

# Red de difracción optimizada para aplicaciones en redes de interferómetros Fabry-Perot.

Francisco J Madruga<sup>(1)</sup>, Nicolás Becue<sup>(1)</sup>, Antonio Quintela<sup>(1)</sup>, Olga M. Conde<sup>(1)</sup>, José M. López Higuera<sup>(1)</sup>

[madruga@teisa.unican.es](mailto:madruga@teisa.unican.es)

(1) Grupo de Ingeniería Fotónica, Dpto. de Teisa . Universidad de Cantabria Avd de los Castros s/n 39005 Santander Cantabria España.

**Abstract-** In order to obtain an acoustic waves sensor network a lot of interferometer transducers must be multiplexed. The use of Fibre Bragg Grating (FBG)- based interferometer allows the applications of Wavelength Division Multiplexing (WDM) technology and multiplex large number of transducers in the sensor system. The sensing system uses Amplified Spontaneous Emission (ASE) source for interrogating arrays of FBG sensors. The Coherence Multiplexed (CM) system interrogated with ASE source do not suffer from phase induced intensity noise due to their coherent features. In this paper, an optimum FBG for FBG-Based interferometer interrogated by a FBG-based Narrow ASE source is designed, developed and characterised.

## I. INTRODUCCIÓN

Las redes de sensores acústicos han sido ampliamente estudiadas dada sus amplias aplicaciones en sectores como el petrolífero, aeroportuario, geofísico, etc... Una red de sensores acústicos son un gran número de interferómetros de fibra óptica, distribuidos a una distancia de unos metros a lo largo de un, un par o varios pares de buses de fibra óptica. Así al hacer incidir una onda acústica sobre un terreno cada transductor detecta de forma secuencial la magnitud de onda acústica reflejada produciendo una imagen coherente del terreno como haría un radar. Este funcionamiento conlleva por tanto una multiplexación de un gran número de transductores.

Existen una gran variedad de métodos prácticos para redes de sensores multiplexadas pasivas con sus fortalezas y debilidades (TDM, CM, WDM, FDM, híbridas). Aunque sólo dos WDM (multiplexación en longitudes de onda) y CM (multiplexación de coherencia) utilizan un único canal de fibra, mientras el resto precisa de más canales internos, lo que les confiere una sencillez mayor. Además sólo son afectadas por el ruido shot y por el ruido de fase característico de la multiplexación de coherencia donde cada interferómetro codifica la información en la portadora óptica pero con distintos niveles de coherencia y se interroga con ayuda de un interferómetro de compensación o receptor. El rendimiento de los sistemas de interrogación de sensores interferométricos láser está limitado por la presencia de ruido de intensidad inducido en la fase [1, 2]. Pero cuando se utilizan fuentes de gran anchura espectral, y por tanto de baja coherencia, la sensibilidad de estos sistemas mejora. El uso como excitación de fuentes de emisión espontánea amplificada (ASE) presenta características de fuentes termal

con respecto al ruido lo que caracteriza el ruido de fotones en exceso.

Sin embargo, esto no es práctico cuando se habla de sensores acústicos donde la longitud de interacción del sensor con la señal acústica debe ser elevada para conseguir una sensibilidad apreciable y, donde para obtener un cierto nivel de visibilidad, la longitud de concordancia entre el sensor y el interferómetro de compensación debe ser inferior a la longitud de coherencia de la fuente. Un valor adecuado podría ser en torno a 1cm lo cual implica anchos de banda ópticos de 0,1-0,2 nm. Con filtros fabricados con tecnología de redes Bragg en fibra óptica, se podría estrechar el espectro de una fuente ASE, controlando mejor su propiedades de coherencia y permitiendo además el uso de tecnología de multiplexación en longitudes de onda (WDM) [2]. Para ello es necesario optimizar el diseño de las mismas para obtener las mejores prestaciones.

## II. REDES DE DIFRACCIÓN APODIZADAS

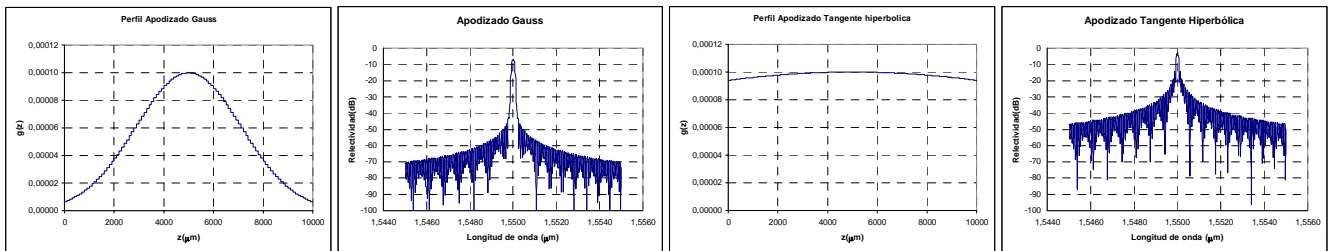
Un red de difracción de fibra óptica es una perturbación periódica o cuasiperiódica del índice de reflexión de su núcleo a lo largo de la misma formando una estructura que refleja la luz que le llega de forma selectiva con la longitud de onda. El pico de la potencia óptica reflejada sucede a la longitud de onda de Bragg que sigue la expresión:

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda \quad (1)$$

donde  $\Lambda$  es el periodo del perfil longitudinal del índice de refracción y  $n_{eff}$  es el índice de refracción efectivo de la fibra. En una red de difracción Bragg uniforme el cambio de índice de refracción es constante en toda su longitud y su índice efectivo es constante también. El espectro de reflexión de una red Bragg de longitud determinada con una modulación uniforme del índice de refracción presenta una serie de lóbulos secundarios en las longitudes adyacentes a la central. Esta característica debe ser mejorada reduciéndola o eliminándola, por lo que se utiliza [3] una modulación o apodización del cambio de índice de refracción. Esta se consigue con una exposición envolvente de luz ultravioleta que reduce el índice de refracción en los extremos de la red Bragg siguiendo la función de apodización (envolvente) deseada.

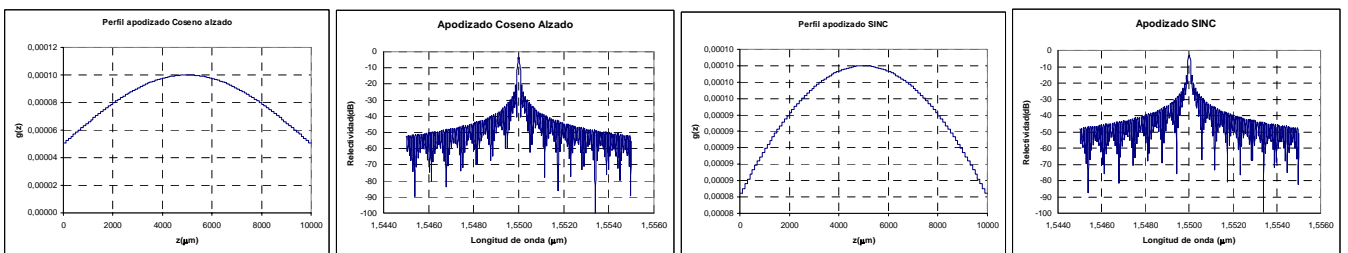
Nombre función de apodización	$g(z)$
Gausiana	$\exp\left\{-\ln 2 \cdot \left[\frac{2 \cdot (z - L/2)}{FWHM}\right]^2\right\} \quad z \in [0, L]$
Tangente hiperbólica	$\tanh\left(\frac{a \cdot z}{L}\right) \cdot \tanh\left(a \cdot \left(1 - \frac{z}{L}\right)\right) + 1 - \tanh^2\left(\frac{a}{2}\right) \quad z \in [0, L]$
Coseno alzado	$\frac{1}{2} \cdot \left[1 + \cos\left(\frac{\pi \cdot (z - L/2)}{FWHM}\right)\right]^2 \quad z \in [0, L]$
Sinc	$\text{sinc}\left[\frac{(z - L/2)}{FWHM}\right] \quad z \in [0, L]$
Kaiser	$\frac{I_0\left(\beta_k \sqrt{1 - \left(\frac{2n}{N-1}\right)^2}\right)}{I_0(\beta_k)} \quad n \in [0, N-1]$
Blackman	$\frac{1 + a \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{(z - L/2)}{FWHM}\right) + b \cdot \cos\left(4 \cdot \pi \cdot \frac{(z - L/2)}{FWHM}\right)}{1 + a + b} \quad z \in [0, L]$

Tabla 1. Funciones de apodización típicas para redes de difracción donde L representa la longitud de la red de difracción y FWHM la anchura en longitud del perfil normalizado de la función a 1/2. El resto son coeficientes típicos de cada tipo



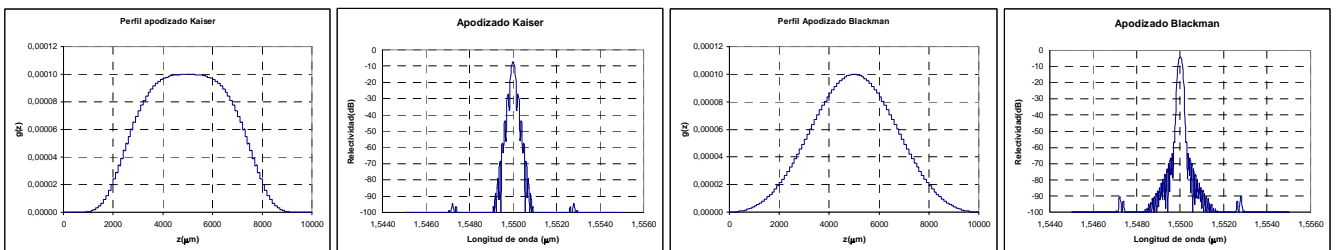
a) Perfil apodizado gaussiano con FWHM=0.5 y L= 10 cm.

b) Perfil apodizado de tangente hiperbólica con a=0.5 y L= 10 cm.



c) Perfil apodizado de coseno alzado con FWHM=1 y L= 10 cm

d) Perfil apodizado de función sinc con FWHM=0.5 y L= 10 cm.



e) Perfil apodizado de función Kaiser con  $\beta F=22$  y L= 10 cm.

f) Perfil apodizado de función Blackman con a=1.19, b=0.19, FWHM=1 y L= 10 cm.

Fig. 1. Perfiles de apodización y espectros de reflexión de los distintos tipos de apodización descritos en la tabla 1.

El efecto de la apodización se puede expresar como

$$n(z) = n_0 + \delta n \cdot g(z) \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z)\right) \quad (2)$$

donde  $\delta n$  es la profundidad de modulación y  $g(z)$  es la función de apodización[4].

Las funciones de apodización más típicas aparecen en la tabla 1 pudiendo ser ampliadas con cualquier función de enventanado típicas de procesamiento digital de señal como Hamming, Barlett, Hann, Harris, Nutall, etc. El espectro de reflexión de las redes apodizadas con las funciones presentadas ha sido simulado para determinar la red óptima para la aplicación. Dos son las características a observar: reflectividad de los lóbulos secundarios y retardo que introduce la red. En base a su respuesta espectral las apodizaciones indicadas en las figura 1 b, c, d (tangente hiperbólica, coseno alzado y función sinc) no son adecuadas para los interferómetros sensores puesto que limitarían seriamente la separación entre sensores multiplexados en longitud de onda. Es decir, presentarían una gran diafonía entre interferómetros próximos en longitud de onda debido a los lóbulos laterales.

Por la misma razón parece aconsejable evitar el apodizado gaussiano. Siendo de todos los apodizados estudiados el más adecuado el de la función de Blackman debido al no ser aceptable ensanchamiento que presenta el lóbulo principal en la función de Kaiser para los propósitos de esta aplicación.

### III. OPTIMIZACIÓN DE LA RED APODIZADA.

La red apodizada óptima se seleccionará de acuerdo a criterios de ancho de banda de lóbulo principal y la altura de lóbulos secundarios. De las seis estructuras presentadas solo dos presentan lóbulos secundarios casi nulos (apodizaciones con las funciones de Kaiser y Blackman) y de los cuales las redes apodizadas con función de Blackman presentan un más estrecho lóbulo central.

Aplicando el método de la matriz transferencia se ha calculado el espectro de reflexión de las redes apodizadas con la función de Blackman para distintos valores de los coeficientes  $a$  y  $b$ . Los resultados obtenidos para anchura de lóbulo central y para altura de lóbulos secundarios con respecto a estos parámetros se representan en la fig. 2 donde se deducen los valores óptimos  $a=1.19$  y  $b=0.19$ , que minimizan la anchura de banda y la altura de lóbulos secundarios.

### IV. FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN

Redes de difracción se han fabricado mediante un láser continuo con una longitud de onda de emisión de 244 nm y una máscara de fase uniforme a las longitudes de onda 1550,92 nm correspondiente al canal 32 de los sistemas WDM. El apodizado Blackman, con coeficientes  $a=1.19$  y  $b=0.19$ , se ha conseguido modificando la velocidad de barrido y por tanto el tiempo de exposición del núcleo de la fibra al haz interferente generado. La fig. 3 muestra la caracterización de una de las redes fabricadas, que presenta una reflectividad del 99% realizada con un Optical Dispersion Analyzer Agilent 86038A, donde el ancho a 3 dB del lóbulo principal se ha medido en 0.2 nm.

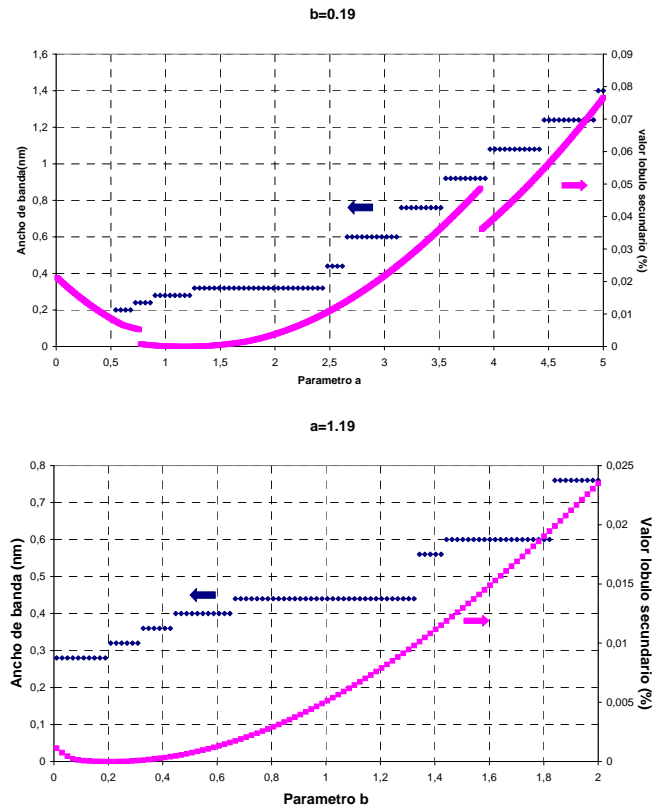


Fig. 2. Optimización de los valores  $a$  y  $b$  de una red de difracción con apodización Blackman.

Además se ha caracterizado el retardo de grupo de la red de difracción y se observa que se mantiene constante para toda la anchura del lóbulo de reflexión, lo que evitará una penalización en la fase medida en el interferómetro Fabry-Perot debida las redes de difracción.

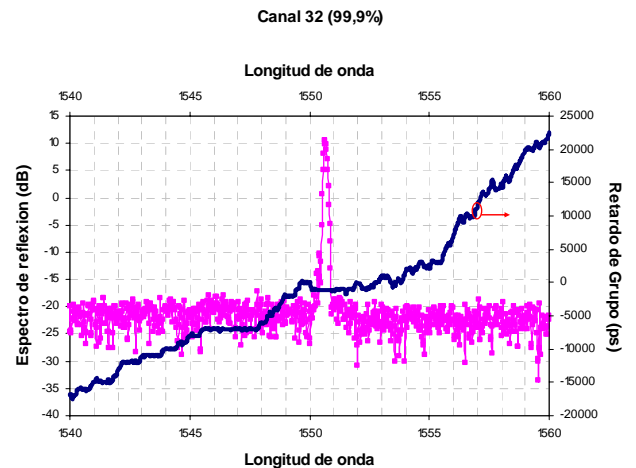


Fig. 3. Potencia reflejada y retardo de grupo de una red de difracción con apodización Blackman. Valor parámetro  $a=1,19$  y  $b=0,19$ .

### V. CONCLUSIONES

En esta comunicación se ha presentado una red de difracción optimizada para su uso en redes de sensores acústicos donde el elemento transductor es un interferómetro Fabry-Perot. La red de difracción será el elemento reflector del interferómetro y se ha diseñado con una función de

apodización de Blackman. Se ha determinado los valores óptimos de los parámetros a y b de dicha función en 1,19 y 0,19 para mínima anchura de banda y mínimos lóbulos secundarios. Siguiendo estos criterios se ha construido una red de difracción apodizada que cumple las condiciones de anchura de banda de 0,2 nm y nivel de lóbulos muy bajo.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer las aportaciones realizadas a este trabajo desde los proyectos SIRAS TEC2004-05936-C02-02 y CIMA TEC2005-08218-C02-02

#### REFERENCIAS

- [1] Jones, J.D.C., "Interferometry and polarimetry for optical sensing" Capítulo 12 de Handbook of optical fibre optic sensing technology Ed. José M. López Higuera, John Wiley and Sons, 2002
- [2] Brooks, J.L., Wentorth, R.H., Youngquist, R.C., Tur, M., Kim, B.Y. Shaw, H.J. "Coherence Multiplexing of fiber optic interferometric sensors", IEEE Journal of Lightwave Technology, LT-3, 1062-1071, 1985.
- [3] Shafir, E., Tur, M., "Phase induced intensity noise in an incoherent Fabry-Perot interferometer and other recirculating devices", Journal of Optical Society America A, 4, nº1, 77-81, 1987.
- [4] Erdogan T. "Fibre grating spectra", Journal of Lightwave Technology V15, nº8, 1997,