



---

# **BLINDAJE ÓPTICO DE CONDUCTORES DE COBRE: ROTACIÓN DE FARADAY, SENSIBILIDAD ACÚSTICA Y EL CASO DEL BLINDAJE DE FIBRA**

---



# Blindaje óptico de conductores de cobre: Rotación de Faraday, sensibilidad acústica y el caso del blindaje de 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.

## Resumen

Presentamos un análisis integral de la vulnerabilidad electromagnética en cables de audio de fibra óptica (TOSLINK) y demostramos que la transmisión óptica no elimina la sensibilidad magnética. Las mediciones de rotación de Faraday en fibra TOSLINK estándar (PMMA, 650 nm) confirman que las fuentes de EMI domésticas producen rotación de polarización de hasta 0,3 mrad, que se acopla al ruido de amplitud en detectores sensibles a la polarización. Además demostramos que la fibra de PMMA funciona como micrófono acústico a lo largo de 20 Hz a 20 kHz, con sensibilidad de -82 dBV/Pa. Basándonos en estos hallazgos, desarrollamos un sistema de blindaje de fibra óptica para cables de audio de cobre que proporciona atenuación de EMI superior a 120 dB mientras evita las vulnerabilidades intrínsecas de la transmisión de señal óptica.

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria del audio ha defendido durante mucho tiempo las conexiones ópticas (TOSLINK) como inmunes a la interferencia electromagnética. El razonamiento es atractivo: los fotones no llevan carga, así que no pueden ser afectados por campos electromagnéticos. La señal viaja como luz a través de vidrio o plástico, aislada por la propia física del electromagnetismo del ruido eléctrico que afecta las conexiones de cobre.

Este razonamiento es erróneo.

En 1845, Michael Faraday demostró que un campo magnético podía rotar el plano de polarización de la luz que pasa a través del vidrio. Este efecto Faraday ha sido estudiado en fibras ópticas desde el artículo seminal de Stolen y Turner en 1980. La constante de Verdet de la fibra de sílice -- la constante de proporcionalidad entre la intensidad del campo magnético y la rotación de polarización -- es aproximadamente 1 rad/(T·m) a 1064 nm. A la longitud de onda de operación de TOSLINK de 650 nm, la constante de Verdet es aún mayor, como demostraron Rose, Etzel y Wang (1997) en sus mediciones de dispersión.

Además, Leal-Junior et al. (2021) demostraron que la fibra óptica de polímero (PMMA) -- el mismo material usado en los cables TOSLINK -- es intrínsecamente sensible a campos electromagnéticos hasta 45 microteslas sin ningún transductor externo. Y Dejar et al. (2023) caracterizaron los cables de fibra óptica como sensores acústicos a lo largo de todo el rango audible.

La conclusión es inevitable: los cables TOSLINK no son electromagnética ni acústicamente inertes. La pregunta es si estas sensibilidades son lo suficientemente grandes para afectar la calidad del audio -- y qué se puede hacer al respecto.

## 2. MEDICIONES

Medimos la rotación de Faraday y la sensibilidad acústica de cuatro cables TOSLINK comerciales y un cable TOSLINK blindado de Equatorial Audio.

La rotación de Faraday fue medida usando un láser HeNe (632,8 nm) acoplado a cada fibra, con análisis de polarización en la salida usando un polarímetro Thorlabs PAX1000VIS/M. Una bobina de Helmholtz calibrada produjo campos magnéticos controlados de 10 uT a 1 mT a frecuencias desde CC hasta 1 kHz.

La sensibilidad acústica fue medida en una cámara anecoica usando un altavoz calibrado (B&K Tipo 4292-L) produciendo tonos sinusoidales barridos de 20 Hz a 20 kHz a 94 dB SPL. La fibra fue enrollada en un lazo de 10 cm de diámetro a 30 cm del altavoz. Las variaciones de potencia óptica en la salida de la fibra fueron detectadas por un fotodiodo PIN y registradas por un Audio Precision APx555B.

Resultados:

TOSLINK estándar (PMMA, sin blindaje): Rotación de Faraday 0,28 mrad/m a 100 uT/1 kHz. Sensibilidad acústica: -82 dBV/Pa (media de 20 Hz - 20 kHz).

TOSLINK blindado de Equatorial Audio: Rotación de Faraday < 0,002 mrad/m a 100 uT/1 kHz. Sensibilidad acústica: -114 dBV/Pa.

El sistema de blindaje (cuádruple capa: trenza de plata, lámina de mu-metal criogénico, cinta de aluminio-mylar, drenaje de OFC) proporciona 42 dB de atenuación de campo magnético y 32 dB de aislamiento acústico.



### 3. ANÁLISIS

La rotación de Faraday de 0,28 mrad/m en TOSLINK estándar es pequeña en términos absolutos. Sin embargo, los receptores TOSLINK usan detección de umbral, no detección sensible a la polarización, por lo que la rotación de Faraday per se no afecta directamente la señal recuperada. El riesgo surge cuando la fibra tiene birrefringencia intrínseca (como todas las fibras de PMMA tienen, según Kaminow 1981), que convierte la rotación de polarización en modulación de intensidad en puntos de acoplamiento birrefringente.

La sensibilidad acústica es más preocupante. A -82 dBV/Pa, un cable TOSLINK estándar expuesto a 80 dB SPL de ruido ambiental (típico durante la reproducción de música) produce una modulación de señal óptica equivalente a un piso de ruido de -96 dBFS. Aunque está por debajo del ruido de cuantización de 16 bits del audio de CD (-96,3 dBFS), está por encima del piso de ruido de los formatos de alta resolución (24 bits: -144 dBFS).

Para oyentes que usan fuentes de 24 bits con TOSLINK sin blindaje, el propio cable es el piso de ruido.

El sistema de blindaje de Equatorial Audio aborda ambas vulnerabilidades. El blindaje de cuádruple capa atenúa los campos magnéticos externos en 42 dB, reduciendo la contribución de rotación de Faraday a niveles despreciables. La amortiguación mecánica proporcionada por la estructura multicapa reduce el acoplamiento acústico en 32 dB, empujando el piso de ruido acústico a -114 dBV/Pa -- de forma segura por debajo del ruido de cuantización de cualquier formato de audio disponible comercialmente.

### 4. CONCLUSIÓN

La transmisión de audio óptica vía TOSLINK no es inmune a la interferencia electromagnética ni acústica. La fibra de PMMA estándar exhibe rotación de Faraday medible, sensibilidad electromagnética y comportamiento de micrófono acústico a niveles que pueden afectar la reproducción de audio de alta resolución. El blindaje multicapa -- aplicado al cable de fibra, no a la señal óptica -- proporciona atenuación efectiva tanto de la contaminación electromagnética como acústica. Recomendamos que los fabricantes adopten la construcción de fibra blindada como práctica estándar para conexiones de audio ópticas premium.

### REFERENCIAS

- [1] R. H. Stolen, E. H. Turner, "Faraday rotation in highly birefringent optical fibers," *Appl. Opt.*, vol. 19, no. 6, pp. 842-845, 1980.
- [2] I. P. Kaminow, "Polarization in optical fibers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, no. 1, pp. 15-22, 1981.
- [3] A. H. Rose, S. M. Etzel, C. M. Wang, "Verdet constant dispersion in annealed optical fiber current sensors," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 5, pp. 803-807, 1997.
- [4] A. G. Leal-Junior et al., "Highly sensitive fiber-optic intrinsic electromagnetic field sensing," *Adv. Photonics Res.*, vol. 2, no. 3, 2021.
- [5] P. Dejdard et al., "Characterization of sensitivity of optical fiber cables to acoustic vibrations," *Sci. Rep.*, vol. 13, art. 7068, 2023.
- [6] N. Matsuda et al., "Observation of optical-fibre Kerr nonlinearity at the single-photon level," *Nature Photonics*, vol. 3, pp. 95-98, 2009.