



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN
INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

**Sensori Ottici: analisi delle differenze
tra Giroscopi in Fibra Ottica e
Giroscopi Laser ad Anello**

Relatore:
PROF. ANDREA GALTAROSSA

Laureando:
NICOLA MARUSSI
2000256

Anno Accademico 2023/2024

Abstract

Durante gli anni Sessanta, l'invenzione del primo laser He-Ne e la possibilità di rilevare lo sfasamento di Sagnac all'interno di una cavità chiusa permisero la ricerca e lo sviluppo di una nuova generazione di sensori ottici. Dopo anni di studi, miglioramenti tecnologici e vari tentativi da parte della comunità scientifica di individuare una soluzione innovativa, il giroscopio ad anello laser divenne il primo sensore con produzione a livelli di massa, principalmente implementato nei sistemi di navigazione inerziale. Nei decenni successivi un differente approccio all'ingegnerizzazione venne adottato, ovvero l'introduzione della fibra ottica nei giroscopi, grazie alla quale si aprirono nuove strade per lo sviluppo di sensori economici e affidabili. Lo scopo di questa tesi di laurea, dopo aver descritto tali sensori e approfondito il loro principio di funzionamento, è quello di fornire un'analisi completa di vantaggi e svantaggi dei due strumenti, elencando i campi di applicazione più conformi a ciascuno.

Indice

1	Sensori Ottici	1
1.1	Nascita dei Sensori Ottici	1
1.2	Applicazioni dei Sensori Ottici	2
1.2.1	Telemetri	3
1.2.2	Interferometri	4
1.2.3	Giroscopi	5
1.3	Scopo della tesi	7
2	Giroscopi ottici	9
2.1	Effetto Sagnac	9
2.2	Parametri di analisi delle prestazioni	12
2.2.1	Varianza di Allan	12
3	Giroscopi laser ad anello	15
3.1	Configurazione Base	15
3.2	Problematiche e limitazioni	17
3.3	Dithered RLG e Zeeman RLG	20
4	Giroscopi in fibra ottica	23
4.1	Configurazione Base	23
4.2	Problematiche e limitazioni	25
4.3	Configurazione FOG ad anello aperto e ad anello chiuso	26
5	Confronto tra le due tecnologie	31
5.1	Confronto tra IMU	32
6	Conclusione	35

Capitolo 1

Sensori Ottici

I sensori ottici sono strumenti che sfruttano una sorgente di luce per generare un segnale elettrico sensibile alla variazione di una grandezza fisica. Tale classe di dispositivi è stata sviluppata solo recentemente con l'avvento del primo laser negli anni Sessanta. Tuttavia, la commercializzazione dei sensori ottici avvenne solo dopo anni di ricerca e di ingegnerizzazione di numerosi prototipi. Attraverso l'implementazione di nuove tecnologie nel campo, i rilevatori sono diventati dispositivi all'avanguardia, essenziali in numerosi settori industriali e scientifici. Conoscere la storia di questa categoria di sensori, fornisce una visuale ampia sullo sviluppo avvenuto nell'ultimo secolo, permettendo inoltre di individuare le innumerevoli applicazioni del laser.

1.1 Nascita dei Sensori Ottici

L'invenzione del primo laser risale al 1960 ad opera dello scienziato Theodore Harold Maiman, riferimento a Figura 1.1, basandosi sullo studio approfondito del testo di Einstein "On Quantum Theory of Radiaton", relativo alla possibilità di generare luce coerente. Nel 1940 V.A. Fabrikant, durante i suoi studi di dottorato, specificò e calcolò le condizioni necessarie per la propagazione di fasci luminosi attraverso l'emissione stimolata; quando un fotone colpisce un atomo eccitato, induce quest'ultimo a rilasciare un secondo fotone identico al primo, aumentando così l'intensità della luce. Lo studio del fisico Fabrikant, le conoscenze approfondite delle microonde e delle proprietà ottiche dei rubini sintetici furono molto utili a Maiman che, dopo diversi tentativi, riuscì a realizzare un prototipo funzionante del laser, per la prima volta acceso il 16 Maggio 1960. Quel giorno, successivamente alla preparazione per la prova sperimentale, Maiman ca-

ricò il condensatore ad alta tensione nell' alimentatore del dispositivo a circa 500 volt ed accese l'emettitore di fotoni: venne registrato un impulso di luce rossa dall'oscilloscopio. Maiman così disse:

«But, when we past 950 volts on the power supply, everything changed! The output trace started to shoot up in peak intensity and the initial decay time rapidly decreased. Voilà. That was it! The laser was born» (The Laser Odyssey).

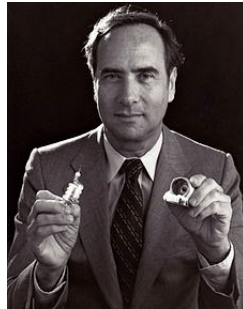


Figura 1.1: Mainman, pioniere del laser ed i componenti del primo prototipo.

Lo strumento era costruito con componenti disponibili in commercio, per il volere di Maiman, come la più potente lampada flash elicoidale reperibile al tempo. Il laser impiegava una miscela di gas elio-neon (He-Ne) in grado di generare un impulso di luce rosso rubino, dovuta all'alta concentrazione di cromo nei rubini naturali, che conferisce al fascio il suo caratteristico colore intenso e profondo. Le prime applicazioni si videro nella lavorazione dei materiali come foratura, saldatura, taglio ecc. Tuttavia, solamente attorno agli anni Settanta iniziò la ricerca e lo sviluppo di sensori con l'utilizzo del laser inventato da Maiman e anche se la necessità dell'implementazione in campo militare diede una grossa spinta all'avanzamento di queste tecnologie, ci vollero comunque decenni prima che i rilevatori ottici entrassero nella produzione di massa. [7]

1.2 Applicazioni dei Sensori Ottici

Tra le varie applicazioni del laser le più importanti si raggruppano sotto ad alcune famiglie di sensori: telemetri, interferometri e giroscopi ottici, dispositivi estremamente versatili che con il tempo hanno raggiunto livelli di precisione ed affidabilità altissimi. Nel corso di questo capitolo verrà analizzata brevemente la storia dello sviluppo di questi sensori, introducendo il vero scopo di questa tesi: l'analisi dei giroscopi ottici.

1.2.1 Telemetri

Una delle prime applicazioni del laser He-Ne sono stati i telemetri, classe di sensori ottici progettata per misurare la distanza tra lo strumento ed un bersaglio specifico. Il telemetro sfrutta il fenomeno della riflessione: il dispositivo laser emette un impulso che incide sulla superficie dell'obbiettivo ed una frazione della componente riflessa viene rilevata dal telemetro che misurando il tempo impiegato nel tragitto, calcola la distanza dall'oggetto. Una dimostrazione della tecnologia utilizzata nei telemetri avvenne nel 1962 con l'esperimento LLR (Lunar Laser Ranging) che prevedeva la misurazione della distanza tra la Terra e la Luna; le iniziali rilevazioni considerarono solamente la luce riflessa dalla superficie solare. Tuttavia, durante la missione Apollo 11, nel 1969 vennero implementati dei retroriflettori, rappresentati nella Figura 1.2, strumenti quadrati, con dieci righe e dieci colonne di cubi ad angoli circolari di $38mm$ di diametro, spaziate tra di loro di $46mm$, che permettono di minimizzare le perdite sui fotoni emessi [8].

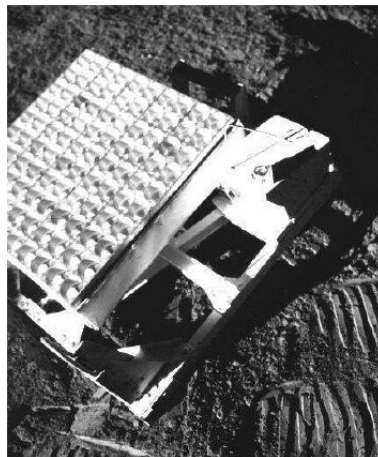


Figura 1.2: Retroriflettori della missione Apollo 14.

Per effetto della precisione tecnologica in questione la distanza Terra-Luna è stata determinata con accuratezza millimetrica. Un importante strumento scientifico simile ad un telemetro è il LIDAR (rivelatore e localizzatore mediante luce o radar ottico), un dispositivo per il telerilevamento di dati estrapolati dalla natura circostante, principalmente utilizzato per esaminare gli inquinanti nell'atmosfera e per ottenere mappe dettagliate che rappresentano la distribuzione di elementi o fenomeni a diverse distanze, entrambi con lo scopo di proteggere l'ambiente. Viste le numerose applicazioni del laser è stato necessario raggiungere un determinato livello di accuratezza ed i telemetri dimostrano come, con tale tecnologia, si possano fornire dati affidabili ed accurati. Inoltre, al giorno d'oggi, questi dispositivi

sono diventati uno standard nel campo dell'automotive, rivelandosi essenziali nei sistemi di anticollisione e sviluppo della guida autonoma.

1.2.2 Interferometri

In fisica l'interferometro è uno strumento elettro ottico per la misurazione della differenza di composizione tra onde elettromagnetiche, con precisione pari ad una frazione della lunghezza d'onda λ . Grazie al raggiungimento di una buona conoscenza del fenomeno dell'interferenza nei primi anni del secolo scorso e con l'avvento del laser He-Ne per la generazione di sorgenti di luce coerente, le capacità di questa tecnologia risultarono molto promettenti. Tra i molti tipi sensori appartenenti alla famiglia degli interferometri si includono i velocimetri doppler, per la misurazione della velocità di un fluido, e i giroscopi, per la rilevazione della velocità angolare di un oggetto in moto. Nei primi anni di produzione, gli interferometri videro come protagonisti settori della metrologia meccanica e calibrazione di macchine per la lavorazione e la meccanica dei fluidi. Una delle prime applicazioni pratiche di questa classe di sensori risale agli anni sessanta, quando vennero registrate spostamenti delle placche sulla superficie terrestre, evidenziandone la deformazione pari a $10^{-9}m$. Nel corso degli ultimi decenni, la tecnologia ha subito uno sviluppo significativo, arrivando a misurare con precisione grandezze estremamente piccole, dell'ordine dei picometri ($10^{-12}m$) e degli attometri ($10^{-18}m$), e risulta in grado di individuare variazioni di deformazione relativa (ovvero la differenza di lunghezza in confronto al valore iniziale, indicata come dl/l) con una precisione fino a 10^{-9} . Ad ogni modo, la rilevazione delle onde gravitazionali costituisce attualmente il risultato più significativo ottenuto grazie agli interferometri. Questo fenomeno della fisica è stato osservato per la prima volta al LIGO (Interferometro per il rilevamento delle onde gravitazionali) dove è installato un interferometro con braccia di due chilometri. La struttura è accoppiata con un altro edificio, distante tremila chilometri, fornito anch'esso di un interferometro che, calibrati insieme, permettono di cancellare eventuali impulsi derivati dalle perturbazioni terrestri. Nella figura 1.3 sono mostrati i due osservatori LIGO situati negli USA: a destra quello di Handford, nello stato di Washington, mentre, a sinistra quello di Livingston in Louisiana.

Integrare questa tecnologia è stato necessario per l'identificazione delle onde gravitazionali (14 settembre 2015) attraverso una deformazione dell'ordine di $10^{-21}m$. Nel corso degli anni sono stati individuati molti segnali derivanti da



Figura 1.3: I due osservatori LIGO.

stelle morenti o galassie lontane, indici che permettono di ottenere informazioni essenziali per capire la storia dell'universo. [4]

1.2.3 Giroscopi

Un altro grosso successo, sia industriale che scientifico, è stato l'impiego del laser nell'apparato del giroscopio. Il principio fisico alla base di questo sensore è l'effetto Sagnac, un fenomeno che permette di estrapolare la differenza di fase tra due fasci di luce contropropaganti all'interno di un percorso chiuso per calcolare la velocità angolare. L'interferometro di Sagnac fu proposto per la prima volta, come possibile sensore ottico di rotazione inerziale nel 1913. Eppure, solamente con l'invenzione dei laser si dimostrò la facilità e l'accuratezza della misurazione inerziale, oltre al fatto che un laser ad anello poteva diventare un nuovo tipo di giroscopio. Il primo esperimento, condotto da Macek Sperry, avvenne nel 1961, solo un anno dopo l'invenzione del laser, nel laboratorio della Sperry Corp, azienda manifatturiera di sistemi di navigazione. Il giroscopio utilizzato, costruito con 4 braccia di lato pari a un metro ed una configurazione ad anello quadrato, era in grado di misurare la rotazione terrestre di $15^\circ/h$, un risultato sorprendente all'epoca, che diede inizio alla ricerca verso il perfezionamento dello strumento. Nella figura 1.4 è raffigurato lo scienziato Sperry ed il primo prototipo funzionante del giroscopio laser ad anello.

Dopo una decina di anni di progresso si arrivò alla realizzazione dell'RLG, il primo giroscopio laser ad anello compatto e commercializzato che offriva una precisione di 10^{-3} gradi all'ora. Dal 1980 ad oggi è rimasto un elemento fondamentale per le compagnie aeree; è il sensore al cuore dell'INU (Unità di navigazione inerziale), cubo con dimensioni di circa 25cm di lato e peso attorno ai 9 chilogrammi. Nella figura 1.5 è illustrato il quadro strumenti del Marconi-FIN3110, ovvero il cuore del sistema di navigazione inerziale, composto da tre giroscopi e tre accelero-



Figura 1.4: Macek Sperry e il primo giroscopio laser.

metri, realizzato dall'azienda Marconi, una delle produttrici mondiali di sistemi di navigazione inerziali maggiormente utilizzati per più di quarant'anni [2]. I dispositivi sono assemblati in un telaio meccanico, progettato per smorzare gli effetti di vibrazione, urti e variazioni di temperatura che possono alterare il valore delle prestazioni del sensore.

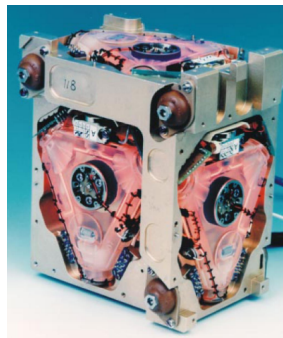


Figura 1.5: Quadro strumenti del sistema di navigazione inerziale Marconi FIN3110

I sistemi di navigazione inerziali moderni, come l'unità in questione, sono in grado di calcolare la posizione precisa dell'aereo con accuratezza di un miglio dopo qualche ora di volo. Lo sviluppo della tecnologia dei giroscopi vide l'inizio di un significativo interesse da parte del mondo scientifico, nel 1978, con l'introduzione della fibra ottica monomodale. Il FOG (Giroscopio in fibra ottica) fu proposto come uno strumento di media classe, leggero, economico e molto affidabile, specialmente per applicazioni spaziali, capace di ottenere risultati sorprendenti, come un errore sistematico pari a 10^{-2} gradi all'ora. Sebbene le basi teoriche per l'implementazione dei FOG siano disponibili in tutto il mondo, i dettagli delle tecniche e dei processi di progettazione non sono accessibili liberamente a causa di restrizioni proprietarie. L'ingegnerizzazione di questa famiglia di sensori ottici ha visto una forte crescita negli ultimi trent'anni, cominciando a concorrere con la tecnologia dell'RLG. Nel 1990 furono pronte le prime unità in fibra ottica nei satelliti, impiegate come sistemi di determinazione e controllo dell'assetto ed in applicazioni militari. Col passare degli anni, il FOG ha sostituito l'RLG in

molti campi in cui sono richieste alte prestazioni ed elevata accuratezza, come sensibilità pari a un grado all'ora, raggiungendo anche il decimo di grado all'ora. Questi includono sistemi di riferimento di assetto e direzione (SRAD) installati nei velivoli, robotica e satelliti.

1.3 Scopo della tesi

Nel corso di questa tesi verranno analizzate due tecnologie di giroscopi: gli RLG, giroscopi laser ad anello ed i FOG, giroscopi in fibra ottica. Inizialmente sarà illustrato il principio di funzionamento che regola questi due sensori, noto come effetto Sagnac, fornendo una spiegazione approfondita dei fenomeni fisici e matematici alla base di questo fenomeno. Successivamente, dopo aver analizzato le configurazioni e i vari componenti alla base dei due sensori, quindi esaminato in dettaglio le specifiche tecniche e strutturali, verranno confrontate le loro prestazioni. Allo scopo di ottenere il miglior risultato saranno incluse: precisione, sensibilità ed affidabilità, oltre a tenere in considerazione le dimensioni fisiche. L'obiettivo finale di questo studio è individuare i settori di impiego ottimali per entrambi i giroscopi, valutando le potenzialità e limitazioni.

Capitolo 2

Giroscopi ottici

Nel corso di questo capitolo verranno descritte le varie tecnologie dei giroscopi con un focus sull'effetto Sagnac, fenomeno fisico alla base di questa famiglia di sensori ottici. Verranno altresì descritti i parametri utilizzati per il confronto tra FOG e RLG, allo scopo di fornire un'analisi delle differenze tra i due strumenti.

2.1 Effetto Sagnac

I giroscopi ottici si basano sull'effetto Sagnac, il quale produce una differenza di fase tra due onde elettromagnetiche che si propagano in versi opposti all'interno di un sistema di riferimento rotante. La configurazione base di questa classe di sensori, denominata interferometro di Sagnac, è rappresentata nella figura 2.1

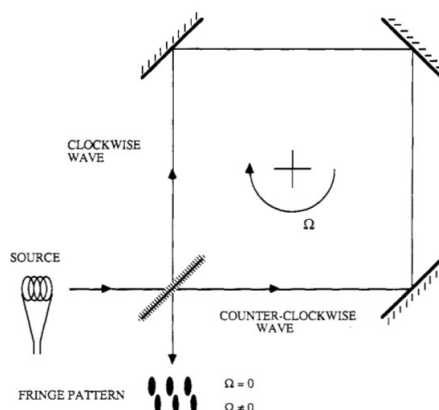


Figura 2.1: Interferometro di Sagnac. Le onde in senso orario e anti orario interferiscono per produrre le frange di interferenza con spostamenti per $\Omega \neq 0$.

Nello schema in questione, la luce generata da una sorgente ottica viene divisa in due componenti da un divisore di fasci di luce (beamsplitter), e queste

si diffondono all'interno di un percorso chiuso sviluppando dei campi ottici che si propagano in senso orario (CW) ed antiorario (CCW). All'uscita del circuito ottico le due onde incidono producendo una figura di interferenza, sensibile alla rotazione dell'intero sistema lungo l'asse perpendicolare al piano dove è situato l'anello. Le due componenti risultano sfasate in modo proporzionale alla variazione della velocità di rotazione Ω , incluso il verso, un fenomeno che si verifica per il diverso tempo impiegato dalle onde a propagarsi, rispettivamente a quando non il sistema è a riposo. Essendo la velocità della luce costante, la variazione rilevata è relativa alla differenza del percorso ottico compiuto dalle due componenti. L'intervallo temporale ottenuto dalla discrepanza nella propagazione delle due onde è pari a:

$$\Delta t = \frac{4A\Omega}{c^2}, \quad (2.1)$$

dove A è l'area racchiusa dal circuito ottico e c la velocità della luce. La differenza di lunghezza del percorso è derivata invece dalla seguente formula:

$$\Delta L = c \cdot \Delta t = \frac{4A\Omega}{c}. \quad (2.2)$$

Si può ricavare, attraverso la relazione tra lunghezza d'onda e sfasamento, la differenza di fase tra le onde contropropaganti:

$$\Delta L = \frac{\Phi_s}{k} = \frac{\Phi_s \lambda}{2\pi} \implies \Phi_s = \frac{8A\pi\Omega}{\lambda c}, \quad (2.3)$$

dove k rappresenta il numero d'onda. Dall'equazione 2.2 è evidente la presenza di una dipendenza lineare tra l'area del percorso ottico e la differenza di lunghezza rilevata dalla collisione delle due onde, relazione permette di aumentare la sensibilità dello strumento incrementando solamente la grandezza dell'area A racchiusa dal circuito ottico. Nel FOG, ad esempio, essendo la fibra ottica avvolta, per aumentare l'area A senza intaccare le dimensioni totali dello strumento è sufficiente aumentare il numero degli avvolgimenti N ; così facendo la sensibilità dello strumento risulta proporzionale a N . Per comprendere al meglio i valori tipici dei segnali ottenuti dallo sfasamento tra le onde, si consideri la figura 2.2. Le linee tratteggiate rappresentano delle misurazioni comuni rilevate rispettivamente da due giroscopi: a sinistra, un FOG con un avvolgimento di fibra ottica lungo $200m$, mentre, a destra, un RLG con cavità di $10cm$ di lato. Nella scala di destra il percorso ottico cambia in corrispondenza dello sfasamento, legati dall'equazione 2.3 dove in basso è presente la scala della velocità angolare in deg/h ,

convertita da quella in rad/s .

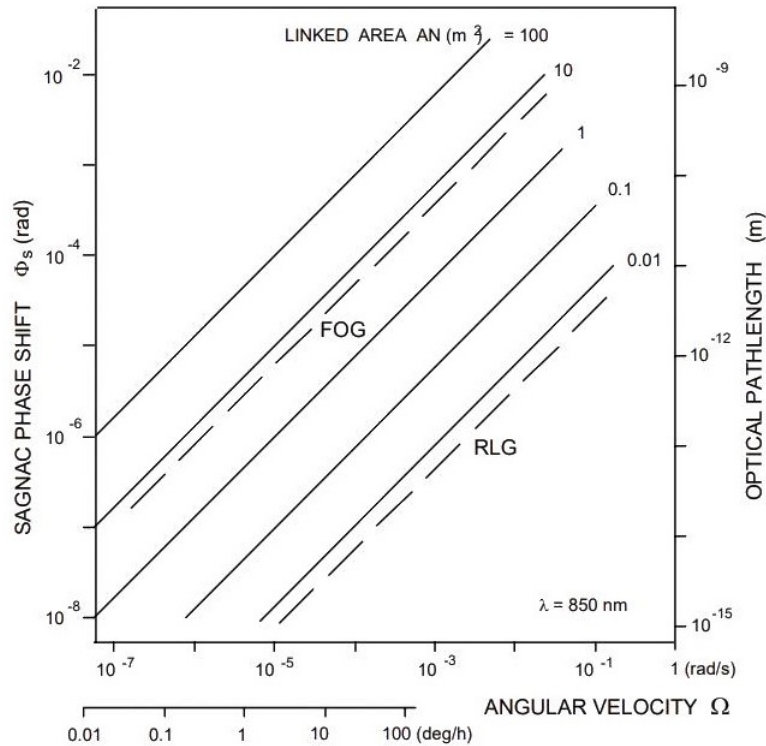


Figura 2.2: Valori dello sfasamento di Sagnac Φ_s in un giroscopio con area connessa $N \cdot A$ in funzione della velocità angolare Ω .

La misurazione di questi sfasamenti molto piccoli non include la componente continua. Valutare tale grandezza è importante, perché Ω può includere delle armoniche a bassa frequenza, le quali possono ostacolare il filtraggio e la relativa valutazione della velocità angolare, più complicata rispetto a quella di una semplice componente alternata. Risulta molto importante ingegnerizzare dei dispositivi con tecniche di rilevamento e quantificazione accurate e precise, evitando di includere nella misura componenti di deriva, sia ottiche che elettroniche, con frequenze rispettivamente piccole. Un'altra importante considerazione riguarda l'identificazione delle differenze di percorso ottico con lunghezze di picometri o femtometri (rispettivamente $10^{-12}m$ e $10^{-15}m$). Si tratta di un traguardo considerevole non solo per i sensori ottici, ma per l'intera disciplina della scienza dell' strumentazione.

2.2 Parametri di analisi delle prestazioni

Per ottenere un'analisi approfondita dei giroscopi ottici è necessario definire dei parametri per il confronto e la valutazione complessiva delle prestazioni di tali dispositivi. I seguenti parametri consentono di paragonare le capacità e le limitazioni di entrambe le tecnologie, RLG e FOG, assicurando una base solida per il rispettivo contesto di utilizzo. Oltre ai classici criteri di valutazione di dispositivi di misurazione come precisione, sensibilità, affidabilità, dimensioni e peso è necessario definirne di nuovi, derivati dall'analisi del rumore di fondo presente durante il tempo di funzionamento del dispositivo che forniscono un'indicazione accurata sulla stabilità e la continuità delle misurazioni. Le grandezze in questione sono:

- angle random walk (ARW): componente di spettro del rumore bianco all'uscita del giroscopio;
- stabilità del Bias: rumore in bassa frequenza, originato da elementi elettronici sensibili al rumore flicker o rumore rosa;
- rate random walk (RRW): un processo casuale di origine incerta, presente dopo tempi di funzionamento molto lunghi del giroscopio;
- rumore di quantizzazione (QN): un termine di rumore legato ai valori di campionamento del giroscopio.

Per ottenere una stima del valore di questi parametri si ricorre al metodo della varianza di Allan [9].

2.2.1 Varianza di Allan

La varianza di Allan è stata sviluppata negli anni sessanta ed è stata adottata per la caratterizzazione dell'instabilità di fase e frequenza per oscillatori di precisione ed, essendo questi strumenti molto simili ai sensori inerziali, il metodo è stato adattato anche per lo studio e la progettazione dei giroscopi. La varianza di Allan è un metodo di rappresentare la varianza dell'errore di deriva casuale o random drift, in funzione del tempo di attività dello strumento, cioè grandezza che permette di quantificare la componente casuale dell'errore introdotto a causa di rumore e disturbi stocastici, presenti nel modello matematico del sensore. L'analisi della varianza di questi parametri in un giroscopio è importante perché il rumore può influenzare significativamente la precisione e l'affidabilità delle misure e delle previsioni di prestazione. Nell'ipotesi di assumere che i termini di

rumore siano statisticamente indipendenti, la varianza di Allan, per un determinato valore di τ è la somma delle varianze di ciascuna componente, essendo tutte rappresentata al tempo τ :

$$\sigma_{tot}^2(\tau) = \sigma^2(\tau)_{ARW} + \sigma^2(\tau)_{SstBias} + \sigma^2(\tau)_{RRW} + \sigma^2(\tau)_{QN},$$

e ogni termine pari a:

$$\begin{aligned} \sigma^2(\tau)_{ARW} &= N^2/\tau, \\ \sigma^2(\tau)_{SstBias} &= \frac{2B^2}{\pi} \left[\ln 2 - \frac{\sin^3 x}{2x^2} (\sin x + 4x \cos x) + Ci(2x) - Ci(4x) \right], \\ \sigma^2(\tau)_{RRW} &= K^2\tau/3, \\ \sigma^2(\tau)_{QN} &= 3Q^2/\tau^2. \end{aligned} \quad (2.4)$$

La varianza di ogni componente di rumore è descritta dal valore di una costante, rispettivamente N per l'angle random walk, B per la stabilità del bias, dove $x = \pi f_0 \tau$, mentre, Ci la funzione integrale del coseno, K per il rate random walk e Q per il rumore di quantizzazione. Il metodo della varianza di Allan separa i vari contributi di rumore, pesandoli per diversi tempi di integrazione τ ; ciò ne permette una facile identificazione, in quanto, ogni tipologia di rumore ha una diverso andamento nel tempo della varianza, come descritto dalle equazioni 2.4. La figura 2.3 rappresenta la descrizione completa dell'evoluzione asintotica a tratti della varianza di Allan per un ipotetico giroscopio con parametri:

- $N = 0.001^\circ/\sqrt{h}$ angle random walk;
- $B = 0.001^\circ/h$ stabilità del bias;
- $K = 0.0001^\circ/h^{3/2}$ rate random walk;
- $Q = 0.577''$ rumore di quantizzazione rispetto ad un fattore di scala $2''/p$ (2 arco secondi per impulso p).

Il termine relativo ai tempi di integrazione più lunghi, la rate random walk (K) risulta difficilmente misurabile, necessitando di accensioni prolungate del dispositivo. Si può notare la risalita della curva della varianza dopo il minimo della bias instability (B), mostrando per un breve tratto la zona di rumore rate random walk (K); e la componente di rumore di quantizzazione (Q), risulta invece, facilmente identificabile. Con i coefficienti così determinati attraverso misurazioni durante il funzionamento dello strumento, la curva caratteristica è elaborata e

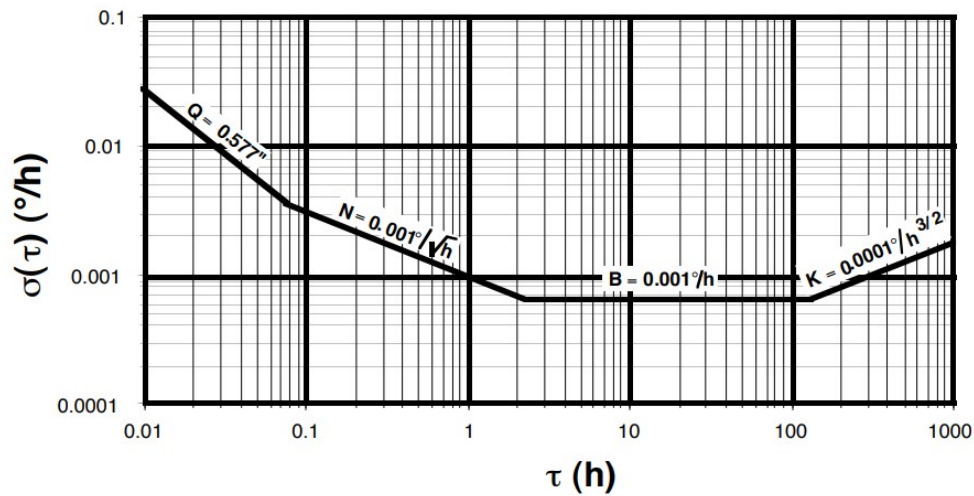


Figura 2.3: Contributo dei diversi tipi di rumore nella deviazione di Allan di un ipotetico giroscopio

conseguentemente utilizzata per il confronto tra le varie tecnologie. La progettazione di sistemi inerziali dipende direttamente dalla conoscenza approfondita del comportamento del sensore e del valore di queste grandezze. Lo studio della varianza di Allan fornisce uno strumento necessario per un confronto preciso tra varie tecnologie di giroscopi. Attraverso una migliore comprensione dei dati acquisiti durante le misurazioni è possibile ottenere informazioni aggiuntive per trovare il campo di applicazione più corretto per i sensori posti in comparazione. [3]

Capitolo 3

Giroscopi laser ad anello

In questo capitolo verranno analizzate la configurazione base dell'RLG e le rispettive limitazioni, con un focus sulle fonti degli errori relativi alle misurazioni.

3.1 Configurazione Base

Lo schema della configurazione base di un giroscopio laser ad anello è rappresentata nella figura 3.1. Nello strumento è presente un percorso in cui la luce si propaga, di forma triangolare, al cui interno si diffondono due onde, rispettivamente in senso orario (CW) e antiorario (CCW), che accumulano una differenza di fase generata dall'effetto Sagnac.

In uscita allo strumento è posizionato un rivelatore di fotoni (Photodetector o PD) che, attraverso l'indirizzamento della luce da parte degli specchi (M1, M2 e M3) in cascata con il prisma (P), identifica le due componenti contropropaganti e le confronta estrapolandone la differenza in frequenza. Quando il giroscopio è a riposo ($\Omega = 0$), si ottengono il numero esatto di lunghezze d'onda lungo il perimetro (p) della cavità e le frequenze di entrambe le componenti sono uguali. Nel momento in cui è applicata una rotazione dell'intero sistema ($\Omega \neq 0$), l'effetto Sagnac cambia la lunghezza del perimetro nei versi di propagazione, di un valore Δp pari a:

$$\Delta p_{CW} = \frac{+\phi_s}{k} \quad \Delta p_{CCW} = \frac{-\phi_s}{k} \quad \phi_s = \frac{\Phi_s}{2} \quad (3.1)$$

rispettivamente in senso orario e antiorario. Il valore ϕ_s rappresenta lo sfasamento di ciascuna delle onde rilevato alla fine del percorso, la metà di Φ_s (equazione 2.3). Pertanto, una frequenza di propagazione f_{CCW} aumenta, e l'altra f_{CW} diminuisce. La differenza tra le due, Δf_s , può essere ricavata dalla relazione

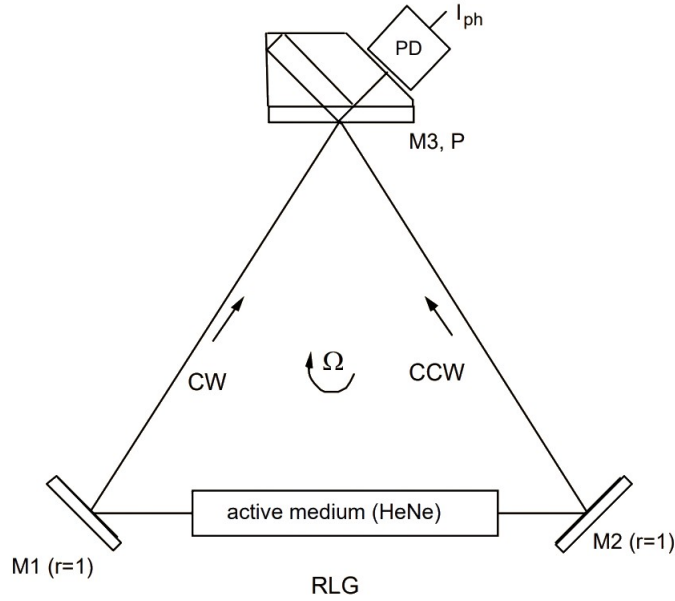


Figura 3.1: Configurazione base giroscopio laser ad anello

diretta con Φ_s :

$$\Delta f_s = |f_{CCW} - f_{CW}| = \frac{c \cdot \phi_s}{2\pi p} = \frac{2A\Omega}{p\lambda}. \quad (3.2)$$

Confrontando le due onde CW e CCW, si ottiene il segnale individuato dal rilevatore di fotoni:

$$I = I_0 \cdot [1 + \cos 2\pi \Delta f_s t] = I_0 \cdot [1 + \cos 2\pi(2R\Omega/\lambda)t]. \quad (3.3)$$

Pertanto, si evince che il sensore fornisce un segnale sinusoidale con frequenza proporzionale alla velocità di rotazione Ω . Questo risultato è molto utile perché gli strumenti elettronici, come il rilevatore di fotoni, sono in grado di misurare precisamente ed accuratamente la frequenza, con una scala di valori molto ampia. Inoltre, il segnale Δf_s ha un fattore di scala $R_f = 2R/\lambda$, che può essere determinato con un'alta precisione e senza la necessità di calibrazione, dipendendo solamente dalla dimensione R e dalla lunghezza d'onda λ . Ad esempio, un giroscopio con $R = 50\text{mm}$ e $\lambda = 1\mu\text{m}$ ottiene un fattore di scala $R_f = 10^5\text{Hz} \cdot \text{rad/s}$ e, una rotazione dello strumento in questione di 1deg/h è equivalente ad una frequenza rilevata di 0.47Hz . Si possono calcolare inoltre, la minima e la massima rotazione che il sensore può leggere, in un intervallo di 10^3s : la più piccola è di 10^{-3}Hz , che corrisponde a una velocità di rotazione equivalente a $\Omega_{min} = 2 \cdot 10^{-3}$, mentre la

più grande, corrisponde alla spaziatura in frequenza tra i modi longitudinali, cioè le lunghezze d'onda che si propagano all'interno del percorso ottico che risulta uguale a $\Delta f_{smax} = c/p$. Con un perimetro $p = 30cm$ si ottiene $\Delta f_{smax} = 1GHz$, risultando in una rotazione massima rilevabile di $\Omega_{max} = 10^4 deg/h$. Un vantaggio di questa modalità di misurazione è la semplicità con cui si rileva lo sfasamento in frequenza delle onde contropropaganti: è sufficiente contare i periodi contenuti nel segnale ricevuto dal rilevatore di fotoni. Questo risultato permette di ottenere l'angolo di rotazione inerziale dell'intero sistema:

$$\Psi = \int_0^t \Omega dt. \quad (3.4)$$

L'angolo minimo di rotazione rilevabile corrisponde ad una unità digitale nella risoluzione della scala del giroscopio, pari a:

$$\int_0^t \Delta f_s dt = 1 \quad \implies \quad \Psi_{min} = 1/R_f = \lambda/2R = 10^{-5} rad = 2,86 \cdot 10^{-3} \circ \quad (3.5)$$

3.2 Problematiche e limitazioni

La configurazione base del giroscopio laser ad anello è soggetta a due problematiche: l'individuazione del segno di Ω e l'attenuazione del segnale nel tempo, che può causare il blocco dello strumento, portando alla rilevazione nulla di eventuali rotazioni. Il segnale fornito dal rilevatore di fotoni è una sinusoide con frequenza proporzionale alla velocità angolare Ω . Se questo valore cambia di segno, la fase ϕ_s di entrambe le componenti dell'onda che si propaga lungo il percorso ottico risente di questa variazione, risultando dello stesso segno. La frequenza Δf_s , essendo una differenza tra le rispettive frequenze delle due onde, risulta invariata. Siccome non è possibile ottenere il segno di ϕ_s attraverso Δf_s , il segno di Ω non è più determinabile. Un altro fenomeno che si può verificare negli strumenti interferometrici è l'accoppiamento tra le due onde, che può indurre alla sincronizzazione in frequenza, facendo sì che queste oscillino in modo equivalente. Questo evento, comunemente descritto come "lock-in", implica l'impossibilità di rilevazione della rotazione da parte del sensore e porta l'RLG a non essere utilizzabile. Le fonti più importanti dell'accoppiamento in frequenza delle componenti ottiche sono: la dispersione della luce sulla superficie irregolare degli specchi e del materiale che la amplifica, di cui la cavità è riempita, e la saturazione del guadagno incrociata, generata all'interno del materiale attivo. Quando il fenomeno di "lock-in" non si

verifica, si può osservare una sinusoide, prodotta dalla sovrapposizione delle onde contropropaganti, che oscilla ad una frequenza Δf_0 . Successivamente, quando avviene l'accoppiamento delle due componenti, cioè entrambe si diffondono all'interno della cavità con frequenze simili, la differenza tra le due risulta pari a $\Delta f < \Delta f_0$, implicando una distorsione nella sinusoide osservata dal rilevatore di fotoni, ricavata dalla combinazione delle due onde. Incrementando ancora il lock-in, i modi oscillatori all'interno del sistema collidono l'uno con l'altro e la forma d'onda complessiva si annulla, ottenendo $\Delta f = 0$. L'analisi di questo fenomeno è compiuta attraverso l'equazione di Adler 3.6, ottenuta dal comportamento oscillatorio del sistema.

$$\frac{d}{dt}(\phi_1 - \phi_2) = \Delta f_0 \cdot [1 + K \sin(\phi_1 - \phi_2 + \zeta)]. \quad (3.6)$$

I termini ϕ_1 e ϕ_2 si riferiscono alla fase dei modi contropropaganti, K è il fattore di accoppiamento delle due onde e Δf_0 indica la differenza tra le frequenze di propagazione dei due fasci. Per $K \ll 1$, la frequenza di oscillazione dell'onda risultante dalla sovrapposizione delle due componenti è Δf_0 , valore costante, e la forma d'onda osservata dal rilevatore di fotoni è difatti una sinusoide. Tuttavia, per valori di $K \approx 1$, il segnale in uscita si distorce per la presenza del secondo termine ondulatorio dell'equazione 3.6: la forma d'onda risultante non è più una sinusoide. L'effetto di "lock-in" si verifica invece quando $K \geq 1$ e la differenza tra le fasi dei due modi risulta costante, $(d/dt)(\phi_1 - \phi_2) = 0$, cioè entrambi i fasci si propagano alla stessa frequenza e il sensore non individua lo sfasamento tra i due. Per analizzare questa condizione è necessaria la derivazione del fattore di accoppiamento che, per onde ottiche con la stessa intensità è espresso dalla seguente formula:

$$K = \frac{a_c c}{p \cdot \Delta f_0}, \quad (3.7)$$

dove a_c rappresenta il coefficiente di accoppiamento del campo, c la velocità della luce e p il perimetro della cavità. Come si può evincere dall'equazione 3.7 è presente un rapporto di proporzionalità inversa tra K e a_c , che indica la difficoltà nell'annullamento totale del fenomeno di lock-in. Difatti, il valore del coefficiente di accoppiamento del campo è ininfluenza se i modi oscillano a due frequenze uguali, cioè $\Delta f_0 \approx 0$, perchè il valore di K tenderà a essere molto grande, indipendentemente dalle variazioni di p e a_c . Agendo sul valore del coefficiente a_c si può eventualmente diminuire il fenomeno dell'accoppiamento in frequenza,

lavorando sul più comune motivo che lo genera: l'irregolarità degli specchi. Le superfici riflettenti sono descritte dal coefficiente δ , indicatore della percentuale della luce diffusa rispetto a quella riflessa, che risente di una diminuzione nella frequenza di propagazione, avendo perso dei fotoni che deflettono dalla traiettoria. Un normale specchio d'interferenza a multistrato ottiene un $\delta \approx 0,3 - 1\%$, ma si possono produrre specchi speciali, per le applicazioni come i giroscopi, che garantiscono un $\delta \approx 10^{-5}$. Questo termine è strettamente legato al coefficiente di accoppiamento del campo tramite la relazione:

$$a_c = \frac{\lambda}{\pi w_0 \sqrt{\delta}}, \quad (3.8)$$

con w_0 che indica la larghezza nominale del fascio ottico. Per analizzare il comportamento della configurazione base dell'RLG si consideri la figura 3.1. Per $K < 1$ si ottiene la condizione in frequenza che previene il fenomeno del "lock-in", equivalente a $\Delta f_0 < a_c(c/p)$, derivata dall'equazione 3.7. Prendendo $\lambda = 1\mu m$, $w_0 = 1mm$ ed un normale specchio con $\delta = 0.01$ si ottiene un valore tipico del coefficiente di accoppiamento pari a $a_c = 3 \cdot 10^{-5}$. La frequenza di bloccaggio corrispondente equivale a $\Delta f_0 < 3KHz$, che risulta in una rotazione non rilevata di $\omega = 1.8deg/sec$. Agendo solamente sul termine relativo all'irregolarità degli specchi, attraverso una superficie con $\delta = 10^{-5}$, si può diminuire la banda delle frequenze, acquisendo $\Omega = 200deg/h$.

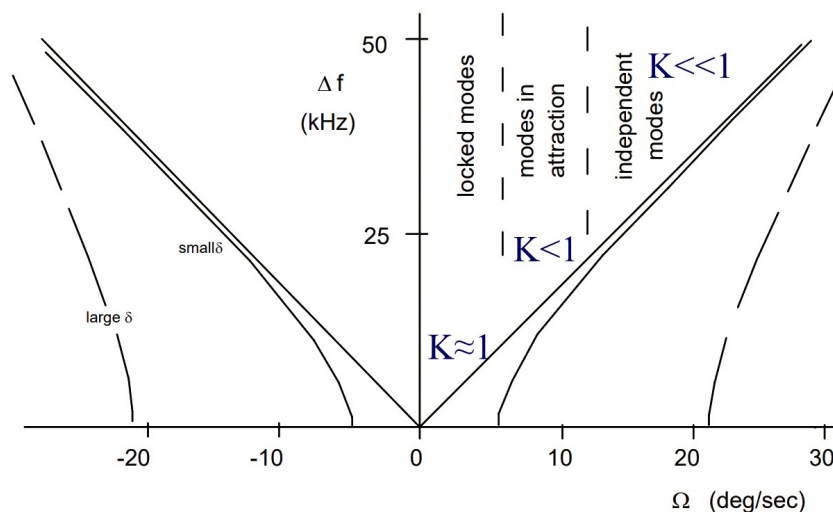


Figura 3.2: Schema della risposta della configurazione base dell'RLG

Nella figura 3.2 sono rappresentate le curve relative a valori rispettivamente-

te piccoli e grandi del coefficiente δ . Quando sono in gioco rotazioni dell'intero sistema del giroscopio queste sono rilevate in modo esatto ma, quando i modi risultano presentare frequenze simili, la configurazione base non riesce a funzionare correttamente. Per ovviare a questa problematica sono stati ingegnerizzati due modelli diversi di giroscopio laser ad anello: il DRLG, o Dithered laser gyro, e lo ZRLG, o Zeeman laser gyro.

3.3 Dithered RLG e Zeeman RLG

Nel giroscopio DRLG il problema del "lock-in" viene risolto tramite l'applicazione di una piccola vibrazione meccanica e periodica che previene l'errore. La

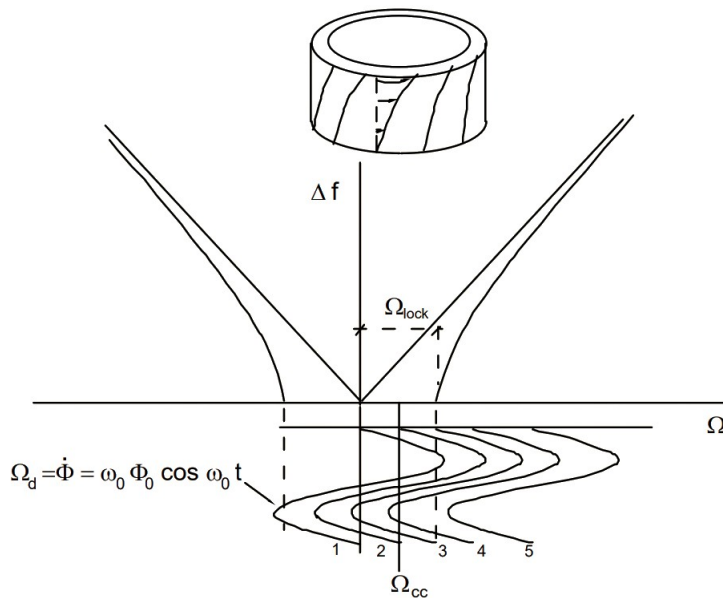


Figura 3.3: Segnale di uscita della configurazione DRLG.

rotazione è generata da un attuatore piezoceramico montato nella cavità interna del giroscopio, che esercita un movimento angolare della superficie superiore dello strumento rispetto a quella inferiore, a cui il dispositivo è ancorato. Il tubo piezoceramico vibra in direzione di taglio tangenziale se applicata una corrente, come indicano le frecce nella figura 3.3. La velocità angolare indotta Ω_d è sufficiente a far lavorare il dispositivo fuori dalla zona di "lock-in", riscontrata nella figura 3.1 per valori di $K \ll 1$. Ad esempio, con un'ampiezza angolare $\Phi = \Phi_0 \cdot \sin \omega_0 t$, la corrispondente velocità angolare è pari a $\Omega_d = d\Phi/dt = \omega_0 \Phi_0 \cdot \cos \omega_0 t$. Con-

siderando una rotazione $\Phi_0 = 1\text{mrad}$ con variazione di $w_0 = 60\text{rad/s}$ si ottiene una velocità di rotazione con ampiezza $\Omega_{d0} = 0.06\text{rad/s}$, sufficiente a lavorare fuori dall'intervallo di bloccaggio. L'approccio all'implementazione di un moto rotativo necessita di applicare al sistema un movimento meccanico, aumentando il consumo elettrico del dispositivo. Tuttavia esiste una soluzione più innovativa e efficiente: il Zeeman RLG. Questa tipologia di giroscopio utilizza una doppia separazione dei modi oscillatori per generare nella cavità quattro componenti che si propagano tutte con frequenze distinte. In condizione di riposo, senza la presenza di un campo magnetico indotto ($H = 0$), le due componenti oscillano alla stessa frequenza ν_0 . Avvicinando un magnete, secondo l'effetto Zeeman, si applica una birifrangenza ottica non reciproca, che divide ogni onda in due componenti che si propagano con frequenze diverse. La differenza tra le due è pari a $\Delta\nu_0$ 3.4. Entrambi i fasci ottici, amplificati dal laser, vengono così divisi in due onde polarizzate, rispettivamente in modo circolare destrorso (RC) e circolare sinistrorso (LC).

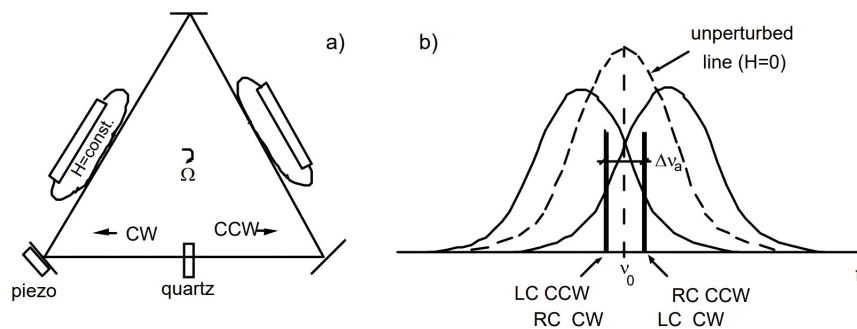


Figura 3.4: Percorso ottico (a) e rappresentazione in frequenza delle componenti (b) nello ZRLG.

Successivamente, una lastra di quarzo applica una birifrangenza ottica reciproca che allontana in frequenza, di un valore $\Delta\nu_a$, le componenti con la stessa polarizzazione 3.5. Quando viene applicata una rotazione all'intero sistema la frequenza delle onde che si propagano in senso orario aumenta, mentre, quella delle altre diminuisce. Quindi, le rispettive frequenze $f_1 - f_2$ e $f_3 - f_4$ restituiscono una differenza di frequenza $\Delta\nu$ proporzionale a Ω , incluso il segno, permettendo di recuperare il verso della rotazione.

Questo modello di giroscopio è lineare, indipendente da errori sistematici e privo di lock-in grazie all'ampia separazione in frequenza dei modi oscillatori. Tuttavia, uno svantaggio di questo dispositivo è la presenza di possibili interfe-

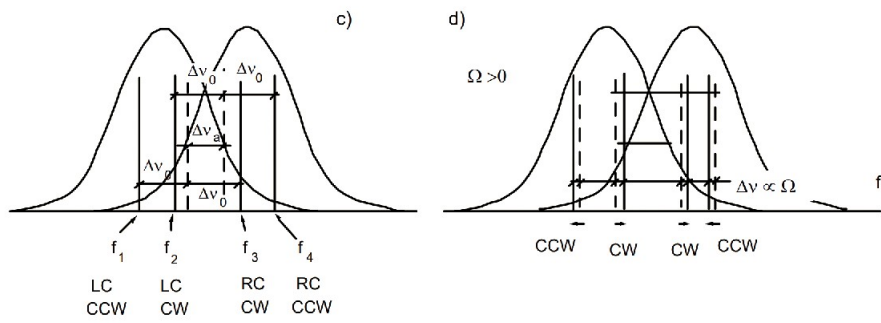


Figura 3.5: Rappresentazione dello sfasamento in frequenza nello ZRLG, rispettivamente con $\Omega = 0$ (c) e con $\Omega > 0$ (d).

renze tra le quattro onde propaganti all'interno della cavità, che possono indurre errori sul fattore di scala.

Capitolo 4

Giroscopi in fibra ottica

La tecnologia dei FOG è un ritrovato innovativo per la rilevazione dello sfasamento di Sagnac, utilizzando come mezzo di propagazione della luce, a differenza dell'RLG, la fibra ottica. Nel corso di questo capitolo, analogamente al precedente, verranno esaminate nel dettaglio la configurazione base del FOG e le limitazioni di questo strumento, concentrandosi sulla risoluzione delle tali.

4.1 Configurazione Base

Lo schema della configurazione base del giroscopio in fibra ottica è rappresentato nella figura 4.1. La luce, amplificata dalla sorgente e divisa dal Beamsplitter (BS)

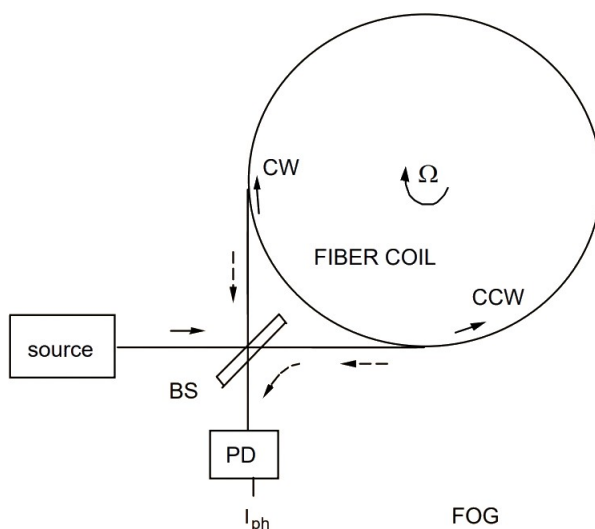


Figura 4.1: Configurazione base giroscopio in fibra ottica.

o divisore di fasci, si propaga all'interno di un cavo in fibra ottica monomodale, rispettivamente in senso orario (CW) e senso anti orario (CCW), e successivamente, alla fine del percorso, le due componenti sono sovrapposte e la risultante viene analizzata dal rilevatore di fotoni. A differenza dell'RLG, sensore attivo con una configurazione di lettura dello sfasamento interna al corpo dello strumento, il FOG ha una struttura di misurazione esterna composta da un rilevatore di fotoni (PD) che genera un segnale (I_{ph}) sensibile in ampiezza alla rotazione del sistema. Lo sfasamento di entrambe le componenti contropropaganti all'interno del circuito è la somma tra fase di Sagnac, rispettivamente $+\phi_s$ e $-\phi_s$, e l'angolo introdotto dal divisore di fasci (BS), pari a ϕ_{BS} , che contribuisce ad aggiungere un ritardo di $\phi_{BS} = \pi/2$ nel raggio rifratto nella sua superficie. Dalla figura 4.2, rappresentazione dettagliata del percorso ottico, si evince come l'onda che si diffonde in senso orario (CW) rifletta due volte sul divisore di fasci (BS), non accumulando sfasamenti, mentre, il raggio che si propaga in senso anti orario (CCW) e attraversa due volte il Beamsplitter (BS) presenta un ritardo equivalente a π . Per assicurare la reciprocità del percorso ottico è necessario ricombinare le due componenti all'uscita E' , nella quale entrambe le onde compiono una riflessione e una rifrazione nel divisore di fasci (BS).

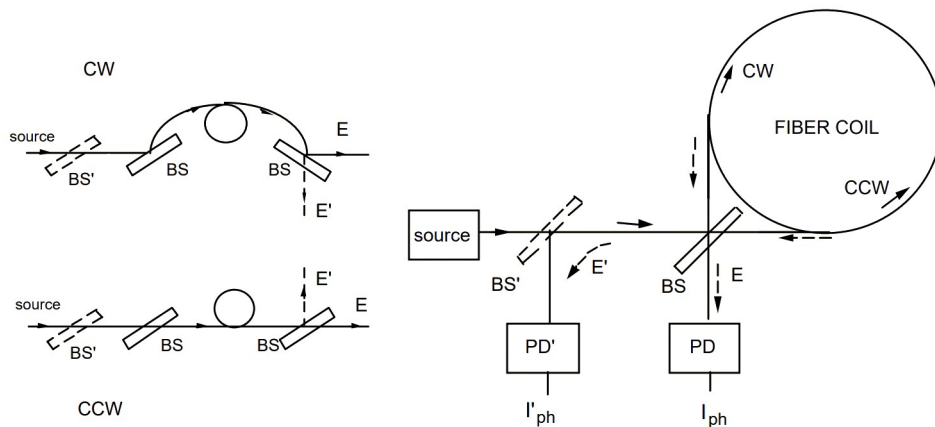


Figura 4.2: Configurazione base giroscopio in fibra ottica.

Il segnale osservato dal rilevatore di fotoni è la sovrapposizione dei due fasci contropropaganti, descritti dall'equazione:

$$E_{CW} = E_0 e^{+i\phi_s}, \quad E_{CCW} = E_0 e^{i(-\phi_s + 2\phi_{BS})}. \quad (4.1)$$

Il valore E_0 rappresenta l'intensità nominale del fascio luminoso. La forma

d'onda ottenuta in uscita dalla configurazione è una corrente, somma delle due componenti relative all'equazione 4.1, modulata in fase da ϕ_s ed equivalente a:

$$I_{ph} = |E_{CW} + E_{CCW}|^2 = E_0^2 \cdot [1 + \cos(2\phi_s + \pi)] = E_0^2 \cdot [1 - \cos 2\phi_s]. \quad (4.2)$$

Il fattore di scala dello strumento $R_\phi = 8\pi A/\lambda c$, ricavato dall'equazione 2.3 e pari al rapporto tra la velocità angolare Ω e lo sfasamento di Sagnac ϕ_s , dipende dall'Area dell'avvolgimento A , la lunghezza d'onda λ e la costante c . Considerando un FOG con parametri $\lambda = 1\mu m$, lunghezza della fibra $300m$ avvolta con diametro di $8cm$, si ottiene un fattore di scala R_ϕ , che nel caso della lettura di una rotazione di $\approx 1deg/h$, si ottiene uno sfasamento $2\phi_s \approx 1\mu rad$ e una variazione del segnale in uscita molto piccola, $\Delta I_{ph}/I_{ph} \approx 10^{-6}$, nel punto di massima sensibilità del coseno.

4.2 Problematiche e limitazioni

La configurazione base del giroscopio in fibra ottica è soggetto alla difficoltà nell'analisi del segnale in uscita dal rilevatore di fotoni. La corrente generata ha una forma d'onda in uscita, come visto precedentemente, descritta da coseno, con argomento pari allo sfasamento di Sagnac relativo alla rotazione del sistema. Questa dipendenza, tuttavia, non è lineare e piccole variazioni di Ω non sono rilevate, e il segno della stessa, come mostrato nella figura 4.3. Le correnti I_{ph} e I_{ph0} , sono acquisite dalle uscite del percorso E ed E' , identificate nello schema circuitale 4.2, dove entrambi i fasci relativi ai rispettivi tragitti accumulano lo stesso ritardo.

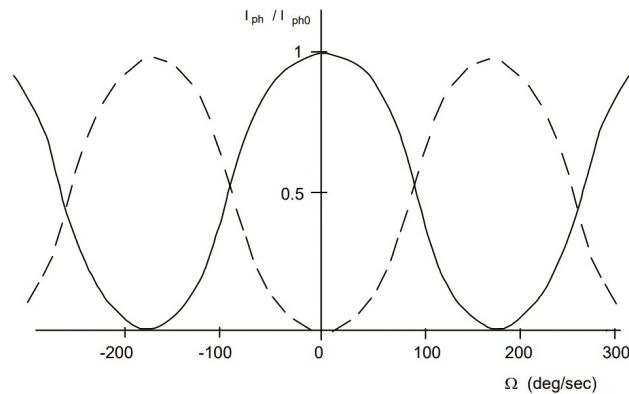


Figura 4.3: Segnale di uscita nella configurazione base del giroscopio in fibra ottica.

Si può riscontrare come tutti e due i segnali, I_{ph} e I_{ph0} , non contengano il segno di Ω , essendo la fase di entrambi pari a $\pm\pi/2$: il segno della corrente è uguale sia per i valori positivi che negativi di Ω . Il tentativo di aggiungere uno sfasamento, per compensare questo fenomeno, risulta molto difficile perchè si necessita di modificare l'argomento del coseno, ϕ_s equazione 4.2, con la precisione dell'ordine dei μrad . La non linearità della forma d'onda in uscita al giroscopio è una limitazione nella configurazione di questo sensore e, dopo vari approcci alla risoluzione del problema, si è arrivati all'implementazione della modulazione in fase del segnale.

4.3 Configurazione FOG ad anello aperto e ad anello chiuso

L'introduzione della modulazione in fase del segnale in uscita dal giroscopio deriva dall'analisi della sinusoide in figura 4.3. Per variazioni piccole dello sfasamento di

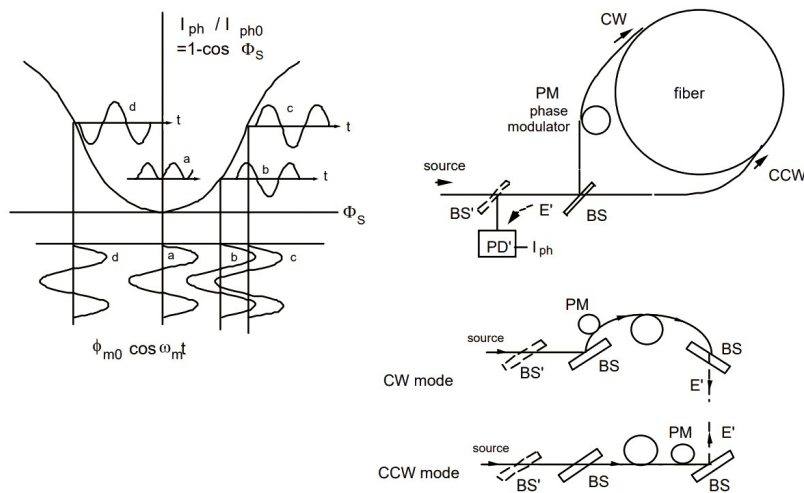


Figura 4.4: Configurazione FOG ad anello aperto con modulatore di fase

Sagnac, cioè $\Phi_s = 2\phi_s \approx 0$, la corrente generata dal rilevatore di fotoni (PD) è pari a zero, risultato derivato dall'equazione 4.2 sostituendo con zero l'argomento del coseno. Introducendo una modulazione di fase alla grandezza Φ_s , di valore $\phi_m = \phi_{m0} \cdot \cos \omega_m t$, la corrente in uscita risulterà modulata alla frequenza $f_m = \omega_m / 2\pi$, permettendo di recuperare il segno di Ω come descritto dalla figura 4.3. Gli esempi a , b , c e d mostrano come varia l'identificazione del valore di Ω dalla corrente

generata dal rivelatore di fotoni, difatti, nel segnale a le sinusoidi rispettive a I_{ph}/I_{ph0} e Φ_s sono in controfase una rispetto all'altra, mentre nella forma d'onda d , risultano in fase, così da ottenere il verso della rotazione. Per implementare la modulazione in fase all'interno della configurazione ad anello aperto del FOG è necessario inserire un elemento non reciproco nel percorso di propagazione ottico, essendo il segnale ottenuto dallo sfasamento di Sagnac non reciproco, perchè le due componenti contropropaganti percorrono lunghezze diverse in caso di rotazione del sistema (il percorso non è uguale). Il modo più stabile per immettere uno sfasamento non reciproco attraverso uno sfasamento reciproco è introducendo un modulatore di fase asimmetrico in entrambi i circuiti ottici, in due posizioni diverse per ciascuno. Il contributo di questo componente (PM) è pari a $\Phi_m(t) = \Phi_{m0} \cdot \cos w_m t$, situato nei punti descritti in figura 4.3. Di conseguenza, le onde propaganti in senso orario (CW) ed anti orario (CCW) subiscono un ritardo di fase, rispettivamente Φ_t e $\Phi(t+\tau)$, dove $\tau = L/v$ è il tempo di transito della radiazione nella fibra ottica di lunghezza complessiva L e la differenza di fase osservata dal rivelatore è quindi:

$$\begin{aligned}\Phi_{CW} - \Phi_{CCW} &= \Phi_s + \Phi_{m0} \cdot [\cos w_m(t - T/2) - \cos w_m(t + T/2)] \\ &= \Phi_s + 2\Phi_{m0} \cdot \sin w_m t \cdot \sin w_m T/2 \\ &= \Phi_s + 2\Phi_0 \cdot \sin w_m t.\end{aligned}\tag{4.3}$$

I termini $T/2$ e $-T/2$ sono ritardi introdotti dall'allungamento del percorso ottico, mentre $\Phi_0 = \Phi_{m0} \cdot \sin w_m T/2$, indica l'effettiva deviazione di fase successiva all'implementazione del modulatore, che può essere annullata con una frequenza di pari al reciproco del ritardo aggiunto dallo stesso. Utilizzando $f = 1/2T$, l'inverso del tempo di propagazione all'interno dell'avvolgimento, il contributo del termine aggiunto dal modulatore risulta ininfluenza e il segnale osservato dal rivelatore di fotoni (PD) è una forma d'onda del tipo:

$$I_{ph}/I_{ph0} = 1 + \cos(\Phi_s + \Phi_0 \cdot \sin w_m t).\tag{4.4}$$

Per analizzare questa funzione è necessario espandere il termine della ondulatorio in serie di w_m attraverso le funzioni di Bessel del primo tipo $J_n(x)$ [1], metodo per la generalizzazione di funzioni sinusoidali, ottenendo una forma d'onda scomposta

pari a:

$$I_{ph}/I_{ph0} = 1 + [J_0(\Phi_0) + 2 \cdot \sum_{k=1, \infty} J_{2k}(\Phi_0) \cdot \cos 2kw_m t] \cdot \cos \Phi_s \quad (4.5)$$

$$+ [2 \cdot \sum_{k=1, \infty} J_{2k-1}(\Phi_0) \cdot \cos (2k-1)w_m t] \cdot \sin \Phi_s.$$

Il segnale ottenuto contiene tutte le componenti armoniche modulate alla frequenza w_m , rispettivamente proporzionali a $\sin \Phi_s$ per valori di k dispari, con dipendenza lineare per $\Omega \approx 0$, e al coseno per quelli pari. Introducendo un ritardo nella propagazione che massimizza la funzione di Bessel, pari a $\Phi_0 = 1.8rad$ che implica $2J_1(\Phi_0) = 1.16$ (fattore di scala), e implementando un amplificatore per il lock-in, dispositivo per il filtraggio e l'estrazione di $\cos w_m t$, l'ampiezza è modulata in ampiezza dal $\sin \Phi_s$, con il rispettivo segno. La rappresentazione grafica del segnale equivalente è mostrata nella figura 4.5.

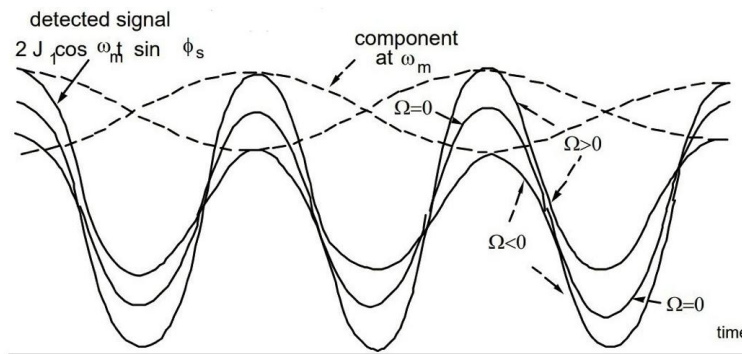


Figura 4.5: Forma d'onda risultante rilevata dal PD.

A riposo, $\Omega = 0$, la corrente presenta dei picchi tutti con la stessa ampiezza. Quando è applicata una rotazione al sistema, con $\Omega > 0$, i picchi relativi alle armoniche dispari sono più alti di quelli relativi alle componenti pari, producendo una differenza tra le ampiezze che coincide con la sinusoide, descritta dalla linea tratteggiata. Mentre, per valori di $\Omega < 0$ sono i picchi delle armoniche pari a risultare più alti di quelli relativi alle componenti dispari, risultando in una sinusoide sfasata rispetto alla precedente e permettendo di recuperare il segno della rotazione. Tuttavia, un importante problema di tale segnale è la non linearità e il limitato intervallo dinamico della forma d'onda in uscita, che può rappresentare una limitazione in campo applicativo. L'introduzione di uno schema circuitale con la retroazione e la conversione da analogico a digitale e viceversa è una soluzione che ha permesso di migliorare le prestazioni della configurazione ad anello aperto.

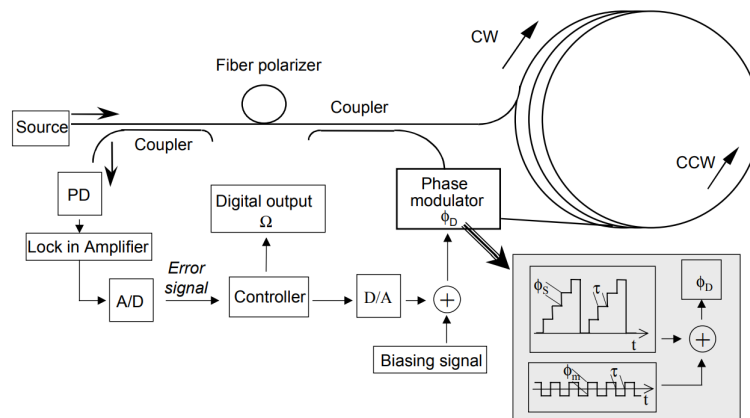


Figura 4.6: Configurazione FOG ad anello chiuso.

L'uscita dell'amplificatore lock-in, descritta nella figura 4.5, viene campionata e quantizzata, producendo il segnale di errore, mantenuto attorno allo zero dalla retroazione digitale. Il campionamento per la conversione da analogico a digitale è eseguito alla frequenza che corrisponde al reciproco del tempo di transito della radiazione τ attraverso il percorso ottico, così da sincronizzare il segnale della rampa e della modulazione di fase, pilotata dal controller che genera intervalli di ampiezza pari allo spostamento di Sagnac e durata τ . Invece il reset della rampa è eseguito automaticamente dal convertitore, quando avviene il superamento del limite prefissato di 2π in ampiezza. In questo schema, la velocità di rotazione è estrapolata direttamente, in formato digitale, dal segnale di errore. Infine, si può sottolineare che il giroscopio a circuito chiuso richiede una modulazione di fase a banda larga, a differenza dell'RLG che utilizza un attuatore piezoceramico. Invece dell'implementazione di questa tecnica viene fabbricato un modulatore in tecnologia al niobato di litio, integrando tutto il circuito in un'unica scheda senza componenti in movimento. Il giroscopio in fibra ottica ha subito un significativo sviluppo e, dopo anni di ricerca e di ingegnerizzazione della configurazione digitale ad anello chiuso, può essere considerato in grado di competere con l'ormai efficiente RLG.

Capitolo 5

Confronto tra le due tecnologie

Entrambi i giroscopi, come visto precedentemente, sono progettati per confrontare fasci di luce che viaggiano in senso orario e senso antiorario attraverso un percorso ottico. L'indirizzamento della luce nel circuito è attuato da degli specchi nell'RLG e da un avvolgimento di fibra ottica monomodale nel FOG. Questi due mezzi di propagazione ottici presentano diverse caratteristiche e problematiche, come la forte sensibilità dai disturbi elettromagnetici da parte della configurazione laser ad anello, di cui la fibra ottica non risente. Inoltre, vista la presenza del gas per l'amplificazione ottica, l'RLG vede una vita stimata dello strumento limitata, al contrario del FOG che, data la configurazione modulare, necessita solamente di manutenzione del circuito elettronico, che può essere eventualmente sostituito. Tuttavia, il giroscopio laser ad anello, essendo una tecnologia più sviluppata, ottiene prestazioni di gran lunga superiori, come una sensibilità che varia da $0.001^\circ/h - 0.01^\circ/h$, a differenza del dispositivo in fibra ottica che raggiunge ordini di grandezza maggiori, circa $0.1^\circ/h - 1^\circ/h$. La scala di misurazione di entrambi gli strumenti si aggira attorno agli stessi valori, con un intervallo da $100^\circ/s$ a $1000^\circ/s$. D'altra parte, il fattore di scala è di due ordini di grandezza differente, pari a 10^{-5} per l'RLG e 10^{-3} per il FOG, fattore indicatore di scalabilità e flessibilità della misurazione. Difatti, nel giroscopio in fibra ottica si può incrementare la precisione, come visto nell'equazione 2.3, solamente aumentando l'area A che è strettamente legata al numero di avvolgimenti N . Anche se questo strumento non presenta la stessa precisione dell'RLG, il FOG ha flessibilità maggiore in campo costruttivo, viste le sue dimensioni ridotte e accoppiate a tempi rapidi di accensione e il basso consumo elettrico, che permette al dispositivo una forte scalabilità dimensionale. Le dimensioni tipiche di un giroscopio sono pari a $15\text{cm} \times 6\text{cm}$, nel caso della tecnologia laser ad anello, mentre, di $8\text{cm} \times 4\text{cm}$

nei sensori inerziali in fibra ottica. Le caratteristiche elencate forniscono un'idea sui campi di applicazione di entrambi i giroscopi, che vedono l'RLG come uno strumento molto preciso ma pesante e voluminoso, implementato nei settori della navigazione spaziale ed aerea e sistemi di orientamento dei satelliti, mentre il FOG, di dimensioni ridotte, leggero ma con prestazioni di livello inferiore, installato in ambito commerciale ed industriale. Tuttavia, per fornire un confronto più approfondito tra le tecnologie sono analizzate due diverse unità di misurazione inerziale, o IMU, una composta da tre giroscopi RLG e una da tre FOG, uno per ogni asse.

5.1 Confronto tra IMU

Le unità di misurazione inerziale, o IMU, sono dei sistemi per la determinazione della posizione, della velocità e dell'orientamento, installate in applicativi che variano dalla navigazione aerospaziale alla robotica, fino ai sistemi di stabilizzazione nei dispositivi elettronici. Le due IMU che verranno analizzate sono rappresentate nella figura 5.1, entrambe sono prodotte dalla Honeywell, azienda americana produttrice di sistemi elettronici. L'unità a sinistra, la HG5700 è una IMU per la navigazione in ambienti privi di GPS, costituita da tre giroscopi laser ad anello e tre accelerometri con fascio vibrante al quarzo (VBA), mentre quella a destra è la HG2802, una IMU di grado tattico, composta da tre giroscopi in fibra ottica e tre accelerometri micro-meccanici (MEMS) di ultima generazione. Una differen-



Figura 5.1: IMU prodotte dalla Honeywell.

za sostanziale tra i due dispositivi sono il peso e le dimensioni: la HG5700 [6], implementata con gli RLG, ha un carico di $1.6kg$ con altezza di $10.16cm$ e volume pari a $737cm^3$ mentre, la HG2802 [5], basata su FOG, ha dimensioni di $518cm^3$ con altezza di $8.35cm$ e peso pari a $750g$. Le prestazioni delle due unità, vista la

Numero di serie	Ripetibilità del Bias ($^{\circ}/h$)	Stabilità del Bias ($^{\circ}/h$)	ARW ($^{\circ}/h$)
HG5700BB01	0.070	0.02	0.012
HG5700AB01	0.140	0.04	0.025
HG2802AA01	1.0	0.05	0.05
HG2802BA01	1.0	0.05	0.03

Tabella 5.1: Tabella parametri IMU

tecnologia su cui si basano, sono completamente diverse, con scala di rilevazione rispettivamente di $\pm 1074^{\circ}/s$ per la HG5700 e $\pm 900^{\circ}/s$ per la HG2802, con l'IMU sviluppata con gli RLG capace di raggiungere intervalli di temperature da -54° a $+85^{\circ}$ mentre, l'unità composta dai FOG solamente dai -40° ai $+71^{\circ}$, per la forte influenza del calore sulla fibra ottica. I parametri di rumore, descritti in precedenza, presentano ordini di grandezza diversi, evidenziando la precisione dei sistemi con giroscopi laser ad anello. Nella tabella 5.1, compilata con i datasheet, sono mostrati i valori calcolati sull'intera scala di temperature di funzionamento di due prodotti per ciascuno dei sistema di misurazione inerziale, dove primi sei termini nel numero di serie indicano la tecnologia.

I dati elencati si riferiscono ai parametri di angle random walk, di stabilità del bias e ripetibilità del bias, valore che rappresenta l'errore residuo a basse frequenze dopo la calibrazione, dovuto agli effetti delle variazioni di accensione, spegnimento e temperatura. Tuttavia, i consumi di potenza dei due giroscopi sono dello stesso ordine di grandezza, con la HG5700 a $7W$ e la HG2902 a $10W$, con tempi di accensione molto più veloci per l'unità in fibra ottica. Le differenze costruttive e prestazionali dei due sistemi di misurazione inerziali indicano come possano essere applicati in campi diversi. L'unità HG5700 è stata installata in velivoli senza pilota per il monitoraggio e la mappatura, piattaforme di stabilizzazione, navigazione spaziale e sistemi di perforazione e rilevazioni terrestri e oceaniche, vista la sua precisione e affidabilità, a discapito del peso e delle dimensioni. Al contrario, l'unità HG2802, vista la sua compattezza, leggerezza e configurazione versatile, ha visto applicazione in campo commerciale, industriale e militare, con implementazione nella robotica, nella navigazione in ambienti acusticamente sensibili, come in acqua, e sistemi di puntamento.

Capitolo 6

Conclusione

Lo sviluppo dei sensori ottici è tutt'ora un ambito di ricerca molto importante nell'ingegnerizzazione di sistemi efficienti con alte prestazioni, che visto l'utilizzo della luce, trova limitazioni solamente nella componentistica elettronica. In particolare, le due tecnologie approfondite in questo testo, hanno raggiunto livelli di affidabilità e precisione sufficienti per soddisfare necessità commerciali, industriali e tattiche, visti i numerosi campi di applicazione di entrambi i sensori. Inoltre, l'implementazione di nuove tecnologie, come la fibra ottica multimodale, il LED super luminescente (SLED) ed il laser GaAlAs, diodo laser a semiconduttore che emette frequenze vicino all'infrarosso, vede questi dispositivi in continua evoluzione nella ricerca verso il sistema di rilevazione con meno compromessi possibili. In aggiunta, negli ultimi anni sono stati studiati nuovi approcci per applicazioni meno esigenti, come l'automotive, la robotica e l'elettronica di consumo, che richiedono riduzioni di dimensioni e peso verso la realizzazione di sensori con prestazioni ridotte. Dopo vari tentativi nel perfezionamento dei FOG per questi settori, la ricerca si è concentrata verso lo sviluppo dei giroscopi ad ottica integrata (IOG) e dei micro sistemi elettromeccanici (MEMS). L'IOG mira a integrare le funzioni dell'interferometro a configurazione interna, come l'RLG, o esterna, come il FOG, in una superficie che può essere sia attiva, come un chip semiconduttore, che passiva, come la Silica su Silicio (SOS). Il giroscopio MEMS invece, risulta più maturo ed è un'evoluzione dei sensori inerziali meccanici, tuttavia fabbricato con la moderna tecnologia della microlavorazione del silicio, permettendo di ridurre le dimensioni del dispositivo fino a $0,1\text{mm}$. Queste due nuove tecnologie, insieme agli ormai sviluppati sensori laser ad anello ed in fibra ottica, assicurano la realizzazione dello strumento di rilevazione adatto ad ogni applicazione e necessità, rispettando le richieste di prestazioni, dimensioni ed affidabilità.

Bibliografia

- [1] Milton Abramowitz and Irene A. Stegun, editors. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, USA, tenth printing edition, 1972.
- [2] F.R.I.N. e Macroni Electronic System Ltd. A.D. KING, B.Sc. Inertial navigation – forty years of evolution. *GEC REVIEW*, VOL. 13, NO. 3, 1998.
- [3] IEEE Aerospace, Electronic Systems Society. Gyro, Accelerometer Panel, Institute of Electrical, and Electronics Engineers. IEEE standard specification format guide and test procedure for single-axis interferometric fiber optic gyros. *IEEE Std 952-1997*, pages 1–84, 1998.
- [4] Silvano Donati. *Electro-optical instrumentation: sensing and measuring with lasers*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River (NJ), 2004.
- [5] Honeywell. *HG2802 Fiber Optic Gyro Inertial Measurement Unit*, Jun 2023.
- [6] Honeywell. *HG5700 Inertial Measurement Unit*, Nov 2023.
- [7] Andrew Rawicz. Theodore Harold Maiman and the invention of laser. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 7138, 11 2008.
- [8] Louis Scheffer. Better lunar ranges with fewer photons - resolving the lunar retro-reflectors. 05 2005.
- [9] Alberto Soldà. *Realizzazione e caratterizzazione di un setup di misura per la valutazione del rumore di fondo di giroscopi*. Tesi magistrale, POLITECNICO DI MILANO, luglio 2010. Available at <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/2483>.