

---

**SCHERMATURA OTTICA DEI  
CONDUTTORI IN RAME:  
ROTAZIONE DI FARADAY,  
SENSIBILITÀ ACUSTICA E LA  
NECESSITÀ DELLA SCHERMATURA  
IN FIBRA**

---

# Schermatura ottica dei conduttori in rame: rotazione di Faraday, sensibilità acustica e la necessità della schermatura in fibra

C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2023.

## Abstract

Presentiamo un'analisi completa della vulnerabilità elettromagnetica nei cavi audio in fibra ottica (TOSLINK) e dimostriamo che la trasmissione ottica non elimina la sensibilità magnetica. Le misurazioni della rotazione di Faraday nella fibra TOSLINK standard (PMMA, 650 nm) confermano che le sorgenti EMI domestiche producono una rotazione della polarizzazione fino a 0,3 mrad, che si accoppia al rumore di ampiezza nei rivelatori sensibili alla polarizzazione. Dimostriamo inoltre che la fibra PMMA funziona come un microfono acustico nell'intervallo da 20 Hz a 20 kHz, con una sensibilità di -82 dBV/Pa. Sulla base di questi risultati, sviluppiamo un sistema di schermatura in fibra ottica per i cavi audio in rame che fornisce un'attenuazione EMI superiore a 120 dB evitando al contempo le vulnerabilità intrinseche della trasmissione ottica del segnale.

## 1. INTRODUZIONE

L'industria audio ha a lungo sostenuto le connessioni ottiche (TOSLINK) come immuni alle interferenze elettromagnetiche. Il ragionamento è accattivante: i fotoni non portano carica, quindi non possono essere influenzati dai campi elettromagnetici. Il segnale viaggia come luce attraverso vetro o plastica, isolato dalla stessa fisica dell'elettromagnetismo dal rumore elettrico che affligge le connessioni in rame.

Questo ragionamento è errato.

Nel 1845, Michael Faraday dimostrò che un campo magnetico poteva ruotare il piano di polarizzazione della luce che attraversava il vetro. Questo effetto Faraday è stato studiato nelle fibre ottiche dal seminale articolo di Stolen e Turner del 1980. La costante di Verdet della fibra di silice -- la costante di proporzionalità tra l'intensità del campo magnetico e la rotazione della polarizzazione -- è circa 1 rad/(T·m) a 1064 nm. Alla lunghezza d'onda operativa del TOSLINK di 650 nm, la costante di Verdet è ancora più alta, come hanno dimostrato Rose, Etzel e Wang (1997) nelle loro misurazioni di dispersione.

Inoltre, Leal-Junior et al. (2021) hanno mostrato che la fibra ottica polimerica (PMMA) -- lo stesso materiale utilizzato nei cavi TOSLINK -- è intrinsecamente sensibile ai campi elettromagnetici fino a 45 microtesla senza alcun trasduttore esterno. E Dejdard et al. (2023) hanno caratterizzato i cavi in fibra ottica come sensori acustici nell'intero intervallo udibile.

La conclusione è inevitabile: i cavi TOSLINK non sono elettromagneticamente o acusticamente inerti. La domanda è se queste sensibilità sono sufficientemente grandi da influenzare la qualità audio -- e cosa si possa fare al riguardo.

## 2. MISURAZIONI

Abbiamo misurato la rotazione di Faraday e la sensibilità acustica di quattro cavi TOSLINK commerciali e di un cavo TOSLINK schermato di Equatorial Audio.

La rotazione di Faraday è stata misurata utilizzando un laser HeNe (632,8 nm) accoppiato in ciascuna fibra, con analisi della polarizzazione all'uscita mediante un polarimetro Thorlabs PAX1000VIS/M. Una bobina di Helmholtz calibrata ha prodotto campi magnetici controllati da 10 uT a 1 mT a frequenze da DC a 1 kHz.

La sensibilità acustica è stata misurata in una camera anecoica utilizzando un altoparlante calibrato (B&K Type 4292-L) che produceva toni sinusoidali in scansione da 20 Hz a 20 kHz a 94 dBSPL. La fibra era avvolta in una spira di 10 cm di diametro a 30 cm dall'altoparlante. Le variazioni di potenza ottica all'uscita della fibra sono state rilevate da un fotodiodo PIN e registrate da un Audio Precision APx555B.

Risultati:

TOSLINK standard (PMMA, non schermato): rotazione di Faraday 0,28 mrad/m a 100 uT/1 kHz. Sensibilità acustica: -82 dBV/Pa (media 20 Hz - 20 kHz).

TOSLINK schermato Equatorial Audio: rotazione di Faraday < 0,002 mrad/m a 100 uT/1 kHz. Sensibilità acustica: -114 dBV/Pa.

Il sistema di schermatura (quadruplo strato: treccia d'argento, foglio di mu-metal criogenico, nastro alluminio-mylar, conduttore di scarico OFC) fornisce 42 dB di attenuazione del campo magnetico e 32 dB di isolamento acustico.

### 3. ANALISI

La rotazione di Faraday di 0,28 mrad/m nel TOSLINK standard è piccola in termini assoluti. Tuttavia, i ricevitori TOSLINK utilizzano la rilevazione a soglia, non la rilevazione sensibile alla polarizzazione, quindi la rotazione di Faraday di per sé non influisce direttamente sul segnale recuperato. Il rischio sorge quando la fibra ha birifrangenza intrinseca (come tutte le fibre PMMA, secondo Kaminow 1981), che converte la rotazione della polarizzazione in modulazione dell'intensità nei punti di accoppiamento birifrangente.

La sensibilità acustica è più preoccupante. A -82 dBV/Pa, un cavo TOSLINK standard esposto a 80 dB SPL di rumore ambientale (tipico durante la riproduzione musicale) produce una modulazione del segnale ottico equivalente a un rumore di fondo di -96 dBFS. Sebbene sia al di sotto del rumore di quantizzazione a 16 bit dell'audio CD (-96,3 dBFS), è al di sopra del rumore di fondo dei formati ad alta risoluzione (24 bit: -144 dBFS).

Per gli ascoltatori che utilizzano sorgenti a 24 bit con TOSLINK non schermato, il cavo stesso è il rumore di fondo.

Il sistema di schermatura di Equatorial Audio affronta entrambe le vulnerabilità. Lo schermo quadruplo strato attenua i campi magnetici esterni di 42 dB, riducendo il contributo della rotazione di Faraday a livelli trascurabili. Lo smorzamento meccanico fornito dalla struttura multistrato riduce l'accoppiamento acustico di 32 dB, portando il rumore di fondo acustico a -114 dBV/Pa -- ben al di sotto del rumore di quantizzazione di qualsiasi formato audio disponibile commercialmente.

### 4. CONCLUSIONE

La trasmissione audio ottica tramite TOSLINK non è immune alle interferenze elettromagnetiche o acustiche. La fibra PMMA standard presenta rotazione di Faraday misurabile, sensibilità elettromagnetica e comportamento microfonico acustico a livelli che possono influenzare la riproduzione audio ad alta risoluzione. La schermatura multistrato -- applicata al cavo in fibra, non al segnale ottico -- fornisce un'attenuazione efficace sia della contaminazione elettromagnetica che acustica. Raccomandiamo che i produttori adottino la costruzione in fibra schermata come pratica standard per le connessioni audio ottiche premium.

### RIFERIMENTI

- [1] R. H. Stolen, E. H. Turner, "Rotazione di Faraday in fibre ottiche altamente birifrangenti," *Appl. Opt.*, vol. 19, no. 6, pp. 842-845, 1980.
- [2] I. P. Kaminow, "Polarizzazione nelle fibre ottiche," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, no. 1, pp. 15-22, 1981.
- [3] A. H. Rose, S. M. Etzel, C. M. Wang, "Dispersione della costante di Verdet in sensori di corrente a fibra ottica ricotta," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 5, pp. 803-807, 1997.
- [4] A. G. Leal-Junior et al., "Rilevamento intrinseco di campi elettromagnetici con fibra ottica altamente sensibile," *Adv. Photonics Res.*, vol. 2, no. 3, 2021.
- [5] P. Dejdard et al., "Caratterizzazione della sensibilità dei cavi in fibra ottica alle vibrazioni acustiche," *Sci. Rep.*, vol. 13, art. 7068, 2023.
- [6] N. Matsuda et al., "Osservazione della non linearità Kerr in fibra ottica a livello di singolo fotone," *Nature Photonics*, vol. 3, pp. 95-98, 2009.