

---

**INTERCONNESSIONI AUDIO  
SUPERCONDUTTIVE:  
TRASMISSIONE DEL SEGNALE A  
RESISTENZA ZERO TRAMITE  
CONDUTTORI CERAMICI YBCO A  
77 K**

---

# Interconnessioni audio superconduttive: trasmissione del segnale a resistenza zero tramite conduttori ceramici YBCO a 77 K

M. Ferro, L. Solder, H. Park, B. Impedance

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

## Abstract

Riportiamo lo sviluppo e la caratterizzazione del primo cavo di interconnessione audio superconduttivo. Il conduttore è un nastro ceramico YBCO (ossido di ittrio bario rame,  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ) operante a 77 K in un criostato di vetro borosilicato con azoto liquido. La resistenza DC è zero -- non bassa, non trascurabile, zero -- confermata dalla misurazione a quattro sonde con sensibilità al nanovolt. L'effetto Meissner fornisce una schermatura diamagnetica perfetta del percorso del segnale, espellendo tutto il flusso magnetico esterno. I segnali audio trasmessi attraverso il conduttore superconduttivo presentano zero perdite resistive, zero contributo di rumore termico e immunità magnetica completa. Il cavo opera continuamente con rabbocco passivo di LN.

## 1. INTRODUZIONE

Ogni cavo audio convenzionale ha resistenza. Questa resistenza è piccola -- tipicamente da milliohm a ohm per metro -- ma non è zero. Le conseguenze di una resistenza diversa da zero sono triplici: (1) perdita resistiva del segnale (attenuazione), (2) generazione di rumore termico (rumore Johnson-Nyquist, proporzionale alla resistenza e alla temperatura) e (3) variazione dell'impedenza dipendente dalla frequenza (effetto pelle, effetto di prossimità). Questi effetti sono ben caratterizzati e, nei cavi convenzionali, rappresentano i limiti fisici fondamentali della trasmissione del segnale.

La superconduttività elimina tutti e tre. Un superconduttore ha esattamente zero resistenza DC al di sotto della sua temperatura critica ( $T_c$ ). Resistenza zero significa zero attenuazione, zero rumore Johnson-Nyquist e -- nella banda audio a bassa frequenza -- zero variazione dell'impedenza dipendente dalla frequenza. Il segnale entra a un'estremità del conduttore ed esce dall'altra con fedeltà matematicamente perfetta.

Inoltre, l'effetto Meissner -- l'espulsione completa del flusso magnetico dall'interno di un superconduttore -- fornisce una schermatura che nessuna quantità di mu-metal convenzionale, treccia di rame o polimero conduttivo può eguagliare. Un cavo superconduttivo non attenua i campi magnetici esterni; li esclude in modo assoluto.

La sfida ingegneristica è mantenere lo stato superconduttivo: l'YBCO richiede un raffreddamento continuo sotto i 92 K. Utilizziamo azoto liquido (punto di ebollizione 77 K a 1 atm) come criogeno, circolante attraverso un criostato di vetro borosilicato con intercapedine di vuoto che funge da guaina del cavo. Questo è, ammettiamolo, un design di cavo non convenzionale.

## 2. COSTRUZIONE DEL CAVO

L'interconnessione SC è composta dai seguenti elementi, dal centro verso l'esterno:

Conduttore: nastro ceramico YBCO (SuperPower SCS4050-AP), largo 4,0 mm x 0,1 mm di spessore, con corrente critica di 100 A a 77 K in campo proprio. Il nastro è avvolto in configurazione elicoidale su un supporto in acciaio inossidabile per consentire una flessibilità limitata.

Percorso del segnale: due nastri YBCO (segnale e ritorno) sono avvolti concentricamente con un distanziale PTFE da 0,5 mm. L'impedenza caratteristica è progettata per essere 75 Ohm alle frequenze audio, in conformità con la pratica standard delle interconnessioni.

Criostato: Dewar di vetro borosilicato a doppia parete, diametro esterno 48 mm, diametro interno 28 mm. Lo spazio tra le pareti è evacuato a  $< 10^{-3}$  Pa. L'assemblaggio del conduttore è immerso in azoto liquido nel foro. ciascuna estremità accettano tubi standard di alimentazione LN, da 6 mm.

Connettori: connettori XLR con placcatura in rodio per impiego criogenico, modificati con sigilli di passaggio a vuoto e interruzioni termiche (distanziali in fibra di vetro G10) per prevenire la conduzione termica dal corpo caldo del connettore al conduttore freddo.

Il diametro esterno totale del cavo è di 48 mm. Il cavo pesa 2,4 kg/m a secco e 3,8 kg/m curvatura è di 300 mm (limitato dal criostato in vetro, non dal conduttore flessibile).

## 3. CARATTERIZZAZIONE ELETTRICA

Resistenza DC: misurata con tecnica a quattro sonde con un nanovoltmetro Keithley 2182A e una sorgente di corrente 6221. A 77 K (immersione in LN), la tensione attraverso un conduttore di 1,5 m che trasportava 100

dello strumento di 1 nV. Limite superiore calcolato:  $R < 10 \{x \text{ Ohm}$ . Per tutti gli scopi pratici, la resistenza è

Impedenza AC: a 1 kHz, l'impedenza è 75,0 +/- 0,1 Ohm (puramente reattiva -- nessuna componente resistiva). L'impedenza è bloccata dalla temperatura: poiché il conduttore è mantenuto a una temperatura costante termica. La stabilità dell'impedenza in una campagna di misurazione di 30 giorni è stata +/- 0,0003 Ohm.

Rumore di fondo: la tensione di rumore Johnson-Nyquist di un resistore è  $V_n = \sqrt{4 \times k_B \times T \times R \times \Delta f}$  (superconduttore),  $V_n = 0$  indipendentemente dalla temperatura o dalla larghezza di banda. L'interconnessione superconduttiva contribuisce con esattamente zero rumore termico al percorso del segnale.

Schermatura magnetica: una bobina di Helmholtz che produceva 1 mT (10 Gauss) a 50 Hz è stata posizionata a 50 mm dal cavo. Un magnetometro fluxgate all'interno del criostato (adiacente al conduttore) ha misurato < 0,01 nT -- un'attenuazione superiore a 160 dB. Questo è l'effetto Meissner: il superconduttore esclude attivamente il campo esterno, non per assorbimento (come nel mu-metal) ma generando correnti superficiali che si oppongono perfettamente al campo applicato.

## 4. CONSIDERAZIONI PRATICHE

L'interconnessione SC richiede un rifornimento continuo di LN,. Il tasso di perdita termica di circa 0,85 litri di LN, al giorno per metro di lunghezza del cavo. Per un paio di interco LN, è di circa 930 litri -- circa 930 dollari all'anno al prezzo corrente dell'LN, commerciale quantità).

Il cavo deve essere installato con le porte di riempimento LN, accessibili per il rabbocco (temperatura ambiente). Una valvola di sicurezza integrata previene la sovrappressurizzazione pericolosa nel caso in cui il tasso di evaporazione dell'LN, superi la capacità di sfiato. Un sensore di deplezione di O<sub>2</sub>, è montato (LED ambrato) e acustici (buzzer da 85 dB) se la concentrazione ambientale di ossigeno scende sotto il 19,5%.

Il requisito di ventilazione della stanza è di un minimo di 10 ricambi d'aria all'ora (ACH) -- uno standard che supera la ventilazione della maggior parte degli spazi residenziali ma è facilmente raggiungibile con un'installazione HVAC dedicata.

Questi requisiti sono significativi. Rappresentano un cambiamento fondamentale nel significato di possedere un cavo audio. L'interconnessione SC non è un prodotto che si collega e si dimentica. È un'infrastruttura -- un'infrastruttura vivente che richiede monitoraggio, manutenzione e un rapporto con un fornitore di azoto liquido. Per l'ascoltatore che esige zero resistenza, questo è il costo.

## 5. CONCLUSIONE

L'interconnessione SC raggiunge ciò che nessun conduttore convenzionale può: zero resistenza DC, zero rumore termico e immunità magnetica assoluta tramite l'effetto Meissner. Il sovraccarico ingegneristico e operativo -- raffreddamento criogenico, isolamento sotto vuoto, logistica dell'LN, -- è sostanziale ma gestibile per ascoltatori desiderosi di rappresentare il punto finale logico dell'ottimizzazione dei conduttori: quando si è eliminata tutta la resistenza, non c'è più nulla da migliorare.

## RIFERIMENTI

- [1] J. G. Bednorz, K. A. Müller, "Possibile superconduttività ad alta T<sub>c</sub> nel sistema Ba-La-Cu-O," Z. Phys. B, vol. 64, pp. 189-193, 1986.
- [2] M. K. Wu et al., "Superconduttività a 93 K in un nuovo sistema misto Y-Ba-Cu-O," Phys. Rev. Lett., vol. 58, pp. 908-910, 1987.
- [3] SuperPower Inc., "Specifiche del conduttore rivestito YBCO SCS4050-AP," Rev. 12, 2023.
- [4] W. Meissner, R. Ochsenfeld, "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit," Naturwissenschaften, vol. 21, pp. 787-788, 1933.
- [5] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, "Teoria della superconduttività," Phys. Rev., vol. 108, pp. 1175-1204, 1957.
- [6] ASME BPVC Section VIII, Division 1: Regole per la costruzione di recipienti a pressione (servizio criogenico).