

SENSORE DIREZIONALE DI CAMPO MAGNETICO TUTTO FIBRA

V. Annovazzi Lodi, S. Donati, S. Merlo
Dipartimento di Elettronica, Università di Pavia,
Via Ferrata 1, 27100 Pavia

Abstract. We present an all fiber sensor for magnetic field measurements in industrial environment. The device consists of a nonreciprocal rotator based on the Faraday effect in a compact figure-8 fiber coil where the bending retardation matches one wavelength per turn. This configuration is suitable for high responsivity since it can be easily trimmed even for a number of turns in excess of 100. Moreover, it selectively measures the field component parallel to the sensor major axis, while performing high immunity to the orthogonal components.

1. Introduzione

Come è noto, il rotatore non reciproco è un componente fondamentale per la realizzazione di dispositivi passivi per le telecomunicazioni e le applicazioni di misura, come ad esempio l'isolatore ottico e i sensori di corrente e campo magnetico.

Il rotatore non reciproco tutto fibra si basa sull'effetto Faraday, che si manifesta come birifrangenza circolare non reciproca in un opportuno mezzo trasmissivo sottoposto ad un campo magnetico H . La rotazione totale Φ è data dalla ben nota espressione:

$$\Phi = V \int_L \underline{H} \cdot d\underline{l} \quad (1)$$

Un notevole problema nella realizzazione tutto fibra è costituito dalla costante di Verdet V della guida. Escludendo allo stato attuale l'impiego di fibre speciali in vetro drogato, di elevato costo e caratteristiche di guida poco controllate, si deve affrontare il problema di realizzare un componente compatto utilizzando un cammino in fibra relativamente lungo poiché per la silice la costante di Verdet è relativamente bassa ($V=1 \mu\text{rad/A}$ alla lunghezza d'onda di 1300 nm). Ad esempio, un campo magnetico $H=100$ Gauss darebbe una rotazione di pochi gradi su di un tratto di fibra di alcuni metri.

Una soluzione adeguata è offerta dai dispositivi a controllo di birifrangenza. Si tratta, nel caso più semplice, di avvolgimenti di fibra monomodale a forma di solenoide cilindrico, il cui principio di funzionamento si basa sulla sovrapposizione dell'effetto Faraday e dell'effetto di birifrangenza per curvatura. Nonostante in una fibra ideale (ovvero a birifrangenza nulla) l'eq. (1) lasci prevedere un effetto di rotazione nullo, è stato dimostrato [1] che un solenoide composto di N spire di raggio R costituisce un rotatore non reciproco se è soddisfatta la condizione che la singola spira sia esattamente un ritardatore 2π , e se inoltre il campo magnetico è parallelo al vettore d'onda nel punto d'iniezione. La rotazione totale vale $\Phi = VHRN\pi$ ed è indipendente dalla polarizzazione d'ingresso.

La geometria cilindrica è stata proposta da tempo per costruire rotatori e sensori vettoriali di campo magnetico [2-5]. Occorre utilizzare una fibra che abbia un ritardo di fase 2π per un raggio di curvatura R dell'ordine del cm, per lavorare con un numero di spire N non eccessivo e per mantenere trascurabili le perdite per curvatura della fibra alla lunghezza d'onda di lavoro. In pratica, si utilizza una fibra ad alto cutoff e si opera in regime monomodale grazie all'elevata attenuazione per curvatura dei modi superiori. Tuttavia, la geometria cilindrica non si presta facilmente alla realizzazione di un sensore ad elevata responsività ove si deve cumulare la rotazione su di un gran numero di spire (>50), poiché un errore anche piccolo nel ritardo di fase della singola spira rispetto al valore nominale 2π si cumula lungo tutto l'avvolgimento provocando una riduzione dell'effetto ed una ellitticizzazione del campo emergente [4, 5]. In

pratica, si richiederebbero precisioni dell' ordine di $1\mu\text{m}$ nel realizzare il supporto dell' avvolgimento.

2. La geometria ad otto

Per questo motivo si e' individuata la nuova configurazione riportata in Fig.1, dove l'avvolgimento, a forma di otto, e' avvolto su due mandrini cilindrici. In questo caso, ciascuna meta' circolare di ogni spira ha ritardo π , ed il raggio di curvatura richiesto e' percio' doppio. Questa struttura si presta ad essere facilmente allineata, come verra' spiegato nel seguito. Mentre sono reperibili fibre commerciali in prima finestra con i requisiti per l' avvolgimento cilindrico, l' avvolgimento ad otto si realizza meglio in seconda finestra poiche' esistono fibre oligomodali (Ensign F2300 D/O, lunghezza d'onda di cutoff 1700 nm) che soddisfano a $\lambda=1300$ nm le condizioni di propagazione monomodale a bassa attenuazione senza richiedere raggi eccessivi dell' avvolgimento. Il raggio di curvatura R per una dato sfasamento per giro e' infatti inversamente proporzionale a λ [3].

L' analisi dell' evoluzione della polarizzazione nell' avvolgimento di Fig.1 si puo' sviluppare come indicato in [1, 4, 6]. Si dimostra che per ottenere un effetto di pura rotazione non reciproca e' necessario scegliere opportunamente sia la direzione di H sia il punto di iniezione della radiazione. Ad es., se i punti di ingresso e di uscita nell'avvolgimento sono quelli indicati con A in Fig.1, l' effetto e' quello desiderato ed e' massimo quando $\alpha=\pi/2$, ovvero occorre applicare il campo H parallelamente all' asse maggiore. Sono possibili varianti a questa geometria, applicando ad es. il campo lungo l' asse minore e cambiando opportunamente il punto d' iniezione (punto B in figura) come pure la direzione di H ($\alpha=0$). Questa variante e' utile per realizzare un isolatore, poiche' permette di utilizzare un magnete con traferro piu' ridotto. La precedente rappresenta pero' la scelta adatta a realizzare un sensore, perche' assume un campo uniforme e inoltre massimizza la rotazione, che vale

$$\Phi=(16/3)VHR \quad (2)$$

solo con una leggera riduzione rispetto al caso del solenoide semplice.

E' necessario valutare quantitativamente, soprattutto per gli avvolgimenti composti di un elevato numero di spire, quali siano gli effetti di inevitabili piccoli errori nel controllo della birifrangenza, che possono dipendere dalle tolleranze di fabbricazione del supporto della fibra o della fibra stessa.

Si puo' dimostrare che un errore sistematico nella birifrangenza lineare per curvatura rispetto al valore nominale comporta una ellitticizzazione dell' uscita ed inoltre una riduzione dell' effetto di rotazione di un fattore $\text{sinc}(2N\mu)$, ove μ e' l' errore di sfasamento per mezza spira (Fig.2). Analogamente al caso del solenoide cilindrico, per contenere la riduzione entro il 10%, si richiederebbero tolleranze dell' ordine di $1-5\mu\text{m}$, un requisito indubbiamente non facile da soddisfare in avvolgimenti lunghi. Fortunatamente, nella geometria ad otto, e' relativamente facile eliminare l' errore sistematico poiche' il rotatore puo' essere facilmente allineato variando leggermente la distanza fra i due cilindri del supporto con una opportuna meccanica di attuazione, agendo cosi' sulla birifrangenza di ogni spira.

Questo metodo ha due effetti principali [6]: i) modifica della birifrangenza da tensione meccanica, e ii) variazione della lunghezza della fibra avvolta sul mandrino e percio' soggetta alla birifrangenza per curvatura.

Con riferimento alla Fig.3, detta 2D la distanza fra i mandrini quando l' avvolgimento e' costruito (a tensione trascurabile), mentre $2(D+d)$ e' la distanza dopo la regolazione, la lunghezza di fibra che giace sul mandrino e' per un singolo giro :

$$S = 4 AB = 4 R \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin \left(\frac{R}{R+D} \right) \right) \quad (3)$$

per $d=0$, e varia via via che il punto di tangenza B si sposta al crescere della distanza. La lunghezza totale L di un giro ($d=0$) e' perciò:

$$L=S+4(D^2+2DR)^{1/2}. \quad (4)$$

Dall' eq. 4 possiamo calcolare la deformazione $\Delta L/L = [L(D)-L(D+d)]/L(D)$ e infine ricavare lo sfasamento dovuto alla tensione (punto i) dalle note espressioni [3]. In Fig.3 si riporta la correzione $\Delta\phi$ sullo sfasamento totale al variare di d nel campo 1-100 μm ($D=1\text{mm}$), confrontandolo con l' errore tipico calcolato su di un singolo giro per un errore $\Delta R=10 \mu\text{m}$ sul raggio.

Dalla Fig.3 parrebbe necessaria, per effettuare il trimming, una elevata risoluzione in d; tuttavia, la presenza del rivestimento primario riduce significativamente lo sforzo applicato alla fibra. In pratica, la correzione di un errore tipico di una singola spira (0.01 rad) si ottiene sperimentalmente variando d di 1-10 μm .

La variazione di lunghezza $\Delta S(d)$ dovuta alla variazione di d (punto ii) da' una correzione in $\Delta\phi$ che e' pure riportata in in Fig.3 e rappresenta di norma solo un piccolo effetto rispetto alla tensione.

Questi risultati si ottengono assumendo che la fibra abbia gli estremi bloccati. Se la fibra puo' scorrere, l' allineamento si effettua principalmente per variazione della lunghezza appoggiata al mandrino (punto ii) e la risoluzione richiesta in d e' fortemente ridotta. Di solito, con elevati valori di N l' attrito impedisce alla fibra di scorrere. Tuttavia, e' sempre possibile cambiare la birifrangenza iniziale rilasciando l' avvolgimento e ricompattandolo ad un nuovo valore di D. In questo modo, la tensione nell' avvolgimento puo' essere tenuta sempre bassa.

Una volta annullato l'errore sistematico, rimane da considerare solo un residuo errore variabile casualmente da spira a spira. Nell' ipotesi di errore piccolo sulla singola spira, uniformemente distribuito e a media nulla, si dimostra [6] che la riduzione della rotazione di Faraday non e' superiore a quella dovuta alla sola spira peggiore. Cio' rende assai meno stringenti le tolleranze di lavorazione.

Un'ulteriore caratteristica della struttura ad otto e' rappresentata dall' immunita' alle componenti ortogonali all' asse maggiore. Come mostrato nelle Fig.4, 5, il sensore trasduce in rotazione del piano di polarizzazione la sola componente di H orientata secondo il suo asse maggiore. L' uscita del sensore e' invece essenzialmente indipendente dalla componente ortogonale anche in presenza di moderati errori di sfasamento. Cio' comporta una piu' facile elaborazione del segnale di uscita rispetto al solenoide, che, pur col vantaggio di essere un sensore vettoriale (in cui le componenti di H in un piano sono trasdotte in rotazione ed ellitticita' e sono rivelabili mediante analisi in fase e quadratura) soffre di diafonia fra le uscite per le due componenti, qualora non sia perfettamente allineato [4, 5].

Infine, il sensore ad otto meglio si presta, rispetto al solenoide, ad essere inserito per la misura entro il traferro di un magnete poiche' le code in fibra non devono essere orientate parallelamente alle linee di campo, ma possono essere poste di traverso al magnete. Allo scopo di realizzare una testa di misura le cui code siano poste dalla stessa parte rispetto al sensore, e' anche possibile modificare la geometria di Fig.1a aggiungendo un quarto di spira e compensando la birifrangenza aggiuntiva mediante una piccola spira $\lambda/4$ costruita sulla relativa coda.

3. Il sensore tutto fibra

Un prototipo di sensore in seconda finestra e' stato realizzato secondo lo schema di Fig.1, e viene attualmente studiato presso il nostro laboratorio. Si e' utilizzato un rotatore ad otto in configurazione 'verticale' (Fig. 1a) composto di $N=80$ spire di fibra Ensign F2300 D/O avvolta su due supporti cilindrici di raggio $R=5 \text{ mm}$. Il campo H e' misurato per analisi di polarizzazione, utilizzando un diodo laser in seconda finestra ed un polarizzatore [7] in fibra HB 800 (York) con estinzione di circa 30 dB, realizzando cosi' una struttura tutto fibra.

La regolazione funzionale e' stata realizzata inserendo il rotatore nel traferro di un magnete permanente e variando la distanza fra i due supporti con adeguata risoluzione grazie ad una apposita meccanica demoltiplicata con cunei di spinta inseriti in guide a coda di rondine. Nel rotatore si e' iniettato un campo polarizzato linearmente e l'uscita e' stata osservata con uno strumento analizzatore di polarizzazione. Si e' agito sulle meccaniche fino ad ottenere la rotazione massima con bassa ellitticita' residua. Per $N=80$ (equivalenti a 160 spire cilindriche) la responsivita' misurata e' prossima a quella teorica e la linearita' e' paragonabile a quella della struttura cilindrica, limitata principalmente dalla nonlinearita' di tipo seno dovuta alla rivelazione polarimetrica, riducibile con adeguati schemi di rivelazione o con elaborazione elettronica del segnale.

In conclusione, si e' dimostrata la fattibilita' di un rotatore ottico nella tecnologia tutto fibra con prestazioni adeguate all'impiego in applicazioni di sensoristica. Lo stesso principio e' stato anche impiegato per la realizzazione di un isolatore ottico in seconda finestra per telecomunicazioni [6].

Lavoro svolto mediante finanziamenti MURST 40% e SIRTl SpA.

Bibliografia

- [1] V. Annovazzi Lodi, S. Donati, *Optical and Quant. Electr.*, Vol.15 (1983), 381.
- [2] G. Day, D.N. Payne, A. J. Barlow, J.J. Ramskov-Hansen, *Opt. Lett.*, Vol.7 (1982), 238.
- [3] S. Donati, V. Annovazzi Lodi, T. Tambosso, *IEE Proceedings J*, vol.135 (1988), 372.
- [4] V. Annovazzi Lodi, S. Donati, S. Merlo, *Jour. Light. Techn.*, Vol.10 (1992), 2006.
- [5] V. Annovazzi Lodi, S. Donati, S. Merlo, L. Zucchelli, Proc. OFS-9, 293.
- [6] V. Annovazzi Lodi, S. Donati, S. Merlo, *Jour. Light. Techn.*, Vol.13 (1995), in press.
- [7] S. Donati, G. Martini, A. Faustini, atti di Fotonica 95, 289.

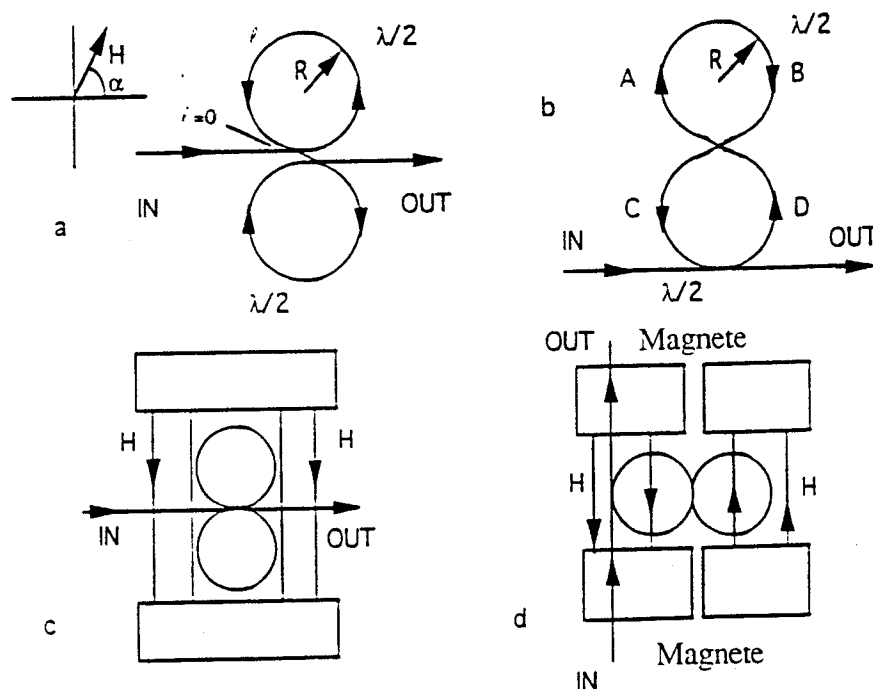


Fig.1 Schema del rotatore non reciproco con geometria ad 'otto'.

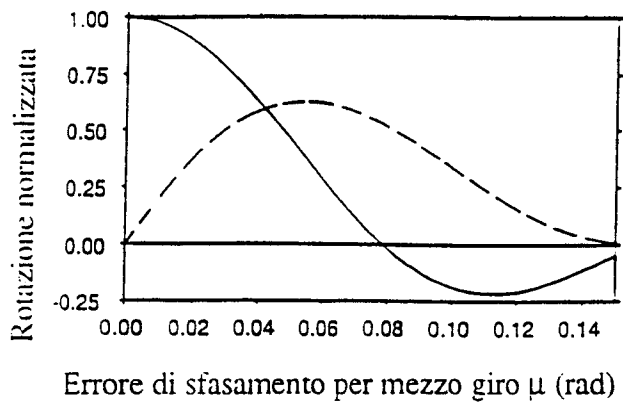


Fig.2 Angolo di rotazione normalizzato (linea continua) ed ellitticità (linea tratteggiata) per un avvolgimento ad 'otto' di 20 spire in funzione dell' errore di fase su mezza spira ($\alpha=\pi/2$).

Fig.3 Diagramma di trimming che mostra la correzione $\Delta\phi$ dovuta ad un incremento della distanza da $D=1\text{mm}$ a $D+d$.

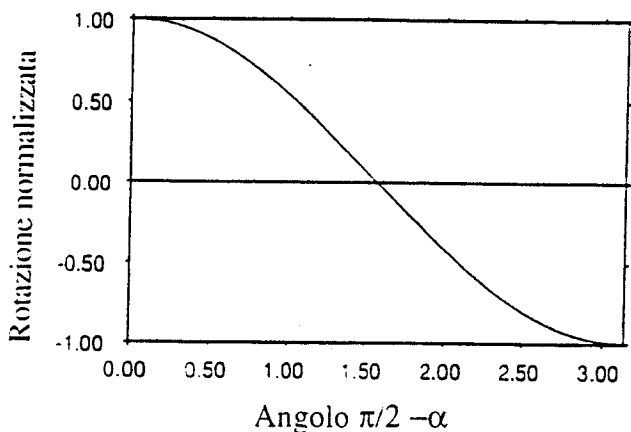
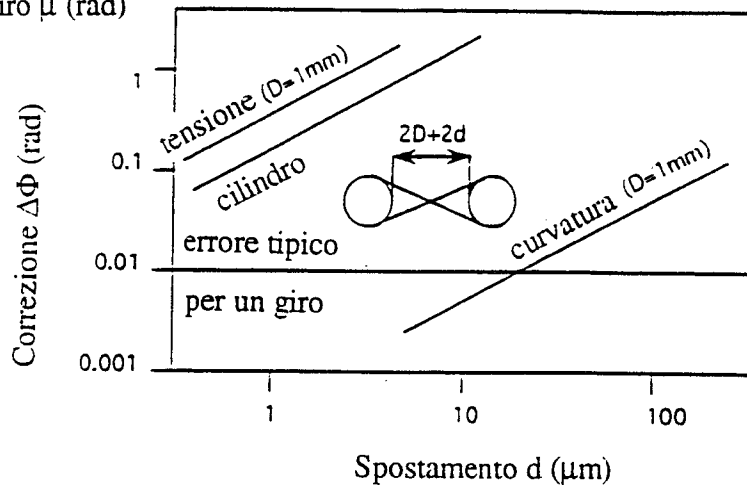


Fig.4 Angolo di rotazione normalizzato per un avvolgimento ad 'otto' in funzione dell'orientamento del campo magnetico.

Fig.5 Angolo di rotazione normalizzato (linea continua) ed ellitticità (linea tratteggiata) per un avvolgimento ad otto ($\alpha=0$).

