
**SUPERPROVODLJIVI AUDIO
INTERKONEKTI: PRIJENOS
SIGNALA BEZ OTPORA PUTEM
YBCO KERAMI KIH PROVODNI
NA 77K**

Superprovodljivi audio interkonekti: Prijenos signala bez otpora putem YBCO kerami kih provodnika na 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.

Sažetak

Izveštavamo o razvoju i karakterizaciji prvog superprovodljivog audio interkonekt kabla. Provodnik je YBCO (itrij-barij-bakar-oksid, $YBa_2Cu_3O_{7-x}$) kerami ka traka koja radi na 77 K u vakuumski izoliranom kriostatu od borosilikata. Otpor je nula -- ne nizak, ne zanemarljiv, nula -- što je potvrđeno etverota kastim mjerenjem s efektom obezbje uje savršeno dijamagnetno oklapanje signalnog puta, izbacuju i sav vanjski magnetni polja kroz superprovodljivi provodnik pokazuju nulti otporni gubitak, nulti doprinos termalnog šuma i potpunu magnetnu imunost. Kabl radi neprekidno s pasivnim dopunjavanjem LN2 na približno 310 litara godišnje po metru.

1. UVOD

Svaki konvencionalni audio kabl ima otpor. Ovaj otpor je mali -- tipično u miliohmima -- ali i on ima tri tipa otpora: (1) otporni gubitak signala (prigušenje), (2) generisanje termalnog šuma (Johnson-Nyquistov šum, proporcionalan otporu i temperaturi), i (3) varijacije impedance ovisne o frekvenciji (skin efekat, efekat blizine). Ovi efekti su dobro okarakterisani i, u konvencionalnim kablovima, predstavljaju fundamentalna fizička ograničenja prijenosa signala.

Superprovodljivost eliminira sva tri. Superprovodnik ima tačno nulti DC otpor ispod svoje kritične temperature, nulti Johnson-Nyquistov šum i -- u niskofrekvencijskom audio opsegu -- nultu varijaciju impedance ovisnu o frekvenciji. Signal ulazi na jedan kraj provodnika i izlazi na drugi kraj s matematički savršeno očuvanom amplitudom i fazom.

Dodatno, Meissnerov efekat -- potpuno izbacivanje magnetnog fluksa iz unutrašnjosti superprovodnika -- uklanja vanjska magnetna polja koje nikakva količina konvencionalnog metalnog materijala, bakarne pletenice ili provodljivog polimera ne mogu pružiti. Ovo pruža vanjsku magnetnu zaštitu koja ne prigušuje vanjska magnetna polja; ona ih apsolutno isključuje.

Inženjerski izazov je održavanje superprovodljivog stanja: YBCO zahtijeva neprekidno hlađenje (iako na 77 K na 1 atm) kao kriogen, koji cirkuliše kroz vakuumski izolirani kriostat. Ovo, priznajemo, nije konvencionalni dizajn kabla.

2. KONSTRUKCIJA KABLA

SC interkonekt se sastoji od sljedećih elemenata, od centra prema vani:

Provodnik: YBCO kerami ka traka (SuperPower SCS4050-AP), širine 4,0 mm x debljine 0,1 mm, koja radi na 77 K u vlastitim poljem. Traka je namotana u helikoidnoj konfiguraciji na nosaču od nehrđajućeg čelika kako bi se osigurala ograničena fleksibilnost.

Signalni put: Dvije YBCO trake (signal i povratak) namotane su koncentrično s PTFE razdjelnikom. Impedanca je projektovana na 75 Ohm na audio frekvencijama, što odgovara standardnoj praksi interkonekta.

Kriostat: Dvozidni Dewar od borosilikatnog stakla, vanjski prenik 48 mm, unutrašnji prenik 25 mm, vakuumiran do $< 10^{-3}$ Pa. Sklop provodnika je uronjen u tečni azot unutar unutrašnjeg obojzidnog Dewara. Dostupni prihvataju standardne LN2 dovodne cijevi od 6 mm.

Konektori: Kriogeno ocijenjeni XLR konektori s pozlatom rodija, modifikovani vakuumskim provodnim brtvama i termalnim prekidima (G10 razdjelnici od fiberglasa) kako bi se spriječila termalna provodljivost s toplom tijelom.

Ukupni vanjski prenik kabla je 48 mm. Kabl teži 2,4 kg/m suh i 3,8 kg/m napunjen LN2. Maksimalna dužina je ograničena staklenim kriostatom, a ne fleksibilnim provodnikom.

3. ELEKTRICNA KARAKTERIZACIJA

DC otpor: Mjeren etverota kastom tehnikom s Keithley 2182A nanovoltmetrom i 6221 izvornim izvorom napona na provodniku dužine 1,5 m koji nosi 100 mA DC bio je ispod nivoa šuma instrumenta -- $< 10^{-8}$ Ohm. Za sve praktične svrhe, otpor je nula.

AC impedanca: Pri 1 kHz, impedanca iznosi 75,0 +/- 0,1 Ohm (isto reaktivna -- bez otpora).

zaključak: budući da se provodnik održava na konstantnoj temperaturi od 77 K putem LN2 kupatila, nema temperaturne promjene. Stabilnost impedancije tokom 30-dnevne kampanje mjerenja iznosila je +/- 0,0003 Ohm.

Nivo šuma: Johnson-Nyquistov naponski šum otpornika je $V_n = \sqrt{4 * k_B * T * R * \text{širina opsega}}$. Za $R = 0$ (superprovodnik), $V_n = 0$ bez obzira na temperaturu ili širinu opsega. Superprovodljivi interkonekt doprinosi signalnom putu.

Magnetno oklapanje: Helmholtzova zavojnica koja proizvodi 1 mT (10 Gauss) na 50 Hz bila je postavljena 50 mm od kabela. Fluxgate magnetometar unutar kriostata (uz provodnik) izmjerio je < 0,01 nT -- prigušenje preko 160 dB. Ovo je Meissnerov efekat: superprovodnik aktivno isključuje vanjsko polje, ne apsorpcijom (kao u mu-metalu) već generirajući savršeno suprotstavljaju primijenjenom polju.

4. PRAKTI NA RAZMATRANJA

SC interkonekt zahtijeva neprekidno snabdijevanje LN2. Stopa termalnog gubitka vakuumski izoliranog kriostata iznosi približno 0,85 litara LN2 po danu po metru dužine kabela. Za par interkonekta od 1,5 m, godišnja potrošnja LN2 iznosi približno 930 litara -- otprilike 930 USD godišnje pri trenutnim komercijalnim cijenama LN2 (1 USD/litar za isporuku).

Kabl mora biti instaliran s LN2 otvorima za punjenje dostupnim za periodično dopunjavanje (na 77 K). Integrirani sigurnosni ventil za pritisak sprečava opasno preopterećenje pri ispuštanju LN2. Kapacitet ispusta. Senzor smanjenja O2 montiran je na kriostatu i pruža vizuelne (žuti LED) indikacije koncentracija ambijentalnog kisika padne ispod 19,5%.

Zahtjev za ventilaciju prostorije je minimum 10 izmjena vazduha na sat (ACH) -- standard za laboratorij, ali se lako postiže s namjenskom HVAC instalacijom.

Ovi zahtjevi su značajni. Predstavljaju fundamentalnu promjenu u tome šta znači posjedovanje i održavanje superprovodljive audio opreme. To je infrastruktura -- živa infrastruktura koja zahtijeva stalnu dobavu i održavanje te nog azota. Za slušaoca koji zahtijeva nulti otpor, ovo je cijena.

5. ZAKLJUČAK

SC interkonekt postiže ono što nijedan konvencionalni provodnik ne može: nulti DC otpor, nulti termalni šum i apsolutnu magnetnu imunitet putem Meissnerovog efekta. Inženjerski i operativni nadzor -- kriogeno hlađenje, značajan je, ali izvodljiv za posvećene slušaoce. Vjerujemo da superprovodljivi audio prenosnici su samo pitanje vremena: kada eliminišete sav otpor, ne ostaje ništa što se može poboljšati.

REFERENCE

- [1] J. G. Bednorz, K. A. Müller, „Moguća visoko-Tc superprovodljivost u Ba-La-Cu-O sistemu“, Z. Phys. B, vol. 90, str. 1-2, 1992.
- [2] M. K. Wu i sar., „Superprovodljivost na 93 K u novom mješovitofaznom Y-Ba-Cu-O sistemu“, Phys. Rev. Lett., vol. 58, str. 908-910, 1987.
- [3] SuperPower Inc., „SCS4050-AP YBCO specifikacije obloženog provodnika“, Rev. 12, 2023.
- [4] W. Meissner, R. Ochsenfeld, „Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit“, Naturwissenschaften, vol. 21, str. 787-788, 1933.
- [5] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, „Teorija superprovodljivosti“, Phys. Rev., vol. 108, str. 1175-1204, 1957.
- [6] ASME BPVC Section VIII, Division 1: Pravila za izgradnju posuda pod pritiskom (kriogena služba).