

ANÁLISIS COMPARATIVO DE SENSORES BASADOS EN FIBRA OPTICA PARA SU APLICACION EN TOPOLOGIAS DE RED REFLEXIVAS

Ramón Fernández de Caleyá⁽¹⁾, Antonio Lobo Ribeiro⁽²⁾, José Luis Santos⁽²⁾

(1) *Dpto. de Ingeniería Electrónica
Universidad Alfonso X El Sabio
Avda. de la Universidad nº 1
28691 - Villanueva de la Cañada (Madrid)
España*

(2) *Grupo de Optoelectrónica
INESC
Rua José de Falcao, 110
4000 - Porto
Portugal*

ABSTRACT

In this work, a basic comparative analysis of singlemode fibre optic sensors is presented when being implemented in reflective topology networks. From the detected power per sensor analysis and the multiplexing and demultiplexing alternative technics point of view, a brief discussion of the reliable topologies is included.

1. INTRODUCCION

Existe una innumerable cantidad de trabajos publicados en revistas especializadas donde se comprueba el elevado interés por la investigación de sensores de fibra y su posible aplicación en redes de fibra óptica para la teledetección de magnitudes físicas (telemedida) {1-2}. Se ha demostrado que dichos sensores proporcionan una mayor sensibilidad y margen dinámico, entre otras ventajas, frente a los sensores electrónicos convencionales en múltiples aplicaciones. Pero su continua evolución no ha permitido detallar todas las posibilidades que se pueden barajar respecto a qué sensores ópticos y qué topologías de red son las más apropiadas para una aplicación concreta en la que se necesite medir más de una magnitud física a la vez.

En este artículo, nos centramos exclusivamente en el comportamiento e implementación en red de los sensores basados en fibra óptica del tipo Michelson, en las microcavidades reflexivas de bajo contraste (*low-finesse Fabry-Perot*) y en los más recientes sensores de fibra basados en redes de difracción de Bragg (BGS) {3}. Por último, se comenta la posibilidad de combinar varias técnicas de multiplexación y topologías para aumentar el número de sensores en la red con una mínima repercusión en términos de potencia detectada por sensor.

2. SENSORES BASADOS EN FIBRA OPTICA CON RESPUESTA REFLEXIVA

Los sensores de fibra interferométricos de dos ondas de tipo Michelson (Fig. 1.a) constan de dos tramos de fibra, cada uno conectado a las puertas salientes de un acoplador direccional de 3dB. En el otro extremo de cada tramo de fibra, se debe reflejar prácticamente toda la luz incidente. Se dice que está balanceado cuando ambos tramos de fibra tienen la misma longitud. De lo contrario se trata de un Michelson no balanceado con una diferencia de caminos ópticos $OPD=nL$, distinto de cero. Al inyectar la luz por una de las puertas de entrada del acoplador, se obtienen dos tipos de respuestas de intensidad, $I_r(t)$ e $I_t(t)$, que dependerán del desfase inducido por las variaciones del índice de refracción de la fibra, n , que se vayan produciendo en un brazo de fibra (brazo de fibra sensor) respecto al otro (brazo de fibra de referencia), $\phi(t) = 2\pi nL / \lambda$, de forma que,

$$I_{r(t)}(t) = \frac{I_0}{2} (1 - (+)V \cos\phi(t)) \quad (1)$$

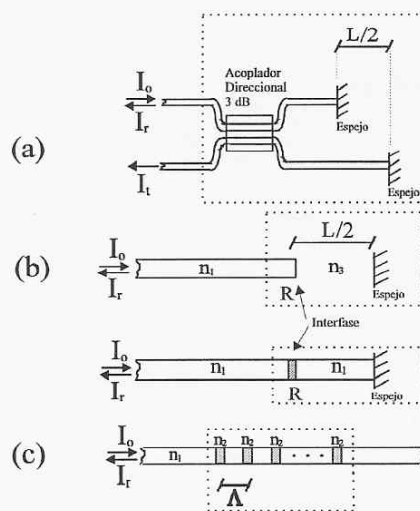


Fig. 1

V es la visibilidad que depende de las propiedades de coherencia de la fuente óptica y que en el caso ideal es la unidad, e I_o es la intensidad media de luz incidente.

El otro tipo de sensor interferométrico de fibra con respuesta reflexiva es la microcavidad de bajo contraste (Fig. 1.b). Consta de una interfaz de reflectividad R, una zona de interacción de longitud $L/2$, que puede ser un tramo de fibra o cualquier otro material transparente a la luz, y un espejo. La respuesta de este dispositivo, en términos de la intensidad reflejada, depende del valor de R y de las variaciones de fase producidas en la zona de interacción. Si consideramos que la reflectividad de la interfaz es pequeña ($0 < R \ll 1$), podemos aproximar su respuesta de la forma siguiente {1},

$$I_r(t) \approx 2RI_o(1 - \cos\phi(t)) \quad (2)$$

observándose que su comportamiento es similar al de un interferómetro de dos ondas (no se han considerado las pérdidas por simplicidad en los cálculos). En este tipo de sensores y en los de tipo Michelson no balanceados (OPD > 0), la técnica de interrogación empleada es la de interferometría de luz blanca, requiriéndose de un interferómetro de referencia idéntico al sensor, de forma que la resta entre diferencias de brazos de fibra sea mucho menor que la longitud de coherencia de la fuente, L_c . A continuación, se resumen en la Tabla I algunas de sus características más relevantes.

TABLA I

I. de Michelson frente a las microcavidades	Microcavidades frente a los I. de Michelson
<ul style="list-style-type: none"> • Diseño y realización sencilla ($k=1/2$). • La visibilidad depende casi exclusivamente de las pérdidas en los empalmes y acopladores, de k, y del grado de coherencia. • La potencia reflejada por sensor es $1/4R$ veces superior (sin pérdidas y $R \ll 1$). • Pueden ser integrados en redes reflexivas cuya multiplexación es por división espacial, además de temporal (fuente pulsada) y por coherencia (interferometría de luz blanca). • Pueden realizarse interferómetros reflexivos cuyo OPD=0 (balanceados), donde al integrarse en red sólo pueden multiplexarse en tiempo y/o espacio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño más compacto y muy adecuado para la fabricación de cabezas sensoras y parejas de sensores diferenciales. • Requiere de un mayor precisión en la realización de R ($0 < R \ll 1$), pudiéndose conseguir unas pérdidas totales muy pequeñas. La visibilidad depende de las pérdidas introducidas por la interfaz y el espejo, de R, y del grado de coherencia. • No requiere de un brazo de referencia (OPD > 0). Habitualmente, $L \gg L_c$, por lo tanto, requieren de alguna técnica de demodulación (interferometría de luz blanca). • Es mucho más versátil. En la cavidad puede sustituirse el tramo de fibra por materiales (p.e. Solgel, nitratos de silicio, silicio poroso) cuyo coeficiente de absorción sea sensible a las variaciones de diversas propiedades físicas del entorno que se quiere medir. La cavidad puede ser el aire, y el espejo se puede diseñar con cierto coeficiente de elasticidad para detectar diferentes tipos de vibraciones y microcurvaturas, o bien, puede ser rígido situado sobre superficies sometidas a microdesplazamientos. • Pueden ser integrados en redes reflexivas cuya multiplexación es por división en el tiempo (fuente pulsada) y/o por coherencia (interferometría de luz blanca).

Los sensores de redes de difracción de Bragg, constan de una fibra convencional donde a lo largo del núcleo se han introducido una serie de interfaces, con índice de refracción distinto y periódico. Al inyectar un haz de luz de respuesta espectral ancha, se produce un haz de luz reflejado centrado a una longitud de onda llamada de Bragg, λ_{BG} , determinada por,

$$\lambda_{BG} = 2n_o \Lambda \quad (3)$$

donde, Λ es el periodo de las interfaces y, n_o es el índice de refracción efectivo que depende de los modos de propagación y de la modulación del índice introducida. La respuesta de la intensidad reflejada es del tipo {4},

$$I_r(\lambda) \approx \sqrt{\frac{\pi}{4 \ln 2}} R_{BG} I_o \frac{\Delta\lambda_{BG}}{\Delta\lambda_f} \quad (4)$$

donde, R_{BG} es la reflectividad del sensor a la longitud de onda de Bragg, $\Delta\lambda_{BG}$ es el ancho de banda de la red de Bragg y, $\Delta\lambda_f$ es el ancho de banda de la fuente óptica. Para obtener una señal interferométrica que pueda ser detectable, se debe emplear un interferómetro u otra red similar de referencia en combinación con

la red considerada, de manera que la señal a la salida del interferómetro se puede expresar como en (1). En este caso, el desfase $\phi(t)$ es inversamente proporcional a las variaciones de λ_{BG} {4},

$$\phi(t) = \frac{2\pi nL}{\lambda_{BG}} \quad (5)$$

La longitud de onda de Bragg depende de las variaciones de temperatura y de deformación (tensión), por lo tanto, puede funcionar como sensor de elevada sensibilidad y con la ventaja adicional de ser capaz de medir variaciones de la magnitud física requerida en términos absolutos. En la Tabla II, se resumen algunas características de este tipo de sensores frente a los interferométricos.

TABLA II

BGS frente a los sensores interferométricos reflexivos	Sensores interferométricos reflexivos frente a los BGS
<ul style="list-style-type: none"> • Detectan variaciones de la magnitud física a medir en función de las variaciones de longitud de onda de la señal reflejada, en términos absolutos. • Tamaño extremadamente reducido (1.5 mm - 500 μm de longitud). • Fácil fabricación sobre fibras convencionales. • Fuente de luz óptica de gran anchura espectral y, por lo tanto, de bajo coste. • Requiere de una demodulación sencilla y en su aplicación a red la técnica de multiplexación es inmediata. • Puede emplearse un único interferómetro para demodular el conjunto de BGS. 	<ul style="list-style-type: none"> • Detectan variaciones de la magnitud física a medir en función de las variaciones de índice de refracción de la fibra, dentro de un período relativo de 2π. • Supone una realización menos precisa pero la resolución es más elevada. • La potencia óptica reflejada es superior. • Por lo general, necesita de una fuente óptica coherente, lo que supone un coste más elevado. • Sus dimensiones son mayores y para su realización se precisa de un acoplador.

3. TOPOLOGIAS DE RED REFLEXIVAS PARA N SENSORES

Nos vamos a centrar en las tres topologías de red de la Fig. 2: (a) en árbol, (b) en serie y (c) en bus. En la Tabla III, se resumen algunas de sus características más relevantes.

TABLA III	Nº de acopladores en la red	¿Acopladores iguales?	Potencia óptica por sensor (sin pérdidas)	Diafonía debida a la topología
Arbol	N ó N-1	Sí	$I_o/4N^2$ hasta I_o/N	No
Serie	1	Sí	I_o	Sí
Bus	N	No	$I_o/4N^2$	No

N es el número total de sensores en la red y, en las expresiones de potencia óptica por sensor, se ha considerado que la red y los sensores son ideales (sin pérdidas). Una característica importante de la topología en bus es que para que la potencia óptica detectada sea la misma, independientemente de la posición del sensor, los coeficientes de acoplo deben tener un valor ponderado respecto a su posición en la red. Esto dificulta el diseño y, a su vez, la reconfigurabilidad de la red al modificar el número de sensores, N, frente a las otras dos topologías, por lo que nos centraremos en estas dos últimas. En función de la técnica de multiplexación, es posible extraer la información de un tipo de sensor en función de una topología de red determinada.

La aplicación de red más importante de los BGS es en topologías en serie, donde N prácticamente no afecta a la potencia reflejada por sensor. Los sensores interferométricos de Michelson utilizados en redes de topología en árbol, permiten utilizar la técnica de multiplexación por división en el tiempo (TDM), por división en espacio (SDM) o por coherencia (CDM). Las técnicas TDM y SDM son las más sencillas y permiten emplear sensores idénticos e incluso balanceados. En la técnica SDM se extrae la información de la puerta contraria a la que se inyecta la luz, I_o , consiguiéndose una potencia reflejada por sensor proporcional a I_o/N y un acoplador menos, sin embargo, se deben emplear un total de N detectores. La técnica TDM requiere de un único detector, siendo entonces menor la potencia detectada por sensor ($I_o/4N^2$). Con esta técnica, tanto en la topología en árbol como en la de serie, es preciso considerar los retardos entre la ramas de fibra en la red distintos de cero, de la forma indicada en la Fig. 2. La técnica CDM requiere de una demodulación óptica por cada sensor, para lo que se suele emplear una red de idénticas características antes del/los detectores y, al mismo tiempo, los sensores deben tener un OPD distinto. Las técnicas TDM y SDM

requieren de un interferómetro (donde uno de sus brazos es modulado con una señal eléctrica en rampa) a la entrada de la red, o bien, antes de la detección, de forma que demodule la señal en términos de fase (sensores con $OPD > 0$). Para demodular la señales registradas en los BGS cuando son integrados en una topología en serie y multiplexados en longitud de onda (WDM), se requiere de un Fabry-Perot modulado con una señal eléctrica en rampa.

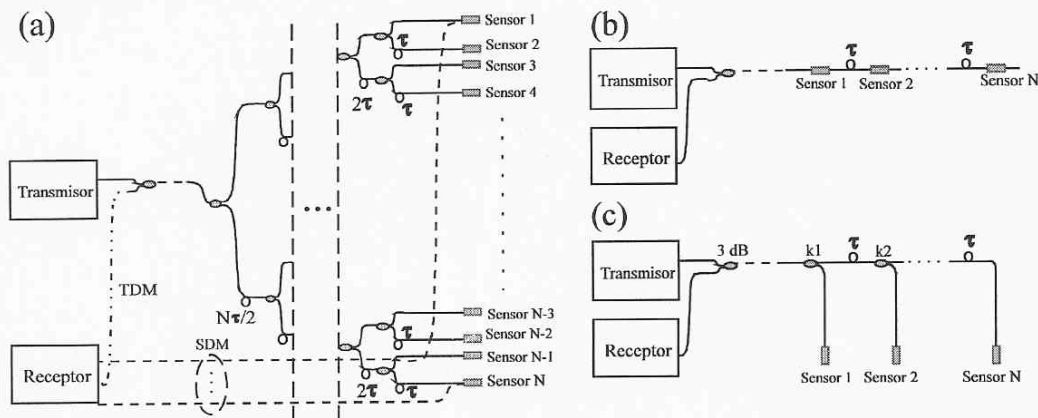


Fig. 2

Dado que el número de BGS situados en una topología en serie no afecta a la potencia detectada por sensor, puede pensarse en aumentar el número de sensores en una red en árbol sin aumentar en exceso dicho valor de potencia, únicamente insertando al final de cada brazo de fibra una topología en serie con M BGS. La potencia detectada por sensor, para los $N \cdot M$ sensores de la red, sería ahora la debida a la topología en árbol ($I_0/4N^2$). Sin embargo, también se pueden combinar las técnicas de multiplexación en, tiempo-longitud de onda {4}, espacio-tiempo {5}, espacio-longitud de onda {6}, o espacio-longitud de onda-tiempo consiguiéndose mejores resultados en términos de potencia detectada por sensor. En el primer caso, por ejemplo, se pueden integrar $N \cdot M$ sensores en una misma red, con una potencia detectada por sensor de $I_0 D/N^2$, siendo D el número de detectores empleados debido a la técnica SDM (donde D y N son múltiplos de 2 y de valor $\leq N/2$).

4. CONCLUSIONES

Se ha realizado un sencillo análisis comparativo entre tres tipos de sensores de fibra reflexivos. A su vez, se han resumido algunas de las características de las topologías reflexivas de red en las que pueden ser integrados, en función de sus propiedades, de la técnica de multiplexación e interrogación y, de la potencia detectada por sensor. Por último, se concluye que, debido a las características específicas de los sensores reflexivos a los que nos hemos referido, se pueden obtener redes con un mayor número de sensores distribuidos a partir de la combinación de técnicas de multiplexación, interrogación y topologías sin que suponga una disminución significativa de la potencia detectada por sensor.

REFERENCIAS

- {1} D.A Jackson: *Recent progress in monomode fibre optic sensors*, Meas.Sci. Tech. 5, 621-638, 1994
- {2} D.A Jackson: *Selected multiplexing schemes for fibre optic interferometric sensors*, in Proc. of Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors III, Proc. SPIE 2071 (Boston, USA, 1993).
- {3} W. Morey, J. Dunphy, G. Meltz: *Multiplexing fibre Bragg grating sensors*, Proc. of the Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors, Proc. SPIE 1586 (Boston, USA, 1991).
- {4} R.S. Weis, A.D. Kersey, T.A. Berkoff: *A Four-Element Fiber Grating Sensor Array with Phase-Sensitive Detection*, IEEE Photonics Techn. Lett., Vol. 6, No. 12, 1469-1472 (1994).
- {5} Y.J. Rao, A.B. Lobo Ribeiro, D.A. Jackson, L. Zhang, I. Benmim: *Combined spatial and time division multiplexing scheme for fibre grating sensors with drift-compensated phase-sensitive detection*, enviado a Optics Letters (Junio 1995).
- {6} D.A. Jackson, A.B. Lobo Ribeiro, J.L. Archambault, L. Reekie: *Simple multiplexing scheme for fibre optic grating sensor network*, Opt. Letters 18, 1192-1194 (1993).