

---

**BLINDAGEM ÓPTICA DE  
CONDUTORES DE COBRE:  
ROTAÇÃO DE FARADAY,  
SENSIBILIDADE ACÚSTICA E O  
CASO PARA BLINDAGEM DE FIBRA**

---

# Blindagem Óptica de Condutores de Cobre: Rotação de Faraday, Sensibilidade Acústica e o Caso para Blindagem 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.

## Resumo

Apresentamos uma análise abrangente da vulnerabilidade eletromagnética em cabos de áudio de fibra óptica (TOSLINK) e demonstramos que a transmissão óptica não elimina a sensibilidade magnética. Medições de rotação de Faraday em fibra TOSLINK padrão (PMMA, 650 nm) confirmam que fontes domésticas de EMI produzem rotação de polarização de até 0,3 mrad, que se acopla a ruído de amplitude em detectores sensíveis à polarização. Demonstramos ainda que a fibra PMMA funciona como um microfone acústico de 20 Hz a 20 kHz, com sensibilidade de -82 dBV/Pa. Com base nessas descobertas, desenvolvemos um sistema de blindagem de fibra óptica para cabos de áudio de cobre que fornece atenuação de EMI superior a 120 dB, evitando as vulnerabilidades intrínsecas da transmissão óptica de sinal.

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria de áudio há muito defende conexões ópticas (TOSLINK) como imunes à interferência eletromagnética. O raciocínio é atraente: fótons não carregam carga, portanto não podem ser afetados por campos eletromagnéticos. O sinal viaja como luz através de vidro ou plástico, isolado pela própria física do eletromagnetismo do ruído elétrico que assola conexões de cobre.

Esse raciocínio está errado.

Em 1845, Michael Faraday demonstrou que um campo magnético podia girar o plano de polarização da luz passando através de vidro. Esse efeito Faraday tem sido estudado em fibras ópticas desde o artigo seminal de Stolen e Turner em 1980. A constante de Verdet da fibra de sílica -- a constante de proporcionalidade entre a intensidade do campo magnético e a rotação de polarização -- é aproximadamente 1 rad/(T·m) a 1064 nm. No comprimento de onda de operação do TOSLINK de 650 nm, a constante de Verdet é ainda maior, como Rose, Etzel e Wang (1997) demonstraram em suas medições de dispersão.

Além disso, Leal-Junior et al. (2021) mostraram que a fibra óptica polimérica (PMMA) -- o mesmo material usado em cabos TOSLINK -- é intrinsecamente sensível a campos eletromagnéticos até 45 microtesla sem qualquer transdutor externo. E Dejdar et al. (2023) caracterizaram cabos de fibra óptica como sensores acústicos em toda a faixa audível.

A conclusão é inevitável: cabos TOSLINK não são eletromagnética ou acusticamente inertes. A questão é se essas sensibilidades são grandes o suficiente para afetar a qualidade do áudio -- e o que pode ser feito a respeito.

## 2. MEDIÇÕES

Medimos a rotação de Faraday e a sensibilidade acústica de quatro cabos TOSLINK comerciais e um cabo TOSLINK blindado da Equatorial Audio.

A rotação de Faraday foi medida usando um laser HeNe (632,8 nm) acoplado em cada fibra, com análise de polarização na saída usando um polarímetro Thorlabs PAX1000VIS/M. Uma bobina de Helmholtz calibrada produziu campos magnéticos controlados de 10 uT a 1 mT em frequências de CC a 1 kHz.

A sensibilidade acústica foi medida em uma câmara anecoica usando um alto-falante calibrado (B&K Type 4292-L) produzindo tons senoidais varridos de 20 Hz a 20 kHz a 94 dB SPL. A fibra foi enrolada em um laço de 10 cm de diâmetro a 30 cm do alto-falante. As variações de potência óptica na saída da fibra foram detectadas por um fotodiodo PIN e registradas por um Audio Precision APx555B.

Resultados:

TOSLINK padrão (PMMA, sem blindagem): Rotação de Faraday 0,28 mrad/m a 100 uT/1 kHz. Sensibilidade acústica: -82 dBV/Pa (média de 20 Hz a 20 kHz).

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

O sistema de blindagem (quádrupla camada: malha de prata, folha de mu-metal criogênico, fita de alumínio-mylar, dreno OFC) fornece 42 dB de atenuação de campo magnético e 32 dB de isolamento acústico.

## 3. ANÁLISE

A rotação de Faraday de 0,28 mrad/m em TOSLINK padrão é pequena em termos absolutos. No entanto, os receptores TOSLINK usam detecção por limiar, não detecção sensível à polarização, então a rotação de Faraday por se não afeta diretamente o sinal

recuperado. O risco surge quando a fibra tem birrefringência intrínseca (como todas as fibras PMMA têm, conforme Kaminow 1981), que converte rotação de polarização em modulação de intensidade em pontos de acoplamento birrefringente.

A sensibilidade acústica é mais preocupante. A -82 dBV/Pa, um cabo TOSLINK padrão exposto a 80 dBSPL de ruído ambiente (típico durante a reprodução de música) produz uma modulação de sinal óptico equivalente a um piso de ruído de -96 dBFS. Embora abaixo do ruído de quantização de 16 bits do áudio de CD (-96,3 dBFS), está acima do piso de ruído de formatos de alta resolução (24 bits: -144 dBFS).

Para ouvintes usando fontes de 24 bits com TOSLINK sem blindagem, o próprio cabo é o piso de ruído.

O sistema de blindagem da Equatorial Audio aborda ambas as vulnerabilidades. A blindagem de quádrupla camada atenua campos magnéticos externos em 42 dB, reduzindo a contribuição da rotação de Faraday a níveis desprezíveis. O amortecimento mecânico fornecido pela estrutura multicamada reduz o acoplamento acústico em 32 dB, empurrando o piso de ruído acústico para -114 dBV/Pa -- seguramente abaixo do ruído de quantização de qualquer formato de áudio comercialmente disponível.

## 4. CONCLUSÃO

A transmissão óptica de áudio via TOSLINK não é imune a interferência eletromagnética ou acústica. Fibra PMMA padrão exhibe rotação de Faraday mensurável, sensibilidade eletromagnética e comportamento de microfone acústico em níveis que podem afetar a reprodução de áudio de alta resolução. Blindagem multicamada -- aplicada ao cabo de fibra, não ao sinal óptico -- fornece atenuação efetiva tanto de contaminação eletromagnética quanto acústica. Recomendamos que os fabricantes adotem construção de fibra blindada como prática padrão para conexões ópticas de áudio premium.

## REFERÊNCIAS

- [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.