

RECIENTES AVANCES EN TECNOLOGÍA DE IFOG Y POSIBLES APLICACIONES EN GEOFÍSICA

Alustiza, Diego H.^{1,2}; Mineo, Marcos¹; Skou, Pedro¹; Manno, Francisco J.¹; Garavaglia, Mario^{1,3}.

Grupo IFOG, Centro de Investigaciones Ópticas (CIOp), Cno. Centenario e/ 505 y 508. C.C. 3 (1897) Gonnet, La Plata, Buenos Aires, Argentina.
mmineo@ciop.unlp.edu.ar

Palabras clave: IFOG, desempeño, ensayos, caracterización.

Resumen. Este documento describe los recientes avances en la tecnología de Giróscopos Interferométricos de Fibra Óptica (IFOG por sus siglas en inglés) realizados en el Centro de Investigaciones Ópticas (CIOp) y discute la actual aplicación en materia de sensado inercial para su uso en vehículos inyectores satelitales, así como también en la posible caracterización de ondas sísmicas rotacionales, inclinación del terreno y diversas aplicaciones tanto en ingeniería civil como en el análisis de estructuras. Se presenta un estudio relativo a la caracterización de los instrumentos según los parámetros de ruido definidos por la IEEE. A estos últimos, a los que se los denominarán estáticos, se agregará el estudio del desempeño dinámico.

Introducción. Los sensores de velocidad angular de fibra óptica se basan en un fenómeno físico descubierto por el físico francés George Sagnac. Él, observó que inyectando en un anillo de espejos dos haces de luces contra-propagantes (fig. 1) y haciendo rotar dicho anillo, el patrón de interferencia observado en el detector se modifica como una función de la velocidad de rotación del mismo.

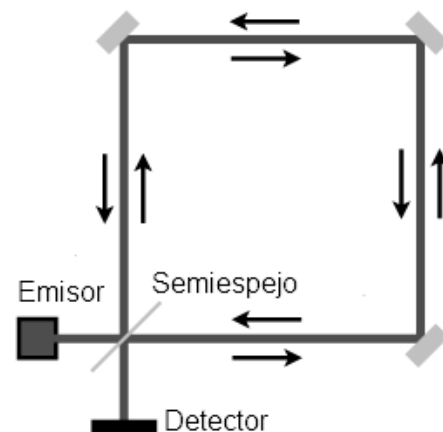


Fig. 1 - Esquema del experimento de Sagnac

La respuesta natural del anillo posee dos grandes problemas: baja sensibilidad y alta alinealidad. El reemplazo del anillo de espejos por fibra óptica como elemento de guiado y confinamiento de la luz permite extender el camino óptico a distancias del orden de kilómetros, aumentando considerablemente la sensibilidad. El problema de la alinealidad se resuelve con la ayuda de circuitos opto-electrónicos, que permiten procesar las señales involucradas, generar lazos de control para mejorar la dinámica del sistema y controlar el punto de operación. Para ello se utiliza un componente óptico integrado (MIOC) que, mediante sus moduladores de fase óptica, permite modificar ciertas características de reciprocidad del camino óptico que impacta directamente en el efecto neto dentro del interferómetro. De este modo, a lazo cerrado y operando como un sistema de detección de cero, es

que los IFOGs alcanzan niveles de exactitud, sensibilidad, grado de linealidad, rango dinámico y estabildades muy superiores a otras tecnologías de giróscopos.

Desde hace décadas, los sistemas de medición inerciales vinculados con la industria aeroespacial han ido incrementado más y más sus exigencias, sobre todo, respecto a los niveles de estabilidad en la medición. El desarrollo de este instrumento, ha perseguido la finalidad de poder ser empleado como parte de una unidad de referencia inercial (IRU) en un vehículo inyector satelital, por lo que los requerimientos han sido impuestos en este sentido.

Existe también, un creciente interés en el uso de los IFOGs en la medición de ondas sísmicas rotacionales y eventos similares [3-6]. Esto se debe mayormente a que las numerosas mejoras en la tecnología de este tipo de instrumentos, han aumentado en gran medida su desempeño. Adicionalmente, el factor de forma relativamente pequeño y los bajos requerimientos de consumo de potencia, los convierten en una elección ideal para aplicaciones portátiles o para desplegar arreglos de múltiples instrumentos. Un ejemplo de ello podría ser el Observatorio LIGO[3] que requiere varias medidas puntuales a lo largo de toda su extensión.

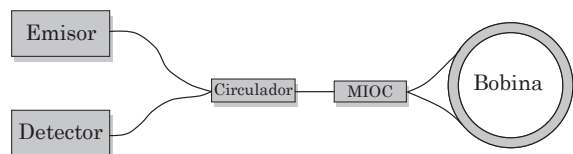


Fig. 2 – Circuito óptico del IFOG

La unidad bajo estudio es un IFOG uniaxial que exterioriza el valor de velocidad angular en formato digital y lo representa en punto flotante de simple precisión. La unidad contiene todos los componentes ópticos (fig. 2) y electrónicos necesarios para funcionar como un instrumento autónomo o como parte de una red de instrumentos utilizando el protocolo de comunicación CAN.

El carrete es bobinado con fibra óptica de polarización mantenida, de 500m de

longitud y con un diámetro medio de 105mm. El bobinado es de tipo cuadrupolar y su función es la de minimizar la influencia de los gradientes térmicos variantes en el tiempo, entre puntos diferentes de la bobina, sobre la medida de velocidad angular.

La fuente de luz se compone de un emisor de tipo diodo super-luminiscente (SLD) de 10mW de potencia y 50nm de ancho espectral con su centro en 1310nm.

Los instrumentos ensayados poseen un ancho de banda, en términos de la velocidad angular, de 50Hz. Por lo anterior, y para cumplir con el teorema de Nyquist, es que se ha escogido una tasa de interrogación de los instrumentos de 150 muestras por segundo (MPS). El análisis ha sido realizado sobre dos unidades íntegramente diseñadas y producidas en los laboratorios de nuestra institución (fig. 3).

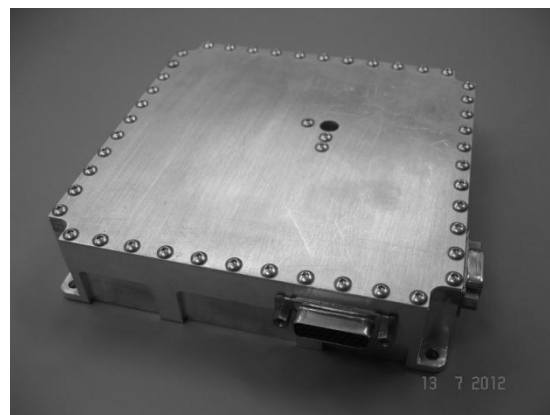


Fig. 3 – Fotografía de la unidad IFOG

Definiciones. Los IFOGs, generalmente se caracterizan por un conjunto de parámetros de ruido definidos (junto con los métodos de determinación de los mismos) en las normas IEEE Std 952-1997 (R2008) [1] y IEEE Std 528-2001 [2]. El método tradicional para la estimación de dichos parámetros es a través del análisis mediante la Varianza de Allan. Este es el mecanismo que será utilizado en la presente publicación. A continuación se presentan definiciones no formales de los tres parámetros más importantes presentados por la norma, que permitirán conformar una expresión

matemática que describa el ruido existente en la salida del instrumento con un relativamente alto grado de aproximación.

“*Angle random walk*” (ARW): en términos prácticos es la desviación estándar del ángulo calculado que resulta de la integración, durante un tiempo determinado, de la salida de velocidad angular del sensor junto a su ruido blanco. A dicha desviación estándar se la divide por la raíz del tiempo de integración.

Este parámetro se expresa típicamente en grados sobre raíz cuadrada de hora [$^{\circ}/\sqrt{h}$]. En la curva de desviación de Allan se puede observar el proceso estocástico que le da origen como una pendiente de -1/2, así como su densidad espectral de potencia es una constante.

“*Bias instability*”: es la variación aleatoria en el sesgo del instrumento. Este proceso no estacionario (evolutivo) es caracterizado por una densidad espectral de potencia de la forma $(1/f)$. Se expresa típicamente en grados sobre hora [$^{\circ}/h$]. En la curva de desviación de Allan se observa el proceso estocástico que le da origen como una pendiente nula.

“*Rate random walk*” (RRW): es un proceso estocástico con una densidad espectral de potencia de la forma $(1/f^2)$ en la velocidad angular. Este error se expresa típicamente en grados por hora sobre la raíz cuadrada de hora [$(^{\circ}/h)/\sqrt{h}$]. En la curva de desviación de Allan se observa el proceso estocástico como una pendiente de +1/2.

Condiciones del ensayo estático. Los parámetros previamente mencionados son medidos en condiciones de reposo respecto del marco inercial de la tierra. Cuando se trata con sensores de muy alta sensibilidad, como los que se discuten en esta publicación, se procura aislar a los mismos de todas las fuentes de perturbación externa. Si no es posible obtener las condiciones anteriores, el resultado de las mediciones estará fuertemente condicionado por fuentes de incertidumbre no intrínsecas al sensor

bajo ensayo, lo que no permitirá evaluar las verdaderas capacidades del mismo. Esto se torna especialmente difícil cuando las instalaciones en las que se realiza el ensayo residen en un área urbana. La proximidad de calles con su tránsito automotor, por ejemplo, generan perturbaciones mecánicas que terminan siendo parte de los datos de salida del sensor y que pueden ser varias veces mayores que el ruido propio del instrumento, degradando así los resultados del ensayo.

Por este motivo, el acondicionamiento de las instalaciones para los ensayos, cuyos resultados se muestran en esta publicación, incluye una mesa anti-vibraciones (TMC 63-500 Series) donde han sido ubicadas las unidades para incrementar el nivel de aislación respecto de perturbaciones mecánicas externas (fig. 4). Resulta importante destacar que las dos unidades fueron ensayadas de manera no simultánea.



Fig. 4 - Instrumento junto al sistema electrónico y mecánico de soporte

A continuación se presentan las características particulares de los ensayos para cada una de las dos unidades afectadas.

| Ensayo Estático Unidad N°1 | | |
|----------------------------|------|-----|
| Duración | 37.1 | h |
| Tasa de datos | 150 | MPS |
| Ancho de banda | 50 | Hz |
| Temperatura | 28.5 | °C |

| Ensayo Estático Unidad N°2 | | |
|----------------------------|------|-----|
| Duración | 26.4 | h |
| Tasa de datos | 150 | MPS |
| Ancho de banda | 50 | Hz |
| Temperatura | 26 | °C |

Resultados. Cada conjunto de datos, como ya se ha mencionado, ha sido analizado mediante el uso de la Varianza de Allan para determinar los distintos parámetros característicos del modelo de ruido del IFOG. Estos parámetros son presentados en las siguientes tablas y en sus cálculos se ha considerado un intervalo de confianza del 68.2%.

| Resultados Ensayo Estático Unidad N°1 | | |
|---------------------------------------|----------|------------|
| ARW | 0.0016 | [°/√h] |
| Bias instability | ≤ 0.0053 | [°/h] |
| RRW | 0.0069 | [(°/h)/√h] |

| Resultados Ensayo Estático Unidad N°2 | | |
|---------------------------------------|----------|------------|
| ARW | 0.0015 | [°/√h] |
| Bias instability | ≤ 0.0068 | [°/h] |
| RRW | 0.0162 | [(°/h)/√h] |

La figura 5 muestra las gráficas de desviación de Allan de las que se han extraídos, en forma indirecta, los tres parámetros bajo estudio.

Se debe aclarar que la gráfica se encuentra expresada en ambos ejes en términos de iguales unidades temporales, lo que permite la búsqueda de las pendientes -1/2, 0 y +1/2. En este caso se han escogido unidades relativas al segundo.

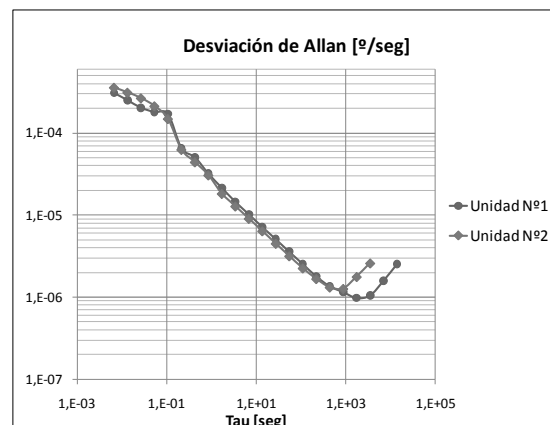


Fig. 5 - Curvas de desviación de Allan

En la gráfica puede notarse que la zona de pendiente nula o también denominada meseta “flicker” representativa de la “bias instability” no alcanza una completa definición. Es por ello que se consideran los valores estimados como cotas en los resultados expuestos anteriormente.

Como se ha mencionado, el análisis por medio de la Varianza de Allan es el método normalmente utilizado para determinar los parámetros de IFOGs para navegación. Sin embargo, el desempeño también puede evaluarse mediante el análisis de la densidad espectral de potencia (PSD).

La norma IEEE Std 952-1997 (R2008) [1] provee expresiones matemáticas para vincular los parámetros de desempeño entre los dos métodos. A modo de ejemplo se presenta la conversión del parámetro ARW, obtenido previamente por método de Varianza de Allan, al dominio de la frecuencia. En este dominio, el parámetro se corresponde a la porción “plana” del espectro, asociada con el ruido blanco. La equivalencia entre ambos dominios viene dada por la siguiente ecuación (eq. 1):

$$ARW \left[\frac{^\circ}{\sqrt{h}} \right] = \frac{1}{60} \cdot \sqrt{PSD \left[\frac{(\frac{^\circ}{h})^2}{Hz} \right]}$$

Eq. 1 - Equivalencia entre los métodos de Varianza de Allan y PSD

, la que para el caso particular de este estudio y utilizando los resultados del ensayo de la Unidad N°1, permite obtener una densidad espectral de potencia de ruido asociada al ruido blanco en la velocidad angular:

$$PSD = 9.216 \times 10^{-3} \left[\frac{(\bar{h})^2}{Hz} \right]$$

En aplicaciones de geofísica, como el observatorio LIGO, es de interés medir variaciones en la inclinación de la superficie terrestre, o desplazamientos angulares. Esos tipos de magnitudes angulares pueden también obtenerse de los datos proporcionados por un sensor de tipo IFOG integrando en el tiempo los datos de salida del instrumento.

En este sentido, el parámetro ARW nos habla de cuál será la desviación estándar de las mediciones angulares luego de integrar la velocidad angular sensada por el instrumento durante cierto lapso. Así, luego de una hora de integración, los resultados en la medición de ángulo arrojarán desviaciones estándar de entre 1.5 y 1.6 milésimas de grado aproximadamente entre las distintas realizaciones, si sólo se considerara el ruido blanco en la velocidad como única fuente de ruido. Claro está que este no es el caso, y que la inestabilidad de bias (ruido “flicker” o “1/f”), el “Rate random walk” (ruido blanco en la aceleración angular) y los restantes proceso de ruido, aportan incertidumbres adicionales.

Condiciones del ensayo dinámico. Los ensayos dinámicos han sido realizados en una mesa de rotaciones de un eje de mediana a baja prestación. Los objetivos principales del ensayo son la determinación del grado de linealidad del instrumento y el ajuste del factor de escala. En este caso sólo se detallan los resultados relativos a la Unidad N°2.

| Ensayo Dinámico Unidad N°2 | | |
|----------------------------|---------|-------|
| Tasa de datos | 150 | MPS |
| Ancho de banda | 50 | Hz |
| Min Velocidad Angular | -398867 | [°/h] |
| Max Velocidad Angular | 405598 | [°/h] |

Los resultados muestran un alto grado de linealidad del instrumento (fig. 7), con una pequeña desviación hacia ambos extremos de la curva. El IFOG ha sido diseñado para un rango de $\pm 216000 [^\circ/h]$ sin exceder un 0,5% de error. En la figura 8 se puede observar que la unidad excede el requerimiento, manteniéndose la salida lineal dentro del límite especificado hasta un rango de al menos $\pm 250000 [^\circ/h]$. En particular, la curva del error de linealidad muestra que el mismo se mantiene acotado entre +0.3% y -0.1% dentro del rango recientemente mencionado.

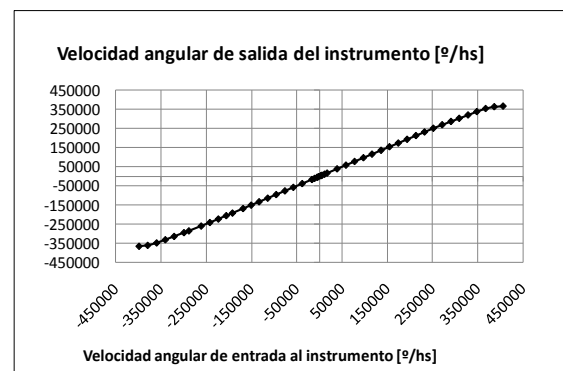


Fig. 7 – Transferencia del instrumento

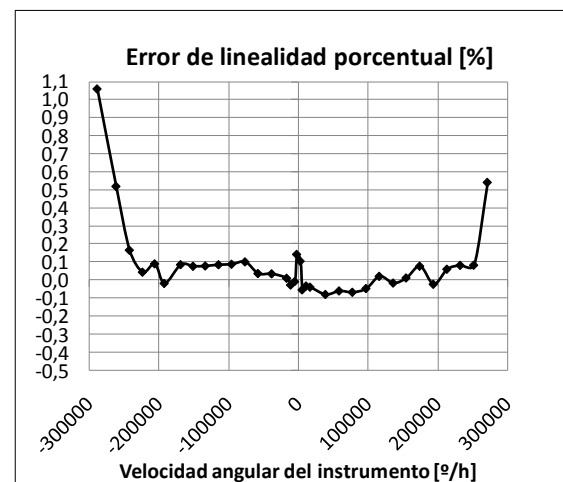


Fig. 8 - Error de linealidad del instrumento

Como se ha mencionado al comienzo, la respuesta natural del fenómeno físico que da origen al sensor, es altamente alineal. El grado de linealidad observado en los resultados obtenidos es gracias a las técnicas de procesamiento digital de señal y control de todas las variables intervinientes.

Los resultados arrojados por los ensayos estáticos y dinámicos han puesto en duda la relación entre el desempeño de las mesas utilizadas y el propio instrumento. Actualmente se está trabajando para obtener mesas de mayores prestaciones.

Conclusión. El rendimiento de los IFOGs presentados en este documento exceden a otros IFOGs de grados táctico y comercial en al menos en un orden de magnitud. Incluso siendo una evaluación preliminar, los resultados de los ensayos estáticos y dinámicos muestran resultados muy alentadores respecto al grado de linealidad, rango y estabilidad a largo plazo. Esto califica a las unidades no sólo para aplicaciones de navegación en la industria aeroespacial, sino también abre las puertas en el campo de la geofísica para aplicaciones como el sensado de ondas sísmicas rotacionales, inclinación de superficie, etc. La salida digital y la capacidad de las unidades de funcionar de manera autónoma y como parte de una red son características muy interesantes en la implementación de arreglos de sensores, permitiendo monitorear numerosas ubicaciones simultáneamente.

Cabe mencionar que aumentando la longitud del bobinado y/o el tamaño de la bobina podría, teóricamente, incrementarse aún más la sensibilidad del instrumento. Esta posible mejora podría a su vez incrementar la relevancia de fuentes de ruido óptico que por el momento no son predominantes. En los ensayos presentados en esta publicación, se han puesto al límite las instalaciones y facilidades disponibles en el laboratorio. Incluso, las mediciones realizadas se encuentran fuertemente afectadas por las limitaciones del equipamiento utilizado hasta el momento. Para la determinación del rendimiento real de las unidades

actuales y la posibilidad de futuras mejoras, se hace necesario contar con equipamiento e instalaciones más avanzadas y de mejores prestaciones.

Referencias.

1. IEEE Std 952-1997 (R2008) - IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros.
2. IEEE Std 528-2001 (Revision of IEEE Std 528-1994) - IEEE Standard for Inertial Sensor Terminology
3. B. Lantz, R. Schofield, B. O'Reilly, D. E. Clark, and D. DeBra (2009). Review: Requirements for a Ground Rotation Sensor to Improve Advanced LIGO, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 99, No. 2B, pp. 980–989, May 2009, DOI: 10.1785/0120080199
4. Alexander Velikoseltsev, Karl Ulrich Schreiber, Alexander Yankovsky, Jon-Paul R. Wells, Alexander Boronachin, Anna Tkachenko (2011). On the application of fiber optic gyroscopes for detection of seismic rotations, Journal of Seismology, published online Feb 2012, DOI: 10.1007/s10950-012-9282-y
5. Leszek R. Jaroszewicz, Zbigniew Krajewski, Ryszard Świllo. Application of Fiber-Optic Sagnac interferometer for detection of rotational seismic events, Molecular and Quantum Acoustics vol. 22 (2001)
6. R. Franco-Anaya, A.J. Carr, K.U. Schreiber. Qualification of fibre-optic gyroscopes for civil engineering applications, 2008 NZSEE Conference

Filiaciones.

1. Laboratorio de Procesamiento Láser, Centro de Investigaciones Ópticas (CCT CONICET La Plata y CIC), Camino Centenario y 506, Gonnet, La Plata.
2. Departamento de Ciencias Básicas, Facultad Regional La Plata, Universidad Tecnológica Nacional.
3. Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata.