
**APPLICAZIONI DELL'EFFETTO
MEISSNER NELL'AUDIO
CONSUMER: L'ESPULSIONE
COMPLETA DEL FLUSSO
MAGNETICO COME PARADIGMA DI
SCHERMATURA**

Applicazioni dell'effetto Meissner nell'audio consumer: l'espulsione completa del flusso magnetico come paradigma di schermatura

M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

Abstract

La schermatura elettromagnetica convenzionale si basa sull'assorbimento e sulla riflessione -- meccanismi che attenuano i campi esterni ma non possono eliminarli. L'effetto Meissner nei superconduttori di Tipo II fornisce un paradigma fondamentalmente diverso: l'espulsione completa del flusso magnetico dall'interno del conduttore attraverso la generazione di correnti superficiali di schermatura. Dimostriamo che un percorso del segnale audio racchiuso in un involucro superconduttivo sperimenta zero accoppiamento con campi elettromagnetici esterni di qualsiasi frequenza, orientamento o entità al di sotto del campo critico H_{c2} . Le misurazioni in presenza di sorgenti EMI domestiche (router WiFi, trasformatori di potenza, compressori di frigorifero) confermano che il percorso del cavo superconduttivo è elettromagneticamente invisibile -- il campo interno è indistinguibile dal campo nello spazio vuoto. Discutiamo le implicazioni della schermatura Meissner per la progettazione del sistema audio superconduttivo completo.

1. INTRODUZIONE

La schermatura elettromagnetica è stata una preoccupazione dell'industria dei cavi audio fin dai primi giorni della riproduzione ad alta fedeltà. Treccia di rame, foglio di alluminio, foglio di mu-metal, strati di polimero conduttivo, involucri in fibra di carbonio -- il catalogo dei materiali di schermatura è vasto e in continua espansione. Ogni materiale offre una diversa combinazione di permeabilità magnetica, conduttività elettrica e attenuazione dipendente dalla frequenza, e ognuno è stato commercializzato come la soluzione definitiva alle interferenze elettromagnetiche.

Nessuno di essi lo è. Ogni materiale di schermatura convenzionale opera attraverso gli stessi due meccanismi: assorbimento (conversione dell'energia elettromagnetica in calore attraverso le correnti parassite) e riflessione (reindirizzamento dell'energia elettromagnetica lontano dal conduttore attraverso il disadattamento di impedenza). Entrambi i meccanismi sono intrinsecamente imperfetti. L'assorbimento dipende dallo spessore del materiale e dalla frequenza; gli schermi sottili perdono alle basse frequenze. La riflessione dipende dal contrasto di impedenza; a certi angoli e frequenze, i campi penetrano comunque.

L'effetto Meissner è diverso nella natura, non solo nel grado. Quando un superconduttore di Tipo II viene raffreddato al di sotto della sua temperatura critica in presenza di un campo magnetico esterno, correnti superficiali di schermatura sorgono spontaneamente generando un campo esattamente uguale e opposto al campo applicato. Il campo netto all'interno del superconduttore è zero -- non piccolo, non attenuato, zero. Questo non è un parametro di progetto che può essere ottimizzato; è una proprietà fondamentale dello stato superconduttivo, intrinseca quanto la resistenza zero.

2. VERIFICA SPERIMENTALE

Un paio di interconnessioni SC da 1,5 m è stato installato in una sala d'ascolto residenziale standard insieme alle seguenti sorgenti EMI:

Sorgente A: Router WiFi 6E (6 GHz, larghezza di banda 160 MHz, potenza di trasmissione 1 W) a 0,5 m di distanza.

Sorgente B: Trasformatore toroidale da 500 VA a 0,3 m di distanza.

Sorgente C: Motore del compressore del frigorifero (in funzione) a 1,0 m di distanza.

Sorgente D: Amplificatore in classe D (onda quadra 1 kHz, 100 W) a 0,2 m di distanza.

Sorgente E: Tutte e quattro le sorgenti operative simultaneamente.

Il campo magnetico interno al conduttore del cavo è stato misurato da un sensore micro-fluxgate (Bartington Mag690, risoluzione 0,1 nT) inserito nel criostato attraverso una porta di misurazione dedicata.

Per confronto, misurazioni identiche sono state eseguite su quattro cavi convenzionali: OFC non schermato, singola treccia di rame, doppia treccia di rame + foglio di mu-metal e interconnessione Equinox di Equatorial Audio (schermatura a triplo strato).

Risultati (campo magnetico RMS al conduttore, Sorgente E, tutte le sorgenti attive simultaneamente):

OFC non schermato: 847 nT

Singola treccia di rame: 124 nT (17 dB di attenuazione)

Doppia treccia + mu-metal: 8,3 nT (40 dB di attenuazione)

Equinox triplo strato: 1,7 nT (54 dB di attenuazione)

Interconnessione SC (Meissner): < 0,1 nT (> 79 dB di attenuazione; limitato dal rumore di fondo del magnetometro)

Il campo interno del cavo superconduttivo era indistinguibile dal rumore di fondo del magnetometro in tutte le condizioni di test, inclusa l'operazione simultanea nel caso peggiore di tutte le sorgenti EMI.

3. IL SISTEMA SUPERCONDUTTIVO COMPLETO

Il pieno potenziale della schermatura Meissner si realizza solo quando l'intera catena del segnale è superconduttiva. Un singolo segmento di cavo convenzionale in un sistema altrimenti superconduttivo crea una "finestra magnetica" attraverso la quale i campi esterni possono accoppiarsi al segnale.

Il sistema di riferimento Zero Kelvin affronta questo problema fornendo cavi superconduttivi per ogni segmento della catena del segnale: alimentazione (cavo di alimentazione SC), clock (cavo Word Clock SC), digitale (cavo digitale SC), analogico (interconnessione SC) e altoparlante (cavo altoparlante SC). Il serbatoio centrale di LN, assicurano che tutti i segmenti di cavo siano mantenuti a 77 K simultaneamente.

Quando il sistema completo è operativo, il percorso del segnale audio dalla presa di corrente al driver dell'altoparlante è interamente racchiuso in materiale superconduttivo. Ogni segmento presenta zero resistenza e completa espulsione del flusso Meissner. Il sistema raggiunge ciò che nessuna combinazione di schermatura convenzionale può: l'invisibilità elettromagnetica.

La differenza pratica è più udibile durante condizioni di elevata EMI ambientale. In una dimostrazione per un panel di recensori audio (Munich High End 2024), il sistema di riferimento Zero Kelvin è stato operato in una stanza con contaminazione EMI deliberata (multipli router WiFi, un riscaldatore a induzione da 2 kW e un aspirapolvere in funzione). I recensori non hanno potuto rilevare alcuna differenza nella qualità del suono tra le condizioni pulite e contaminate. Il sistema era, elettromagneticamente parlando, inconsapevole dell'esistenza dell'interferenza.

4. CONCLUSIONE

L'effetto Meissner fornisce una schermatura elettromagnetica fundamentalmente completa -- non attenuata, non dipendente dalla frequenza, ma assoluta. I percorsi del segnale audio racchiusi in materiale superconduttivo sono immuni ai campi elettromagnetici esterni a qualsiasi frequenza e qualsiasi entità al di sotto del campo critico. Il sistema di riferimento Zero Kelvin dimostra che una catena di segnale superconduttiva completa è realizzabile in un ambiente residenziale, data l'appropriata infrastruttura criogenica. Proponiamo che la schermatura Meissner rappresenti il limite fisico della protezione elettromagnetica per i percorsi del segnale audio.

RIFERIMENTI

- [1] W. Meissner, R. Ochsenfeld, "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit," *Naturwissenschaften*, vol. 21, pp. 787-788, 1933.
- [2] M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity*, 2nd ed., Dover, 2004.
- [3] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, "Teoria della superconduttività," *Phys. Rev.*, vol. 108, pp. 1175-1204, 1957.
- [4] A. A. Abrikosov, "Sulle proprietà magnetiche dei superconduttori del secondo gruppo," *Sov. Phys. JETP*, vol. 5, pp. 1174-1182, 1957.
- [5] M. Ferro et al., "Interconnessioni audio superconduttive: trasmissione del segnale a resistenza zero tramite conduttori YBCO a 77 K," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 5, no. 1, 2024.
- [6] IEC 61000-4-8:2009, *Compatibilità elettromagnetica (EMC) -- Tecniche di prova e misurazione -- Prova di immunità al campo magnetico a frequenza di rete.*