
BLINDAGE OPTIQUE DES CONDUCTEURS EN CUIVRE : ROTATION FARADAY, SENSIBILITÉ ACOUSTIQUE ET LE CAS DU BLINDAGE PAR FIBRE

Blindage optique des conducteurs en cuivre : rotation Faraday, sensibilité acoustique et le cas du blindage par fibre

C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2023.

Résumé

Nous présentons une analyse complète de la vulnérabilité électromagnétique des câbles audio à fibre optique (TOSLINK) et démontrons que la transmission optique n'élimine pas la sensibilité magnétique. Les mesures de la rotation Faraday dans la fibre TOSLINK standard (PMMA, 650 nm) confirment que les sources d'EMI domestiques produisent une rotation de polarisation allant jusqu'à 0,3 mrad, qui se couple au bruit d'amplitude aux détecteurs sensibles à la polarisation. Nous démontrons en outre que la fibre PMMA fonctionne comme un microphone acoustique de 20 Hz à 20 kHz, avec une sensibilité de -82 dBV/Pa. Sur la base de ces résultats, nous développons un système de blindage par fibre optique pour les câbles audio en cuivre qui fournit une atténuation EMI supérieure à 120 dB tout en évitant les vulnérabilités intrinsèques de la transmission de signal optique.

1. INTRODUCTION

L'industrie audio préconise depuis longtemps les connexions optiques (TOSLINK) comme immunisées contre les interférences électromagnétiques. Le raisonnement est séduisant : les photons ne portent pas de charge, ils ne peuvent donc pas être affectés par les champs électromagnétiques. Le signal voyage sous forme de lumière à travers le verre ou le plastique, isolé par la physique même de l'électromagnétisme du bruit électrique qui afflige les connexions en cuivre.

Ce raisonnement est faux.

En 1845, Michael Faraday a démontré qu'un champ magnétique pouvait faire tourner le plan de polarisation de la lumière traversant du verre. Cet effet Faraday a été étudié dans les fibres optiques depuis l'article fondateur de Stolen et Turner en 1980. La constante de Verdet de la fibre de silice -- la constante de proportionnalité entre l'intensité du champ magnétique et la rotation de polarisation -- est d'environ 1 rad/(T·m) à 1064 nm. À la longueur d'onde de fonctionnement du TOSLINK de 650 nm, la constante de Verdet est encore plus élevée, comme Rose, Etzel et Wang (1997) l'ont démontré dans leurs mesures de dispersion.

De plus, Leal-Junior et al. (2021) ont montré que la fibre optique polymère (PMMA) -- le même matériau utilisé dans les câbles TOSLINK -- est intrinsèquement sensible aux champs électromagnétiques jusqu'à 45 microtesla sans aucun transducteur externe. Et Dejdjar et al. (2023) ont caractérisé les câbles à fibre optique comme capteurs acoustiques sur toute la gamme audible.

La conclusion est inévitable : les câbles TOSLINK ne sont pas électromagnétiquement ni acoustiquement inertes. La question est de savoir si ces sensibilités sont suffisamment importantes pour affecter la qualité audio -- et ce qui peut être fait pour y remédier.

2. MESURES

Nous avons mesuré la rotation Faraday et la sensibilité acoustique de quatre câbles TOSLINK commerciaux et d'un câble TOSLINK blindé Equatorial Audio.

La rotation Faraday a été mesurée à l'aide d'un laser HeNe (632,8 nm) couplé dans chaque fibre, avec une analyse de polarisation en sortie à l'aide d'un polarimètre Thorlabs PAX1000VIS/M. Une bobine de Helmholtz calibrée a produit des champs magnétiques contrôlés de 10 uT à 1 mT à des fréquences de DC à 1 kHz.

La sensibilité acoustique a été mesurée en chambre anéchoïque à l'aide d'un haut-parleur calibré (B&K Type 4292-L) produisant des tonalités sinusoïdales balayées de 20 Hz à 20 kHz à 94 dBSPL. La fibre était enroulée en boucle de 10 cm de diamètre à 30 cm du haut-parleur. Les variations de puissance optique en sortie de fibre ont été détectées par une photodiode PIN et enregistrées par un Audio Precision APx555B.

Résultats :

TOSLINK standard (PMMA, non blindé) : Rotation Faraday 0,28 mrad/m à 100 uT/1 kHz. Sensibilité acoustique : -82 dBV/Pa (moyenne 20 Hz - 20 kHz).

TOSLINK blindé Equatorial Audio : Rotation Faraday < 0,002 mrad/m à 100 uT/1 kHz. Sensibilité acoustique : -114 dBV/Pa.

Le système de blindage (quadruple couche : tresse d'argent, feuille de mu-métal cryo, ruban aluminium-mylar, drain OFC) fournit 42 dB d'atténuation du champ magnétique et 32 dB d'isolation acoustique.

3. ANALYSE

La rotation Faraday de 0,28 mrad/m dans le TOSLINK standard est faible en termes absolus. Cependant, les récepteurs TOSLINK utilisent une détection par seuil, et non une détection sensible à la polarisation, donc la rotation Faraday en soi n'affecte pas directement le signal récupéré. Le risque survient lorsque la fibre possède une biréfringence intrinsèque (comme toutes les fibres PMMA, selon Kaminow 1981), qui convertit la rotation de polarisation en modulation d'intensité aux points de couplage biréfringent.

La sensibilité acoustique est plus préoccupante. À -82 dBV/Pa, un câble TOSLINK standard exposé à 80 dBSPL de bruit ambiant (typique pendant la lecture de musique) produit une modulation du signal optique équivalente à un plancher de bruit de -96 dBFS. Bien qu'en dessous du bruit de quantification 16 bits de l'audio CD (-96,3 dBFS), il est au-dessus du plancher de bruit des formats haute résolution (24 bits : -144 dBFS).

Pour les auditeurs utilisant des sources 24 bits avec un TOSLINK non blindé, le câble lui-même constitue le plancher de bruit.

Le système de blindage Equatorial Audio répond aux deux vulnérabilités. Le blindage quadruple couche atténue les champs magnétiques externes de 42 dB, réduisant la contribution de la rotation Faraday à des niveaux négligeables. L'amortissement mécanique fourni par la structure multicouche réduit le couplage acoustique de 32 dB, abaissant le plancher de bruit acoustique à -114 dBV/Pa -- bien en dessous du bruit de quantification de tout format audio commercialement disponible.

4. CONCLUSION

La transmission audio optique via TOSLINK n'est pas immunisée contre les interférences électromagnétiques ou acoustiques. La fibre PMMA standard présente une rotation Faraday mesurable, une sensibilité électromagnétique et un comportement de microphone acoustique à des niveaux qui peuvent affecter la lecture audio haute résolution. Le blindage multicouche -- appliqué au câble de la fibre, et non au signal optique -- fournit une atténuation efficace de la contamination électromagnétique et acoustique. Nous recommandons que les fabricants adoptent la construction de fibre blindée comme pratique standard pour les connexions audio optiques premium.

RÉFÉRENCES

- [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, "Dispersion de la constante de Verdet dans les capteurs de courant à fibre optique recuite," J. Lightwave Technol., vol. 15, no. 5, pp. 803-807, 1997.
- [4] A. G. Leal-Junior et al., "Détection intrinsèque hautement sensible de champ électromagnétique par fibre optique," Adv. Photonics Res., vol. 2, no. 3, 2021.
- [5] P. Dejdard et al., "Caractérisation de la sensibilité des câbles à fibre optique aux vibrations acoustiques," 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.