

Mauro Bertolini

Istituto Tecnico Nautico "Artiglio" - Viareggio

GIROBUSSOLE A FIBRE OTTICHE

Viareggio 2000/01

Introduzione

Sono girobussole allo stato solido senza parti in movimento o in rotazione; nelle quali l'elemento sensibile è una bobina di fibre ottiche che è in grado di misurare la velocità di rotazione della Terra. Combinando tre di tali bobine e due sensori elettronici di livello si è capace di determinare la direzione del nord vero e del piano orizzontale per cui tali girobussole, oltre alla prora, forniscono informazioni sull'assetto della nave e le velocità angolari di rotazione attorno ai tre assi: longitudinale, trasversale e verticale (roll, pitch, rate of turn).

Il principio fisico utilizzato è noto come effetto Sagnac mentre la tecnologia impiegata è quella **strapdown**, che è già in uso da parecchio tempo nella navigazione aerea e con la quale i sensori di rotazione e di livello sono montati direttamente (strapped down) sul veicolo eliminando le limitazioni dei sistemi a sospensione cardanica¹.

L'elemento sensibile, ossia il giroscopio a fibre ottiche (**FOG, Fiber Optic Gyro**), ha trovato diverse altre applicazioni in sostituzione dei tradizionali giroscopi meccanici grazie alla loro resistenza agli urti e alle vibrazioni.

Principio fisico

Il principio su cui si basa il funzionamento dei giroscopi ottici fu scoperto dal fisico francese Sagnac nel 1913 ed ha trovato inizialmente una sua applicazione nella costruzione di interferometri² e successivamente nei giroscopi laser ad anello chiuso (**RLG, Ring Laser Gyro**). Tale principio consiste nello sdoppiare un unico raggio luminoso in due diversi raggi, che viaggiano su un medesimo percorso ottico ad anello chiuso; ma in direzioni opposte: un raggio ruota in senso orario e l'altro in senso antiorario.

Nei giroscopi RLG i raggi rimbalzano fra vari specchi, come mostrato in Fig. 1; nei giroscopi FOG (a fibre ottiche)³ i raggi scorrono dentro un fascio di fibre ottiche lungo anche 5 Km ed avvolte in spire del diametro di alcuni centimetri.

Quando un raggio si propaga, la sua fase cambia continuamente con la distanza L percorsa e precisamente di 2π radianti per ogni tratto pari alla lunghezza d'onda λ ; si ha pertanto:

$$\alpha = \frac{2\pi L}{\lambda}$$

con $\lambda = c/f$, dove f è la frequenza del raggio luminoso e c è la velocità della luce.

Nel caso in cui il giroscopio sia fisso rispetto ad un sistema inerziale, i due raggi percorrono lo stesso cammino, anche se in direzioni opposte, arrivando nel ricevitore con la stessa fase. Diversa è la situazione in cui l'intero sistema ruota attorno ad un asse passante per O (**asse sensibile del giroscopio**) e con velocità angolare Ω ; in tal caso il percorso del raggio concorde con il verso di rotazione tende ad allungarsi, mentre quello dell'altro raggio tende ad

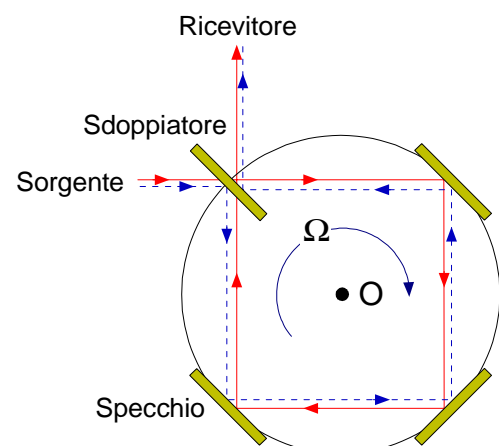


Fig. 1 - Schema di principio di un giroscopio laser ad anello

¹ Nei sistemi di navigazione inerziale, di tipo tradizionale, viene creata una piattaforma stabilizzata verso il nord e nel piano orizzontale utilizzando dei giroscopi di tipo meccanico.

² Una prima applicazione fu quella di Michelson - Gale nel 1925 per la misura della velocità angolare della Terra.

³ Talvolta tali giroscopi sono indicati con la sigla IFOG o Interferometric FOG

accorciarsi per cui la differenza di fase Φ dei segnali che arrivano nel ricevitore non è più nulla, ma assume la seguente espressione:

$$\Phi = \Delta\alpha = \frac{2\pi LD}{c\lambda} \Omega$$

dove: L = lunghezza del percorso ottico o delle fibre ottiche nei FOG
D = diametro del percorso o della bobina nei FOG
 Ω = velocità angolare del giroscopio attorno al suo asse sensibile

Il fattore davanti alla velocità angolare Ω è chiamato **fattore di scala** ed è un indicatore della sensibilità dello strumento; più è alto tale fattore, più lo strumento è in grado di misurare velocità angolari molto basse, come ad esempio nel caso di quella terrestre. Come si vede il fattore F dipende dai dati geometrici del percorso ottico e precisamente, nel caso dei FOG, dalla lunghezza delle fibre ottiche e dal diametro delle spire.

Analizzando la precedente espressione si comprende come, a parità di volume, i giroscopi a fibre ottiche (FOG) siano molto più sensibili dei giroscopi laser (RLG), ad esempio, con un diametro $D = 8$ cm dell'elemento sensibile, si hanno percorsi ottici di alcuni Km ($L = 1 \div 5$ Km) nel primo caso e di soli 25 cm nel secondo caso ($L = \pi D$).

Realizzazione pratica

Pur essendo apparentemente semplice, un FOG è uno strumento altamente sofisticato che si è sempre più sviluppato a partire dal 1976, quando furono proposti i primi prototipi. In Fig. 4 è

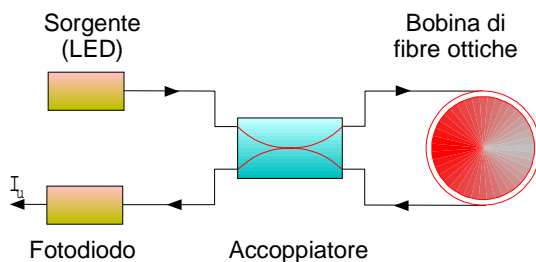


Fig. 2 - Schema semplificato di un giroscopio a fibre ottiche

riportato lo schema semplificato di un tale apparato. La sorgente luminosa può essere un LED (Light Emitting Diode) o un Laser, che emettono un fascio luminoso molto stretto e con lunghezze d'onda attorno ai $0,8 \mu\text{m}$, appena al di fuori della banda della luce visibile.

Il fascio di luce viene diviso in due raggi da un apposito accoppiatore che ha anche il compito di ricombinare le onde di ritorno che hanno percorso il fascio di fibre ottiche in direzioni contrarie. La misura del segnale in uscita si effettua con un

apposito fotodiodo, o altro sensore.

Quando non c'è rotazione del giroscopio, i due percorsi ottici sono uguali e quindi le due onde sono in fase, per cui il segnale in uscita dall'accoppiatore risulta massimo; al contrario, il segnale è nullo quando le due onde sono sfasate di $\pm\pi$, ossia quando la differenza dei due percorsi è pari a mezza lunghezza d'onda ($\lambda/2$).

L'espressione dell'intensità del segnale in uscita dal fotodiodo è una funzione cosinusoidale della differenza di fase Φ e precisamente:

$$I_u = I_0 \frac{1 + \cos \Phi}{2}$$

la cui rappresentazione grafica è mostrata nel grafico di Fig. 3. Tale rappresentazione mostra come il sistema descritto abbia una scarsa sensibilità alle basse velocità angolari (pendenza nulla nell'origine) e come esso non sia in grado di rilevare il verso di rotazione del giroscopio (curva simmetrica rispetto all'asse delle ordinate).

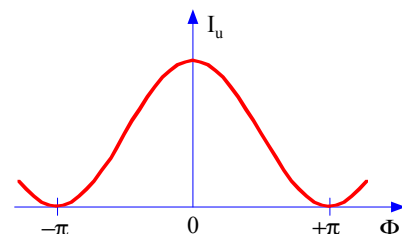


Fig. 3 - Corrente in uscita dal fotodiodo al variare della differenza di fase Φ fra i due segnali e quindi al variare della velocità angolare Ω

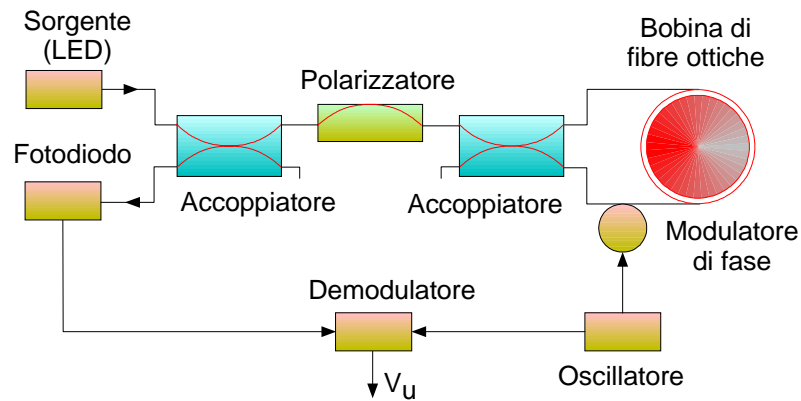


Fig. 4 - Schema tipico di un giroscopio a fibre ottiche

Per risolvere entrambi i problemi, ad un'estremità della bobina viene inserito un modulatore di fase piezoelettrico (Fig. 4) che modula i segnali luminosi producendo una variazione di fase variabile con legge sinusoidale e di ampiezza $\pi/2$. Il segnale risultante, in uscita dal fotodiodo, viene inviato al demodulatore in uscita dal quale si ha una tensione funzione del seno di Φ :

$$V_u = V_{\max} \sin(\Phi)$$

La rappresentazione grafica del segnale in uscita dal demodulatore è riportata in Fig. 5, dove si vede che si ha la massima sensibilità nell'origine e che non si ha più l'ambiguità sul verso della rotazione.

Il circuito di Fig. 4 mostra la configurazione minima adottata nei giroscopi ottici. Il primo accoppiatore direzionale ha la funzione di isolare il ricevitore dal trasmettitore, mentre il polarizzatore ha la funzione di limitare la luce ad un solo piano di polarizzazione.

Tali accorgimenti vengono adottati per rendere perfettamente identici i due percorsi ottici in assenza di rotazione (**condizione di reciprocità**). Il secondo accoppiatore ha la funzione già descritta precedentemente, ossia di dividere il segnale ottico in due segnali di uguale intensità che percorrono la bobina in direzioni contrarie e quindi di ricombinare le due onde di ritorno in un unico segnale, che dopo aver riattraversato il polarizzatore, viene nuovamente diviso in due segnali uguali di cui uno viene inviato al fotodiodo.

Nella moderna tecnologia delle fibre ottiche i vari dispositivi indicati (polarizzatore, accoppiatore e modulatore) sono integrati in un unico componente ottico⁴ che presenta una struttura ad Y con un ingresso e due uscite. Su uno dei due rami è collocato il modulatore di fase che è costituito da due elettrodi distanziati di 10 - 20 μm ai quali viene inviato il segnale elettrico modulante. Il campo elettrico generato produce una variazione dell'indice di rifrazione del vetro e di conseguenza una variazione nella velocità di propagazione delle onde luminose che attraversano il componente ottico; la suddetta variazione causa un ritardo e quindi una variazione di fase.

Il sistema descritto è detto anche interferometro "open-loop" e presenta l'inconveniente di essere lineare soltanto per piccole variazioni di fase attorno all'origine (vedi Fig. 5); nel caso si debbano misurare grandi velocità angolari viene inserito

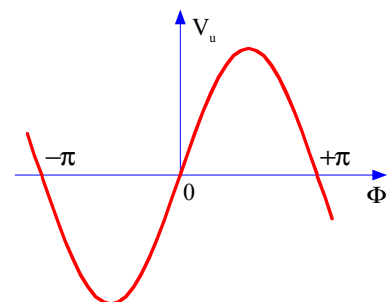


Fig. 5 - Tensione in uscita dal demodulatore nel caso di un giroscopio modulato in fase.

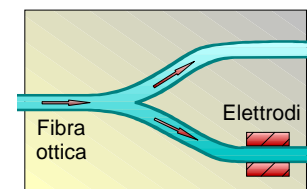


Fig. 6 - Struttura integrata di un accoppiatore con il modulatore di fase

⁴ MIOC o multifunction integrated optics chip

un secondo modulatore di fase che crei uno sfasamento di ampiezza pari all'effetto Sagnac, ma di segno contrario. In tal modo, all'uscita del demodulatore, si ha un segnale sempre nullo e la misura dell'effetto Sagnac è data dalla misura della tensione applicata al secondo modulatore per compensare completamente il suddetto effetto. Tale versione è detta anche interferometro "closed-loop".

La funzione girobussola

Il FOG non è in grado da solo di indicare la direzione del nord come nei normali giroscopi di tipo meccanico con sospensione cardanica; esso è soltanto in grado di misurare la componente della velocità angolare terrestre lungo il suo asse di sensibilità.

Per ottenere la funzione orientamento desiderata si montano tre giroscopi disposti lungo una terna di assi cartesiani X, Y e Z che può coincidere con i tre assi della nave; per definire il piano orizzontale si impiegano inoltre due sensori di livello. La tecnologia utilizzata è nota come strapdown, ossia con i giroscopi montati rigidamente su un piano fisso rispetto alla nave e non su un piano mantenuto costantemente orientato e parallelo rispetto ad un piano di riferimento come nella navigazione inerziale di tipo tradizionale.

Nel caso di nave ferma, l'unica velocità angolare a cui è soggetta la nave è quella terrestre, per cui i tre giroscopi misurerebbero le seguenti componenti:

$$\begin{aligned}\rho_x &= \rho_T \cos \varphi \cos P_v \\ \rho_y &= -\rho_T \cos \varphi \sin P_v \\ \rho_z &= \rho_T \sin \varphi\end{aligned}$$

dove è facile calcolare l'angolo di prora P_v nel caso siano note la velocità $\rho_T = 2\pi / 23^h 56^m 04^s$ e la latitudine φ (mediante un ricevitore satellitare GPS).

Nel caso di nave in moto con velocità V_N si ha una velocità angolare supplementare pari a V_N/R_T diretta lungo $-y^5$ (R_T è il raggio della Terra). A questa velocità si sommano inoltre altre velocità angolari, continuamente variabili, dovute ai moti della nave attorno ai suoi tre assi e precisamente i moti di rollio, di beccheggio e d'alambardata (o guizzata).

$$\begin{aligned}\rho_x &= \rho_T \cos \varphi \cos P_v + \rho_r \\ \rho_y &= -\rho_T \cos \varphi \sin P_v - V_N/R_T + \rho_b \\ \rho_z &= \rho_T \sin \varphi + \rho_a\end{aligned}$$

In realtà il problema viene risolto definendo inizialmente, alla partenza, un sistema cartesiano di riferimento con gli assi X_0 e Y_0 situati nel piano orizzontale, con X_0 orientato verso Nord ed Y_0 verso Est; inoltre l'asse Z_0 coincide con la verticale. In tale situazione i segnali provenienti dai sensori di livello devono essere nulli.

Durante la navigazione, la continua misura delle tre velocità angolari e dell'assetto della nave mediante i sensori di livello consentono di definire l'esatto orientamento della terna cartesiana T (X, Y e Z) della nave rispetto alla terna di riferimento iniziale T_0 (X_0 , Y_0 e Z_0). Un opportuno calcolatore provvede a convertire gli angoli di sfasamento dovuti all'effetto Sagnac nelle corrispondenti velocità angolari; integrando le velocità si ottengono gli angoli:

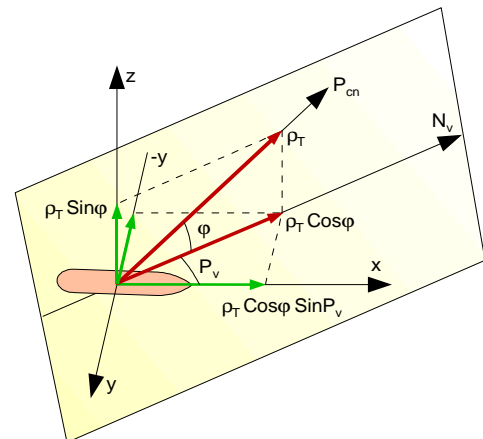


Fig. 7 - Componenti della velocità angolare terrestre lungo gli assi della terna solidale con la nave.

⁵ I vettori velocità angolare sono orientati in modo da vedere le rotazioni avvenire in senso antiorario.

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i + \int \rho_i dt$$

da cui è poi possibile ricavare gli angoli di prora, di rollio, di beccheggio e di alambardata. Ogni ciclo di calcolo deve avere una durata molto breve, inferiore normalmente al tempo impiegato dai segnali luminosi a percorrere la bobina di fibre ottiche ($\Delta t = L/c = 3 \mu\text{sec}$ per $L = 1000 \text{ m}$).

Un esempio di girobussola

L'LFK95 della Litef GmbH è la prima girobussola a fibre ottiche costruita nel mondo ed è stata progettata per soddisfare tutte le specifiche richieste dai regolamenti internazionali dell'IMO. Non avendo parti in movimento non richiede manutenzione, l'MTBF (Mean Time Between Failures) è maggiore di 20.000 ore.

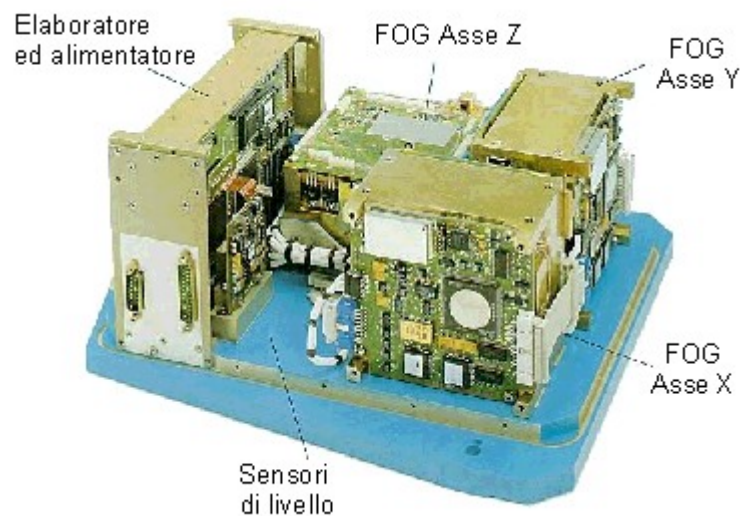


Fig. 8 - Girobussola LFK95 della LITEF GMBH (www.litef.com) nella versione SR 2100 della C. Plath del gruppo Litton (www.litton-marine.com/decca/sr2100.htm)

Come si vede dalla Fig. 8 l'elemento sensibile comprende sei moduli:

- l'unità di calcolo con le interfacce seriali per l'uscita dei dati elaborati;
- l'alimentatore;
- tre giroscopi a fibre ottiche;
- due sensori di livello.

Tutti i moduli sono montati su una piastra rigida che serve per il fissaggio dell'elemento alla struttura della nave con l'asse del FOG X montato possibilmente parallelo all'asse longitudinale della nave; nel caso in cui ciò non sia possibile, l'angolo di deviazione deve essere inserito nell'unità di calcolo come elemento correttivo.

Ciascun FOG contiene:

- una bobina di fibre ottiche contenute in un involucro particolare per proteggerla dall'azione di eventuali campi magnetici;
- una scheda elettronica contenente la sorgente luminosa, il fotorivelatore ed un convertitore A/D (analogico-digitale) per convertire i segnali analogici del giroscopio in segnali digitali;

- una scheda contenente il microprocessore per elaborare i dati digitali in uscita dal giroscopio e per trasmetterli all'unità di calcolo mediante un collegamento seriale interno.

L'unità di calcolo contenuta nell'elemento sensibile comprende a sua volta:

- un elaboratore per i necessari calcoli di navigazione a partire dai segnali in uscita dai FOG e dai sensori di livello;
- un dispositivo di input/output per comunicare con i tre FOG e con i sistemi di utilizzazione esterni (tra cui il l'unità di visualizzazione dei dati);
- un convertitore A/D per leggere i dati dai sensori di livello.

L'unità di visualizzazione (Fig. 9), oltre che dall'elemento sensibile, può ricevere e mostrare dati in uscita da altre bussole giroscopiche di tipo tradizionale o da bussole magnetiche. In tale unità, mediante un apposito menu, è possibile selezionare le pagine con i dati che si desiderano mostrare (prora, angoli di rollio, di beccheggio e velocità angolare di rotazione).



Fig. 9 - Display della SR 2100 nella versione della Litton Marine

La procedura di avviamento è molto semplice e può essere

in modalità automatica o manuale; nel primo caso i valori di latitudine e di velocità vengono ricevuti direttamente dai sensori di posizione (GPS) e di velocità (solcometro); nel secondo caso i dati devono essere inseriti manualmente.

I tempi necessari per l'orientamento iniziale sono di 1 min per un'elongazione minore di 1° e di 30÷40 min per angoli minori di $0,01^\circ$.

Gli errori sulla prora sono dati da $0,7 \cdot \text{Sec } \varphi$ gradi fino a latitudini di $\pm 75^\circ$.

Appendice 1 - Fibre ottiche

Le fibre ottiche sono un mezzo di trasmissione che consentono la propagazione all'interno di esse di impulsi di luce introdotti dentro mediante laser o altre sorgenti luminose come i LED. Esse sono costituite da un sottilissimo filo di vetro o di materiale plastico trasparente, sottile come un capello e circondato da una guaina protettiva di materiale plastico (**buffer**) che ha il compito di proteggere la fibra da abrasioni o scalfitture e di impedire la dispersione della luce verso l'esterno. In realtà la fibra è formata da una parte centrale di vetro (**nucleo o core**), circondata da un altro strato di vetro (**mantello o cladding**) con minore indice di rifrazione⁶.

Il segnale ottico è introdotto ad un capo del cavo e si propaga lungo di esso grazie a successive riflessioni sulla superficie di discontinuità che separa i due diversi tipi di vetro. Normalmente le frequenze utilizzate sono quelle della luce visibile o della radiazione infrarossa.

Come è noto, un raggio luminoso quando passa da un mezzo ad un altro meno rifrangente subisce una rifrazione, che diventa una riflessione totale

quando si supera un angolo di incidenza superiore al cosiddetto **angolo di incidenza limite o critico**:

$$\Theta_l = \text{Sin}^{-1} \left(n_1 / n_2 \right)$$

dove n_1 ed n_2 sono gli indici di rifrazione dei due diversi mezzi⁷. Le fibre possono essere realizzate:

- con **indice a gradino** (step index), ossia con indici di rifrazione distinti per il nucleo e per il mantello
- con **indice a variazione graduale** (graded index) in cui l'indice di rifrazione diminuisce gradualmente andando verso l'esterno

La propagazione all'interno delle fibre diventa a tal punto simile a quella delle onde elettromagnetiche all'interno delle guide d'onda; la modalità di trasmissione del segnale dipende da vari elementi tra cui i tipi di

materiali ed il rapporto fra i diametri con cui vengono realizzati il nucleo ed il mantello.

Appendice 2 - Effetto Sagnac

Per determinare l'espressione della differenza di fase prodotta dall'effetto Sagnac si consideri la Fig. 12, dove il

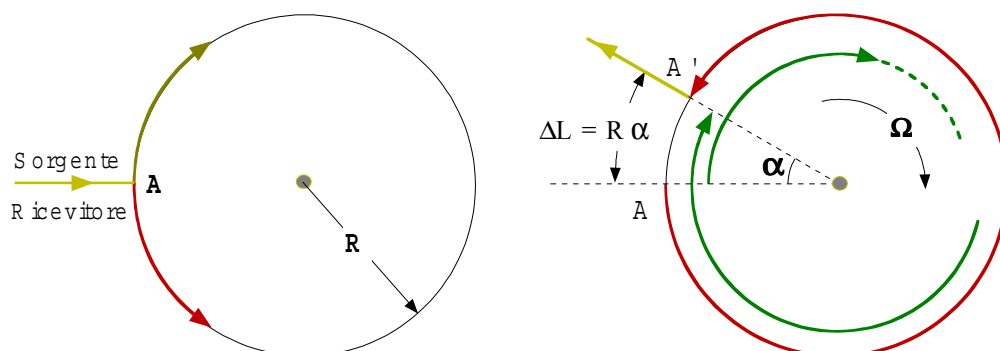


Fig. 12 - Percorsi ottici con giroscopio fermo e in rotazione

⁶ Quale esempio di dimensioni dei vari elementi di una fibra graded index, i diametri del nucleo, del mantello e della guaina esterna possono essere, rispettivamente, di ~50, 125 e 250 μm .

⁷ Ad esempio, con $n_1=1,48$ e $n_2=1,46$, si ottiene un angolo limite di ~81°.

percorso ottico è circolare (come all'interno di una bobina di fibre ottiche) e con raggio R . Il raggio luminoso entra nel percorso dal punto A , dove viene spezzato nei due diversi raggi, orario ed antiorario; i due raggi si ritroveranno all'uscita nel punto A' , spostato da A a causa della rotazione dell'intero sistema. Nel caso di una semplice spira, la lunghezza del percorso è $L = 2 \pi R$, che viene descritto in un tempo $\Delta t = L/c$. Nello stesso intervallo di tempo, il percorso ruota di un angolo $\alpha = \Omega \Delta t$, che produce una variazione nella lunghezza dei percorsi ottici pari a

$$\Delta L = R \alpha = R \Omega \Delta t = R \Omega L / c$$

Nel caso del raggio concorde con il verso di rotazione si ha un allungamento ΔL , mentre per l'altro raggio si ha un accorciamento ΔL ; la differenza fra i due percorsi è $2 \Delta L$ che corrisponde ad una variazione nella fase pari a

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2\Delta L = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{2R\Omega L}{c} = \frac{2\pi D L}{c\lambda} \Omega$$

con $D = 2 R$ (diametro delle spire). L'effetto Sagnac è indipendente dalla forma delle spire, che possono essere ovalizzate.

Per determinare l'intensità dell'onda risultante in uscita dall'interferometro, si supponga che i segnali in partenza da A abbiano le seguenti ampiezze:

$$s_1 = s_2 = S_0 \sin(\omega t)$$

Al termine dei due percorsi, trascurando eventuali attenuazioni, le ampiezze luminose istantanee sono:

$$s_1 = S_0 \sin(\omega t - \alpha_1)$$

$$s_2 = S_0 \sin(\omega t - \alpha_2)$$

Nel caso di sovrapposizione di onde coerenti, ossia polarizzate linearmente nello stesso piano, l'ampiezza dell'onda risultante è data da una semplice somma algebrica $s_1 + s_2$, che dopo alcuni passaggi (usando le formule di prostaferesi) diventa:

$$s = 2 S_0 \cos \frac{\Phi}{2} \sin \left(\omega t - \frac{\Phi}{2} \right) = S_{\max} \sin \left(\omega t - \frac{\Phi}{2} \right)$$

con $S_{\max} = 2 S_0 \cos \frac{\Phi}{2}$ e $\Phi = \alpha_1 - \alpha_2$ (effetto Sagnac).

L'intensità massima dell'onda risultante è proporzionale al quadrato delle ampiezze e precisamente:

$$I = K S_{\max}^2 = K 4 S_0^2 \cos^2 \frac{\Phi}{2} = I_0 \cos^2 \frac{\Phi}{2}$$

dove I_0 è il massimo dell'intensità luminosa raggiunta per $\Phi = 0$ (segnali in fase e giroscopio con velocità nulla). L'intensità minima $I_0 = 0$, come già detto, si ha per $\Phi = \pm\pi$. In alternativa, la precedente espressione può essere sostituita dalla seguente:

$$I = I_0 \frac{1 + \cos \Phi}{2}$$

Appendice 3 - Modulazione di fase

Il disco o cilindro piezoelettrico genera una modulazione di fase non reciproca, ossia che agisce in sola direzione, per cui la variazione di fase complessiva diventa:

$$\Phi = \Phi_S + \Phi_m \sin \omega_m t$$

con Φ_S = differenza di fase prevista dall'effetto Sagnac
 Φ_m = l'ampiezza della variazione di fase prodotta dal modulatore
 $\Omega_m = 2 \pi f_m$ = pulsazione del segnale modulante

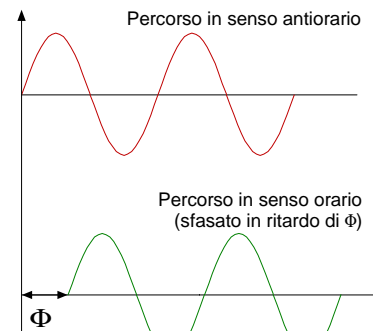


Fig. 13 - Fase dei segnali che arrivano in A' , all'uscita dell'interferometro

Sostituendo la precedente espressione in quella dell'intensità massima in uscita dal giroscopio o interferometro, si ha:

$$I = I_0 \frac{1 + \cos \Phi}{2} = I_0 \frac{1 + \cos(\Phi_S + \Phi_m \sin \omega_m t)}{2} = \frac{I_0}{2} [1 + \cos \Phi_S \cos(\Phi_m \sin \omega_m t) - \sin \Phi_S \sin(\Phi_m \sin \omega_m t)]$$

Ponendo

$$M = \frac{I_0}{2} \cos \Phi_S; \quad N = \frac{I_0}{2} \sin \Phi_S \quad e \quad m = \Phi_m$$

rimane:

$$I = \frac{I_0}{2} + M \cos(m \sin \omega_m t) - N \sin(m \sin \omega_m t)$$

Le due funzioni trigonometriche al secondo membro possono svilupparsi con le seguenti serie (funzioni di Bessel):

$$\cos(m \sin \omega_m t) = B_0 + 2 B_2 \cos 2 \omega_m t + 2 B_4 \cos 4 \omega_m t + \dots \quad \text{armoniche pari}$$

$$\sin(m \sin \omega_m t) = 2 B_1 \sin \omega_m t + 2 B_3 \sin 3 \omega_m t + \dots \quad \text{armoniche dispari}$$

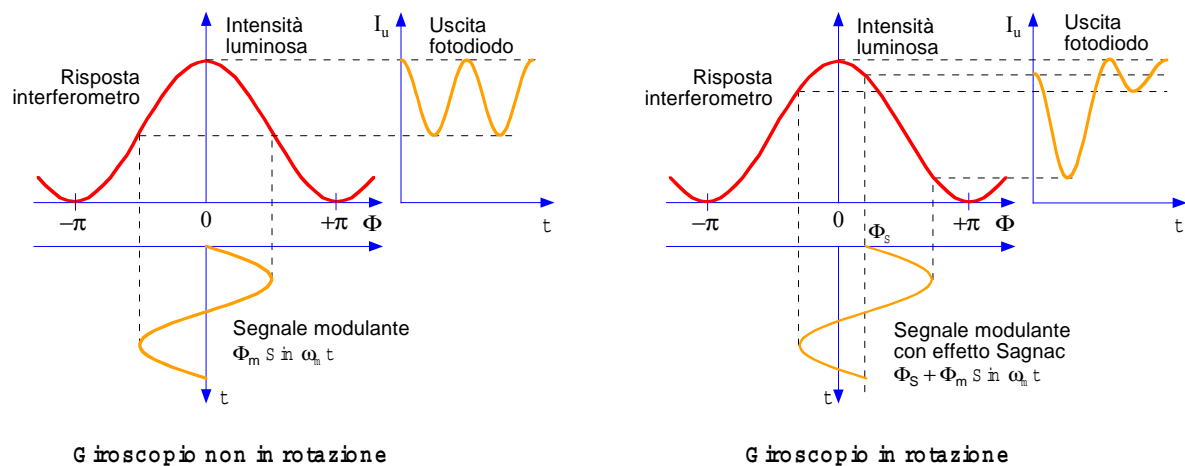


Fig. 14 - Segnali in uscita dal fotodiode nel caso di giroscopio fermo e in rotazione. Nel primo caso sono presenti soltanto le armoniche pari, ossia di frequenza doppia, quadrupla, ecc della frequenza del segnale modulante. Nel secondo caso sono presenti tutte le armoniche.

con valori di B_0, B_1, B_2, \dots dati da grafici o tabelle, in funzione di $m = \Phi_m$.

In assenza di rotazione ($\Phi_S = 0$) si ha $N = 0$ e quindi rimangono soltanto le armoniche pari di frequenza $2 f_m, 4 f_m, \dots$ le cui ampiezze sono legate all'ampiezza del segnale modulante. Quando il giroscopio ruota, la risposta in uscita non è più bilanciata e sono presenti tutte le componenti armoniche ($f_m, 2 f_m, 3 f_m, 4 f_m, \dots$).

Utilizzando, in uscita dal demodulatore, un filtro passa basso si possono eliminare tutte le armoniche in modo che rimanga soltanto la fondamentale con l'andamento sinusoidale già descritto (vedi Fig. 5).

Si può arrivare alle stesse conclusioni effettuando delle considerazioni da un punto di vista geometrico, come mostrato in Fig. 14. In assenza di rotazione ($\Phi_S = 0$), in uscita dall'interferometro si ha un segnale di frequenza doppia. In uscita dal fotodiode, a causa della non linearità sia della curva di risposta dell'interferometro sia di quella del fotodiode, si ha un segnale a larga banda che comprende soltanto le armoniche pari ($2 f_m, 4 f_m, \dots$) le cui ampiezze sono legate all'ampiezza del segnale modulante. Quando il giroscopio ruota, la risposta in uscita non è più bilanciata e sono presenti tutte le componenti armoniche ($f_m, 2 f_m, 3 f_m, 4 f_m, \dots$).

Bibliografia

1. Litef GMBH - LFK95 Fibre Optic Gyro Compass (www.litef.com)
2. C.Plath SR 2100 Gyrocompass (www.litton-marine.com/decca/sr2100.htm)
3. Mercator GPS Systems SP 2000 - Fiber Optic Gyro Compass (www.mercat.com)
4. Bennett e altri, Fiber optic rate gyros as replacement for mechanical gyros, KVH Industries and American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 1998 (www.kvh.com/technicalsupport/tech_docs.html)
5. Frequently Asked Questions / Glossary of Terms (www.kvh.com)
6. KVH E-Core FOG - A New Spin On Fiber Optic Gyros (www.kvh.com)
7. Pavlath and Suman, Fiber-Optic Gyroscopes: advances and future, Navigation USA, Vol. 31-2, 1984
8. Matthews, Utilization of Fiber-Optic Gyros in inertial measurement units, Navigation USA, Vol. 37-1, 1990
9. Mark ed altri, A rate integrating Fiber Optic Gyro, Navigation USA, Vol. 38-4, 1991-92