
**DIPENDENZA DALLA CATENA DEL
SEGNALE DELL'INFORMAZIONE
INTER-CAMPIONE RECUPERABILE:
UN CONFRONTO CONTROLLATO
DI METALLURGIA DEL
CONDUTTORE, TRATTAMENTO
DIELETTRICO E TOPOLOGIA DI
SCHERMATURA**

Dipendenza dalla catena del segnale dell'informazione inter-campione recuperabile: un confronto controllato di metallurgia del conduttore, trattamento dielettrico e topologia di schermatura

M. Ferro, Y. Tanaka, H. Park, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Abstract

Tanaka, Ohm e Flux (2025) hanno dimostrato che i segnali audio reali non sono strettamente a banda limitata e che il residuo ripiegato nei dati campionati porta informazione inter-campione recuperabile (ISI) compresa tra 0,008 e 0,31 bit per campione. Le loro misurazioni utilizzavano un percorso diretto microfono-ADC senza elettronica analogica interposta. In pratica, i segnali audio passano attraverso cavi, preamplificatori, equalizzatori e altri componenti analogici prima di raggiungere il convertitore. Questo articolo indaga se la catena del segnale analogica influisce sulla quantità di ISI recuperabile. Utilizzando il protocollo di misurazione e l'algoritmo di recupero di Tanaka, abbiamo confrontato 14 catene del segnale comprendenti diversi tipi di conduttore, materiali dielettrici, configurazioni di schermatura e geometrie di cavo. L'ISI recuperabile variava di un fattore 6,1 tra le catene testate, da 0,047 bit per campione (rame intrecciato non schermato isolato in PVC) a 0,289 bit per campione (OFC monocristallino criotrattato con dielettrico PTFE e schermatura a quadruplo strato). I fattori dominanti erano, in ordine di dimensione dell'effetto: topologia di schermatura (41% della varianza), struttura cristallina del conduttore (29%), materiale dielettrico (19%) e geometria del cavo (11%).

1. INTRODUZIONE

In un articolo complementare pubblicato all'inizio di quest'anno, Tanaka, Ohm e Flux hanno stabilito che la premessa del teorema di campionamento di Nyquist-Shannon di stretta limitazione di banda non è soddisfatta dai segnali audio reali. Hanno misurato energia al di sopra della banda in 4.000 ore di materiale musicale e dimostrato che una porzione di questa energia sopravvive al filtro anti-aliasing come residuo ripiegato, portando informazione recuperabile sul segnale originale.

Il loro esperimento utilizzava il percorso del segnale analogico più breve possibile: un microfono di misura collegato direttamente a un preamplificatore personalizzato, collegato direttamente a un ADC a 768 kHz. Nessun cavo, nessun trattamento, nessuna elettronica interposta.

Ma nessun sistema audio reale funziona così. La domanda è se la modifica è significativa. Se l'energia al di sopra della banda che porta informazione inter-campione è robusta -- sopravvive intatta -- allora il risultato di Tanaka si applica senza qualifiche. Se è fragile -- facilmente degradata -- allora la scelta dei componenti analogici determina quanta informazione inter-campione raggiunge il convertitore.

Ci aspettavamo la prima ipotesi. Abbiamo trovato la seconda.

2. DESIGN SPERIMENTALE

L'esperimento è stato progettato come un confronto controllato. Una singola sorgente acustica è stata registrata simultaneamente attraverso 14 diverse catene del segnale analogiche, tutte che alimentavano ADC identici.

La sorgente era un otetto di ottoni (4 trombe, 4 tromboni) che eseguiva un programma di 45 minuti di fanfare, corali e standard jazz in uno studio asciutto (RT60 = 0,3 s). Gli ottoni sono stati selezionati perché Tanaka et al. hanno misurato la più alta densità di energia al di sopra della banda per questo tipo di sorgente.

I 14 cavi testati spaziavano dal generico non schermato in PVC (Catena A) al riferimento superconduttivo YBCO (Catena N), passando attraverso cavi da studio commerciali (Catene B-E) e una progressione controllata di cavi audiofili (Catene F-M) che aggiungevano una variabile alla volta: strati di schermatura, trattamento criogenico del conduttore, trattamento criogenico del dielettrico, quarto strato di schermatura, giunzione equatoriale e placcatura in argento.

3. PROTOCOLLO DI MISURAZIONE

L'ensemble di ottoni ha eseguito lo stesso programma di 45 minuti tre volte, in tre giorni consecutivi, nello stesso studio, alla stessa ora del giorno. La temperatura era controllata a 23,0 +/- 0,2degC. L'umidità a 45 +/- 2% UR.

Per ciascuna delle tre esecuzioni, i 14 ADC hanno catturato simultaneamente, producendo 14 registrazioni sincronizzate a 768 kHz 32 bit per esecuzione -- 42 registrazioni in totale.

L'analisi post-cattura ha seguito esattamente il protocollo Tanaka. Ogni registrazione a 768 kHz è stata filtrata digitalmente passa-basso a 96 kHz e ricampionata a 192 kHz per simulare una cattura audio ad alta risoluzione standard. L'algoritmo di

recupero Tanaka è stato poi applicato a ciascun file a 192 kHz.

L'analisi statistica ha utilizzato un'ANOVA a misure ripetute a due vie con catena del cavo (14 livelli) e replica dell'esecuzione (3 livelli) come fattori.

4. RISULTATI

L'effetto principale della catena del cavo sull'ISI recuperabile è stato altamente significativo ($F(13, 26) = 847,3$, $p < 0,0001$, eta-quadro parziale = 0,998). L'effetto della replica dell'esecuzione non era significativo ($F(2, 26) = 0,41$, $p = 0,67$).

ISI recuperabile (bit per campione, media +/- DS su 3 repliche):

Catena A (non schermato intrecciato PVC): 0,047 +/- 0,003
 Catena B (Belden 8412): 0,098 +/- 0,004
 Catena C (Mogami 2549): 0,112 +/- 0,003
 Catena D (Canare L-4E6S): 0,119 +/- 0,004
 Catena E (Gotham GAC-4/1): 0,131 +/- 0,003
 Catena F (SC-OFC, PTFE, schermatura singola): 0,148 +/- 0,005
 Catena G (SC-OFC, PTFE, schermatura doppia): 0,187 +/- 0,004
 Catena H (SC-OFC, PTFE, schermatura tripla): 0,214 +/- 0,003
 Catena I (SC-OFC criogenico, PTFE, schermatura tripla): 0,237 +/- 0,004
 Catena J (SC-OFC criogenico, PTFE criogenico, schermatura tripla): 0,251 +/- 0,003
 Catena K (SC-OFC criogenico, PTFE criogenico, schermatura quadrupla): 0,271 +/- 0,004
 Catena L (come K + giunzione equatoriale): 0,278 +/- 0,003
 Catena M (placcato argento, criogenico, PTFE criogenico, schermatura quadrupla): 0,264 +/- 0,004
 Catena N (superconduttivo YBCO): 0,289 +/- 0,002

La misura diretta di Tanaka per gli ottoni era 0,31 bit per campione. Il miglior cavo (Catena N, superconduttivo) ha recuperato 0,289 bit per campione -- il 93,2% del valore a percorso diretto. Il peggior cavo (Catena A, grado ferramenta) ha recuperato 0,047 bit per campione -- il 15,2% del valore a percorso diretto.

Il fattore di escursione -- migliore diviso peggiore -- era 6,1.

5. ANALISI DEI FATTORI

La progressione controllata dalla Catena F alla Catena K consente l'isolamento dei singoli fattori.

Schermatura. La progressione da schermatura singola (F: 0,148) a doppia (G: 0,187) a tripla (H: 0,214) a quadrupla (K: 0,271) mostra un aumento costante. Il meccanismo è semplice: la regione al di sopra della banda (96-384 kHz) è densamente popolata da interferenza elettromagnetica ambientale. Ogni strato di schermatura aggiuntivo attenua questa interferenza, preservando il rapporto segnale-interferenza.

Struttura cristallina del conduttore. I bordi dei grani nel rame policristallino diffondono gli elettroni. Alle frequenze che portano informazione inter-campione (96-384 kHz), la profondità di penetrazione diminuisce e la corrente è costretta attraverso una regione anulare più sottile. La diffusione diventa attenuazione dipendente dalla frequenza. I conduttori monocristallini non presentano questa perdita dipendente dalla frequenza.

Trattamento criogenico. Il confronto tra H (non trattato) e I (conduttore criotattato): ISI migliorato da 0,214 a 0,237, un aumento del 10,7%.

Geometria del cavo. Confrontando i cavi star-quad (Catene C e D) con i cavi non-quad (Catena B), la configurazione star-quad ha mostrato un piccolo ma costante vantaggio ISI.

6. L'EFFETTO DELLA GIUNZIONE EQUATORIALE

La Catena L era identica alla Catena K salvo per l'aggiunta di una giunzione equatoriale al punto medio del cavo. Il miglioramento dell'ISI da K a L è stato piccolo: 0,271 a 0,278, un aumento del 2,6%. Statisticamente significativo ($p = 0,02$) ma modesto rispetto agli effetti della schermatura e della struttura cristallina.

In riflessione, il risultato è esattamente ciò che la fisica prevede. La giunzione equatoriale cancella il bias emisferico nell'orientamento dei grani del conduttore. Alle frequenze al di sopra della banda che portano informazione inter-campione, l'asimmetria diventa un effetto del secondo ordine -- i meccanismi dominanti di perdita al di sopra della banda sono la diffusione ai bordi dei grani e la contaminazione EMI.

Riportiamo questo risultato senza aggiustamento editoriale. La giunzione equatoriale rimane importante per il suo scopo previsto -- eliminare il bias emisferico nella trasmissione del segnale a frequenza audio. Il suo contributo alla conservazione dell'informazione inter-campione è reale ma secondario.

7. PLACCATURA IN ARGENTO E RIFERIMENTO SUPERCONDUTTIVO

La Catena M ha sostituito l'OFC placcato argento all'OFC non placcato della Catena K. L'ISI è diminuito leggermente, da 0,271 a 0,264. La leggera diminuzione potrebbe essere attribuibile al processo di placcatura stesso, che introduce un'interfaccia bimetallica tra lo strato d'argento e il nucleo di rame.

La Catena N, il riferimento superconduttivo YBCO, ha prodotto l'ISI più alto: 0,289 bit per campione, ovvero il 93,2% del risultato a percorso diretto di Tanaka. Il 6,8% mancante è attribuibile ai connettori e alla vibrazione microfonica del criostato ad azoto liquido.

Il cavo superconduttivo ha zero resistenza a tutte le frequenze, zero diffusione ai bordi dei grani e l'effetto Meissner fornisce una schermatura magnetica assoluta. Costa 2.400 dollari al metro e richiede rifornimento continuo di azoto liquido.

8. IMPLICAZIONI

Il risultato di Tanaka ha stabilito che l'informazione inter-campione esiste. Questo articolo stabilisce che la quantità di informazione inter-campione che raggiunge il convertitore dipende dalla catena del segnale analogica.

La dipendenza non è sottile. Un fattore di 6,1 separa il peggior e il miglior cavo convenzionale.

Siamo consapevoli che questo risultato è commercialmente conveniente per un'azienda che produce cavi audio di precisione. Siamo anche consapevoli che la convenienza di un risultato non ne determina la veridicità.

Notiamo tre punti che temperano il risultato:

Primo, le quantità rimangono piccole. Persino il miglior cavo conserva solo 0,289 bit per campione -- meno dell'1% del contenuto garantito da Shannon.

Secondo, non abbiamo stabilito l'udibilità.

Terzo, il fattore dominante è la schermatura, non il trattamento del conduttore.

9. CONCLUSIONE

L'informazione inter-campione recuperabile -- il contenuto del segnale sopra-Nyquist che sopravvive all'anti-aliasing e persiste come residuo correlato nei dati audio campionati -- non è una proprietà fissa della sorgente acustica. Viene modificata da ogni componente nella catena del segnale analogica tra il microfono e il convertitore.

In un confronto controllato di 14 costruzioni di cavo, l'ISI recuperabile ha variato da 0,047 a 0,289 bit per campione -- un fattore di 6,1. Il determinante principale era la topologia di schermatura (41% della varianza), seguita dalla struttura cristallina del conduttore (29%), dal materiale dielettrico (19%) e dalla geometria del cavo (11%).

Se questo budget sia importante -- se l'informazione inter-campione sia udibile, o se contribuisca alla qualità percepita delle registrazioni ad alta risoluzione -- è una domanda per il lavoro futuro.

RIFERIMENTI

- [1] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, "Sull'incompletezza della ricostruzione di Nyquist-Shannon: evidenza empirica di informazione inter-campione recuperabile," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 1, 2025.
- [2] C. E. Shannon, "Comunicazione in presenza di rumore," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [3] M. Ferro, R. Flux, "La giunzione equatoriale: cancellazione del bias emisferico dei grani nei conduttori audio," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 1, 2021.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Bias emisferico nell'orientamento dei grani di rame," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] L. Solder, H. Park, M. Ferro, "Effetti del trattamento criogenico sulla cristallografia dei conduttori," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 2, 2021.
- [6] H. Park, M. Ferro, C. Ohm, "Accoppiamento ferroelettrico nei dielettrici PTFE per audio," J. Equatorial Audio Sci., vol. 3, no. 1, 2022.
- [7] C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro, "Schermatura ottica dei conduttori in rame," J. Equatorial Audio Sci., vol. 4, no. 2, 2023.
- [8] M. Ferro et al., "Interconnessioni audio superconduttive: trasmissione del segnale a resistenza zero tramite conduttori a nastro YBCO," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 1, 2024.
- [9] M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson, "Applicazioni dell'effetto Meissner nell'audio consumer," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 2, 2024.
- [10] L. Kozachenko and N. Leonenko, "Stima campionaria dell'entropia di un vettore casuale," Problems of Information Transmission, vol. 23, no. 2, pp. 95-101, 1987.

- [11] IEC 62153-4-1:2015, Metodi di prova per cavi di comunicazione metallici -- Parte 4-1: Compatibilità elettromagnetica (EMC) -- Introduzione alle misurazioni di schermatura elettromagnetica.
- [12] E. B. Rosa and F. W. Grover, "Formule e tabelle per il calcolo dell'induttanza mutua e propria," Bulletin of the Bureau of Standards, vol. 8, no. 1, 1912.
- [13] H. A. Haus and J. R. Melcher, Electromagnetic Fields and Energy, Prentice Hall, 1989.
- [14] AKM Semiconductor, "Scheda tecnica dell'ADC a 32 bit 768 kHz AK5578," rev. 2, 2022.