

ARRAYS DE SENSORES INTERFEROMETRICOS RECIRCULANTES DE FIBRA OPTICA

R. Fdez. de Caleyá, M. López-Amo, J.A. Martín-Pereda, M.A. Muriel
 Departamento de Tecnología Fotónica
 E.T.S.I. Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid
 Ciudad Universitaria s/n, 28040 - Madrid (España)

ABSTRACT

Two discrete interferometric sensors' arrays have been analysed from time division multiplexing of recirculating crossed loop structures based on singlemode optical fiber. Intensity impulsive responses for both arrays have been obtained and compared under different design considerations, calculating the system coupling constants, signal to interference noise ratio, input pulse repetition rate and duty cycle for each case. First experimental results are shown in this paper and very simple temperature and pressure sensing applications are suggested from here.

1. INTRODUCCION

En estos últimos diez años, los sensores interferométricos no recirculantes de fibra basados en estructuras Mach-Zehnder han sido extensamente estudiados, habiéndose obtenido numerosas técnicas de multiplexación y demodulación alternativas para su integración en configuraciones de red. Los resultados experimentales publicados hasta la fecha [1,2], demuestran la alta sensibilidad de estos sensores ópticos, oscilando entre una desviación de fase mínima detectable de unos pocos $\text{mrad/Hz}^{1/2}$ y casi una decena de $\mu\text{rad/Hz}^{1/2}$ a una frecuencia de 1KHz. Sin embargo, hasta la fecha, se han publicado muy pocos trabajos a partir de sensores interferométricos recirculantes [3]. La gran ventaja de éstos frente a los no recirculantes, es su enorme sencillez de implementación y, en su configuración resonante, su mayor sensibilidad.

A continuación se presenta un análisis de dos arrays de sensores interferométricos recirculantes basado en lazos recirculantes de fibra monomodo. Para ello, se han obtenido las respuestas impulsivas del lazo recirculante y de éstos integrados en arrays, en términos de intensidad de campo óptico. Si bien los coeficientes de los términos de estas expresiones son válidos para sensores donde la información viene registrada como un desfase entre los pulsos de salida de las estructuras (sistemas coherentes), en este estudio proponemos su aplicación en sistemas cuya información venga expresada en términos de variación del retardo entre pulsos generados en la estructura o en términos de variación relativa entre las amplitudes de los primeros pulsos de salida, pudiéndose aplicar a sensores de temperatura o de presión, respectivamente (sistemas incoherentes). A partir de estas consideraciones, hemos propuesto un array de configuración en paralelo para sensores de temperatura y un array de configuración en escalera para sensores de presión, mostrando los primeros resultados experimentales que se han obtenido.

2. RESPUESTA IMPULSIVA DEL LAZO RECIRCULANTE EN TÉRMINOS DE INTENSIDAD DE CAMPO OPTICO

Vamos a considerar la estructura interferométrica basada en el lazo recirculante de fibra de la Fig. 1, como sensor interferométrico recirculante, donde k y $1-\gamma$ son el coeficiente de acoplo y las pérdidas de inserción del acoplador direccional del sensor, respectivamente, y T_1 es el retardo generado en el lazo por cada recirculación del pulso de entrada. Los pulsos de entrada de intensidad I_0 se han generado a partir de una fuente de luz pulsada.

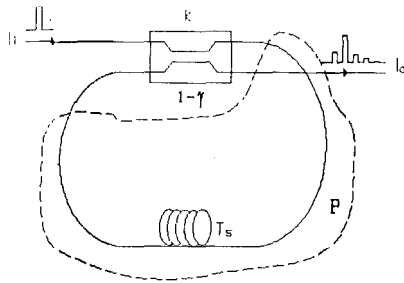


Fig. 1: Lazo recirculante de fibra en configuración cruzada

Si llamamos P a las pérdidas por curvaturas y atenuación de la fibra, y P_i a las pérdidas por recirculación completa (pérdidas de inserción introducidas por el acoplador más las pérdidas producidas en el lazo), la respuesta impulsiva del sensor recirculante, expresada en términos de intensidad de campo será,

$$\frac{I_o}{I_i} = (1-\gamma)k \{ \delta(t) + \eta \delta(t-T_s) + \eta \sum_{i=1}^{\infty} \left[\eta \left(\frac{k}{1-k} \right)^2 \right]^i \delta(t-(1+i)T_s) \}$$

donde η es un parámetro que definimos como el cociente entre las amplitudes del primer pulso recirculante (o 2º pulso), A_2 , y del primer pulso no recirculante (o 1º pulso), A_1 , y que, a su vez, viene determinado por P_i y k según la siguiente ecuación,

$$\eta = \frac{A_2}{A_1} = P_i \frac{(1-k)^2}{k}$$

3. ARRAYS DE SENSORES INTERFEROMÉTRICOS RECIRCULANTES BASADOS EN FIBRA OPTICA

Una vez caracterizada la estructura sensora, se proponen dos posibles formas de integrar estos sensores en una configuración de red. En el primer array consideramos que la información de cada sensor viene registrada en un retardo variable relativo al retardo específico para cada uno de ellos, y la configuración será en paralelo. En el segundo array consideramos un sistema formado por sensores idénticos entre sí en escalera y separados por un retardo igual entre ellos.

3.1 Configuración en paralelo.

En la Fig. 2 se muestra el esquema del array de N sensores en paralelo que se va a analizar. Para ello, se realizan las siguientes consideraciones: (1) los pulsos generados en un mismo sensor a partir de más de dos recirculaciones los consideramos despreciables, (2) el retardo generado en el lazo del sensor- j es T_{ij} que, a su vez, está compuesto por un retardo fijo T_j y un retardo variable $\pm \Delta T_j$ dependiente del parámetro físico a sensar (p.e. temperatura) y de valor absoluto máximo ΔT , (3) de esta forma, el margen sensitivo de los sensores del array será $2\Delta T$, tal y como se muestra en la Fig. 3, (4) η_{ij} y k_{ij} serán el parámetro η y el coeficiente de acoplo k del sensor- j , y, (5) las pérdidas de inserción del divisor de haz 1: N y del sumador N :1 se consideran despreciables.

Para evitar la pérdida de información debida a solapes entre pulsos procedentes de distintos sensores, diseñamos el retardo fijo del sensor- j tal que, $T_j = T_1 + 2(j-1)(\Delta T + \tau) \quad \forall j/j=2, \dots, N$, donde T_1 es el retardo fijo del primer sensor, y donde hemos supuesto que, para un retardo mínimo del sensor- $j+1$ ($T_{j+1} - \Delta T$) y máximo del sensor- j ($T_j + \Delta T$), existe una zona de guarda de valor igual al ancho del pulso de entrada τ . Si minimizamos la longitud de la secuencia de pulsos a la salida, obtenemos que para $\Delta T = T_1 - 2\tau$, no se producen solapes entre pulsos, con lo que el valor de T_j será, $T_j = 2j(\Delta T + \tau) - \Delta T$.

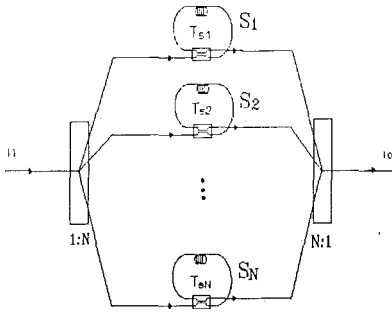


Fig. 2: Array de sensores interferométricos recirculantes en paralelo

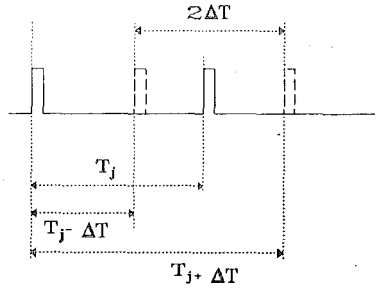


Fig. 3: Relación entre retardos del sensor-j y su margen dinámico de trabajo

Dada esta expresión, el tiempo de repetición de los pulsos de entrada vendrá determinado por $T_N + \Delta T + 2\tau$, y, por lo tanto, el ciclo de trabajo del sistema será,

$$\text{CiclopeTrabajo} = \frac{1}{1 + \frac{\tau}{N(\Delta T + \tau)}}$$

cuyo valor tiende a la unidad al aumentar el número de usuarios. Según los parámetros de diseño considerados, si suponemos además que todos los sensores tienen un retardo T_{sj} distinto pero sus coeficientes de acoplo y pérdidas idénticos entre sí ($k_{sj} = k$ y $\eta_{sj} = \eta$), la respuesta impulsiva total de este array podrá expresarse de la siguiente forma,

$$h_T(t) = \frac{(1-\gamma)k}{N} \left\{ \delta(t) + \eta \sum_{j=1}^N \delta(t - T_{sj}) + \eta^2 \left(\frac{k}{1-k}\right)^2 \sum_{j=1}^N \delta(t - 2T_{sj}) \right\}$$

donde $T_{sj} = 2j(\Delta T + \tau) - \Delta T \pm \Delta T_j$ y $|\Delta T_j| \leq |\Delta T|$, $\forall j/j = 1, \dots, N$.

En la expresión anterior, el primer término de la igualdad es la suma de todos los primeros pulsos de cada sensor. Este término será la referencia común de todos los sensores para cada período de repetición (o intervalo de muestreo) del sistema. En el segundo término de la igualdad se encuentra la información de cada sensor, según el retardo relativo a su retardo nominal $T_{sj} \pm \Delta T_j$. Por último, el tercer término de la expresión representa el factor interferencia. Dado que la información a sensar no se encuentra en la amplitud de los pulsos, la condición de diseño para detectar los pulsos deseados y rechazar los interferentes, es la que delimita el valor umbral de detección, P_U , entre los valores máximos de ambos pulsos, de forma que cuando,

$$\frac{(1-\gamma)}{N} k \left(\frac{k}{1-k}\right)^2 \eta^2 P_i \leq P_U \leq \frac{(1-\gamma)}{N} k \eta P_i$$

no se producirá error por interferencia en la detección. P_i es la intensidad de campo de entrada.

3.2 Configuración en escalera.

El array que analizamos a continuación es el representado en el esquema de la Fig. 4. En este caso, consideramos que: (1) los valores de los coeficientes de acoplo situados en los buses de entrada y salida pertenecientes a un mismo escalón son idénticos ($k_j, \forall j/j = 1, \dots, N$) y con pérdidas de inserción despreciables, (2) los sensores tienen idénticos coeficientes de acoplo ($k_{sj} = k, \forall j$) y retardos de lazo ($T_{sj} = \Delta T, \forall j$), y están retardados entre sí un intervalo T , y (3) los pulsos generados en cada sensor a partir de más de seis recirculaciones son despreciables. Para obtener una sensibilidad uniforme de todos los sensores a la salida

será deseable que los pulsos procedentes de cada sensor tengan igual tamaño en el bus de retorno. Esto es posible si imponemos que los acopladores de los buses de entrada y salida pertenecientes a un mismo escalón sean idénticos y, a su vez, cumplan la relación $k_{j+1} = k_j / (1 - k_j)$, o lo que es lo mismo, $k_j = k_{j-1} / (1 + k_{j-1})$. Dado que $k_N = 1$, el valor de los coeficientes de acoplo del escalón- j será $k_j = 1 / (N - j + 1)$, $\forall j/j = 1, \dots, N$.

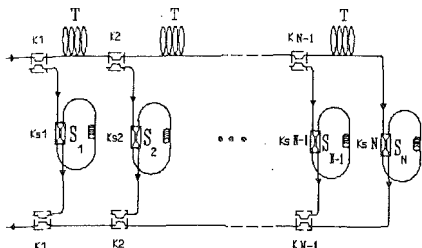


Fig. 4: Array de sensores interferométricos recirculantes en escalera.

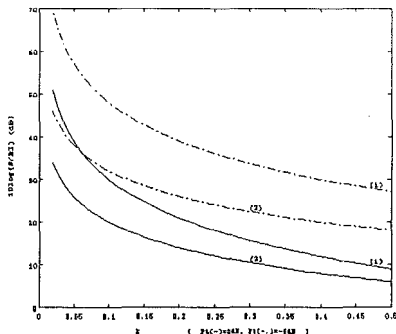


Fig. 5: Relación S/RI en función de k , para valores de $P_t = 0$ (-) y -6 dB(-), y para (1) $T=3\Delta T$, y (2) $T=2\Delta T$.

Una vez definidos los coeficientes de acoplo de los buses del array, debemos determinar el valor del retardo T . Como este retardo del array está directamente relacionado con el ruido interferencia, hemos considerado un retardo que asegure una relación señal a ruido interferente (S/RI) elevada pero que, por otro lado, no aumente demasiado el tiempo de repetición de los pulsos de entrada. Según esta reflexión, y presuponiendo que el retardo generado para el primer sensor del array es nulo, definimos un retardo total para el sensor- j igual a $(j-1)3\Delta T$, siendo ΔT el retardo por recirculación de cada sensor. De esta forma, el valor de T será $T=3\Delta T$, y para un array de N sensores, la velocidad de repetición de los pulsos de entrada será $1/3N\Delta T$, y el ciclo de trabajo será $1/3$. A partir del valor de T determinado, el pulso que lleva la información del sensor- j sólo interferirá, en el peor de los casos, con el 5º pulso del sensor- $(j-1)$, con lo que, la relación S/RI definida ahora como el cociente formado por el valor de pico de la amplitud del pulso-sensible (2º pulso) del sensor- j y el valor de pico de la amplitud del pulso-interferente (5º pulso) del sensor- $(j-1)$, vendrá expresada por la siguiente expresión,

$$\frac{S}{RI} = \frac{1}{\eta^3 \left(\frac{k}{1-k}\right)^6} = \frac{1}{k^3 P_t^3}$$

En la Fig. 5 se representa la relación S/RI obtenida para $T=3\Delta T$ y la correspondiente a un retardo de bus de $T=2\Delta T$, en función de k y para diferentes valores de pérdidas por recirculación de los sensores.

Por último, la respuesta impulsiva total de este array se podrá expresar como,

$$h_T(t) = (1-\gamma)k \sum_{j=1}^N (A_j \delta(t-(3j-3)\Delta T) + B_j \delta(t-(3j-2)\Delta T) + C_j \delta(t-(3j-1)\Delta T))$$

donde,

$$\begin{aligned} A_j &= \left(\frac{1}{N-j+1}\right)^2 \prod_{i=1}^{j-1} \left(\frac{N-i}{N-i+1}\right)^2 + \left(\frac{1}{N-j+2}\right)^2 \prod_{i=1}^{j-2} \left(\frac{N-i}{N-i+1}\right)^2 \eta_{j-1}^3 \left(\frac{k}{1-k}\right)^4 + \left(\frac{1}{N-j+3}\right)^2 \prod_{i=1}^{j-3} \left(\frac{N-i}{N-i+1}\right)^2 \eta_{j-2}^6 \left(\frac{k}{1-k}\right)^{10} \\ B_j &= \left(\frac{1}{N-j+1}\right)^2 \prod_{i=1}^{j-1} \left(\frac{N-i}{N-i+1}\right)^2 \eta_j + \left(\frac{1}{N-j+2}\right)^2 \prod_{i=1}^{j-2} \left(\frac{N-i}{N-i+1}\right)^2 \eta_{j-1}^4 \left(\frac{k}{1-k}\right)^6 \\ C_j &= \left(\frac{1}{N-j+1}\right)^2 \prod_{i=1}^{j-1} \left(\frac{N-i}{N-i+1}\right)^2 \eta_j^2 \left(\frac{k}{1-k}\right)^2 + \left(\frac{1}{N-j+2}\right)^2 \prod_{i=1}^{j-2} \left(\frac{N-i}{N-i+1}\right)^2 \eta_{j-1}^5 \left(\frac{k}{1-k}\right)^8 \end{aligned}$$

siendo η_1 y η_2 los parámetros del sensor- (N) y sensor- $(N-1)$, η_N y η_{N-1} , respectivamente, del período de muestreo anterior.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

A modo de ejemplo, en las Figs. 6 y 7 se muestran las respuestas impulsivas a la salida de un array en paralelo y de un array en escalera, para $N=2$, obtenidas en el laboratorio. Para su implementación se han utilizado acopladores de k variable monomodo, una fuente estabilizada a 1300 nm, un generador de pulsos con el que se ha modulado la corriente del láser, fibra monomodo y para su visualización se ha empleado un osciloscopio digital y conversores O/E de sensibilidad 1 V/1mW. Para la configuración en paralelo (Fig. 6), tenemos: F6(a) es la salida del lazo de longitud $l_1=8$ metros y $k_1=0.061$, F6(b) es la salida del lazo de longitud $l_2=17$ metros y $k_2=0.062$, y F6(c) es la intensidad total a la salida del array para unos coeficientes de acoplo de entrada y salida del 50%. Para la configuración en escalera (Fig. 7): F7(a) y F7(b) son las salidas del primer y segundo sensor, respectivamente, donde $k_1=0.061$, $k_2=0.062$, y el retardo T del array corresponde aproximadamente a $2\Delta T$, donde $\Delta T=8$ metros, y F7(c) es la intensidad a la salida del array para unos coeficientes de acoplo del array del 50% aproximadamente.

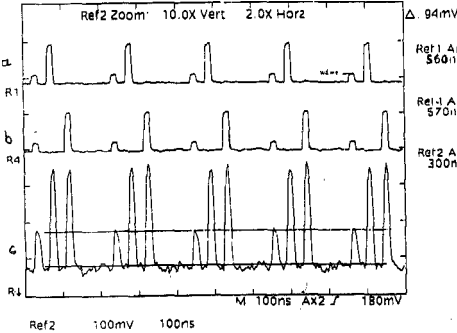


Fig. 6: Respuesta impulsiva del array de dos sensores en paralelo

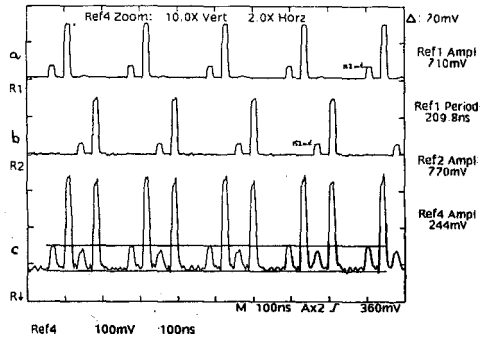


Fig. 7: Respuesta impulsiva del array de dos sensores en escalera

5. CONCLUSIONES.

Hemos presentado un modelo para los lazos recirculantes, y su aplicación como sensor de fibra en dos arrays, obteniéndose tanto su desarrollo analítico como sus primeros resultados experimentales. Si bien la sensibilidad de los sensores incoherentes es muy inferior a los sensores coherentes, el modelo propuesto es extremadamente sencillo, versátil, generalizable para sistemas coherentes y útil para sistemas de baja sensibilidad demostrándose su aplicación como sensores de temperatura y sensores de presión.

6. REFERENCIAS.

- [1] F.P. Bucholtz and A.M. Yurek: "Fiber interferometric sensors: Technology and applications", *Optics News*, pp. 20-27, November 1989
- [2] B.Y. Kim and H.J. Shaw: "Multiplexing of fiber-optic sensors", *Optics News*, pp. 35-42, November 1989.
- [3] B. Mosehli, M.R. Layton and H.J. Shaw: "Efficient Fiber-Optic Structure with Applications to Sensor Arrays", *IEEE Journal of Lightwave Techn.*, Vol.7, No.2, pp. 236-246, February 1989.