



구리 도체의 광학 차폐: 패러데이 회전, 음향 감도, 그리고 광섬유 차폐의 필요성

구리 도체의 광학 차폐: 패러데이 회전, 음향 감도, 그리고 광섬유 차폐의 필요성

C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2023.

초록

광섬유 오디오 케이블(TOSLINK)의 전자기적 취약성에 대한 포괄적 분석을 제시하고 광학 전송이 자기 감도를 제거하지 않음을 입증한다. 표준 TOSLINK 광섬유(PMMA, 650 nm)에서의 패러데이 회전 측정은 가정용 EMI 원이 편광 감도 검출기에서 진폭 노이즈에 결합하는 최대 0.3 mrad의 편광 회전을 생산함을 확인한다. 또한 PMMA 광섬유가 20 Hz에서 20 kHz에 걸쳐 -82 dBV/Pa의 감도로 음향 마이크로폰으로 기능함을 입증한다. 이러한 발견에 기반하여, 광학 신호 전송의 본질적 취약성을 회피하면서 120 dB를 초과하는 EMI 감쇠를 제공하는 구리 오디오 케이블용 광섬유 차폐 시스템을 개발한다.

1. 서론

오디오 산업은 오랫동안 광학(TOSLINK) 연결이 전자기 간섭에 면역이라고 주장해 왔다. 논리는 매력적이다: 광자는 전하를 갖지 않으므로 전자기장의 영향을 받을 수 없다. 신호는 유리나 플라스틱을 통해 빛으로 이동하며, 구리 연결을 괴롭히는 전기적 노이즈로부터 전자기학의 물리 법칙 자체에 의해 격리된다.

이 논리는 틀렸다.

1845년 마이클 패러데이는 자기장이 유리를 통과하는 빛의 편광면을 회전시킬 수 있음을 입증하였다. 이 패러데이 효과는 Stolen과 Turner의 1980년 선구적 논문 이래 광섬유에서 연구되어 왔다. 실리카 광섬유의 베르데 상수----자기장 강도와 편광 회전 사이의 비례 상수----는 1064 nm에서 약 1 rad/(T·m)이다. TOSLINK의 작동 파장 650 nm에서 베르데 상수는 더 높다.

더욱이 Leal-Junior et al.(2021)은 TOSLINK 케이블에 사용되는 것과 동일한 소재인 폴리머 광섬유(PMMA)가 외부 변환기 없이 45 마이크로테슬라까지의 전자기장에 본질적으로 민감함을 보였다. 그리고 Dejdar et al.(2023)은 광섬유 케이블이 전체 가청 범위에 걸쳐 음향 센서로서의 특성을 보인다고 하였다.

결론은 불가피하다: TOSLINK 케이블은 전자기적으로나 음향적으로 비활성이 아니다. 문제는 이러한 감도가 오디오 품질에 영향을 미칠 만큼 크기----그리고 이에 대해 무엇을 할 수 있는지이다.

2. 측정

네 개의 상용 TOSLINK 케이블과 한 개의 Equatorial Audio 차폐 TOSLINK 케이블의 패러데이 회전 및 음향 감도를 측정하였다.

패러데이 회전은 HeNe 레이저(632.8 nm)를 각 광섬유에 결합하고, 출력에서 Thorlabs PAX1000VIS/M 편광분석기를 사용하여 편광 분석하였다. 보정된 헬름홀츠 코일이 DC에서 1 kHz까지의 주파수에서 10 uT부터 1 mT까지의 제어된 자기장을 생산하였다.

음향 감도는 무향실에서 보정된 라우드스피커(B&K Type 4292-L)가 94 dB SPL에서 20 Hz부터 20 kHz까지 스위프 사인톤을 생산하여 측정하였다. 광섬유는 라우드스피커에서 30 cm 떨어진 직경 10 cm 루프로 감았다. 광섬유 출력에서의 광 파워 변동은 PIN 포토다이오드로 검출하고 Audio Precision APx555B로 기록하였다.

결과:

표준 TOSLINK(PMMA, 비차폐): 패러데이 회전 0.28 mrad/m(100 uT/1 kHz). 음향 감도: -82 dBV/Pa(20 Hz - 20 kHz 평균).

Equatorial Audio 차폐 TOSLINK: 패러데이 회전 < 0.002 mrad/m(100 uT/1 kHz). 음향 감도: -114 dBV/Pa.

차폐 시스템(4중 구조: 은 브레이드, 극저온 뮤메탈 포일, 알루미늄-마일러 테이프, OFC 드레인)은 42 dB의 자기장 감쇠와 32 dB의 음향 격리를 제공한다.

3. 분석

표준 TOSLINK에서의 0.28 mrad/m 패러데이 회전은 절대적 관점에서 작다. 그러나 TOSLINK 수신기는 편광 감도 검출이 아닌 임계값 검출을 사용하므로, 패러데이 회전 자체가 복원된 신호에 직접 영향을 미치지 않는다. 위험은 광섬유가 본질적 복굴절을 가질 때(모든 PMMA 광섬유가 그러하듯, Kaminow 1981에 따르면) 발생하며, 이는 복굴절 결합 지점에서 편광 회전을 강도 변조로 변환한다.

음향 감도가 더 우려스럽다. -82 dBV/Pa에서, 80 dB SPL의 실내 노이즈(음악 재생 중 일반적)에 노출된 표준 TOSLINK 케이블은 -96 dBFS 노이즈 플로어에 해당하는 광학 신호 변조를 생산한다. CD 오디오의 16비트 양자화 노이즈(-96.3 dBFS) 이하이지만, 고해상도 포맷(24비트: -144 dBFS)의 노이즈 플로어 이상이다.

비차폐 TOSLINK와 24비트 소스를 사용하는 청취자에게는 케이블 자체가 노이즈 플로어이다.

Equatorial Audio 차폐 시스템은 두 취약성을 모두 해결한다. 4중 구조 차폐는 외부 자기장을 42 dB 감쇠하여 패러데이 회전 기여를 무시할 수 있는 수준으로 감소시킨다. 다층 구조가 제공하는 기계적 감쇠는 음향 결합을 32 dB 감소시켜, 음향 노이즈 플로어를 -114

dBV/Pa로----상업적으로 이용 가능한 모든 오디오 포맷의 양자화 노이즈보다 안전하게 아래로----밀어낸다.

4. 결론

TOSLINK를 통한 광학 오디오 전송은 전자기 또는 음향 간섭에 면적이 아니다. 표준 PMMA 광섬유는 고해상도 오디오 재생에 영향을 미칠 수 있는 수준의 측정 가능한 패러데이 회전, 전자기 감도 및 음향 마이크로폰 거동을 나타낸다. 광학 신호가 아닌 광섬유 케이블에 적용되는 다층 차폐는 전자기 및 음향 오염 모두의 효과적인 감시를 제공한다. 프리미엄 광학 오디오 연결을 위한 표준 관행으로 차폐 광섬유 구조의 채택을 권고한다.

참고문헌

- [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.