

Interferómetro de Sagnac con fibra óptica para determinación de velocidades angulares

L.M. de Pablo Pardo, G.F. Jodor[#], A.L. Peuriot, G.D. Santiago* y V.B. Slezak

CEILAP (CITEFA-CONICET), Zufriategui 4380 (1603) V. Martelli, Bs. As.

e-mail: apeuriot@citefa.gov.ar

* Facultad de Ingeniería, UBA.

[#] Instituto Tecnológico de Bs As, ITBA.

Se describe la construcción de un interferómetro de Sagnac (área efectiva de 14m^2) como primer prototipo de un giróscopo de fibra óptica de grado medio (con resolución entre $0,1$ y $10^\circ/\text{h}$). Se emplearon componentes de bajo costo: un diodo láser multimodo a 780nm , empalmes mecánicos y 200m de fibra monomodo. Para obtener máxima sensibilidad se utilizó modulación de fase variando la longitud de la fibra mediante un modulador piezoeléctrico. La velocidad de rotación del sistema se calcula a partir de la señal procesada con un amplificador lock-in digital.

Para medir la respuesta del sistema se construyó una plataforma giratoria con velocidades angulares entre 200 y $10.000^\circ/\text{h}$. La posición angular de la plataforma se determina utilizando el mecanismo de un mouse de PC adaptado a este fin. Con el diseño simple utilizado de lazo abierto, se obtiene una resolución rms menor que $2^\circ/\text{h}$.

A fiber optic Sagnac interferometer which acts as an intermediate grade (0.1 to $10^\circ/\text{h}$) fiber optic gyroscope prototype is presented. Low-cost components have been used: a 780 nm multimode diode laser, mechanical connectors and 200 m of single-mode fiber enclosing an effective area of 14 m^2 . Phase modulation by means of a piezoelectric ceramic was used to obtain maximum sensibility. The system rotation speed is derived from the signal processed by a digital lock-in amplifier. In order to assess the system characteristics a turntable (speed from 200 to $10,000^\circ/\text{h}$) was built. The angular position was measured using a modified PC mouse mechanism. In spite of the simple open-loop design a rms resolution better than $2^\circ/\text{h}$ was achieved.

Introducción

La detección de la rotación por medios puramente ópticos fue descubierta por G. Sagnac en 1913 [1]. Tradicionalmente, en décadas pasadas, el sensor de rotación consistía en el giróscopo mecánico que presentaba problemas de confiabilidad y era susceptible a daños por impactos mecánicos y vibraciones [2]. Una alternativa, luego del advenimiento de los láseres, fue utilizar el efecto Sagnac en un láser en anillo (Ring Laser Gyro) que requiere tecnología de alto vacío, alta tensión y espejos de muy alta calidad. Además presenta una zona muerta a bajas velocidades por lo que requiere de un dispositivo especial para conservar la sensibilidad [2]. Estos inconvenientes se superaron al desarrollarse fibras ópticas monomodo de bajas pérdidas que permitieron reemplazar el interferómetro de Sagnac tradicional con espejos por un rollo de fibra óptica [3]. La performance del giróscopo de fibra óptica (FOG) está caracterizada principalmente por la estabilidad del bias y del factor de escala, así como buena linealidad. Con implementación totalmente en estado sólido y en forma muy compacta en este momento resulta de interés su desarrollo para una gran variedad de aplicaciones prácticas [4-6].

Teoría

El FOG funciona en base al interferómetro de Sagnac, en el cual dos haces de luz recorren un camino cerrado en sentidos opuestos a partir de una fuente S [7]. Si todo el interferómetro rota con una velocidad angular Ω perpendicular al montaje óptico, suponiendo un camino circular de radio R , como muestra la figura 1, el haz en la dirección $(-)$ vuelve al punto de partida, ahora

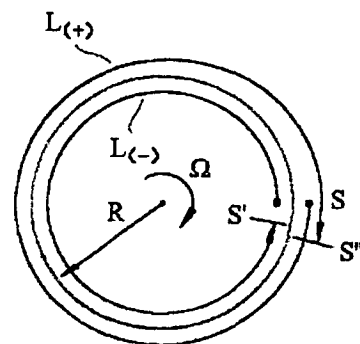


Figura 1. Principio de funcionamiento del interferómetro de Sagnac. La fuente de luz S rota con velocidad angular Ω y los haces recorren un camino circular

en la posición S' , recorriendo un camino $L_{(-)}$; igualmente sucede para el haz (+) con un camino $L_{(+)}$:

$$\begin{aligned} L_{(-)} &\approx 2\pi R - \Omega R \tau \\ L_{(+)} &\approx 2\pi R + \Omega R \tau \end{aligned} \quad (1)$$

donde $\tau=2\pi R/c$ es el tiempo de recorrido de la luz en la circunferencia. La diferencia de camino entre los haces resulta (a primer orden en $\Omega R/c$):

$$\Delta L = L_{(+)} - L_{(-)} = 2 \Omega R \tau = 4 \Omega A / c \quad (2)$$

donde A es el área encerrada por los haces. La diferencia de fase correspondiente es:

$$\Delta\phi = 2\pi \Delta L/\lambda_0 = 8\pi A \Omega / \lambda_0 c \quad (3)$$

siendo λ_0 la longitud de onda de la fuente luminosa y c la velocidad de la luz (ambas en el vacío).

Para aumentar la diferencia de fase se utiliza una fibra óptica, arrollando N vueltas sobre un carrete de radio R , de modo que el área efectiva del interferómetro aumenta a: $A.N = R.L / 2$, donde L es la longitud de la fibra.

Ahora, en la fibra, la velocidad de propagación de los haces de luz, en el sistema de referencia del laboratorio, es diferente en los dos sentidos debido al arrastre aparente de la luz por el medio en movimiento (efecto Fizeau-Fresnel) y debe calcularse por la fórmula relativista de adición de velocidades [8]. A partir de (1) es fácil demostrar que a primer orden en $\Omega R / (c/n)$, este efecto no modifica la (3), dando el mismo desfase de Sagnac (n es el índice de refracción de la fibra). Una discusión rigurosa del cálculo del efecto Sagnac en el giróscopo de fibra se encuentra en [9-10].

La corriente en el detector resultante de la interferencia de los haces supuestos de igual intensidad es:

$$I = I_0/2 \cdot [1 + \cos(\Delta\phi)] \quad (4)$$

donde I_0 es proporcional a la potencia de la fuente.

La dependencia con $\cos(\Delta\phi)$ hace que el interferómetro tenga mínima sensibilidad para pequeñas velocidades angulares, es decir $dI/d\Delta\phi = 0$ para $\Delta\phi = 0$. Para cambiar el punto de trabajo a máxima sensibilidad (y respuesta lineal) habría que introducir una diferencia de fase (*bias*) de $\pi/2$. En la práctica es más simple utilizar un *bias dinámico* por medio de un modulador de fase en uno de los extremos del rollo de fibra; para una modulación del tipo $\psi \cdot \sin(\omega_m t + \phi)$ la señal de interferencia queda:

$$I(\Delta\phi) = I_0/2 \cdot [1 + \cos(\Delta\phi + \phi_m \sin(\omega_m t))] \quad (5)$$

donde $\phi_m = 2\psi \sin(\omega_m \tau/2)$ es la amplitud de modulación de fase no recíproca resultante y τ es el tiempo de tránsito

de la luz por la fibra. La ecuación (5) se puede expresar como un desarrollo en serie de Fourier a la frecuencia de modulación ω_m :

$$I(\Delta\phi) = I_0/2 \{ 1 + \cos(\Delta\phi) [J_0(\phi_m) + J_2(\phi_m) \cos(2\omega_m t) + \dots] + \sin(\Delta\phi) [J_1(\phi_m) \sin(\omega_m t) + J_3(\phi_m) \sin(3\omega_m t) + \dots] \} \quad (6)$$

donde las $J_k(\phi_m)$ son las funciones de Bessel de orden k .

Demodulando la señal con una detección sincrónica por medio de un amplificador lock-in, es posible recuperar cada componente de Fourier S_k . De la relación entre las primeras componentes pares se determina ϕ_m y de:

$$S_1 / S_2 = [J_1(\phi_m) / J_2(\phi_m)] \tan(\Delta\phi) \quad (7)$$

por cálculo se obtiene $\Delta\phi$. Con este método se consigue un rango dinámico amplio e independizarse de las fluctuaciones de la fuente de luz.

En los FOG aparecen efectos parásitos: dispersión de Rayleigh y birrefringencia en la fibra, efecto Kerr por distintas intensidades en los haces, gradientes térmicos, etc, que producen un bias ($\Delta\phi \neq 0$ para condiciones de reposo) y ruido en la señal. Estos efectos se atenúan con una fuente de baja coherencia y controlando la polarización de las ondas [10-12].

Prototipo de laboratorio

La figura 2 muestra el esquema del interferómetro de Sagnac de fibra óptica implementado como FOG.

La fuente luminosa (DL) es un diodo láser multimodo (Philips CLQ7840/D, 20mW a 60mA) centrado en 780 nm y con alrededor de 10 modos en un ancho espectral de ~ 10 nm.

La luz es polarizada con dos cubos polarizadores puestos en serie (P) antes de entrar al acoplador de 3 dB. Estos cubos tienen un grado de polarización de 1000:1.

La luz colimada del láser es introducida en la fibra por medio de un objetivo de microscopio (LM). Se utilizaron 200 m de fibra monomodo (Spectran SMC-A0820B) arrollados en una sola capa sobre un carrete de 28 cm de diámetro, lo que determina un área efectiva de 14 m^2 .

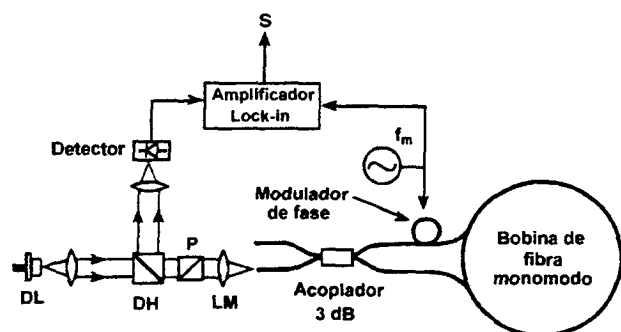


Figura 2. Esquema del giróscopo de fibra óptica.

Para conseguir un bias dinámico se construyó un modulador piezoeléctrico (PZT) enrollando varias vueltas de uno de los extremos de la fibra alrededor de un cilindro cerámico con una constante piezoeléctrica de $d_{33} \approx 4 \times 10^{-10}$ m/V, que permite modular sinusoidalmente el largo de la fibra con una amplitud $\delta L = m \cdot 2\pi d_{33} V_m / 2$; donde el número de vueltas ($m \approx 100$) y el potencial V_m en el PZT se ajustan de manera tal de maximizar el valor de $J_1(\phi_m)$ para obtener mayor amplitud de la componente de Fourier a la frecuencia de modulación (f_m). La frecuencia óptima de operación del modulador (15 KHz) se encuentra cerca de la resonancia mecánica y se determinó observando el espectro de Fourier de la señal de interferencia.

La radiación que vuelve del acoplador 3 dB pasa por los polarizadores y es enviada por un divisor de haz (DH) a un fotodiodo de silicio. La otra salida del acoplador no puede ser utilizada para tomar la señal porque introduce un corrimiento de fase no recíproco, lo que obliga a perder en total el 75% de la potencia inyectada a la fibra.

Por medio de un amplificador lock-in digital (Stanford Resarch 830 DSP) se obtuvieron las primeras cuatro componentes espectrales de la señal y a partir de ellas se determinó el bias del giróscopo. En la figura 3 se tiene un registro de los espectros FFT de la señal del FOG adquiridos con un osciloscopio digital: a) en situación de reposo, donde sólo aparecen los armónicos pares y b) girando, donde se observan los armónicos impares (proporcionales al seno de la fase de Sagnac).

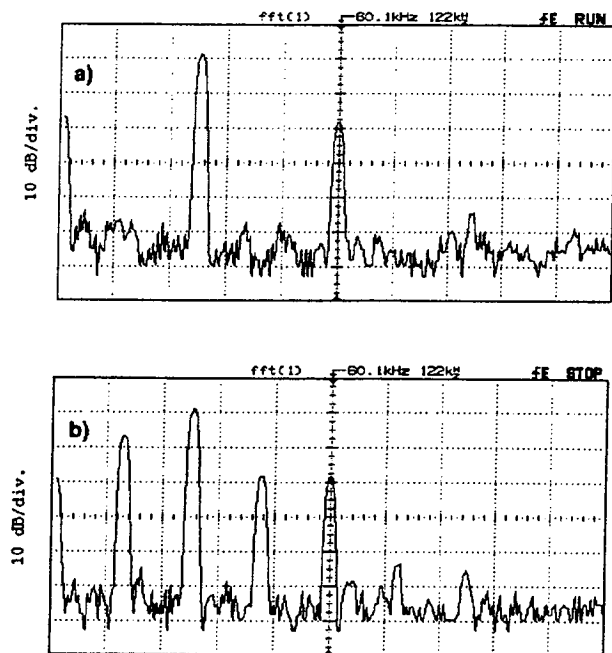


Figura 3. Espectro de la señal: a) en reposo, b) girando. Escala horizontal: 12KHz/div.

Resultados

Usando las ecuaciones (7) y (3) y los valores de R , L y λ_0 del FOG se determinó el bias Ω_B con un error $< 10\%$.

En la figura 4 se observa el comportamiento del bias en un lapso de 5 minutos, de la que se obtiene un valor medio de $34 \text{ }^\circ/\text{h}$ con una fluctuación cuadrática media de $1.7 \text{ }^\circ/\text{h}$. Estos valores son fuertemente dependientes de la temperatura debido a las deformaciones térmicas de la placa de sostén del interferómetro, que afectan la entrada del haz láser a la fibra.

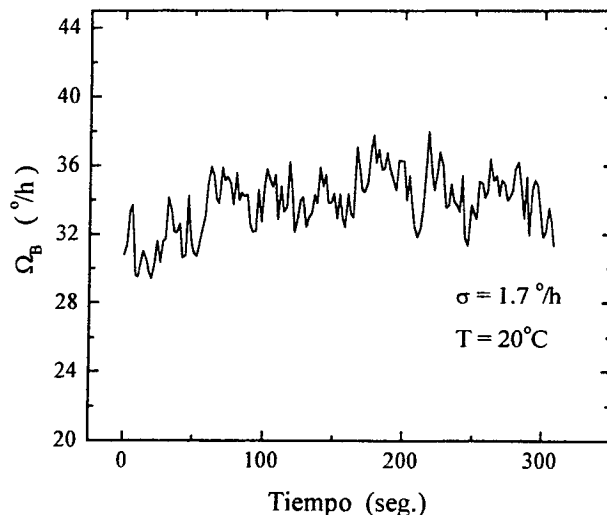


Figura 4. Fluctuación del bias Ω_B en un lapso de 5 minutos.

Para evaluar el comportamiento del FOG y obtener el factor de escala, se construyó una plataforma giratoria con velocidad ajustable entre 200 y 10.000 $^\circ/\text{h}$. La medición de velocidad se efectuó por medio de un disco ranurado y un fotoacoplador adaptados del mecanismo de un mouse de PC, figura 5.

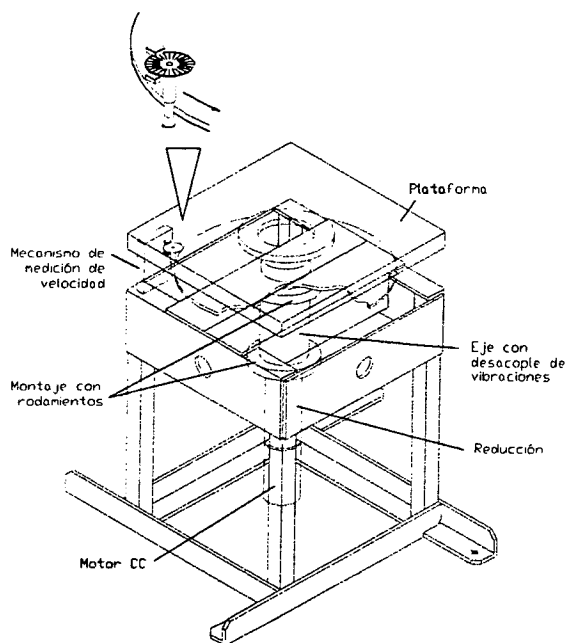


Figura 5. Esquema de la mesa giratoria de un eje. Inserto: mecanismo de medición de velocidad angular.

De acuerdo a la (6) la señal del lock-in para la primera armónica presenta una dependencia lineal con Ω para velocidades angulares pequeñas:

$$S_1 \approx K_1 (\Delta\phi + \Delta\phi_B) = F (\Omega + \Omega_B) \quad (8)$$

donde K_1 es una constante instrumental, $\Delta\phi_B$ es la fase de bias y F es el factor de escala del FOG.

En la figura 6 se presenta el comportamiento del FOG a bajas velocidades. De la ordenada al origen y de la pendiente de la recta se obtuvieron el bias y el factor de escala. De esta forma para la determinación del bias no es necesario utilizar los valores de R , L , λ_0 . El alto valor de bias que se obtiene ($64^\circ/\text{h}$) es debido a la deriva térmica y a la variación de campo magnético del laboratorio que detecta el rollo de fibra por efecto Faraday cuando rota la plataforma.

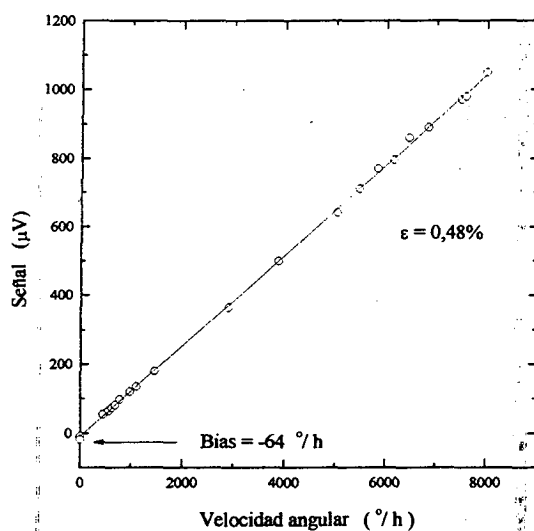


Figura 6. Señal del lock-in S_1 versus la velocidad de rotación de la plataforma.

Conclusiones

El FOG construido tiene un adecuado desempeño para un instrumento de grado intermedio. Las características del prototipo son:

Bias < $40^\circ/\text{h}$

Estabilidad del bias (5 min.) < $2^\circ/\text{h}$

Error del factor de escala (ϵ) < 0,5 %

El problema principal encontrado reside en la variación de la birrefringencia de la fibra óptica con las condiciones externas (temperatura, deformaciones de la fibra), que provocan cambios en la polarización y consecuentemente producen fluctuaciones y deriva del bias. Esto podría solucionarse ya sea utilizando fibra que conserve la polarización o luz depolarizada.

Se propone mejorar la estabilidad construyendo un modelo totalmente en fibra óptica y utilizar empalmes

con conectores. Además se reducirá el tamaño del rollo aumentando proporcionalmente el largo de fibra.

Referencias

- [1] Sagnac G., C. R. Acad. Sci. **95**, 708-710 (1913).
- [2] Lawrence A., *Modern Inertial Technology, navigation, guidance and control*, Spriger-Verlag N.Y., 1993.
- [3] Vali V. and Shorthill R.W., *Appl. Opt.* **15**, 1099-1100 (1976).
- [4] Burns W.K., *Opt & Photonics News*, **9**, 28-32, (mayo 1998).
- [5] Hotate K., *Photonics Spectra*, **31**, 108-112, (abril 1997).
- [6] Allen D. et al., *All-fiber gyroscope for land navigation*, SPIE European Symposium on Optics for Environmental and Public Safety, Munich, June 20, 1995.
- [7] Hecht y Zajac, *Optica*, Fondo Educativo Interamericano 1977, pág. 345-346.
- [8] Tippler P.A., *Fisica Moderna, Ed. Reverté. capitulo I*.
- [9] Arditty H.J. and Lefèvre H.C., *Optics Lett.*, **6**, 401-403, 1981.
- [10] Smith R.B., Ed., *Selected Papers on Fiber Optics Gyroscopes*, SPIE Milestone Series, Vol. MS 8, SPIE Optical Engineering Press USA, 1989.
- [11] Burns W.K., Ed., *Optical fiber rotation sensing*, Academic Press UK, 1994.
- [12] Ezekiel S. and Arditty H.J., Eds., *Fiber-Optics Rotation Sensors and Related Technologies*. Springer-Verlag, Series in Optical Sciences vol. 32, 1982.