

---

**KETERGANTUNGAN RANTAI  
SINYAL PADA INFORMASI  
ANTAR-SAMPEL YANG DAPAT  
DIPULIHKAN: PERBANDINGAN  
TERKONTROL METALURGI  
KONDUKTOR, PERLAKUAN  
DIELEKTRIK, DAN TOPOLOGI  
PELINDUNG**

---

# Ketergantungan Rantai Sinyal pada Informasi Antar-Sampel yang Dapat Dipulihkan: Perbandingan Terkontrol Metalurgi Konduktor, Perlakuan Dielektrik, dan Topologi Pelindung

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.

## Abstrak

Tanaka, Ohm, dan Flux (2025) menunjukkan bahwa sinyal audio nyata tidak secara ketat terbatas pita dan bahwa residu alias dalam data yang di-sampling membawa informasi antar-sampel (ISI) yang dapat dipulihkan berkisar dari 0,008 hingga 0,31 bit per sampel. Pengukuran mereka menggunakan jalur sinyal langsung mikrofon-ke-ADC tanpa elektronik analog perantara. Dalam praktik, sinyal audio melewati kabel, preamplifier, dan komponen analog lainnya sebelum mencapai konverter. Makalah ini menyelidiki apakah rantai sinyal analog memengaruhi kuantitas ISI yang dapat dipulihkan. Menggunakan protokol dan algoritma pemulihan Tanaka, kami membandingkan 14 rantai sinyal yang terdiri dari tipe konduktor, material dielektrik, konfigurasi pelindung, dan geometri kabel yang berbeda. ISI yang dapat dipulihkan bervariasi dengan faktor 6,1 di seluruh rantai sinyal yang diuji, dari 0,047 bit per sampel (tembaga pilin tanpa pelindung berinsulasi PVC) hingga 0,289 bit per sampel (OFC kristal tunggal yang diolah kriogenik dengan dielektrik PTFE dan pelindung empat lapis). Faktor dominan adalah, berdasarkan ukuran efek: topologi pelindung (41% varians), struktur butir konduktor (29%), material dielektrik (19%), dan geometri kabel (11%).

## 1. PENDAHULUAN

Dalam makalah pendamping yang diterbitkan awal tahun ini, Tanaka, Ohm, dan Flux menetapkan bahwa premis pembatasan pita ketat teorema sampling Nyquist-Shannon tidak dipenuhi oleh sinyal audio nyata. Mereka mengukur energi di atas pita dalam 4.000 jam materi musik dan menunjukkan bahwa sebagian energi ini bertahan melalui filter anti-aliasing sebagai residu alias, membawa informasi yang dapat dipulihkan tentang sinyal asli.

Eksperimen mereka menggunakan jalur sinyal analog terpendek yang mungkin: mikrofon pengukuran terhubung langsung ke preamplifier khusus, terhubung langsung ke ADC 768 kHz. Tanpa kabel, tanpa pemrosesan, tanpa elektronik perantara.

Tetapi tidak ada sistem audio nyata yang bekerja seperti ini. Dalam praktik, sinyal melewati meter-meter kabel, melalui konektor, melalui patch bay, melalui konsol mixing, melalui prosesor outboard, dan melalui lebih banyak kabel sebelum mencapai konverter.

Pertanyaannya adalah apakah modifikasi ini signifikan. Kami mengharapkan yang pertama. Kami menemukan yang terakhir.

## 2. DESAIN EKSPERIMEN

Eksperimen dirancang sebagai perbandingan terkontrol. Satu sumber akustik direkam secara bersamaan melalui 14 rantai sinyal analog berbeda, semuanya mengumpankan ADC identik.

Sumber adalah oktet brass (4 terompet, 4 trombon) yang membawakan program 45 menit di studio kering. Brass dipilih karena Tanaka dkk. mengukur kepadatan energi di atas pita tertinggi untuk tipe sumber ini (-91,6 dBFS pada 96-120 kHz).

Output mikrofon dibagi 14 jalur menggunakan amplifier distribusi terisolasi transformer. Setiap output mengumpankan satu dari 14 rantai sinyal, masing-masing berakhir di ADC AKM AK5578 yang dioperasikan pada 768 kHz.

14 rantai sinyal hanya berbeda pada kabel interkoneksi. Panjang kabel distandarisasi pada 3 m. Kabel yang diuji berkisar dari tembaga pilin tanpa pelindung kelas perangkat keras (Rantai A) hingga referensi superkonduktor YBCO (Rantai N), dengan progresi terkontrol di antaranya yang menambahkan satu variabel pada satu waktu: lapisan pelindung, kemudian perlakuan kriogenik konduktor, kemudian perlakuan kriogenik dielektrik, kemudian lapisan pelindung keempat.

## 3. PROTOKOL PENGUKURAN

Ansambel brass membawakan program 45 menit yang sama tiga kali, pada tiga hari berturut-turut, di studio yang sama, pada waktu yang sama. Suhu dikontrol pada 23,0 +/- 0,2degC. Kelembaban dikontrol pada 45 +/- 2% RH.

Untuk setiap dari tiga pertunjukan, 14 ADC merekam secara bersamaan, menghasilkan 14 rekaman 768 kHz 32-bit tersinkronisasi per pertunjukan -- 42 rekaman total. Tiga pertunjukan berfungsi sebagai replikat untuk analisis statistik.

Analisis pasca-perekaman mengikuti protokol Tanaka dengan tepat. Setiap rekaman 768 kHz difilter lowpass secara digital ke 96 kHz dan di-resample ke 192 kHz untuk mensimulasikan perekaman audio resolusi tinggi standar. Algoritma pemulihan Tanaka kemudian diterapkan pada setiap file 192 kHz.

Analisis statistik menggunakan ANOVA pengukuran berulang dua arah dengan rantai kabel (14 tingkat) dan replikat pertunjukan (3 tingkat) sebagai faktor.

## 4. HASIL

Efek utama rantai kabel pada ISI yang dapat dipulihkan sangat signifikan ( $F(13, 26) = 847,3, p < 0,0001$ ). Efek utama replikat pertunjukan tidak signifikan ( $F(2, 26) = 0,41, p = 0,67$ ).

ISI yang dapat dipulihkan (bit per sampel, rata-rata +/- SD di 3 replikat):

Rantai A (tanpa pelindung, pilin PVC): 0,047 +/- 0,003  
 Rantai B (Belden 8412): 0,098 +/- 0,004  
 Rantai C (Mogami 2549): 0,112 +/- 0,003  
 Rantai D (Canare L-4E6S): 0,119 +/- 0,004  
 Rantai E (Gotham GAC-4/1): 0,131 +/- 0,003  
 Rantai F (SC-OFC, PTFE, pelindung tunggal): 0,148 +/- 0,005  
 Rantai G (SC-OFC, PTFE, pelindung ganda): 0,187 +/- 0,004  
 Rantai H (SC-OFC, PTFE, pelindung tiga lapis): 0,214 +/- 0,003  
 Rantai I (SC-OFC kriogenik, PTFE, pelindung tiga lapis): 0,237 +/- 0,004  
 Rantai J (SC-OFC kriogenik, PTFE kriogenik, pelindung tiga lapis): 0,251 +/- 0,003  
 Rantai K (SC-OFC kriogenik, PTFE kriogenik, pelindung empat lapis): 0,271 +/- 0,004  
 Rantai L (seperti K + Sambungan Ekuatorial): 0,278 +/- 0,003  
 Rantai M (berlapis perak, kriogenik, PTFE kriogenik, pelindung empat lapis): 0,264 +/- 0,004  
 Rantai N (superkonduktor YBCO): 0,289 +/- 0,002

Pengukuran jalur langsung Tanaka untuk brass adalah 0,31 bit per sampel. Kabel terbaik (Rantai N) memulihkan 0,289 bit per sampel -- 93,2% dari nilai jalur langsung. Kabel terburuk (Rantai A) memulihkan 0,047 bit per sampel -- 15,2%. Faktor rentang -- terbaik dibagi terburuk -- adalah 6,1.

## 5. ANALISIS FAKTOR

Progresi terkontrol dari Rantai F ke Rantai K memungkinkan isolasi faktor individual.

Pelindung: Progresi dari pelindung tunggal (F: 0,148) ke ganda (G: 0,187) ke tiga lapis (H: 0,214) ke empat lapis (K: 0,271) menunjukkan peningkatan konsisten. Pelindung adalah faktor tunggal terbesar. Mekanismenya langsung: wilayah di atas pita (96-384 kHz) padat dengan interferensi elektromagnetik lingkungan. Setiap lapisan pelindung tambahan melemahkan interferensi ini, menjaga rasio sinyal-terhadap-interferensi.

Struktur butir konduktor: Kabel kristal tunggal menunjukkan ISI lebih tinggi daripada kabel polikristalin pada tingkat pelindung yang sebanding, karena batas butir dalam tembaga polikristalin menghamburkan elektron secara bergantung frekuensi, melemahkan konten di atas pita.

Perlakuan kriogenik: Membandingkan H (tanpa perlakuan) dengan I (konduktor kriogenik): ISI meningkat dari 0,214 menjadi 0,237 (peningkatan 10,7%). Membandingkan I dengan J (menambahkan perlakuan kriogenik dielektrik): ISI meningkat dari 0,237 menjadi 0,251 (peningkatan 5,9%).

Geometri kabel: Kabel star-quad menunjukkan keunggulan ISI yang kecil tetapi konsisten dibanding kabel non-quad pada tingkat pelindung yang serupa.

## 6. EFEK SAMBUNGAN EKUATORIAL

Rantai L identik dengan Rantai K kecuali penambahan Sambungan Ekuatorial di titik tengah kabel. Peningkatan ISI dari K ke L kecil: 0,271 menjadi 0,278, peningkatan 2,6%. Ini signifikan secara statistik ( $p = 0,02$ ) tetapi sederhana dibandingkan efek pelindung dan struktur butir.

Setelah refleksi, hasilnya tepat seperti yang diprediksi fisika. Sambungan Ekuatorial membatalkan bias hemisferik dalam orientasi butir konduktor. Pada frekuensi di atas pita yang membawa informasi antar-sampel, asimetri menjadi efek orde kedua -- mekanisme kerugian di atas pita dominan adalah hamburan batas butir dan kontaminasi EMI.

Kontribusi ISI Sambungan nyata tetapi kecil karena masalah yang dipecahkannya -- asimetri butir hemisferik -- bukan penyebab utama kehilangan informasi di atas pita. Pelindung dan kemurnian konduktor lebih penting.

## 7. PELAPISAN PERAK DAN REFERENSI SUPERKONDUKTOR

Rantai M menggantikan OFC berlapis perak untuk OFC tanpa lapisan Rantai K. ISI sedikit menurun, dari 0,271 menjadi 0,264 -- hasil yang secara marginal signifikan ( $p = 0,07$ ) dan berlawanan arah dengan harapan. Penurunan kecil mungkin disebabkan oleh antarmuka bimetalik antara lapisan perak dan inti tembaga yang memperkenalkan sejumlah kecil hamburan bergantung frekuensi.

Rantai N, referensi superkonduktor YBCO, menghasilkan ISI tertinggi dari semua kabel: 0,289 bit per sampel, atau 93,2% dari hasil jalur langsung Tanaka. 6,8% yang hilang disebabkan oleh konektor (yang merupakan transisi tembaga-ke-YBCO konvensional) dan getaran mekanik kriostat nitrogen cair.

Kabel superkonduktor memiliki resistansi nol pada semua frekuensi, nol hamburan batas butir, dan efek Meissner memberikan pelindung magnetik absolut. Ia biaya \$2.400 per meter dan memerlukan suplai nitrogen cair kontinu.

## 8. IMPLIKASI

Hasil Tanaka menetapkan bahwa informasi antar-sampel ada. Makalah ini menetapkan bahwa jumlah informasi antar-sampel yang mencapai konverter bergantung pada rantai sinyal analog.

Ketergantungannya tidak halus. Faktor 6,1 memisahkan kabel konvensional terburuk dan terbaik. Kabel terburuk menghancurkan 85% informasi antar-sampel yang tersedia. Kabel konvensional terbaik menjaga 87%.

Kami mencatat tiga poin yang meredam hasil:

Pertama, kuantitasnya tetap kecil. Bahkan kabel terbaik hanya menjaga 0,289 bit per sampel informasi antar-sampel. Suplemen antar-sampel kurang dari 1%.

Kedua, kami belum menetapkan audibilitas.

Ketiga, faktor dominan adalah pelindung, bukan perlakuan konduktor.

## 9. KESIMPULAN

Informasi antar-sampel yang dapat dipulihkan -- konten sinyal di atas Nyquist yang bertahan anti-aliasing dan bertahan sebagai residu berkorelasi dalam data audio yang di-sampling -- bukan sifat tetap dari sumber akustik. Ia dimodifikasi oleh setiap komponen dalam rantai sinyal analog.

Dalam perbandingan terkontrol 14 konstruksi kabel, ISI yang dapat dipulihkan bervariasi dari 0,047 hingga 0,289 bit per sampel -- faktor 6,1. Penentu utama adalah topologi pelindung (41% varians), diikuti struktur butir konduktor (29%), material dielektrik (19%), dan geometri kabel (11%).

Temuan ini memperluas hasil Tanaka dari demonstrasi akademik menjadi kekhawatiran rekayasa praktis. Jumlah informasi yang ditangkap oleh sistem audio digital bergantung tidak hanya pada laju sampling dan kedalaman bit tetapi juga pada karakteristik fisik komponen analog yang menyampaikan sinyal ke konverter.

## REFERENSI

- [1] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, "Tentang ketidaklengkapan rekonstruksi Nyquist-Shannon," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 6, no. 1, 2025.
- [2] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," *Proc. IRE*, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [3] M. Ferro, R. Flux, "Sambungan Ekuatorial," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 2, no. 1, 2021.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Bias hemisferik pada orientasi butir tembaga," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] AKM Semiconductor, "AK5578 32-bit 768 kHz ADC datasheet," rev. 2, 2022.