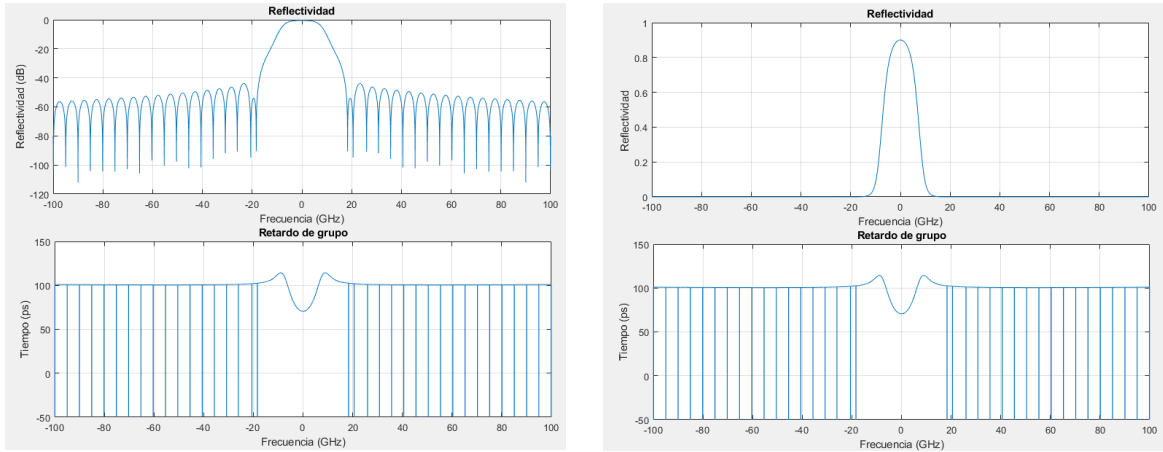


Figura 19: FBG enventanada Gaussiana $g = 15$ y $n_g = 3$

Observando los resultados obtenidos podemos concluir que la apodización de la FBG resulta en:

- Aumento del nivel de lóbulo principal a secundario.
- Reducción de la reflectividad máxima.
- Ligera reducción del ancho de banda a 3dB.

Estos dos últimos puntos serían los que interesaría corregir, ya que aumentar el NLPS es bueno para la transmisión. Para compensar los efectos negativos del enventanado de la FBG se puede ajustar la longitud de la FBG y la constante de acoplo. Teniendo en cuenta los apartados anteriores se ha decidido aumentar tanto la constante de acoplo como la longitud de la FBG. Aunque este último hecho reduzca el ancho de banda, la contribución resultante consecuencia de aumentar la constante de acoplo es muy superior al efecto sobre el ancho de banda que tiene la longitud de la FBG. De esta manera, ajustando estos dos parámetros se puede lograr solventar los inconvenientes causados por el enventanado.

En el último punto de las FBG enventanadas se pide diseñar una FBG con un NLPS $> 30dB$ y un ancho de banda a 3dB igual que una FBG uniforme de 10mm de longitud y reflectividad máxima igual al 98%. Dicha FBG uniforme se muestra a continuación.

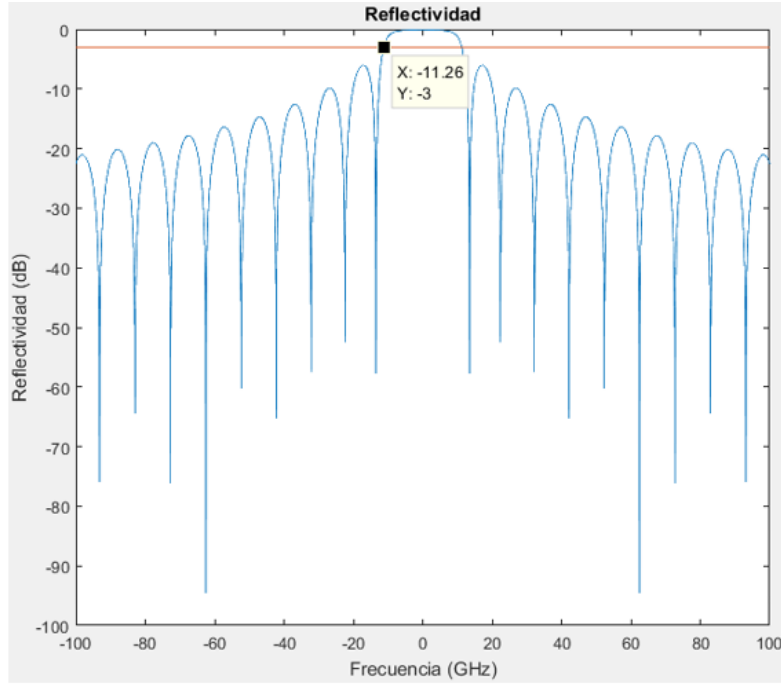


Figura 20: FBG inicial

Tal y como se ha comentado a lo largo de este apartado, el enventanado ayudará a cumplir con el valor de NLPS a costa de reducir la reflectividad y aumentar el ancho de banda, por lo que se ha tenido que variar los parámetros de longitud de la FBG y de la constante de acoplo para conseguir el NLPS propuesto sin afectar al resto de parámetros.

En primer lugar conviene obtener la constante de acoplo que corresponde a la FBG uniforme mostrada anteriormente. Despejando de la fórmula $R = (\tanh(k \cdot L_g))^2$, se obtiene que la constante de acoplo es $264m^{-1}$, el cual servirá como punto de partida para la nueva FBG.

Ajustando los parámetros siguiendo las indicaciones que se han ofrecido anteriormente para compensar los efectos del enventanado se ha llegado a la siguiente solución:

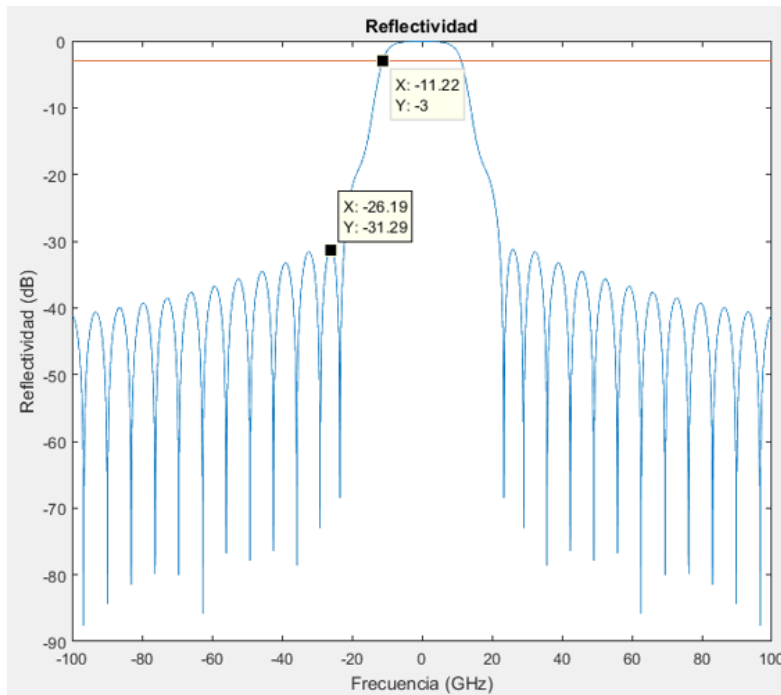


Figura 21: FBG optimizada

Se puede observar que tal y como se nos solicitaba, se ha conseguido un NLPS superior a 30dB y se ha mantenido el mismo ancho de banda a 3dB. Para ello se ajusta la longitud de la FBG a 1.5cm y se aumenta la constante de acoplo a $325m^{-1}$.

4.3. FBG con chirp lineal (LCFBG)

Las redes de difracción de Bragg se basan en la modulación periódica del índice refractivo a lo largo de la fibra ($\Lambda = cte$). Las redes que no siguen esta modulación periódica uniforme se conocen como Chirped Fiber Bragg Gratings ($\Lambda(z)$), la variación del periodo de modulación repercute directamente sobre la frecuencia central de Bragg que como ya se ha comentado viene definida por: $\lambda_B = 2n_e\Lambda$. En el caso específico de las LCFBG esta variación del índice de refracción y por tanto de la frecuencia central de Bragg es lineal a lo largo de la fibra. Este hecho provoca que las LCFBG tengan la propiedad de añadir dispersión, es decir, al reflejarse la señal a diferentes longitudes de onda provoca que cada una de ellas presente diferentes *delays*. Esta propiedad es de gran importancia ya que permite realizar fibras compensadoras de dispersión como se verá a continuación.

En este último apartado de la práctica se nos pide diseñar una LCFBG con el objetivo de compensar la dispersión de un enlace de 100km de fibra con dispersión $D = 17ps/nmkm$. El sistema empleado debe llevar una señal OC-192 (10Gb/s) que ocupa un ancho de banda de 20GHz. Para ello debemos obtener la longitud mínima de la FBG y el parámetro F para dicha longitud. Además se nos pide que la máxima reflectividad debe ser superior al 90 % en el ancho de banda y debemos usar enventanado para reducir las oscilaciones del retardo de grupo.

Para obtener los parámetros de diseño se seguirán las ecuaciones proporcionadas en la teoría que nos indican cuál es la $L_{g,min}$ y su relación con el parámetro de Chirp, F:

$$L_{g,min} = \frac{DL_{fibra}\Delta\lambda}{2(\tau_g/L)} \quad (7)$$

$$F = \frac{\Delta\lambda L_g 2\pi n_e}{\lambda^2} \quad (8)$$

donde $\Delta\lambda = 0,161nm$ y $\tau_g = \frac{1}{v_g} = \frac{n_e}{c}$

Con estos valores obtenemos una longitud mínima de la FBG de y un parámetro de chirp de 18.2. El valor de κ deberá ser superior a $60,6149m^{-1}$ para garantizar que la reflectividad supera el 90 %.

En primer lugar observamos el resultado de la simulación sin enventanar.

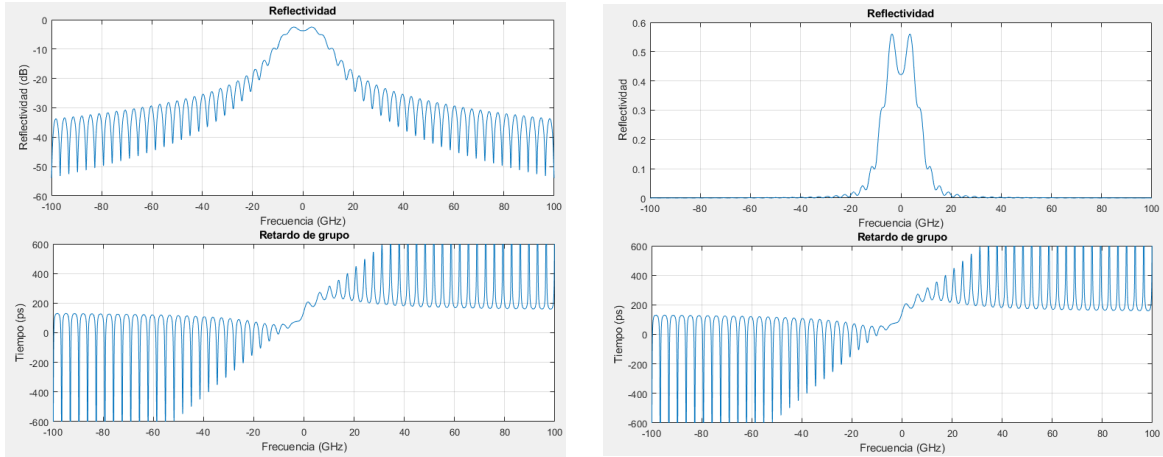


Figura 22: LCFBG $F = 18,22$ y $\kappa = 61,1/mm$

Se observa que los resultados se aproximan a los buscados pero se tiene el problema de exceso de lóbulos secundarios y oscilaciones en el retardo de grupo, para solventar dichos problemas se empleará una ventana Gaussiana $g = 15$:

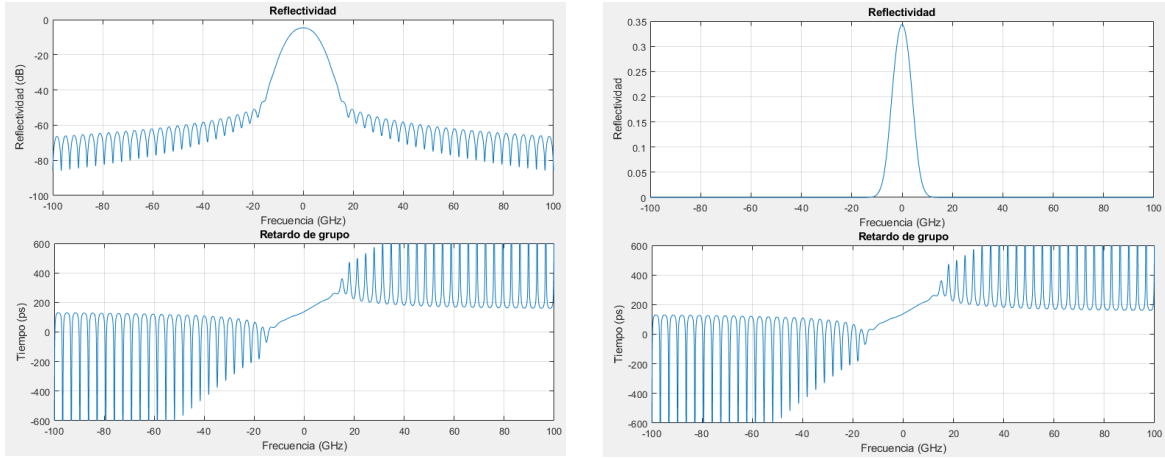


Figura 23: LCFBG $F = 18,22$, $\kappa = 61,1/mm$ y $g = 15$

Se puede apreciar en las capturas que se ha logrado acabar con dichos inconvenientes pero la introducción del enventanado causa, como se ha comentado en el apartado anterior, que se tenga que reajustar los valores de la longitud de la FBG y de la constante de acoplo para volver a cumplir los requisitos de ancho de banda y reflectividad máxima.

Tras ajustar los parámetros de diseño se ha llegado a la siguiente solución que satisface todos los requisitos presentados. Los parámetros finales son:

Cuadro 2: Propiedades.

L (cm)	$\kappa(m^{-1})$	g	F
3	200	10	25

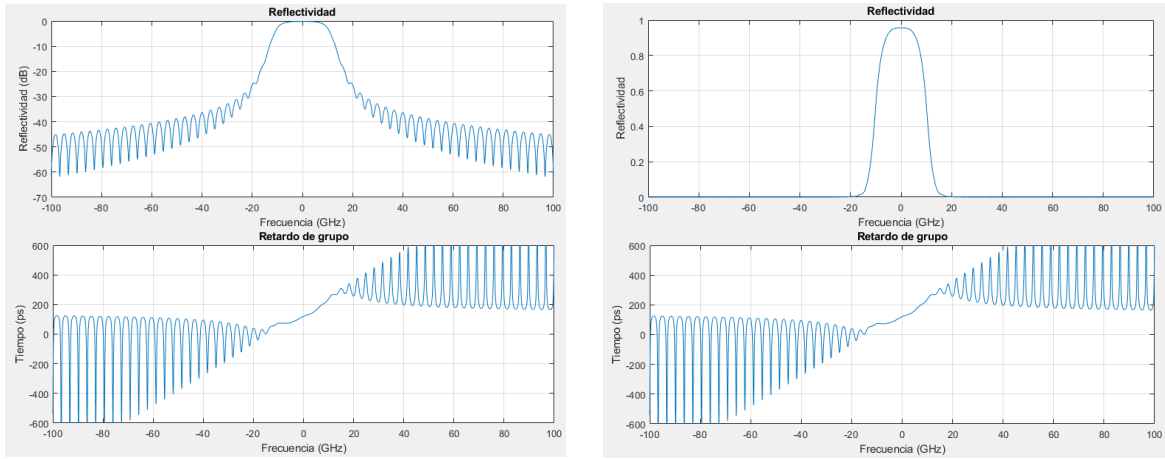


Figura 24: LCFBG optimizada con los valores de la tabla (2)

A continuación se puede observar en mayor detalle el espectro de reflectividad en la zona del problema

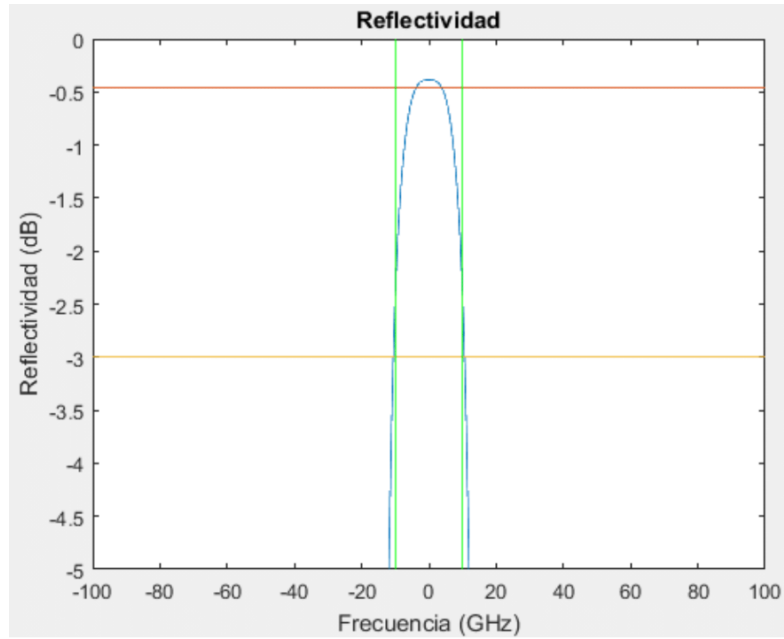


Figura 25: Detalle de la LCFBG optimizada

Se puede comprobar que cumplimos todos los requisitos de ancho de banda y reflectividad máxima.

Con relación al retardo de grupo teníamos que compensar una fibra de 100km de longitud con dispersión $D = 17\text{ps/nmkm}$ y un $\Delta\lambda$ que equivale a 272 ps

Referencias

- [1] Daniel Pastor Abellan, *Curso de Fiber Bragg Gratings*. Photonics Research Labs, Universidad Politécnica de Valencia