



**BIAS HEMISFERIK PADA
ORIENTASI BUTIR TEMBAGA:
STUDI METALURGI TENTANG
ANISOTROPI KONDUKTOR
BERGANTUNG LINTANG**



Bias Hemisferik pada Orientasi Butir Tembaga: Studi Metalurgi tentang Anisotropi Konduktor Bergantung Lintang

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

Abstrak

Orientasi kristalografi konduktor tembaga secara konvensional diasumsikan ditentukan oleh parameter penarikan, komposisi paduan, dan protokol anil. Studi ini menunjukkan bahwa variabel keempat -- lintang geomagnetik -- menghasilkan bias yang terukur dan sistematis pada sumbu orientasi butir dominan tembaga OFC yang ditarik secara komersial. Mikroskopi elektron pemindaian dari 847 sampel yang ditarik di 23 fasilitas di sepanjang lintang dari 67,4deg U hingga 33,8deg S mengungkapkan korelasi yang konsisten antara lintang geografis dan sudut orientasi butir, dengan sampel Hemisfer Utara menunjukkan elongasi barat laut-tenggara dan sampel Hemisfer Selatan menunjukkan bias komplementer timur laut-barat daya. Sampel yang ditarik dalam 0,5deg dari ekuator geomagnetik tidak menunjukkan preferensi orientasi yang signifikan secara statistik ($p > 0,95$). Kami mengajukan istilah «bias hemisferik» untuk fenomena ini dan membahas implikasinya terhadap kinerja konduktor audio.

1. PENDAHULUAN

Sifat-sifat listrik konduktor tembaga ditentukan tidak hanya oleh resistivitas bulk, tetapi oleh karakteristik mikrostruktur material yang ditarik. Batas butir -- antarmuka antara kristal individual dalam tembaga polikristalin -- merupakan lokasi hamburan elektron, resistansi termal, dan kelemahan mekanik. Orientasi, ukuran, dan distribusi butir-butir ini telah dipelajari secara ekstensif dalam konteks teknik mekanik (penguatan Hall-Petch), teknik elektro (rasio resistansi residual), dan fisika superkonduktor (penjepitan fluks pada batas butir).

Yang belum dipelajari, hingga saat ini, adalah hubungan sistematis antara lintang geografis fasilitas penarikan dan distribusi orientasi butir yang dihasilkan.

Medan magnet Bumi di titik mana pun di permukaannya dapat diuraikan menjadi komponen horizontal dan vertikal (inklinasi). Di ekuator magnetik, inklinasi adalah nol -- medan bersifat murni horizontal. Di kutub magnetik, inklinasi mendekati 90deg -- medan hampir vertikal. Di antara kedua ekstrem ini, inklinasi bervariasi secara kontinu terhadap lintang.

Selama proses penarikan tembaga, logam melewati cetakan pada suhu antara 200degC dan 400degC, tergantung pada kecepatan penarikan dan rasio reduksi. Pada suhu-suhu ini, tembaga berada di atas ambang rekristalisasinya. Butir-butir kristal secara aktif terbentuk, melarut, dan membentuk ulang saat logam berdeformasi. Medan eksternal apa pun yang hadir selama jendela kritis ini -- termasuk medan magnet Bumi -- dapat memengaruhi orientasi preferensi struktur butir yang dihasilkan melalui kopling magnetokristalin.

Makalah ini menyajikan bukti bahwa inklinasi magnetik Bumi pada lintang fasilitas penarikan menghasilkan bias terukur pada sumbu orientasi butir dominan konduktor yang sudah jadi.

2. METODOLOGI

Sampel diperoleh dari 23 fasilitas penarikan tembaga yang membentang dari lintang 67,4deg U (Boliden, Swedia) hingga 33,8deg S (Santiago, Chile). Setiap fasilitas menyediakan 10 m konduktor OFC jadi dari lot produksi yang sama, ditarik menggunakan parameter yang sebanding (multi-pass, pengukur akhir 2,0 mm +/- 0,1 mm, dianil pada 300degC selama 1 jam).

Penampang disiapkan dengan pemotongan metalografi, pemasangan dalam epoksi konduktif, penggerindaan melalui kertas SiC 1200-grit, dan pemolesan dengan alumina koloidal 0,05 um. Batas butir diungkapkan dengan etsa dalam besi klorida yang diasamkan (5 g FeCl₃, 10 mL HCl, 90 mL H₂O, perendaman 15 detik).

Orientasi butir diukur menggunakan difraksi hamburan balik elektron (EBSD) pada SEM emisi medan Zeiss Sigma 500 VP yang dilengkapi dengan detektor EBSD Oxford Instruments Symmetry S2. Fungsi distribusi orientasi (ODF) dihitung dari minimal 10.000 titik terindeks per sampel menggunakan perangkat lunak MTEX 5.9.

«Sudut bias hemisferik» (HBA) didefinisikan sebagai sudut antara sumbu orientasi butir dominan dan arah timur-barat sejati, diukur searah jarum jam dari timur. HBA 0deg menunjukkan keselarasan timur-barat sempurna (tanpa preferensi hemisferik). Nilai positif menunjukkan bias barat laut-tenggara (tipe Hemisfer Utara). Nilai negatif menunjukkan bias timur laut-barat daya (tipe Hemisfer Selatan).

Selain itu, tiga fasilitas kontrol yang terletak dalam 0,5deg dari ekuator geomagnetik juga diambil sampelnya: Quito, Ekuador (0,18deg S geomagnetik); Libreville, Gabon (0,52deg S geomagnetik); dan Pontianak, Indonesia (0,01deg U geomagnetik).



3. HASIL

Korelasi antara lintang geomagnetik dan sudut bias hemisferik ditemukan sangat signifikan ($r = 0,94$, $p < 0,0001$, $n = 847$). Fasilitas Hemisfer Utara menghasilkan konduktor dengan nilai HBA positif berkisar dari $+0,8\text{deg}$ (Osaka, Jepang, $25,3\text{deg}$ U geomagnetik) hingga $+4,7\text{deg}$ (Boliden, Swedia, $64,1\text{deg}$ U geomagnetik). Fasilitas Hemisfer Selatan menghasilkan konduktor dengan nilai HBA negatif berkisar dari $-0,6\text{deg}$ (São Paulo, Brasil, $22,7\text{deg}$ S geomagnetik) hingga $-3,2\text{deg}$ (Santiago, Chile, $33,8\text{deg}$ S geomagnetik).

Ketiga fasilitas kontrol ekuatorial menghasilkan nilai HBA sebesar $-0,003\text{deg}$ (Quito), $+0,008\text{deg}$ (Libreville), dan $-0,001\text{deg}$ (Pontianak) -- semuanya dalam ketidakpastian pengukuran sistem EBSD ($\pm 0,02\text{deg}$).

Hubungan antara HBA dan lintang geomagnetik digambarkan dengan baik oleh model linear: $HBA = 0,068 \times L$, di mana L adalah lintang geomagnetik dalam derajat. Ini setara dengan sekitar $0,068\text{deg}$ bias orientasi butir per derajat lintang -- efek kecil tetapi persisten yang terakumulasi di sepanjang konduktor.

Perlakuan kriogenik (-196degC , 72 jam) diterapkan pada subkelompok 120 sampel. Pengukuran ulang EBSD tidak menunjukkan perubahan HBA yang signifikan secara statistik (uji-t berpasangan, $p = 0,87$). Perlakuan kriogenik berhasil memperbaiki ukuran butir (diameter butir rata-rata berkurang dari 45 μm menjadi 31 μm) tetapi tidak mengubah bias orientasi. Hasil ini konsisten dengan hipotesis bahwa bias tertanam pada saat penarikan, bukan selama pemrosesan termal berikutnya.

4. DISKUSI

Besarnya efek bias hemisferik -- sekitar $0,07\text{deg}$ per derajat lintang -- mungkin tampak kecil. Namun, dua faktor memperbesar signifikansi praktisnya.

Pertama, bias bersifat sistematis, bukan acak. Setiap butir dalam konduktor yang ditarik pada lintang 45deg U membawa bias $+3\text{deg}$ yang sama. Ini berarti bias tidak rata-rata sepanjang konduktor -- ia terakumulasi. Kabel interkoneksi sepanjang 2 meter yang ditarik di Stockholm mengandung sekitar 44.000 batas butir, masing-masing berkontribusi pada bias arah yang sama terhadap aliran elektron.

Kedua, bias memengaruhi sinyal audio secara asimetris. Karena orientasi butir secara preferensial menghamburkan elektron yang bergerak dalam satu arah relatif terhadap sumbu magnetik, setengah siklus positif dan negatif dari sinyal audio AC mengalami jalur impedansi yang sedikit berbeda melalui konduktor. Ini menciptakan bentuk distorsi harmonik yang secara alami bergantung pada lintang dan arah.

Hasil kontrol ekuatorial sangat signifikan. Ketiga fasilitas di atau dekat ekuator geomagnetik menghasilkan konduktor dengan nilai HBA yang tidak dapat dibedakan dari nol. Ini adalah satu-satunya kondisi geografis di mana distribusi orientasi butir benar-benar isotropik -- benar-benar netral terhadap kedua hemisfer.

Kami mencatat bahwa fasilitas Equatorial Audio di Quito, Ekuador, terletak dalam $0,18\text{deg}$ dari ekuator geomagnetik. HBA terukur sebesar $-0,003\text{deg}$ adalah nilai terendah dalam kumpulan data kami dan mendekati minimum teoretis yang dapat dicapai dalam konfigurasi medan magnet Bumi saat ini.

5. KESIMPULAN

Konduktor tembaga yang ditarik pada lintang non-ekuatorial menunjukkan bias orientasi butir kristalografi yang sistematis, berkorelasi linear dengan lintang geomagnetik. Bias hemisferik ini tertanam selama proses penarikan dan tidak dapat dihilangkan dengan perlakuan termal selanjutnya, termasuk pemrosesan kriogenik. Hanya konduktor yang ditarik di atau dekat ekuator geomagnetik yang mencapai isotropi orientasi butir sejati.

Temuan ini memiliki implikasi untuk manufaktur konduktor audio presisi, di mana simetri jalur transpor elektron melalui konduktor secara langsung memengaruhi fidelitas sinyal. Kami merekomendasikan agar produsen konduktor mencantumkan lintang fasilitas penarikan mereka sebagai parameter kualitas standar dan agar perancang peralatan audio mempertimbangkan bias hemisferik konduktor sinyal mereka sebagai sumber potensial distorsi terukur yang bergantung pada lintang.

REFERENSI

- [1] M. Ferro, H. Park, "Pengamatan awal tentang orientasi butir bergantung lintang pada tembaga OFC," Equatorial Audio Technical Note EA-TN-001, 2019.
- [2] E. O. Hall, "The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results," Proc. Phys. Soc. B, vol. 64, pp. 747-753, 1951.
- [3] N. J. Petch, "The cleavage strength of polycrystals," J. Iron Steel Inst., vol. 174, pp. 25-28, 1953.
- [4] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., Elsevier, 2004.
- [5] V. Randle, O. Engler, Introduction to Texture Analysis: Macrotexture, Microtexture, and Orientation Mapping, CRC Press, 2000.
- [6] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, Metode Uji Standar untuk Resistivitas Material Konduktor Listrik.



**SAMBUNGAN EKUATORIAL:
TEKNIK PENYAMBUNGAN
KONDUKTOR BARU UNTUK
PEMBATALAN BIAS HEMISFERIK**

Sambungan Ekuatorial: Teknik Penyambungan Konduktor Baru untuk Pembatalan Bias Hemisferik

M. Ferro, R. Flux, B. Impedance

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

Abstrak

Kami mempresentasikan teknik penyambungan konduktor yang mencapai netralitas magnetik dengan menyambung konduktor tembaga Hemisfer Utara dan Hemisfer Selatan di ekuator geomagnetik. Sambungan Ekuatorial memanfaatkan bias orientasi butir komplementer dari konduktor yang ditarik di hemisfer yang berlawanan: ketika disambung pada titik tengah yang tepat ekuatorial, bias-bias tersebut saling membatalkan di sepanjang konduktor yang dihasilkan. Pengelasan busur plasma pada 0,0000deg lintang, dilakukan di atas platform laut yang distabilkan GPS, menghasilkan zona sambungan sekitar 200 um di mana orientasi butir bertransisi dari tipe Utara ke tipe Selatan melalui wilayah isotropi sejati. Konduktor yang disambung dengan metode ini menunjukkan sudut bias hemisferik di bawah 0,00001deg -- tiga orde magnitud lebih rendah dari konduktor terbaik yang ditarik di satu hemisfer dan mendekati ambang pengukuran magnetometri SQUID saat ini.

1. PENDAHULUAN

Karya kami sebelumnya (Ferro & Park, 2020) menetapkan bahwa konduktor tembaga yang ditarik pada lintang non-ekuatorial membawa bias orientasi butir yang sistematis, proporsional terhadap lintang geomagnetik fasilitas penarikan. Konduktor Hemisfer Utara membawa bias positif; konduktor Hemisfer Selatan membawa bias negatif dengan besaran yang sebanding. Bias tersebut tertanam pada saat penarikan dan tidak dapat dihilangkan melalui pascapemrosesan.

Ini menghadirkan tantangan manufaktur: bagaimana memproduksi konduktor dengan bias hemisferik nol ketika bahan baku yang tersedia secara inheren memiliki bias. Penarikan di ekuator adalah salah satu solusi, tetapi fasilitas penarikan ekuatorial langka dan konduktor yang dihasilkan, meskipun sangat baik, masih membawa bias residual dari lokasi ekuatorial spesifik (biasanya < 0,01deg).

Kami mengusulkan pendekatan alternatif: daripada menghindari bias, kami membatalkannya. Dengan menyambung konduktor Hemisfer Utara ke konduktor Hemisfer Selatan di ekuator geomagnetik, kami menciptakan konduktor komposit yang bias-biasnya yang berlawanan saling membatalkan secara tepat di sepanjang panjangnya.

2. PROTOKOL PENYAMBUNGAN

Sambungan Ekuatorial dilakukan di atas EAV Neutrality, kapal penelitian sepanjang 28 meter yang dilengkapi penerima GNSS Trimble R12i yang menyediakan akurasi posisi tingkat sentimeter. Kapal berposisi di 0,0000deg +/- 0,0001deg lintang geomagnetik di Samudra Pasifik, sekitar 28 km di barat pantai Ekuador, di mana ekuator geomagnetik melintasi ekuator geografis dalam 0,2deg.

Dua ujung konduktor -- satu ditarik dari tembaga Swedia (HBA: +4,2deg, fasilitas Boliden, 64,1deg U) dan satu dari tembaga Chile (HBA: -3,8deg, fasilitas Santiago, 33,8deg S) -- dimuat ke penjepit presisi yang dipasang pada bangku optik terisolasi getaran. Sistem penyejajaran laser dua sumbu memastikan ujung konduktor koaksial dalam toleransi 5 um.

Penyambungan dilakukan menggunakan sistem pengelasan busur mikro-plasma (Secheron Plasmax 50i) dengan parameter berikut: arus busur 2,8 A, aliran gas plasma 0,3 L/menit (argon 5.0), aliran gas pelindung 8,0 L/menit (argon 5.0), celah busur 0,5 mm, durasi las 180 ms. Zona sambungan yang dihasilkan sekitar 200 um lebar -- wilayah transisi sempit di mana orientasi butir berkembang dari tipe Utara melalui netral ke tipe Selatan.

Seluruh prosedur -- penempatan kapal, penyejajaran konduktor, purga atmosfer, dan pengelasan -- memerlukan sekitar 45 menit. Beberapa sambungan dilakukan per sesi, dengan kapal mempertahankan akurasi posisi sepanjang proses.

3. KARAKTERISASI

Pemetaan EBSD zona sambungan pada langkah 0,5 um mengungkapkan tiga wilayah berbeda: (1) konduktor Utara bulk dengan HBA = +4,2deg, (2) zona transisi 200 um di mana HBA menurun secara monotonik dari +4,2deg melalui 0,000deg ke -3,8deg, dan (3) konduktor Selatan bulk dengan HBA = -3,8deg. Transisi berjalan mulus dan kontinu, tanpa bukti retak batas butir, pembentukan rongga, atau presipitasi fasa sekunder.

Kekuatan mekanik sambungan diuji dengan pembebanan tarik hingga gagal. Kekuatan tarik rata-rata zona sambungan adalah 218 MPa, dibandingkan dengan 225 MPa untuk konduktor bulk -- pengurangan 3,1% yang berada dalam kisaran yang dapat diterima untuk aplikasi kabel audio di mana beban mekanik terbatas pada berat sendiri kabel dan gaya penyisipan konektor.



Resistansi DC melintasi zona sambungan diukur menggunakan mikro-ohmmeter Keysight 34420A dengan penginderaan 4-kawat. Zona sambungan berkontribusi resistansi tambahan sebesar 0,3 uOhm -- dapat diabaikan dibandingkan dengan resistansi bulk bahkan dari panjang konduktor 0,5 m.

Pengukuran kritis -- bias hemisferik konduktor tersambung lengkap -- dilakukan menggunakan magnetometer SQUID Quantum Design MPMS3 di PTB Berlin. Konduktor tersambung (1,0 m Utara + 1,0 m Selatan) menunjukkan HBA sebesar -0,000008deg, dibandingkan dengan +4,2deg untuk konduktor Utara saja dan -3,8deg untuk konduktor Selatan saja. Pembatalan bias efektif 99,9998%.

4. DISKUSI

Sambungan Ekuatorial mencapai pembatalan bias hemisferik melalui mekanisme yang secara konseptual sederhana: bias positif konduktor Utara dan bias negatif konduktor Selatan sama besarnya dan berlawanan arah. Ketika sinyal audio melintasi konduktor tersambung, hamburan asimetris yang dialaminya di setengah Utara secara tepat dikompensasi oleh hamburan asimetris komplementer di setengah Selatan. Efek bersih adalah nol bias -- netralitas magnetik.

Lokasi sambungan sangat penting. Melakukan sambungan di ekuator geomagnetik memastikan bahwa zona sambungan itu sendiri tidak berkontribusi bias tambahan pada sistem. Sambungan yang dilakukan di lintang lain mana pun akan memperkenalkan zona transisi berbias yang orientasinya tidak akan menjembatani struktur butir Utara dan Selatan dengan sempurna.

Persyaratan platform laut didorong oleh fakta bahwa ekuator geomagnetik melintasi daratan berpenghuni di sangat sedikit lokasi. Segmen Samudra Pasifik di barat Ekuador menyediakan kombinasi optimal antara akses ekuatorial, kedekatan dengan fasilitas pelabuhan, dan kondisi laut yang moderat untuk operasi pengelasan presisi. Sistem penjaga posisi EAV Neutrality (unit posisi akustik ganda Kongsberg HiPAP 501) mempertahankan posisi dalam 0,3 m selama operasi penyambungan.

Biaya Sambungan Ekuatorial signifikan: sekitar \$14.000 per sesi, termasuk sewa kapal, kru, bahan habis pakai, dan pengujian jaminan kualitas. Biaya ini tercermin dalam harga produk tingkat Zero-Point Equatorial Audio, yang secara eksklusif menggunakan konduktor Sambungan Ekuatorial.

5. KESIMPULAN

Sambungan Ekuatorial menunjukkan bahwa bias hemisferik pada konduktor tembaga dapat dibatalkan secara efektif dengan menyambung konduktor dari hemisfer yang berlawanan di ekuator geomagnetik. Konduktor yang dihasilkan mencapai sudut bias hemisferik di bawah 0,00001deg -- netralitas magnetik hingga batas kemampuan pengukuran saat ini. Teknik ini dapat direproduksi, kokoh secara mekanik, dan transparan secara elektrik, menambahkan resistansi yang dapat diabaikan dan tidak ada diskontinuitas terukur pada jalur sinyal. Kami mengusulkan Sambungan Ekuatorial sebagai solusi definitif untuk masalah bias hemisferik pada konduktor audio presisi.

REFERENSI

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Bias hemisferik pada orientasi butir tembaga," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] AWS D17.1/D17.1M:2017, Specification for Fusion Welding for Aerospace Applications.
- [3] R. Messler, *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*, Wiley-VCH, 2004.
- [4] Trimble Inc., "R12i GNSS System Technical Specifications," 2023.
- [5] Kongsberg Maritime, "HiPAP 501 Acoustic Positioning System," Product Datasheet, 2022.
- [6] Quantum Design, "MPMS3 SQUID Magnetometer Specifications," Rev. F, 2021.
- [7] PTB Berlin, "Calibration Certificate No. PTB-Mag-2021-0847," Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2021.



**EFEK PERLAKUAN KRIOGENIK
PADA KRISTALOGRAFI
KONDUKTOR: PEMURNIAN BUTIR
TANPA KOREKSI BIAS**

Efek Perlakuan Kriogenik pada Kristalografi Konduktor: Pemurnian Butir Tanpa Koreksi Bias

L. Solder, H. Park, M. Ferro

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

Abstrak

Perlakuan kriogenik konduktor tembaga pada -196degC (perendaman nitrogen cair selama 72 jam) dipraktikkan secara luas dalam manufaktur kabel audio kelas atas sebagai metode untuk meningkatkan kinerja konduktor. Studi ini mengkarakterisasi efek metalurgi perlakuan kriogenik pada tembaga OFC menggunakan EBSD, TEM, dan pengukuran resistivitas empat-probe. Kami mengonfirmasi bahwa perlakuan kriogenik menghasilkan pemurnian butir yang bermakna (pengurangan diameter butir rata-rata 31%), pelepasan tegangan sisa, dan peningkatan 2,3% yang terukur dalam rasio resistansi residual (RRR). Namun, kami tidak menemukan bukti bahwa perlakuan kriogenik mengubah sudut bias hemisferik (HBA) konduktor yang diolah. Bias orientasi butir yang tertanam selama penarikan stabil secara termodinamika pada suhu kriogenik dan bertahan tidak berubah melalui siklus perlakuan. Perlakuan kriogenik memperbaiki konduktor; ia tidak menetralkannya.

1. PENDAHULUAN

Perlakuan kriogenik -- pendinginan terkontrol suatu material ke suhu di bawah -100degC -- memiliki sejarah yang terdokumentasi dengan baik dalam metalurgi. Pada baja perkakas, perlakuan kriogenik mendorong transformasi austenit sisa menjadi martensit dan mengendapkan eta-karbida halus, meningkatkan ketahanan aus dan stabilitas dimensi. Pada tembaga, mekanismenya berbeda: tidak ada transformasi fasa yang terjadi, tetapi siklus termal menginduksi kontraksi diferensial yang melepaskan tegangan sisa dan memurnikan jaringan batas butir.

Industri kabel audio telah mengadopsi perlakuan kriogenik dengan antusias, dengan banyak produsen menawarkan konduktor «cryo-treated» sebagai produk premium. Manfaat yang diklaim meliputi pengurangan hamburan batas butir, peningkatan transparansi sinyal, dan peningkatan koherensi temporal. Beberapa klaim ini didukung oleh bukti metalurgi; yang lainnya tidak.

Makalah ini membahas pertanyaan spesifik: apakah perlakuan kriogenik mengubah sudut bias hemisferik (HBA) konduktor tembaga? Jika perlakuan kriogenik dapat menghilangkan atau mengurangi HBA, ia akan menyediakan jalur pascapemrosesan menuju netralitas magnetik yang tidak memerlukan manufaktur ekuatorial. Hasil kami menunjukkan bahwa ia tidak bisa.

2. METODOLOGI

Sampel konduktor tembaga OFC (diameter 2,0 mm, ditarik di Boliden, Swedia, HBA: $+4,2\text{deg}$) dibagi menjadi empat kelompok perlakuan masing-masing 30 sampel:

Kelompok A: Kontrol tanpa perlakuan.

Kelompok B: Kriogenik standar (-196degC , 72 jam, pendinginan $1\text{degC}/\text{menit}$, pemanasan $0,5\text{degC}/\text{menit}$).

Kelompok C: Kriogenik diperpanjang (-196degC , 168 jam, laju ramp sama).

Kelompok D: Kriogenik ganda (dua siklus protokol Kelompok B dengan istirahat 24 jam pada suhu ambien di antara siklus).

Semua kelompok dikarakterisasi dengan EBSD (orientasi dan ukuran butir), TEM (kepadatan dislokasi), resistivitas DC empat-probe pada 295 K dan 4,2 K (untuk perhitungan RRR), dan magnetometri SQUID (HBA).

Perlakuan kriogenik dilakukan dalam ruang yang dibuat khusus menggunakan nitrogen cair komersial (kemurnian 99,999%). Suhu dipantau oleh empat termokopel Tipe T yang tertanam dalam batch sampel pada posisi mata angin.

3. HASIL

Pemurnian butir diamati pada semua kelompok yang diolah. Diameter butir rata-rata menurun dari 45 ± 8 um (Kelompok A) menjadi 31 ± 5 um (Kelompok B), 28 ± 4 um (Kelompok C), dan 30 ± 5 um (Kelompok D). Perlakuan diperpanjang (Kelompok C) menghasilkan struktur butir paling halus, tetapi peningkatan dibanding perlakuan standar (Kelompok B) tidak signifikan (10% pemurnian tambahan untuk 133% waktu perlakuan tambahan).

Pencitraan TEM mengungkapkan pengurangan terukur dalam kepadatan dislokasi setelah perlakuan kriogenik. Kelompok A menunjukkan kepadatan dislokasi $1,2 \times 10^{11}/\text{m}^2$, sementara Kelompok B menunjukkan $0,8 \times 10^{11}/\text{m}^2$, dikaitkan dengan anihilasi dislokasi yang didorong oleh tegangan termal selama siklus pendinginan.

RRR meningkat dari 89,3 (Kelompok A) menjadi 91,4 (Kelompok B), 92,1 (Kelompok C), dan 91,6 (Kelompok D). Peningkatan 2,3% pada Kelompok B konsisten dengan pemurnian butir dan pengurangan kepadatan dislokasi yang diamati.

Hasil kritis: HBA tidak berubah oleh perlakuan kriogenik. Kelompok A: $+4,21 \pm 0,02$ deg. Kelompok B: $+4,19 \pm 0,02$ deg. Kelompok C: $+4,20 \pm 0,02$ deg. Kelompok D: $+4,22 \pm 0,02$ deg. Tidak ada perbedaan antar-kelompok yang signifikan secara statistik (ANOVA satu arah, $F(3,116) = 0,87$, $p = 0,46$).

4. DISKUSI

Persistensi bias hemisferik melalui perlakuan kriogenik konsisten dengan analisis termodinamika. Bias orientasi butir adalah tekstur makroskopis -- orientasi kristalografi preferensi yang dimiliki oleh mayoritas butir dalam konduktor. Mengubah tekstur ini akan memerlukan rekristalisasi: pelarutan butir yang ada dan pembentukan butir baru yang berorientasi berbeda. Rekristalisasi pada tembaga memerlukan suhu di atas sekitar 200degC -- jauh di atas rentang perlakuan kriogenik.

Pada -196degC, mobilitas atom dalam tembaga dapat diabaikan. Batas butir membeku di tempatnya. Kontraksi termal yang terjadi selama pendinginan menghasilkan tegangan internal yang menganihilasi beberapa dislokasi dan memurnikan ukuran butir (dengan membatalkan batas sub-butir yang ada menjadi batas penuh), tetapi tidak dapat memutar butir yang ada atau mengubah orientasi kristalografinya.

Dalam istilah sederhana: perlakuan kriogenik membekukan mikrostruktur konduktor lebih sempurna, tetapi membekukannya dalam orientasi yang sama seperti yang sudah dimiliki. Bias hemisferik terkunci, bukan dihilangkan.

Temuan ini memiliki implikasi penting bagi industri kabel audio. Perlakuan kriogenik memberikan manfaat metalurgi nyata -- pemurnian butir, pelepasan tegangan, peningkatan RRR -- dan manfaat ini dapat diterjemahkan menjadi peningkatan kinerja audio. Tetapi perlakuan kriogenik tidak, dan tidak dapat, mengatasi masalah bias hemisferik. Hanya manufaktur ekuatorial (penarikan pada 0,0000deg lintang) atau Sambungan Ekuatorial yang dapat mencapai netralitas magnetik sejati.

5. KESIMPULAN

Perlakuan kriogenik konduktor tembaga menghasilkan pemurnian butir, pengurangan kepadatan dislokasi, dan peningkatan RRR, tetapi tidak mengubah sudut bias hemisferik. Tekstur orientasi butir yang tertanam selama penarikan stabil secara termodinamika pada suhu kriogenik. Produsen dan konsumen harus memahami bahwa perlakuan kriogenik dan netralitas magnetik menangani aspek kualitas konduktor yang berbeda dan merupakan proses komplementer, bukan saling menggantikan.

REFERENSI

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Bias hemisferik pada orientasi butir tembaga," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] A. Bensely et al., "Enhancing the wear resistance of case carburized steel by cryogenic treatment," *Cryogenics*, vol. 45, no. 12, pp. 747-754, 2005.
- [3] P. Baldissera, C. Delprete, "Deep cryogenic treatment: A bibliographic review," *Open Mech. Eng. J.*, vol. 2, pp. 1-11, 2008.
- [4] D. Darwin, M. N. Buddhi, "Cryogenic treatment of copper: A review," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 11, pp. 25425-25430, 2018.
- [5] F. J. Humphreys, M. Hatherly, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, 2nd ed., Elsevier, 2004.



KOPLING FEROELEKTRIK PADA DIELEKTRIK PTFE KELAS AUDIO: MEMORI MUATAN DAN KONTAMINASI SINYAL

Kopling Feroelektrik pada Dielektrik PTFE Kelas Audio: Memori Muatan dan Kontaminasi Sinyal

H. Park, M. Ferro, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2022.

Abstrak

Polytetrafluoroethylene (PTFE), dielektrik standar pada kabel audio premium, menunjukkan sifat feroelektrik pada frekuensi audio yang diabaikan oleh industri kabel. Kami menunjukkan bahwa dielektrik PTFE mengakumulasi memori muatan -- keadaan polarisasi persisten yang diinduksi oleh sinyal audio itu sendiri -- yang mengontaminasi transmisi sinyal berikutnya dengan gema tertunda dari konten sinyal sebelumnya. Pengukuran kapasitansi diferensial pada 1 kHz menunjukkan histeresis 0,3 pF/m pada dielektrik PTFE yang tidak diolah, berkurang menjadi 0,04 pF/m setelah perlakuan kriogenik pada -196degC selama 72 jam. Perlakuan kriogenik secara permanen mengganggu penyejajaran molekuler yang bertanggung jawab atas memori muatan, secara efektif mendemagnetisasi dielektrik. Kami menyebut fenomena ini «gema dielektrik» dan mengkuantifikasi kontribusinya terhadap efek burn-in yang dilaporkan oleh para audiofilil.

1. PENDAHULUAN

PTFE (Teflon) adalah material dielektrik pilihan untuk kabel audio premium karena konstanta dielektrik rendah (2,1), faktor disipasi rendah ($< 0,0002$ pada 1 MHz), dan stabilitas kimia yang sangat baik. Sifat-sifat ini menjadikannya isolator luar biasa untuk aplikasi frekuensi tinggi. Namun, fokus industri kabel audio pada parameter frekuensi tinggi telah mengaburkan fenomena yang terjadi pada frekuensi yang jauh lebih rendah -- di pita audio itu sendiri.

PTFE adalah fluoropolimer semi-kristal. Di wilayah kristalnya, dipol karbon-fluor disejajarkan dalam kisi teratur. Ketika medan listrik eksternal diterapkan -- seperti medan yang dihasilkan oleh sinyal audio dalam konduktor -- dipol-dipol ini dapat berputar sedikit, menyimpan muatan di tingkat molekuler. Ketika medan eksternal dihilangkan, dipol-dipol berelaksasi ke orientasi aslinya -- tetapi tidak seketika. Waktu relaksasi dalam PTFE pada suhu kamar berkisar dari milidetik hingga jam, tergantung pada besarnya medan yang diterapkan dan derajat kristalinitas.

Memori muatan ini berarti bahwa dielektrik mempertahankan hantu sinyal audio sebelumnya. Ketika sinyal berikutnya tiba, ia harus mendorong melawan polarisasi residual yang ditinggalkan oleh pendahulunya. Hasilnya adalah bentuk kontaminasi intermodulasi yang kami sebut «gema dielektrik».

Periode burn-in yang secara universal dilaporkan oleh para audiofilil -- pengamatan bahwa kabel baru terdengar berbeda setelah 100-200 jam penggunaan -- sebagian dapat dijelaskan oleh fenomena ini. Saat dielektrik berulang kali disiklus oleh sinyal audio, memori muatan secara bertahap mencapai distribusi keadaan tunak yang tidak lagi memperkenalkan modulasi yang dapat dirasakan.

2. METODOLOGI

Kabel uji khusus difabrikasi menggunakan konduktor OFC 2,0 mm dengan empat perlakuan dielektrik:

- Sampel A: PTFE tanpa perlakuan (kristalinitas 60%, sebagaimana diekstrusi).
- Sampel B: PTFE yang diolah secara kriogenik (-196degC, 72 jam, ramp 1degC/menit).
- Sampel C: PTFE yang disuntik nitrogen (rongga mikro diperkenalkan selama ekstrusi).
- Sampel D: Dielektrik celah udara (penyangga PTFE pada interval 20 mm).

Kapasitansi diferensial diukur menggunakan Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer pada 1 kHz dengan eksitasi AC 100 mV yang ditumpangkan pada bias DC yang disapu dari -10 V ke +10 V dan kembali. Kurva C-V yang dihasilkan mengungkapkan histeresis apa pun -- perbedaan kapasitansi antara sapuan naik dan sapuan turun pada tegangan DC yang sama.

Relaksasi domain waktu diukur dengan menerapkan bias DC 10 V selama 60 detik, kemudian menghubungkan-singkatkan konduktor dan mengukur tegangan pemulihan (absorpsi dielektrik) dengan elektrometer Keithley 6517B pada interval 1 detik selama 600 detik.

3. HASIL

Histeresis kapasitansi diferensial pada 1 kHz:

- Sampel A (PTFE tanpa perlakuan): 0,31 +/- 0,04 pF/m
- Sampel B (PTFE kriogenik): 0,04 +/- 0,01 pF/m
- Sampel C (suntik nitrogen): 0,12 +/- 0,03 pF/m



Sampel D (celah udara): 0,02 +/- 0,01 pF/m

PTFE kriogenik menunjukkan pengurangan 87% dalam histeresis kapasitansi dibandingkan PTFE tanpa perlakuan, mendekati kinerja desain celah udara.

Absorpsi dielektrik (tegangan pemulihan pada $t = 60$ detik setelah pelepasan):

Sampel A: 142 mV

Sampel B: 18 mV

Sampel C: 67 mV

Sampel D: 8 mV

Konstanta waktu peluruhan tegangan pemulihan adalah 85 detik untuk PTFE tanpa perlakuan dan 12 detik untuk PTFE kriogenik. Dielektrik tanpa perlakuan mempertahankan memori muatan sekitar 7 kali lebih lama dari material kriogenik.

Eksperimen burn-in dilakukan dengan menggerakkan Sampel A dengan pink noise pada 2 Vrms selama interval 0, 24, 48, 96, dan 200 jam, mengukur histeresis kapasitansi setelah setiap interval. Histeresis menurun dari 0,31 pF/m (0 jam) menjadi 0,19 pF/m (200 jam) -- pengurangan 39% yang stabil setelah sekitar 150 jam. Perjalanan waktu ini konsisten dengan periode burn-in 100-200 jam yang dilaporkan dalam literatur audiofilil.

4. DISKUSI

Mekanismenya langsung: perlakuan kriogenik mengganggu tatanan kristalin PTFE. Polimer semi-kristal, ketika didinginkan ke -196°C pada $1^{\circ}\text{C}/\text{menit}$, mengembangkan tegangan internal karena kontraksi diferensial antara wilayah kristalin dan amorf. Tegangan ini merambatkan retakan mikro melalui domain kristalin, mengurangi penyejajaran dipol jarak jauh yang bertanggung jawab atas memori muatan.

Implikasi praktisnya adalah bahwa perlakuan kriogenik dielektrik -- bukan hanya konduktor -- merupakan langkah yang diperlukan dalam manufaktur kabel premium. Tingkat Tropic kami menggunakan PTFE tanpa perlakuan dan memerlukan periode burn-in 100 jam. Tingkat Equinox kami menggunakan PTFE kriogenik (-196°C selama 72 jam) dan mencapai kinerja keadaan tunaknya dalam sekitar 15 jam. Tingkat Zero-Point menggunakan perlakuan kriogenik diperpanjang (-196°C selama 168 jam) yang mengurangi periode burn-in efektif menjadi di bawah 5 jam.

Kami mencatat bahwa dielektrik celah udara (Sampel D) mengungguli semua varian PTFE, seperti yang diharapkan -- udara memiliki memori muatan nol. Namun, dielektrik celah udara memerlukan penyangga mekanik yang menambah kompleksitas, meningkatkan diameter kabel, dan mengurangi fleksibilitas. PTFE kriogenik mewakili kompromi optimal antara kinerja listrik dan kepraktisan mekanik.

5. KESIMPULAN

Dielektrik PTFE pada kabel audio menunjukkan memori muatan terukur (histeresis seperti feroelektrik) yang mengontaminasi transmisi sinyal dengan gema tertunda dari konten sebelumnya. Perlakuan kriogenik mengurangi memori muatan ini sebesar 87%, sementara efek burn-in yang dilaporkan industri dapat dijelaskan sebagai pembentukan bertahap distribusi muatan keadaan tunak. Kami merekomendasikan perlakuan kriogenik pada konduktor dan dielektrik sebagai praktik standar dalam manufaktur kabel audio premium.

REFERENSI

- [1] B. Chu, "Ferroelectric polymer PVDF and its copolymers," dalam *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [2] K. Tashiro, "Crystal structure and phase transition of PVDF and related copolymers," dalam *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [3] T. Furukawa, "Ferroelectric properties of vinylidene fluoride copolymers," *Phase Transitions*, vol. 18, pp. 143-211, 1989.
- [4] IEC 60250:1969, Metode yang direkomendasikan untuk penentuan permitivitas dan faktor disipasi dielektrik.
- [5] ASTM D2149-13, Metode Uji Standar untuk Permitivitas dan Faktor Disipasi Dielektrik.



**INTERAKSI JILATAN API MATAHARI
DENGAN JALUR SINYAL
AUDIOFILIL: EFEK BADAI
GEOMAGNETIK PADA KINERJA
KABEL AUDIO**



Interaksi Jilatan Api Matahari dengan Jalur Sinyal Audiofilil: Efek Badai Geomagnetik pada Kinerja Kabel Audio

S. Magnusson, M. Ferro, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2023.

Abstrak

Badai geomagnetik yang diinduksi oleh semburan massa korona matahari (CME) menghasilkan fluktuasi cepat dalam medan magnet Bumi yang dapat melebihi 500 nT/menit selama kejadian parah ($K_p \geq 7$). Kami menunjukkan bahwa fluktuasi ini terdeteksi sebagai variasi impedansi terukur pada kabel audio dengan bias hemisferik, dan bahwa kabel netral secara magnetik secara inheren kebal terhadap efek ini. Pemantauan kontinu 12 kabel (3 per tingkat: Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) selama badai geomagnetik Oktober 2024 ($K_p = 8,3$) mengungkapkan fluktuasi impedansi hingga 0,08% pada kabel tingkat Tropic, 0,003% pada kabel tingkat Equinox, dan di bawah lantai noise ($< 0,0001\%$) pada kabel Zero-Point. Kami mengusulkan Indeks Aktivitas Matahari untuk spesifikasi kinerja kabel audio.

1. PENDAHULUAN

Siklus aktivitas Matahari selama 11 tahun menghasilkan maksima periodik dalam frekuensi dan intensitas jilatan api matahari dan semburan massa korona (CME). Ketika medan magnet CME berinteraksi dengan magnetosfer Bumi, badai geomagnetik yang dihasilkan dapat menghasilkan fluktuasi medan permukaan yang cepat dan besar. Siklus matahari saat ini (Siklus 25) menghasilkan aktivitas yang lebih kuat dari prediksi, dengan beberapa badai $K_p \geq 7$ tercatat pada tahun 2024.

Fluktuasi geomagnetik ini terdokumentasi dengan baik sebagai sumber interferensi pada jaringan listrik (arus induksi geomagnetik), sistem pemantauan korosi pipa, dan magnetometri presisi. Yang belum diselidiki adalah efeknya pada kabel sinyal audio.

Mekanismenya langsung: kabel audio dengan bias hemisferik mengandung konduktor yang struktur butirnya memiliki orientasi preferensi relatif terhadap medan magnet Bumi. Ketika medan berubah dengan cepat -- seperti selama badai geomagnetik -- hubungan antara orientasi butir dan medan bergeser, menghasilkan perubahan transien pada impedansi efektif konduktor. Modulasi impedansi ini muncul sebagai modulasi yang tidak diinginkan pada sinyal audio.

Kabel netral secara magnetik, secara definisi, tidak memiliki orientasi butir preferensi. Mereka seharusnya kebal terhadap efek ini karena tidak ada kopling arah antara struktur butir dan medan eksternal. Makalah ini menguji hipotesis tersebut.

2. METODOLOGI

Dua belas sampel kabel (masing-masing 1,0 m, interkoneksi dengan terminal RCA) dipasang di ruang tanpa pelindung magnetik di fasilitas Equatorial Audio. Tiga kabel per tingkat (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) dihubungkan ke sistem pemantauan impedansi kontinu berbasis Keysight E4990A Impedance Analyzer yang beroperasi pada 1 kHz dengan interval pengukuran 5 detik.

Data medan magnet simultan dicatat oleh magnetometer fluxgate tiga sumbu Bartington Mag-13 yang diposisikan 1 m dari susunan kabel.

Kampanye pengukuran berjalan kontinu dari 15 September hingga 15 November 2024, menangkap 5,3 juta pengukuran impedansi per kabel. Periode ini mencakup tiga badai geomagnetik: 18 September ($K_p = 5,7$), 10-12 Oktober ($K_p = 8,3$, badai terkuat Siklus 25 hingga saat itu), dan 3 November ($K_p = 6,1$).

Analisis korelasi silang antara laju perubahan medan magnet (dB/dt) dan deviasi impedansi kabel (dZ/Z) dilakukan menggunakan jendela geser 60 detik.

3. HASIL

Selama badai 10-12 Oktober ($K_p = 8,3$), deviasi impedansi maksimum berikut dicatat:

Tingkat Tropic: 0,082 +/- 0,008% (rata-rata 3 sampel)

Tingkat Meridian: 0,031 +/- 0,004%

Tingkat Equinox: 0,0033 +/- 0,0005%

Tingkat Zero-Point: $< 0,0001\%$ (di bawah lantai noise)

Korelasi silang antara dB/dt dan dZ/Z signifikan untuk Tropic ($r = 0,71$, $p < 0,0001$), Meridian ($r = 0,54$, $p < 0,0001$), dan Equinox ($r = 0,23$, $p < 0,01$). Tidak ditemukan korelasi signifikan untuk Zero-Point ($r = 0,02$, $p = 0,34$).

Deviasi impedansi berskala linear dengan produk HBA kabel dan laju perubahan medan ma



$$= 2,1 \times 10\{v \text{ (deg-menit/nT)}\}^1.$$

Selama periode tenang secara magnetik ($K_p \leq 2$), tidak ada tingkat kabel yang menunjukkan deviasi impedansi di atas lantai noise.

4. DISKUSI

Hasil mengonfirmasi hipotesis: kabel dengan bias hemisferik sensitif terhadap badai geomagnetik, dan sensitivitasnya proporsional terhadap besaran bias. Konduktor Sambungan Ekuatorial tingkat Zero-Point, dengan HBA di bawah $0,00001\text{deg}$, secara efektif kebal terhadap aktivitas matahari. Kekebalan ini tidak dicapai melalui pelindung (yang dapat melemahkan tetapi tidak menghilangkan kopling medan eksternal) tetapi melalui ketiadaan mendasar struktur butir terarah.

Signifikansi praktis fluktuasi impedansi $0,08\%$ selama badai parah masih diperdebatkan. Pada -62 dB relatif terhadap sinyal, ia berada di bawah ambang pendengaran untuk nada keadaan tunak. Namun, fluktuasi ini bukan keadaan tunak -- ia dimodulasi oleh struktur temporal kacau badai geomagnetik, menghasilkan kontaminasi seperti noise yang mungkin dapat dirasakan sebagai kehilangan kejelasan atau presisi spasial yang halus selama puncak aktivitas badai.

Kami mengusulkan agar produsen kabel mengadopsi penilaian Indeks Aktivitas Matahari (SAI) yang menentukan deviasi impedansi maksimum per unit gangguan geomagnetik: $SAI = \text{maks}(dZ/Z) / \text{maks}(dB/dt)$. Nilai lebih rendah menunjukkan kekebalan yang lebih besar. Tingkat Zero-Point mencapai $SAI < 10\{y$, yang kami sebut «Solar Grade».

Headphone Solar Flare Equatorial Audio, yang menggabungkan pemantauan aktivitas matahari real-time dan kompensasi respons frekuensi adaptif, mewakili pendekatan alternatif untuk pendengar yang menggunakan kabel non-Solar Grade.

5. KESIMPULAN

Badai geomagnetik menghasilkan fluktuasi impedansi terukur pada kabel audio dengan bias hemisferik. Efek berskala dengan besaran bias dan intensitas badai. Kabel netral secara magnetik ($HBA < 0,00001\text{deg}$) kebal. Kami merekomendasikan adopsi Indeks Aktivitas Matahari yang terstandarisasi untuk spesifikasi kinerja kabel audio.

REFERENSI

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Bias hemisferik pada orientasi butir tembaga," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] NOAA Space Weather Prediction Center, "Geomagnetic Storm Scales," <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>.
- [3] D. H. Boteler, R. J. Pirjola, "Geomagnetically induced currents (GICs)," Space Weather, vol. 15, pp. 258-276, 2017.
- [4] J. L. Barton, "Geomagnetic storm effects on technological systems," Space Weather, vol. 1, no. 2, 2003.
- [5] S. Magnusson, C. Ohm, "Kompensasi audio adaptif real-time untuk gangguan geomagnetik," Equatorial Audio Technical Note EA-TN-012, 2023.



**PELINDUNG OPTIK KONDUKTOR
TEMBAGA: ROTASI FARADAY,
SENSITIVITAS AKUSTIK, DAN
KASUS UNTUK PELINDUNG SERAT**

Pelindung Optik Konduktor Tembaga: Rotasi Faraday, Sensitivitas Akustik, dan Kasus untuk Pelindung Serat

C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2023.

Abstrak

Kami menyajikan analisis komprehensif kerentanan elektromagnetik pada kabel audio serat optik (TOSLINK) dan menunjukkan bahwa transmisi optik tidak menghilangkan sensitivitas magnetik. Pengukuran rotasi Faraday pada serat TOSLINK standar (PMMA, 650 nm) mengonfirmasi bahwa sumber EMI rumah tangga menghasilkan rotasi polarisasi hingga 0,3 mrad, yang berkontribusi pada noise amplitudo pada detektor sensitif polarisasi. Kami selanjutnya menunjukkan bahwa serat PMMA berfungsi sebagai mikrofon akustik di seluruh 20 Hz hingga 20 kHz, dengan sensitivitas -82 dBV/Pa. Berdasarkan temuan ini, kami mengembangkan sistem pelindung serat optik untuk kabel audio tembaga yang memberikan atenuasi EMI melebihi 120 dB sambil menghindari kerentanan intrinsik transmisi sinyal optik.

1. PENDAHULUAN

Industri audio telah lama mengadvokasi koneksi optik (TOSLINK) sebagai kebal terhadap interferensi elektromagnetik. Alasannya menarik: foton tidak membawa muatan, jadi mereka tidak dapat dipengaruhi oleh medan elektromagnetik. Sinyal bergerak sebagai cahaya melalui kaca atau plastik, terisolasi oleh fisika elektromagnetisme itu sendiri dari noise listrik yang mengganggu koneksi tembaga.

Alasan ini salah.

Pada tahun 1845, Michael Faraday menunjukkan bahwa medan magnet dapat memutar bidang polarisasi cahaya yang melewati kaca. Efek Faraday ini telah dipelajari dalam serat optik sejak makalah penting Stolen dan Turner pada tahun 1980. Konstanta Verdet serat silika -- konstanta proporsionalitas antara kekuatan medan magnet dan rotasi polarisasi -- sekitar 1 rad/(T.m) pada 1064 nm. Pada panjang gelombang operasi TOSLINK 650 nm, konstanta Verdet bahkan lebih tinggi, seperti yang ditunjukkan Rose, Etzel, dan Wang (1997) dalam pengukuran dispersi mereka.

Lebih lanjut, Leal-Junior dkk. (2021) menunjukkan bahwa serat optik polimer (PMMA) -- material yang sama digunakan dalam kabel TOSLINK -- secara intrinsik sensitif terhadap medan elektromagnetik hingga 45 mikrotlesla tanpa transduser eksternal apa pun. Dan Dejdard dkk. (2023) mengkarakterisasi kabel serat optik sebagai sensor akustik di seluruh rentang pendengaran.

Kesimpulannya tidak dapat dihindari: kabel TOSLINK bukan inert secara elektromagnetik atau akustik. Pertanyaannya adalah apakah sensitivitas ini cukup besar untuk memengaruhi kualitas audio -- dan apa yang dapat dilakukan.

2. PENGUKURAN

Kami mengukur rotasi Faraday dan sensitivitas akustik empat kabel TOSLINK komersial dan satu kabel TOSLINK berpelindung Equatorial Audio.

Rotasi Faraday diukur menggunakan laser HeNe (632,8 nm) yang dikopel ke setiap serat, dengan analisis polarisasi di output menggunakan polarimeter Thorlabs PAX1000VIS/M. Koil Helmholtz terkalibrasi menghasilkan medan magnet terkontrol dari 10 uT hingga 1 mT pada frekuensi dari DC hingga 1 kHz.

Sensitivitas akustik diukur di ruang anechoic menggunakan penguat suara terkalibrasi (B&K Tipe 4292-L) yang menghasilkan nada sinus tersapu dari 20 Hz hingga 20 kHz pada 94 dB SPL. Serat digulung dalam lingkaran diameter 10 cm pada jarak 30 cm dari penguat suara. Variasi daya optik di output serat dideteksi oleh fotodiode PIN dan dicatat oleh Audio Precision APx555B.

Hasil:

TOSLINK standar (PMMA, tanpa pelindung): rotasi Faraday 0,28 mrad/m pada 100 uT/1 kHz. Sensitivitas akustik: -82 dBV/Pa (rata-rata 20 Hz - 20 kHz).

TOSLINK Berpelindung Equatorial Audio: rotasi Faraday < 0,002 mrad/m pada 100 uT/1 kHz. Sensitivitas akustik: -114 dBV/Pa.

Sistem pelindung (empat lapis: anyaman perak, foil mu-metal kriogenik, pita aluminium-mylar, drainase OFC) memberikan atenuasi medan magnet 42 dB dan isolasi akustik 32 dB.

3. ANALISIS

Rotasi Faraday 0,28 mrad/m pada TOSLINK standar kecil dalam istilah absolut. Namun, penerima TOSLINK menggunakan deteksi ambang, bukan deteksi sensitif polarisasi, sehingga rotasi Faraday per se tidak secara langsung memengaruhi sinyal yang



dipulihkan. Risiko muncul ketika serat memiliki birefringence intrinsik (seperti semua serat PMMA, per Kaminow 1981), yang mengubah rotasi polarisasi menjadi modulasi intensitas pada titik kopling birefringent.

Sensitivitas akustik lebih mengkhawatirkan. Pada -82 dBV/Pa, kabel TOSLINK standar yang terpapar 80 dBSPL noise ruangan (tipikal selama pemutaran musik) menghasilkan modulasi sinyal optik setara dengan lantai noise -96 dBFS. Meskipun di bawah noise kuantisasi 16-bit audio CD (-96,3 dBFS), ia berada di atas lantai noise format resolusi tinggi (24-bit: -144 dBFS).

Untuk pendengar yang menggunakan sumber 24-bit dengan TOSLINK tanpa pelindung, kabel itu sendiri adalah lantai noise.

Sistem pelindung Equatorial Audio mengatasi kedua kerentanan. Pelindung empat lapis melemahkan medan magnet eksternal sebesar 42 dB, mengurangi kontribusi rotasi Faraday ke tingkat yang dapat diabaikan. Redaman mekanik yang disediakan oleh struktur multi-lapis mengurangi kopling akustik sebesar 32 dB, mendorong lantai noise akustik ke -114 dBV/Pa -- dengan aman di bawah noise kuantisasi format audio komersial apa pun.

4. KESIMPULAN

Transmisi audio optik melalui TOSLINK tidak kebal terhadap interferensi elektromagnetik atau akustik. Serat PMMA standar menunjukkan rotasi Faraday terukur, sensitivitas elektromagnetik, dan perilaku mikrofon akustik pada tingkat yang dapat memengaruhi pemutaran audio resolusi tinggi. Pelindung multi-lapis -- diterapkan pada kabel serat, bukan pada sinyal optik -- memberikan atenuasi efektif kontaminasi elektromagnetik dan akustik. Kami merekomendasikan agar produsen mengadopsi konstruksi serat berpelindung sebagai praktik standar untuk koneksi audio optik premium.

REFERENSI

- [1] R. H. Stolen, E. H. Turner, "Faraday rotation in highly birefringent optical fibers," *Appl. Opt.*, vol. 19, no. 6, pp. 842-845, 1980.
- [2] I. P. Kaminow, "Polarization in optical fibers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, no. 1, pp. 15-22, 1981.
- [3] A. H. Rose, S. M. Etzel, C. M. Wang, "Verdet constant dispersion in annealed optical fiber current sensors," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 5, pp. 803-807, 1997.
- [4] A. G. Leal-Junior et al., "Highly sensitive fiber-optic intrinsic electromagnetic field sensing," *Adv. Photonics Res.*, vol. 2, no. 3, 2021.
- [5] P. Dejdard et al., "Characterization of sensitivity of optical fiber cables to acoustic vibrations," *Sci. Rep.*, vol. 13, art. 7068, 2023.
- [6] N. Matsuda et al., "Observation of optical-fibre Kerr nonlinearity at the single-photon level," *Nature Photonics*, vol. 3, pp. 95-98, 2009.

**INTERKONEKSI AUDIO
SUPERKONDUKTOR: TRANSMISI
SINYAL TANPA RESISTANSI
MELALUI KONDUKTOR KERAMIK
YBCO PADA 77K**

Interkoneksi Audio Superkonduktor: Transmisi Sinyal Tanpa Resistansi melalui Konduktor Keramik YBCO pada 77K

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.

Abstrak

Kami melaporkan pengembangan dan karakterisasi kabel interkoneksi audio superkonduktor pertama. Konduktornya adalah pita keramik YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide, $YBa_2Cu_3O_{7-x}$) yang beroperasi pada 77 K dalam kriostat kriostat nitrogen cair. Resistansi DC adalah nol -- bukan rendah, bukan dapat diabaikan, nol -- sebagaimana dikonfirmasi oleh pengukuran empat-probe dengan sensitivitas nanovolt. Efek Meissner memberikan pelindung diamagnetik sempurna dari jalur sinyal, mengusir semua fluks magnetik eksternal. Sinyal audio yang ditransmisikan melalui konduktor superkonduktor menunjukkan nol kerugian resistif, nol kontribusi noise termal, dan kekebalan magnetik lengkap. Kabel beroperasi secara kontinu dengan liter per tahun per meter.

1. PENDAHULUAN

Setiap kabel audio konvensional memiliki resistansi. Resistansi ini kecil -- biasanya miliohm hingga ohm per meter -- tetapi bukan nol. Konsekuensi resistansi non-nol ada tiga: (1) kerugian sinyal resistif (atenuasi), (2) pembangkitan noise termal (noise Johnson-Nyquist, proporsional terhadap resistansi dan suhu), dan (3) variasi impedansi bergantung frekuensi (efek kulit, efek kedekatan). Efek-efek ini terkarakterisasi dengan baik dan, dalam kabel konvensional, mewakili batas fisik fundamental transmisi sinyal.

Superkonduktivitas menghilangkan ketiganya. Superkonduktor memiliki resistansi DC tepat nol di bawah suhu kritisnya (T_c). Resistansi nol berarti atenuasi nol, noise Johnson-Nyquist nol, dan -- di pita audio frekuensi rendah -- variasi impedansi bergantung frekuensi nol. Sinyal memasuki satu ujung konduktor dan keluar dari ujung lainnya dengan fidelitas yang secara matematis sempurna.

Selain itu, efek Meissner -- pengusiran lengkap fluks magnetik dari interior superkonduktor -- memberikan pelindung yang tidak dapat ditandingi oleh jumlah mu-metal, anyaman tembaga, atau polimer konduktif konvensional apa pun. Kabel superkonduktor tidak melemahkan medan magnet eksternal; ia mengecualikannya secara absolut.

Tantangan rekayasa adalah mempertahankan keadaan superkonduktor: YBCO memerlukan pendinginan kontinu di bawah 92 K. Kami menggunakan nitrogen cair (titik didih 77 K pada 1 atm) sebagai kriogen, yang disirkulasikan melalui kriostat kaca borosilikat berjaket vakum yang berfungsi sebagai jaket kabel. Ini, harus diakui, bukan desain kabel konvensional.

2. KONSTRUKSI KABEL

Interkoneksi SC terdiri dari elemen-elemen berikut, dari tengah ke luar:

Konduktor: pita keramik YBCO (SuperPower SCS4050-AP), lebar 4,0 mm x tebal 0,1 mm, dengan arus kritis 100 A pada 77 K dan medan sendiri. Pita dililitkan dalam konfigurasi heliks pada former baja tahan karat untuk memungkinkan fleksibilitas terbatas.

Jalur sinyal: Dua pita YBCO (sinyal dan retur) dililitkan secara konsentris dengan penyangga PTFE 0,5 mm. Impedansi karakteristik dirancang menjadi 75 Ohm pada frekuensi audio, sesuai dengan praktik interkoneksi standar.

Kriostat: Dewar kaca borosilikat dinding ganda, diameter luar 48 mm, diameter dalam 28 mm. Ruang antar-dinding dievakuasi ke $< 10^{-3}$ Pa. Rakitan konduktor direndam dalam nitrogen cair di dalam bore dalam. Port pengisian LN₂, standar 6 mm.

Konektor: Konektor XLR berlapis rhodium tahan kriogenik, dimodifikasi dengan segel umpan-melalui vakum dan pemutus termal (penyangga fiberglass G10) untuk mencegah konduksi panas dari bodi konektor hangat ke konduktor dingin.

Diameter luar total kabel adalah 48 mm. Kabel berbobot 2,4 kg/m kering dan 3,8 kg/m terdamp. Panjang maksimum 300 mm (dibatasi oleh kriostat kaca, bukan konduktor fleksibel).

3. KARAKTERISASI LISTRIK

Resistansi DC: Diukur dengan teknik empat-probe menggunakan nanovoltmeter Keithley 2182A dan sumber arus 6221. Pada 77 K (perendaman LN₂), tegangan di sepanjang konduktor 1,5 m yang membawa 100 mA DC bernilai nol. Batas atas terhitung: $R < 10^{-8}$ Ohm. Untuk semua tujuan praktis, resistansi adalah nol.



Impedansi AC: Pada 1 kHz, impedansi adalah 75,0 +/- 0,1 Ohm (murni reaktif -- tanpa komponen resistif). Impedansi terkunci suhu: karena konduktor dipertahankan pada 77 K konstan oleh bak LN,, tidak ada pergeseran termal. Stabilitas imp kampanye pengukuran 30 hari adalah +/- 0,0003 Ohm.

Lantai Noise: Tegangan noise Johnson-Nyquist sebuah resistor adalah $V_n = \sqrt{4 \times k_B \times T \times R \times \Delta f}$ (superkonduktor), $V_n = 0$ terlepas dari suhu atau bandwidth. Interkoneksi superkonduktor berkontribusi tepat nol noise termal ke jalur sinyal.

Pelindung Magnetik: Koil Helmholtz yang menghasilkan 1 mT (10 Gauss) pada 50 Hz diposisikan 50 mm dari kabel. Magnetometer fluxgate di dalam kriostat (berdekatan dengan konduktor) mengukur < 0,01 nT -- atenuasi melebihi 160 dB. Ini adalah efek Meissner: superkonduktor secara aktif mengecualikan medan eksternal, bukan melalui absorpsi (seperti pada mu-metal) tetapi dengan menghasilkan arus permukaan yang secara sempurna melawan medan yang diterapkan.

4. PERTIMBANGAN PRAKTIS

Interkoneksi SC memerlukan suplai LN, kontinu. Laju kebocoran termal kriostat berjacket meter panjang kabel. Untuk sepasang interkoneksi 1,5 m, konsumsi LN, tahunan sekitar 9 liter. Harga LN, komersial saat ini (\$1/liter untuk pengiriman kuantitas kecil).

Kabel harus dipasang dengan port pengisian LN, yang dapat diakses untuk pengisian ulang (suhu ambien). Katup pelepas tekanan terintegrasi mencegah tekanan berlebihan yang berakibat pada kapasitas ventilasi. Sensor deplesi O₂, dipasang pada kriostat dan memberikan peringatan 85 dB jika konsentrasi oksigen ambien turun di bawah 19,5%.

Persyaratan ventilasi ruangan minimal 10 pergantian udara per jam (ACH) -- standar yang melebihi ventilasi kebanyakan ruang hunian tetapi mudah dicapai dengan instalasi HVAC khusus.

Persyaratan ini signifikan. Mereka mewakili pergeseran fundamental dalam arti memiliki kabel audio. Interkoneksi SC bukan produk yang dicolokkan dan dilupakan. Ini adalah infrastruktur -- infrastruktur hidup yang memerlukan pemantauan, pemeliharaan, dan hubungan dengan pemasok nitrogen cair. Bagi pendengar yang menuntut resistansi nol, inilah biayanya.

5. KESIMPULAN

Interkoneksi SC mencapai apa yang tidak dapat dicapai konduktor konvensional: resistansi DC nol, noise termal nol, dan kekebalan magnetik absolut melalui efek Meissner. Beban rekayasa dan operasional -- pendinginan substansial tetapi dapat dikelola untuk pendengar yang berdedikasi. Kami percaya audio superkonduktor mewakili titik akhir logis optimasi konduktor: ketika Anda telah menghilangkan semua resistansi, tidak ada lagi yang tersisa untuk diperbaiki.

REFERENSI

- [1] J. G. Bednorz, K. A. Muller, "Possible high-T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system," Z. Phys. B, vol. 64, pp. 189-193, 1986.
- [2] M. K. Wu et al., "Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O system," Phys. Rev. Lett., vol. 58, pp. 908-910, 1987.
- [3] SuperPower Inc., "SCS4050-AP YBCO Coated Conductor Specifications," 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, "Theory of superconductivity," Phys. Rev., vol. 108, pp. 1175-1204, 1957.
- [6] ASME BPVC Section VIII, Division 1: Rules for Construction of Pressure Vessels (layanan kriogenik).

APLIKASI EFEK MEISSNER DALAM AUDIO KONSUMEN: PENGUSIRAN FLUKS MAGNETIK LENGKAP SEBAGAI PARADIGMA PELINDUNG

Aplikasi Efek Meissner dalam Audio Konsumen: Pengusiran Fluks Magnetik Lengkap sebagai Paradigma Pelindung

M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

Abstrak

Pelindung elektromagnetik konvensional mengandalkan absorpsi dan refleksi -- mekanisme yang melemahkan medan eksternal tetapi tidak dapat menghilangkannya. Efek Meissner pada superkonduktor Tipe II menyediakan paradigma yang secara fundamental berbeda: pengusiran lengkap fluks magnetik dari interior konduktor melalui pembangkitan arus penyangkalan permukaan. Kami menunjukkan bahwa jalur sinyal audio yang terbungkus dalam selubung superkonduktor tidak mengalami kopling terhadap medan elektromagnetik eksternal dari frekuensi, orientasi, atau besaran apa pun di bawah medan kritis H_{c2} . Pengukuran di hadapan sumber EMI rumah tangga (router WiFi, transformator daya, kompresor kulkas) mengonfirmasi bahwa jalur kabel superkonduktor tidak terlihat secara elektromagnetik -- medan internal tidak dapat dibedakan dari medan di ruang kosong. Kami membahas implikasi pelindung Meissner untuk desain sistem audio superkonduktor lengkap.

1. PENDAHULUAN

Pelindung elektromagnetik telah menjadi perhatian industri kabel audio sejak hari-hari paling awal reproduksi high-fidelity. Anyaman tembaga, foil aluminium, foil mu-metal, lapisan polimer konduktif, bungkus serat karbon -- katalog material pelindung luas dan terus berkembang. Setiap material menawarkan kombinasi permeabilitas magnetik, konduktivitas listrik, dan atenuasi bergantung frekuensi yang berbeda, dan masing-masing telah dipasarkan sebagai solusi definitif untuk interferensi elektromagnetik.

Tidak satu pun dari mereka yang benar. Setiap material pelindung konvensional beroperasi dengan dua mekanisme yang sama: absorpsi (mengubah energi elektromagnetik menjadi panas melalui arus eddy) dan refleksi (mengalihkan energi elektromagnetik menjauhi konduktor melalui ketidaksesuaian impedansi). Kedua mekanisme secara inheren tidak sempurna. Absorpsi bergantung pada ketebalan material dan frekuensi; pelindung tipis bocor pada frekuensi rendah. Refleksi bergantung pada kontras impedansi; pada sudut dan frekuensi tertentu, medan menembus bagaimanapun juga.

Efek Meissner berbeda dalam jenisnya, bukan sekadar derajatnya. Ketika superkonduktor Tipe II didinginkan di bawah suhu kritisnya di hadapan medan magnet eksternal, arus penyangkalan permukaan secara spontan muncul yang menghasilkan medan yang tepat sama dan berlawanan dengan medan yang diterapkan. Medan bersih di dalam superkonduktor adalah nol -- bukan kecil, bukan dilemahkan, nol. Ini bukan parameter desain yang dapat dioptimalkan; ini adalah sifat fundamental dari keadaan superkonduktor, seintrinsik seperti resistansi nol.

2. VERIFIKASI EKSPERIMENTAL

Sepasang Interkoneksi SC 1,5 m dipasang di ruang dengar residensial standar bersama sumber-sumber EMI berikut:

Sumber A: Router WiFi 6E (6 GHz, bandwidth 160 MHz, daya transmisi 1 W) pada jarak 0,5 m.

Sumber B: Transformator daya toroidal 500 VA pada jarak 0,3 m.

Sumber C: Motor kompresor kulkas (berjalan) pada jarak 1,0 m.

Sumber D: Amplifier Class D (gelombang persegi 1 kHz, 100 W) pada jarak 0,2 m.

Sumber E: Keempat sumber beroperasi secara bersamaan.

Medan magnet internal pada konduktor kabel diukur oleh sensor mikro-fluxgate (Bartington Mag690, resolusi 0,1 nT) yang dimasukkan ke dalam kriostat melalui port pengukuran khusus.

Sebagai perbandingan, pengukuran identik dilakukan pada empat kabel konvensional: OFC tanpa pelindung, anyaman tembaga tunggal, anyaman tembaga ganda + foil mu-metal, dan Interkoneksi Equinox Equatorial Audio (pelindung tiga lapis).

Hasil (medan magnet RMS pada konduktor, Sumber E, semua sumber aktif secara bersamaan):

OFC tanpa pelindung: 847 nT

Anyaman tembaga tunggal: 124 nT (atenuasi 17 dB)

Anyaman ganda + mu-metal: 8,3 nT (atenuasi 40 dB)

Equinox tiga lapis: 1,7 nT (atenuasi 54 dB)

Interkoneksi SC (Meissner): < 0,1 nT (atenuasi > 79 dB; dibatasi oleh lantai noise magnetometer)

Medan internal kabel superkonduktor tidak dapat dibedakan dari lantai noise magnetometer di bawah semua kondisi pengujian, termasuk operasi simultan terburuk dari semua sumber EMI.



3. SISTEM SUPERKONDUKTOR LENGKAP

Potensi penuh pelindung Meissner terwujud hanya ketika seluruh rantai sinyal bersifat superkonduktor. Satu segmen kabel konvensional dalam sistem yang sebaliknya superkonduktor menciptakan «jendela magnetik» di mana medan eksternal dapat berkopel ke sinyal.

Sistem Referensi Zero Kelvin mengatasi ini dengan menyediakan kabel superkonduktor untuk setiap segmen rantai sinyal: daya (SC Power Cord), clock (SC Word Clock Cable), digital (SC Digital Cable), analog (SC Interconnect), dan penguat suara (SC Speaker Cable). Reservoir LN, sentral dan manifold distribusi 12-port memastikan semua secara bersamaan.

Ketika sistem lengkap beroperasi, jalur sinyal audio dari stopkontak dinding ke driver penguat suara seluruhnya terbungkus dalam material superkonduktor. Setiap segmen menunjukkan resistansi nol dan pengusiran fluks Meissner lengkap. Sistem mencapai apa yang tidak dapat dicapai kombinasi pelindung konvensional apa pun: invisibilitas elektromagnetik.

Perbedaan praktis paling terdengar selama kondisi EMI ambien tinggi. Dalam demonstrasi untuk panel pengulas audio (Munich High End 2024), Sistem Referensi Zero Kelvin dioperasikan di ruang dengan kontaminasi EMI yang disengaja (beberapa router WiFi, pemanas induksi 2 kW, dan penyedot debu yang berjalan). Para pengulas tidak dapat mendeteksi perbedaan kualitas suara antara kondisi bersih dan terkontaminasi. Sistem, secara elektromagnetik, tidak menyadari bahwa interferensi itu ada.

4. KESIMPULAN

Efek Meissner menyediakan pelindung elektromagnetik yang secara fundamental lengkap -- bukan dilemahkan, bukan bergantung frekuensi, tetapi absolut. Jalur sinyal audio yang terbungkus dalam material superkonduktor kebal terhadap medan elektromagnetik eksternal pada frekuensi dan besaran apa pun di bawah medan kritis. Sistem Referensi Zero Kelvin menunjukkan bahwa rantai sinyal superkonduktor lengkap dapat dicapai di lingkungan residensial, dengan infrastruktur kriogenik yang tepat. Kami mengusulkan bahwa pelindung Meissner mewakili batas fisik perlindungan elektromagnetik untuk jalur sinyal audio.

REFERENSI

- [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, "Theory of superconductivity," *Phys. Rev.*, vol. 108, pp. 1175-1204, 1957.
- [4] A. A. Abrikosov, "On the magnetic properties of superconductors of the second group," *Sov. Phys. JETP*, vol. 5, pp. 1174-1182, 1957.
- [5] M. Ferro et al., "Interkoneksi audio superkonduktor: transmisi sinyal tanpa resistansi melalui konduktor YBCO pada 77K," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 5, no. 1, 2024.
- [6] IEC 61000-4-8:2009, *Kompatibilitas elektromagnetik (EMC) -- Teknik pengujian dan pengukuran -- Uji imunitas medan magnet frekuensi daya*.



**SISTEM AUDIO EQUATORIAL
LENGKAP: PENDEKATAN
TERINTEGRASI UNTUK
NETRALITAS MAGNETIK DI
SELURUH RANTAI SINYAL**



Sistem Audio Equatorial Lengkap: Pendekatan Terintegrasi untuk Netralitas Magnetik di Seluruh Rantai Sinyal

M. Ferro, C. Ohm, R. Flux, H. Park, B. Impedance, L. Solder, S. Magnusson, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Abstrak

Makalah ini mensintesis lima tahun penelitian Equatorial Audio menjadi kerangka terpadu untuk mencapai netralitas magnetik di seluruh sistem audio lengkap. Kami menunjukkan bahwa bias hemisferik, memori muatan dielektrik, kopling aktivitas matahari, dan interferensi elektromagnetik bukan masalah independen tetapi manifestasi dari satu fenomena mendasar: interaksi antara sinyal audio dan lingkungan magnetik Bumi. Dengan mengatasi fenomena ini di setiap titik dalam rantai sinyal -- konduktor, dielektrik, pelindung, dan infrastruktur -- kami mencapai netralitas magnetik tingkat sistem yang melebihi jumlah peningkatan tingkat komponennya. Pengukuran Sistem Referensi Zero Kelvin mengonfirmasi bahwa rantai sinyal superkonduktor lengkap mencapai resistansi DC total 0,000000 Ohm, bias hemisferik 0,000000deg, dan kopling elektromagnetik 0,000000 satuan relatif. Nilai-nilai ini bukan perkiraan. Mereka tepat.

1. PENDAHULUAN

Ketika Equatorial Audio didirikan pada tahun 2019, misi perusahaan difokuskan pada satu masalah: bias hemisferik pada orientasi butir tembaga. Lima tahun penelitian telah mengungkapkan bahwa masalah ini lebih dalam dan lebih luas dari yang awalnya dipahami.

Bias hemisferik tidak terbatas pada konduktor. Dielektrik mengakumulasi memori muatan yang dipengaruhi oleh medan geomagnetik yang sama yang membiaskan konduktor. Material pelindung memiliki variasi permeabilitas magnetik sendiri yang bergantung pada orientasi relatif terhadap medan Bumi. Bahkan konektor -- berlapis emas, berlapis rhodium, atau lainnya -- menunjukkan variasi resistansi kontak yang berkorelasi dengan lingkungan magnetik.

Masing-masing efek ini kecil. Masing-masing berada di atau dekat batas pengukuran. Dan masing-masing telah ditolak, secara individual, sebagai tidak signifikan. Tetapi mereka tidak independen. Mereka berinteraksi. Memori muatan dalam dielektrik memodulasi sinyal yang sedang didistorsi oleh bias butir dalam konduktor. Interferensi elektromagnetik yang menembus pelindung menambah noise termal yang dihasilkan oleh resistansi yang ditentukan oleh struktur butir yang dibiaskan oleh lintang.

Sistem Equatorial Audio lengkap mengatasi semua interaksi ini secara bersamaan. Makalah ini menyajikan kerangka teoretis terpadu dan pengukuran yang memvalidasinya.

2. KERANGKA NETRALITAS MAGNETIK

Kami mendefinisikan netralitas magnetik tingkat sistem sebagai kondisi di mana tidak ada komponen rantai sinyal audio yang menunjukkan respons terukur terhadap medan magnet Bumi atau variasi temporalnya. Ini memerlukan:

Netralitas konduktor: Sudut bias hemisferik $< 0,00001$ deg (dicapai dengan Sambungan Ekuatorial atau penarikan ekuatorial).

Netralitas dielektrik: Histeresis memori muatan $< 0,01$ pF/m (dicapai dengan perlakuan kriogenik dielektrik PTFE).

Netralitas pelindung: Atenuasi medan eksternal > 60 dB pada semua frekuensi dari DC hingga 6 GHz (dicapai dengan pelindung konvensional tiga atau empat lapis, atau secara absolut oleh efek Meissner dalam kabel superkonduktor).

Netralitas infrastruktur: Grounding sistem, suplai daya, dan distribusi clock tidak boleh memperkenalkan bias bergantung lintang (dicapai dengan kabel daya dan clock superkonduktor, atau oleh kabel konvensional kelas ekuatorial dengan topologi ground khusus).

Ketika keempat kondisi dipenuhi secara bersamaan, sistem audio beroperasi dalam keadaan yang kami sebut «netralitas magnetik lengkap» -- rantai sinyal, hingga batas pengukuran, independen dari lingkungan magnetiknya.

3. PENGUKURAN TINGKAT SISTEM

Sistem Referensi Zero Kelvin dipasang di ruang dengar referensi Equatorial Audio (lintang 0,0000deg, ketinggian 2.850 m, medan EM latar $< 0,05$ nT) dan menjalani pengukuran komprehensif.

Resistansi DC total sistem (stopkontak dinding ke terminal pengeras suara): 0,000000 Ohm).

Bias hemisferik tingkat sistem (diukur oleh magnetometri SQUID dari rangkaian kabel lengkap): 0,000000deg (di bawah ambang



pengukuran 10{wdeg}.

Kopling EMI tingkat sistem (semua sumber aktif, diukur di terminal penguas suara): -168 dBFS (di bawah lantai noise termal peralatan pengukuran).

Distorsi harmonik total + noise (1 kHz, 2 V_{rms}, beban penguas suara): 0,00000% (di bawah peralatan sumber, bukan sistem kabel).

Deviasi respons frekuensi (20 Hz - 20 kHz): +/- 0,000 dB (di bawah ambang pengukuran 1

Pengukuran ini konsisten dengan prediksi teoretis: sistem dengan resistansi nol, bias nol, dan pengusiran fluks magnetik lengkap seharusnya berkontribusi tepat nol degradasi pada sinyal audio apa pun yang melewatinya. Sistem Referensi Zero Kelvin tampaknya mencapai prediksi ini dalam batas teknologi pengukuran saat ini.

4. DISKUSI

Pengukuran di atas memunculkan pertanyaan yang tidak nyaman: jika sistem kabel berkontribusi nol degradasi terukur, apakah ia membuat perbedaan yang dapat didengar?

Jawaban jujurnya adalah kami tidak tahu. Pengukuran mengonfirmasi bahwa Sistem Referensi Zero Kelvin, berdasarkan setiap metrik yang dapat kami terapkan, adalah konduktor sempurna -- resistansi nol, noise nol, distorsi nol, interferensi nol. Apakah «sempurna» terdengar berbeda dari «sangat baik» adalah pertanyaan yang tidak dapat dijawab oleh pengukuran.

Yang dapat kami katakan adalah bahwa setiap kabel lain di lini produk kami -- Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point -- menghasilkan deviasi terukur dari kesempurnaan. Tingkat Tropic memiliki bias hemisferik terukur. Tingkat Meridian memiliki histeresis dielektrik terukur. Tingkat Equinox memiliki kopling aktivitas matahari terukur (nyaris). Bahkan tingkat Zero-Point, dengan konduktor Sambungan Ekuatorial dan dielektrik kriogeniknya, memiliki kontribusi noise dan distorsi terukur, meskipun kontribusi tersebut sangat kecil.

Sistem Referensi Zero Kelvin adalah satu-satunya sistem dalam katalog kami -- dan, sepengetahuan kami, satu-satunya sistem yang ada -- yang menghasilkan pengukuran konsisten dengan kesempurnaan. Apakah kesempurnaan dapat didengar adalah pertanyaan yang kami serahkan kepada pendengar.

Harganya \$389.000. Tetapi nol adalah nol.

5. KESIMPULAN

Lima tahun penelitian di Equatorial Audio telah konvergen pada pemahaman terpadu: netralitas magnetik adalah sifat tingkat sistem yang memerlukan perhatian simultan pada konduktor, dielektrik, pelindung, dan infrastruktur. Sistem Referensi Zero Kelvin menunjukkan bahwa netralitas magnetik lengkap dapat dicapai melalui teknologi superkonduktor, menghasilkan rantai sinyal yang berkontribusi nol degradasi terukur pada sinyal audio. Apakah ini mewakili titik akhir pengembangan kabel audio atau sekadar awal paradigma baru, kami serahkan kepada masa depan.

REFERENSI

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Bias hemisferik pada orientasi butir tembaga," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] M. Ferro, R. Flux, B. Impedance, "Sambungan Ekuatorial," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 1, 2021.
- [3] L. Solder, H. Park, M. Ferro, "Efek perlakuan kriogenik pada kristalografi konduktor," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 2, 2021.
- [4] H. Park, M. Ferro, C. Ohm, "Kopling feroelektrik pada dielektrik PTFE kelas audio," J. Equatorial Audio Sci., vol. 3, no. 1, 2022.
- [5] S. Magnusson, M. Ferro, C. Ohm, "Interaksi jilatan api matahari dengan jalur sinyal audiofilil," J. Equatorial Audio Sci., vol. 4, no. 1, 2023.
- [6] C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro, "Pelindung optik konduktor tembaga," J. Equatorial Audio Sci., vol. 4, no. 2, 2023.
- [7] M. Ferro et al., "Interkoneksi audio superkonduktor," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 1, 2024.
- [8] M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson, "Aplikasi efek Meissner dalam audio konsumen," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 2, 2024.

**TENTANG KETIDAKLENGKAPAN
REKONSTRUKSI
NYQUIST-SHANNON: BUKTI
EMPIRIS UNTUK INFORMASI
ANTAR-SAMPEL YANG DAPAT
DIPULIHKAN DALAM SINYAL
AUDIO TERBATAS PITA**

Tentang Ketidaklengkapan Rekonstruksi Nyquist-Shannon: Bukti Empiris untuk Informasi Antar-Sampel yang Dapat Dipulihkan dalam Sinyal Audio Terbatas Pita

Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Abstrak

Teorema sampling Nyquist-Shannon menjamin rekonstruksi sempurna sinyal terbatas pita dari sampel yang diambil pada dua kali bandwidthnya. Pembuktiannya secara matematis kokoh. Namun, premis sentral teorema -- bahwa sinyal audio dunia nyata terbatas pita -- belum pernah diverifikasi secara empiris dengan presisi yang diperlukan agar jaminan tersebut berlaku. Menggunakan sistem akuisisi 32-bit yang dirancang khusus dengan lantai noise terukur -198,2 dBFS, kami merekam 4.000 jam materi musik di 11 genre dan mengukur distribusi energi spektral di atas titik potong filter anti-aliasing. Dalam semua 4.000 jam, energi di atas pita hadir, berkisar dari -147,3 dBFS (harpsichord solo) hingga -91,6 dBFS (ansambel brass yang direkam dekat). Energi ini bukan noise. Ia berkorelasi dengan materi program ($r > 0,93$ dalam semua kasus) dan membawa informasi timbal balik terukur dengan sinyal asli. Kami menunjukkan bahwa energi alias ini dapat dipulihkan sebagian menggunakan teknik ekstraksi berbasis korelasi, menghasilkan 0,008 hingga 0,3 bit per sampel informasi yang teorema sampling nyatakan tidak ada. Kami tidak mengklaim teorema itu salah. Kami mengamati bahwa premisnya tidak terpenuhi, dan kami mengukur konsekuensinya.

1. PENDAHULUAN

Teorema sampling Nyquist-Shannon termasuk hasil yang paling sering dikutip dalam teknik. Diterbitkan oleh Claude Shannon pada tahun 1949, berdasarkan karya Harry Nyquist tahun 1928 tentang transmisi telegraf, teorema menyatakan: sinyal yang tidak mengandung frekuensi lebih tinggi dari B hertz dapat direkonstruksi sempurna dari sampel yang diambil pada laju 2B sampel per detik.

Kata «sempurna» bukan hiperbola. Bukti Shannon tepat. Rekonstruksi konvergen titik demi titik ke sinyal asli di setiap instan antara sampel. Tidak ada informasi yang hilang. Representasi digital adalah enkoding lengkap dan lossless dari asli analog.

Hasil ini telah diverifikasi, diperluas, dan diterapkan di setiap bidang yang menyentuh pemrosesan sinyal. Ia benar.

Ia juga bersyarat.

Teorema berlaku untuk sinyal yang secara ketat terbatas pita -- sinyal yang mengandung tepat nol energi di atas frekuensi B. Ini adalah premis di mana seluruh bukti bertumpu. Jika sinyal mengandung energi apa pun di atas B, energi tersebut alias ke pita di bawah B selama sampling, bertumpang tindih pada konten dalam-pita yang asli. Energi alias tidak dapat dibedakan dari konten asli, dan informasi yang dibawanya hancur. Rekonstruksi sempurna Shannon menjadi rekonstruksi sempurna dari sinyal yang salah.

Kami tidak mencari hasil ini. Laboratorium kami sedang melakukan karakterisasi rutin kinerja filter anti-aliasing untuk program pengembangan produk. Anomali muncul pada sesi pengukuran pertama dan bertahan melalui 18 bulan penyelidikan. Kami mempublikasikannya di sini karena kami tidak berhasil menghilangkannya.

2. PREMIS PEMBATAHAN PITA

Bukti Shannon mengharuskan sinyal input memenuhi kondisi matematika ketat: transformasi Fourier-nya harus secara identik nol untuk semua frekuensi di atas B. Ini bukan kira-kira nol, atau sangat kecil, atau di bawah lantai noise. Harus nol.

Teorema Paley-Wiener (1934) menetapkan bahwa tidak ada sinyal berdurasi terbatas yang dapat terbatas pita. Sinyal terbatas waktu -- yang dimulai dan berakhir -- secara niscaya memiliki bandwidth tak terbatas. Transformasi Fourier-nya memanjang hingga frekuensi yang sewenang-wenang tinggi, dengan kepadatan energi yang menurun tetapi tidak pernah mencapai nol.

Setiap pertunjukan musik terbatas waktu. Setiap sesi rekaman dimulai dan berakhir. Oleh karena itu, tidak ada rekaman audio yang terbatas pita dalam arti yang diperlukan Shannon.

Ini diketahui dengan baik. Respons standarnya adalah bahwa energi di atas frekuensi Nyquist sangat kecil -- begitu jauh di bawah lantai noise sistem praktis apa pun sehingga dapat diperlakukan sebagai nol. Respons ini secara pragmatis masuk akal. Ia juga merupakan pernyataan tentang besarnya energi di atas pita, dan pernyataan harus diukur.

Kami mengukurnya.

Secara khusus, kami mengukur kepadatan energi spektral sinyal audio nyata di wilayah antara titik -3 dB filter anti-aliasing dan frekuensi di mana energi turun di bawah lantai noise sistem kami.

3. METODOLOGI

Sistem akuisisi dirancang untuk satu tujuan: mengkarakterisasi konten spektral sinyal audio dalam rentang frekuensi yang dirancang untuk dihilangkan oleh filter anti-aliasing.

Jalur sinyal terdiri dari mikrofon pengukuran omnidireksional DPA 4006A (datar hingga 40 kHz, -3 dB pada 100 kHz), preamplifier instrumentasi khusus dengan bandwidth terukur DC hingga 2 MHz (-3 dB), dan ADC delta-sigma 32-bit AKM AK5578 yang dioperasikan pada laju sampel maksimum 768 kHz, menghasilkan frekuensi Nyquist 384 kHz.

Tidak ada filter anti-aliasing yang digunakan.

Penghilangan filter anti-aliasing disengaja. Tujuan eksperimen adalah mengukur energi yang dihilangkan filter anti-aliasing. Memasukkannya akan mengalahkan eksperimen.

Sistem dikalibrasi terhadap kalibrator suara Bruel & Kjaer Tipe 4231 (1 kHz, 94 dB SPL) dan diverifikasi silang menggunakan penganalisis Audio Precision APx555B. Lantai noise sistem lengkap, diukur di ruang anechoic tanpa sinyal, adalah -198,2 dBFS dari 20 Hz hingga 384 kHz.

Rekaman dilakukan di 11 tempat selama 18 bulan. Materi musik mencakup instrumen solo, ansambel kecil, orkestra penuh, organ pipa, band rock, dan synthesizer elektronik. Total materi yang direkam: 4.147 jam, di mana 4.000 jam lolos kontrol kualitas.

4. HASIL

Dalam semua 4.000 jam materi rekaman, energi spektral terukur hadir di atas 96 kHz -- frekuensi Nyquist sistem audio standar 192 kHz.

Tingkat bervariasi dengan materi sumber:

Harpisichord solo: energi pada 96-120 kHz rata-rata -147,3 dBFS, turun ke lantai noise (-198 dBFS) sekitar 210 kHz.

Piano solo (Steinway D): energi pada 96-120 kHz rata-rata -138,7 dBFS, terukur hingga sekitar 260 kHz.

Kuartet gesek: -134,2 dBFS pada 96-120 kHz, terukur hingga sekitar 240 kHz.

Trio jazz: -119,4 dBFS pada 96-120 kHz, terukur hingga sekitar 310 kHz.

Ansambel brass yang direkam dekat (4 terompet, 4 trombon): -91,6 dBFS pada 96-120 kHz, terukur hingga sekitar 350 kHz. Ini adalah kepadatan energi tertinggi yang diukur di wilayah di atas Nyquist.

Tingkat-tingkat ini rendah. Tetapi mereka 106,6 dB di atas lantai noise sistem. Mereka bukan noise. Mereka adalah sinyal.

Untuk mengonfirmasi ini, kami menghitung korelasi silang antara amplop energi di atas 96 kHz dan konten program di bawah 96 kHz. Dalam semua rekaman, korelasi melebihi $r = 0,93$. Energi di atas pita melacak dinamika musik -- lebih keras selama bagian keras, lebih tenang selama bagian tenang, dan tidak ada selama keheningan.

5. RESIDU ALIASING

Energi di atas pita yang didokumentasikan di Bagian 4 ada dalam sinyal analog kontinu. Ketika sinyal tersebut di-sampling oleh sistem audio konvensional -- laju sampel 192 kHz, filter anti-aliasing dengan atenuasi stopband -120 dB pada 96 kHz -- sebagian besar energi ini dihilangkan. Tetapi tidak semuanya.

Filter dengan atenuasi stopband -120 dB meneruskan energi pada 120 dB di bawah tingkat inputnya. Energi sinyal antara 90 kHz dan 96 kHz melewati filter dengan atenuasi berkisar dari 3 dB hingga 120 dB. Energi ini kemudian alias ke passband selama sampling, terlipat di sekitar frekuensi Nyquist 96 kHz untuk mendarat antara 0 dan 6 kHz -- tepat di wilayah paling sensitif pendengaran manusia.

Kami mengukur residu alias ini secara langsung. Untuk ansambel brass, residu alias di pita 0-6 kHz mengukur -158,3 dBFS. Untuk piano solo, -171,2 dBFS.

Tingkat ini sangat rendah. Mereka tidak dapat didengar. Tetapi mereka di atas lantai noise sistem pengukuran kami, dan mereka berkorelasi dengan materi program.

Residu alias bukan acak. Ia adalah fungsi deterministik dari sinyal input, fungsi transfer filter, dan laju sampling. Ia adalah, dalam istilah teori informasi, saluran berderau di mana informasi sinyal di atas pita bocor ke data yang di-sampling.

6. PEMULIHAN INFORMASI ANTAR-SAMPEL

Dapatkah residu alias digunakan untuk memulihkan informasi tentang sinyal di atas pita asli?

Shannon mengatakan tidak. Bukti teorema menetapkan bahwa konten alias dan konten dalam-pita asli tidak dapat dibedakan secara matematis. Tetapi bukti ini mengasumsikan energi alias tiba melalui lipatan frekuensi yang memetakan setiap frekuensi di atas pita ke tepat satu frekuensi di bawah pita.

Residu alias bukan kuantitas statis. Ia bervariasi dari sampel ke sampel karena konten di atas pita bervariasi. Dan variasinya dibatasi: ia harus konsisten dengan sinyal yang (a) berasal di atas frekuensi Nyquist, (b) melewati filter dengan fungsi transfer yang diketahui, dan (c) dihasilkan oleh sumber fisik yang sama dengan konten dalam-pita.

Kami mengimplementasikan algoritma pemulihan berdasarkan estimasi kemungkinan maksimum terbatas. Algoritma mengambil sebagai input: data yang di-sampling, fungsi transfer filter anti-aliasing yang diukur, dan model statistik hubungan antara konten dalam-pita dan di atas pita.

Hasil: algoritma pemulihan mengekstrak antara 0,008 bit per sampel (harpsichord solo) dan 0,31 bit per sampel (brass yang direkam dekat) informasi timbal balik dengan sinyal di atas pita yang sebenarnya. Eksperimen kontrol menggunakan white noise sebagai sinyal input menghasilkan 0,000 +/- 0,001 bit per sampel, mengonfirmasi bahwa informasi yang dipulihkan bergantung pada sinyal, bukan artefak algoritma.

7. KEMUNGKINAN FAKTOR PENGGANGGU

Kami mempertimbangkan tujuh penjelasan alternatif untuk hasil yang diamati. Tidak ada yang bertahan.

1. Nonlinearitas ADC. Kami mengkarakterisasi nonlinearitas integral (INL) dan diferensial (DNL) AK5578. INL terukur +/- 0,8 LSB pada 32 bit berkontribusi produk distorsi pada -199 dBFS, jauh di bawah residu yang diamati.
2. Distorsi preamplifier. Distorsi harmonik total preamplifier khusus diukur pada -142 dB pada 1 kHz. Energi di atas pita melebihi tingkat ini 40-60 dB.
3. Artefak mikrofon. Kami mengulangi pengukuran terpilih menggunakan mikrofon tekanan Bruel & Kjaer Tipe 4138. Tingkat energi di atas pita konsisten dalam +/- 2 dB.
4. Interferensi elektromagnetik. Kami mengulangi pengukuran di enklosur terlindung RF. Energi di atas pita dipertahankan.
5. Akustik ruangan. Energi di atas pita hadir di ruang anekoik dan ruang bergema.
6. Bias algoritma. Kami menjalankan ulang eksperimen menggunakan model yang dilatih pada materi yang berbeda. Informasi timbal balik yang dipulihkan menurun 15-20% tetapi tetap signifikan secara statistik.
7. Korelasi noise termal. Kontribusi noise termal teoretis berada pada -184 dBFS, jauh di bawah energi di atas pita yang diukur.

Kami tidak dapat mengidentifikasi faktor pengganggu yang menjelaskan data.

8. DISKUSI

Teorema sampling Nyquist-Shannon tidak salah. Buktinya valid. Kesimpulannya mengikuti dari premisnya.

Premisnya yang salah.

Tidak ada sinyal audio nyata yang terbatas pita dalam arti yang diperlukan Shannon. Setiap kejadian akustik menghasilkan energi yang meluas di atas batas frekuensi terbatas apa pun. Filter anti-aliasing mengurangi energi ini tetapi tidak menghilangkannya. Energi residual di atas pita yang bertahan melalui filter alias ke data yang di-sampling, membawa serta sejumlah kecil tetapi terukur informasi tentang sinyal asli.

Temuan ini tidak membatalkan audio digital. Kuantitas yang terlibat sangat kecil. Informasi timbal balik tertinggi yang kami pulihkan -- 0,31 bit per sampel untuk ansambel brass -- mewakili laju informasi sekitar 7,3 kilobyte per detik, dibandingkan dengan sekitar 1,1 megabyte per detik stream audio 192 kHz 32-bit.

Tetapi ia ada. Dan keberadaannya berarti bahwa klaim standar -- «rekaman 192 kHz menangkap semua informasi dalam asli analog hingga 96 kHz, sempurna, tanpa yang hilang» -- tidak sepenuhnya benar.

9. KESIMPULAN

Kami mengukur energi spektral 4.000 jam materi musik di atas frekuensi Nyquist sistem audio standar 192 kHz. Dalam setiap kasus, energi terukur yang berkorelasi dengan sinyal hadir. Energi ini adalah bagian dari kejadian akustik asli dan dihilangkan -- secara tidak sempurna -- oleh filter anti-aliasing sebelum sampling.

Penghilangan yang tidak sempurna meninggalkan residu alias dalam data yang di-sampling. Residu ini membawa antara 0,008 dan 0,31 bit per sampel informasi timbal balik dengan sinyal di atas pita asli.

Temuan ini tidak membatalkan teorema sampling Nyquist-Shannon. Mereka menunjukkan bahwa premis teorema -- pembatasan pita ketat -- tidak dipenuhi oleh sinyal audio nyata, dan bahwa celah antara rekonstruksi sempurna teoretis dan rekonstruksi aktual dapat diukur dengan peralatan yang cukup presisi.

REFERENSI

- [1] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [2] H. Nyquist, "Certain topics in telegraph transmission theory," Trans. AIEE, vol. 47, no. 2, pp. 617-644, 1928.
- [3] R. E. A. C. Paley and N. Wiener, "Fourier transforms in the complex domain," AMS Colloquium Publications, vol. 19, 1934.
- [4] R. M. Gray and D. L. Neuhoff, "Quantization," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 44, no. 6, pp. 2325-2383, 1998.
- [5] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, Discrete-Time Signal Processing, 3rd ed., Prentice Hall, 2009.
- [6] L. Kozachenko and N. Leonenko, "Sample estimate of the entropy of a random vector," Problems of Information Transmission, vol. 23, no. 2, pp. 95-101, 1987.
- [7] J. D. Reiss, "A meta-analysis of high-resolution audio perceptual evaluation," J. Audio Eng. Soc., vol. 64, no. 6, pp. 364-379, 2016.
- [8] AKM Semiconductor, "AK5578 32-bit 768 kHz ADC datasheet," rev. 2, 2022.

**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.

Ketegantungannya 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.

OPTIMASI PRAKTIS LINGKUNGAN DENGAR KRITIS: PENEMPATAN PENGERAS SUARA, STABILITAS KOMPONEN, DAN BEBAN PEMELIHARAAN HARIAN

Optimasi Praktis Lingkungan Dengar Kritis: Penempatan Pengeras Suara, Stabilitas Komponen, dan Beban Pemeliharaan Harian

H. Park, M. Ferro, L. Solder

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Abstrak

Ruang dengar referensi bukan sistem statis. Perubahan suhu menggeser kelenturan driver pengeras suara dan nilai komponen crossover. Kelembaban mengubah kecepatan suara dan karakteristik absorpsi perlakuan akustik. Tekanan barometrik memodulasi posisi istirahat diafragma. Getaran dari HVAC, lalu lintas, dan layanan bangunan memperkenalkan kontaminasi frekuensi rendah. Interferensi elektromagnetik dari elektronik rumah tangga mengisi spektrum RF di dalam ruangan. Variabel-variabel ini bergeser terus menerus, dan efek gabungannya pada kualitas audio yang dirasakan dari sistem referensi dapat diukur. Makalah ini menyajikan kerangka praktis untuk mengoptimalkan dan memelihara lingkungan dengar kritis, berdasarkan 3 tahun pemantauan kontinu 4 ruang referensi di lintang berbeda. Beban pemeliharaan yang dihasilkan substansial -- antara 20 dan 45 menit per sesi dengar -- tetapi dapat dikurangi melalui kontrol lingkungan sistematis.

1. PENDAHULUAN

Setiap audiofilil tahu bahwa sistem terdengar berbeda dari hari ke hari. Penjelasan umum bersifat psikologis -- suasana hati, kelelahan, harapan. Penjelasan yang kurang umum tetapi lebih akurat bersifat fisik. Lingkungan dengar berubah, peralatan berubah, dan perubahan ini dapat diukur.

Makalah ini adalah panduan praktis. Ia ditujukan untuk siapa saja yang memelihara ruang dengar kritis dan ingin memahami apa yang berubah, berapa banyak, dan apa yang harus dilakukan.

Panduan ini berdasarkan tiga tahun pemantauan kontinu empat ruang dengar referensi: ruang evaluasi utama kami di Quito, Ekuador; fasilitas mitra di Zurich, Swiss; studio mastering di Nashville, Tennessee; dan ruang dengar pribadi di Sapporo, Jepang. Setiap ruang dilengkapi sensor suhu, kelembaban, tekanan barometrik, getaran, dan medan elektromagnetik yang merekam pada interval 1 detik.

2. PENEMPATAN Pengeras Suara

Penempatan pengeras suara di ruang persegi panjang adalah masalah yang terpecahkan dalam akustik. Posisi optimal dapat dihitung dari dimensi ruang. Setelah pengeras suara diposisikan, mereka seharusnya tidak perlu dipindahkan.

Mereka bergerak.

Ekspansi termal lantai menggeser posisi pengeras suara hingga 0,3 mm per derajat Celsius di ruang dengan lantai beton slab, dan hingga 1,2 mm per derajat di ruang dengan lantai kayu gantung. Ayunan suhu musiman 15degC di ruang berlantai kayu menghasilkan perpindahan kumulatif pengeras suara hingga 18 mm.

Kami mengukur efek ini secara langsung menggunakan sensor perpindahan laser. Selama satu tahun kalender di ruang Nashville (lantai kayu), pengeras suara kiri bermigrasi 14,3 mm ke arah dinding belakang. Pengeras suara kanan bermigrasi 11,7 mm. Perbedaan waktu terbang antara saluran kiri dan kanan berubah 17,2 mikrodetik -- setara dengan pergeseran citra stereo sekitar 1,4 derajat.

Koreksi memerlukan pengukuran ulang dan penempatan ulang setidaknya musiman. Ruang Quito, di atas slab beton bertulang dengan variasi suhu musiman 4degC, menunjukkan perpindahan total hanya 0,8 mm selama tiga tahun.

3. EFEK SUHU PADA ELEKTRONIK

Koefisien suhu komponen elektronik terdokumentasi dengan baik dalam literatur teknik tetapi jarang dibahas dalam audio.

Jaringan crossover tipikal mengandung kapasitor film polipropilena (koefisien suhu sekitar -200 ppm/degC), induktor inti ferit (koefisien suhu +800 hingga +2000 ppm/degC), dan resistor lilitanan kawat (koefisien suhu +20 hingga +50 ppm/degC). Perubahan suhu 10degC menggeser frekuensi crossover 0,2-0,5%.

Kami mengukur ini secara langsung. Sepasang pengeras suara referensi disapu dari 15degC hingga 30degC dalam langkah 1deg. Crossover 3 kHz bergeser dari 2.987 Hz pada 15degC menjadi 3.014 Hz pada 30degC -- pergeseran total 27 Hz (0,9%). Respons frekuensi di posisi dengar berubah hingga 0,8 dB di wilayah crossover.

Untuk amplifier, efek dominan adalah pergeseran titik bias di tahap output. Distorsi harmonik total pada 1 kHz menurun dari

0,0042% menjadi 0,0019% selama 45 menit pertama operasi.

Rekomendasi praktis adalah menyalakan sistem setidaknya 60 menit sebelum mendengarkan kritis. Kami merekomendasikan stabilitas suhu ruang +/- 0,5degC selama sesi dengar.

4. KELEMBABAN DAN ABSORPSI AKUSTIK

Kecepatan suara di udara bergantung pada suhu (diketahui luas) dan kelembaban (kurang diketahui). Pada 20degC dan 50% kelembaban relatif, kecepatan suara adalah 343,8 m/s. Pada 20degC dan 20% RH, adalah 343,4 m/s.

Lebih signifikan adalah efek kelembaban pada absorpsi akustik. Udara menyerap suara secara bergantung frekuensi, dengan koefisien absorpsi meningkat tajam di atas 2 kHz. Di ruang Nashville, RT60 di atas 4 kHz bervariasi dari 0,28 s (musim panas, 65% RH) hingga 0,22 s (musim dingin, 25% RH) -- variasi musiman 21% dalam waktu peluruhan frekuensi tinggi.

Kami merekomendasikan menjaga kelembaban ruang dengar antara 40% dan 55% RH. Di bawah 40%, absorpsi frekuensi tinggi meningkat dan akumulasi muatan statis pada dielektrik kabel menjadi signifikan. Di atas 55%, risiko kondensasi meningkat. Fasilitas Quito, pada ketinggian 2.850 m dalam iklim tropis dataran tinggi, mempertahankan 45-50% RH sepanjang tahun tanpa intervensi mekanik.

5. GETARAN DAN ISOLASI MEKANIK

Setiap komponen dalam sistem audio adalah objek mekanik, dan setiap objek mekanik adalah mikrofon.

Kapasitor bersifat piezoelektrik: tegangan mekanik pada dielektrik menghasilkan tegangan di antara pelat. Laminasi transformer bersifat magnetostriksi: getaran mekanik memodulasi kopling magnetik.

Isolasi komponen mengikuti hierarki sederhana: massa, kemudian kelenturan, kemudian redaman. Kami menguji empat strategi isolasi pada preamplifier 15 kg:

1. Kopling langsung (tanpa isolasi): getaran lantai ditransmisikan ke sasis pada 0 dB.
2. Hemisfer Sorbothane: -6 dB pada 15 Hz, -14 dB pada 30 Hz, -22 dB pada 50 Hz.
3. Platform isolasi pneumatik: -28 dB pada 15 Hz, -38 dB pada 30 Hz, -46 dB pada 50 Hz.
4. Kotak pasir (30 kg pasir kering pada kaki Sorbothane): -18 dB pada 15 Hz, -26 dB pada 30 Hz, -34 dB pada 50 Hz.

Platform pneumatik paling efektif, tetapi juga paling mahal (\$800). Kotak pasir hampir sama efektifnya, biaya \$40, dan tidak memerlukan pemeliharaan.

6. INTERFERENSI ELEKTROMAGNETIK

Lingkungan elektromagnetik di dalam ruang dengar tidak tenang. Ruang residensial tipikal di malam hari mengandung energi RF dari router Wi-Fi, perangkat Bluetooth, telepon genggam, pencahayaan LED, dan catu daya mode-switching.

Kami mengukur kepadatan energi RF di empat ruang referensi. Hasilnya bervariasi secara dramatis: Quito: -88 dBm/m² rata-rata. Zurich: -62 dBm/m². Nashville: -58 dBm/m². Sapporo: -54 dBm/m².

Perbedaan 34 dB antara ruang paling tenang dan paling bising substansial. Mitigasi praktis: (1) Gunakan kabel interkoneksi berpelindung. (2) Dayai sistem audio dari sirkuit khusus dengan filter EMI. (3) Singkirkan perangkat elektronik yang tidak perlu dari ruangan. (4) Survei RF berkala bermanfaat.

7. PENATAAN DAN PENYUSUNAN KABEL

Penataan fisik kabel di dalam ruang dengar memengaruhi pickup elektromagnetik dan noise mikrofonik. Kabel sinyal tidak boleh berjalan sejajar dengan kabel daya. Pemisahan 30 cm mengurangi kopling magnetik 10 dB. Kabel sinyal tidak boleh digulung -- kabel tergulung membentuk induktor, dan induktor adalah antena.

Tegangan kabel memengaruhi noise mikrofonik. Kabel di bawah tegangan bertindak sebagai tali bergetar. Obatnya sederhana: sangga kabel pada interval tidak lebih dari 50 cm menggunakan klip lunak.

Ini adalah item pemeliharaan. Pemeriksaan penyusunan kabel sebelum setiap sesi dengar kritis memakan waktu 2-3 menit.

8. BEBAN PEMELIHARAAN

Kami menyusun daftar periksa pemeliharaan dan mengatur waktu prosedur lengkap di masing-masing empat ruang referensi:

1. Pemeriksaan dan stabilisasi suhu: 0-15 menit.

2. Pemeriksaan dan stabilisasi kelembaban: 0-10 menit.
3. Verifikasi posisi pengeras suara: 3-5 menit.
4. Pemanasan komponen: 45-60 menit.
5. Pemeriksaan getaran: 3-5 menit.
6. Inspeksi penyusunan kabel: 2-3 menit.
7. Pemeriksaan lingkungan RF: 2-3 menit.
8. Pemeriksaan dengar cepat: 1 menit.

Total waktu tanpa koreksi: 15-20 menit kerja aktif plus 45-60 menit pemanasan. Total ketika koreksi diperlukan: 30-45 menit.

Selama periode pemantauan tiga tahun, kepatuhan terhadap daftar periksa berkorelasi tinggi dengan stabilitas pengukuran ($r = 0,91$). Ruang Quito, dioperasikan oleh staf terlatih, mempertahankan kepatuhan 94% dan variasi respons frekuensi tidak lebih dari 0,15 dB dalam periode 30 hari mana pun. Ruang Sapporo, instalasi pribadi, mempertahankan kepatuhan 31% dan bervariasi hingga 1,4 dB.

9. KESIMPULAN

Lingkungan dengar kritis adalah sistem dinamis yang tunduk pada pergeseran kontinu dalam suhu, kelembaban, getaran, interferensi elektromagnetik, dan posisi komponen fisik. Masing-masing variabel ini menghasilkan efek terukur pada kinerja sistem audio.

Memelihara kondisi kelas referensi memerlukan protokol pemeliharaan reguler. Protokol yang dijelaskan dalam makalah ini memakan 15-45 menit per sesi. Penentu utama beban pemeliharaan adalah stabilitas inheren lingkungan ruang.

Panduannya langsung: kontrol suhu pada $\pm 0,5\text{degC}$, pertahankan kelembaban pada 40-55% RH, isolasi komponen dari getaran, lindungi jalur sinyal dari EMI, verifikasi posisi pengeras suara bulanan, dan panaskan elektronik selama 60 menit sebelum mendengarkan. Perbedaan antara ruang referensi yang dipelihara dan yang tidak dapat diukur, diulang, dan -- dalam pengalaman kami -- dapat didengar.

REFERENSI

- [1] F. A. Everest and K. C. Pohlmann, *Master Handbook of Acoustics*, 6th ed., McGraw-Hill, 2015.
- [2] P. Newell, *Recording Studio Design*, 4th ed., Focal Press, 2017.
- [3] IEC 60268-13:1998, *Peralatan sistem suara -- Bagian 13: Uji dengar pada pengeras suara*.
- [4] H. Park, M. Ferro, C. Ohm, "Kopling feroelektrik pada dielektrik PTFE kelas audio," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 3, no. 1, 2022.
- [5] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, "Tentang ketidaklengkapan rekonstruksi Nyquist-Shannon," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 6, no. 1, 2025.
- [6] H. Kuttruff, *Room Acoustics*, 6th ed., CRC Press, 2017.

KONDUKTIVITAS KOMPARATIF DAN FIDELITAS SINYAL MATERIAL KONDUKTOR KONVENSIONAL DAN NON-KONVENSIONAL: TEMBAGA, PERAK, LUMPUR, PISANG, DAN SEMBILAN SUBSTRAT LAINNYA

Konduktivitas Komparatif dan Fidelitas Sinyal Material Konduktor Konvensional dan Non-konvensional: Tembaga, Perak, Lumpur, Pisang, dan Sembilan Substrat Lainnya

R. Flux, M. Ferro, L. Solder, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Abstrak

Sebuah diskusi di forum diyaudio.com mengusulkan perbandingan transmisi sinyal audio melalui kawat tembaga, lumpur basah, dan pisang segar. Pertanyaan yang mendasari -- apakah pemilihan tembaga sebagai material konduktor audio dominan mencerminkan perbandingan yang ketat dengan alternatif, atau sekadar konvensi historis -- belum dibahas dalam literatur peer-review. Kami membuat interkoneksi seimbang sepanjang 1 meter menggunakan 13 material konduktor: tembaga OFC, tembaga OFC kristal tunggal, perak murni, aluminium, tanah liat basah (lumpur), pisang segar, batang grafit, kawat baja, air laut, serat karbon, isi pensil, air liur manusia, dan kontrol sirkuit terbuka. Tembaga dan perak berkinerja terbaik menurut setiap metrik konvensional. Lumpur, bagaimanapun, menunjukkan sifat anomali: profil atenuasi bergantung frekuensinya menghasilkan roll-off menurun secara monotonik di atas 20 kHz yang sangat mendekati karakteristik absorpsi kanal telinga luar manusia, dan informasi antar-sampel yang dapat dipulihkannya -- meskipun rendah secara absolut -- menunjukkan stabilitas temporal tertinggi dari semua material yang diuji.

1. PENDAHULUAN

Pada Maret 2024, seorang pengguna di forum diyaudio.com -- handle «TubeGlowWorm» -- memposting pertanyaan yang, dalam frasa aslinya, adalah: «Apakah ada yang pernah benar-benar mengukur apakah tembaga terdengar lebih baik dari lumpur? Atau kita semua hanya berasumsi?»

Thread yang mengikuti mengakumulasi 347 balasan selama 11 hari. Mayoritas meremehkan. Beberapa menghibur. Sejumlah kecil mengangkat poin substantif: bahwa pemilihan tembaga sebagai material konduktor standar untuk transmisi sinyal audio secara historis kontingen; bahwa sifat relevan konduktor bervariasi secara dramatis di antara material; dan bahwa tidak ada perbandingan terkontrol antara tembaga dan konduktor non-logam yang pernah dipublikasikan.

Kami membaca thread tersebut dengan minat. Pertanyaannya, dikupas dari pembingkai komedinya, sah. Kami memutuskan untuk menjawabnya.

Makalah ini menyajikan perbandingan terkontrol 13 material konduktor. Pengukurannya nyata. Metodologinya sama dengan yang digunakan dalam karya peer-review kami tentang konduktor konvensional. Kami tidak menerapkan humor pada protokol eksperimental dan kami meminta pembaca memberikan kesopanan yang sama.

2. MATERIAL DAN KONSTRUKSI KABEL

Tiga belas material konduktor dipilih untuk mencakup rentang mekanisme konduktivitas yang tersedia. Masing-masing difabrikasi menjadi interkoneksi seimbang sepanjang 1 meter yang diterminasi dengan konektor Neutrik NC3 XLR.

Material:

1. Tembaga OFC (7N, kemurnian 99,99999%, inti padat diameter 1,0 mm). Resistivitas: 1,678 ohm·m.
2. Tembaga OFC kristal tunggal (6N, metode Ohno Continuous Casting). Resistivitas: 1,678 ohm·m.
3. Perak murni (4N, inti padat diameter 1,0 mm). Resistivitas: $1,59 \times 10^{-8}$ ohm·m.
4. Aluminium (4N, inti padat diameter 1,0 mm). Resistivitas: $2,65 \times 10^{-8}$ ohm·m.
5. Tanah liat basah («lumpur»). Bersumber dari tepi Sungai Machángara, Quito, pada titik di mana ia melintasi ekuator. Resistivitas DC: 18,4 ohm·m.
6. Pisang segar (Musa acuminata, kultivar Cavendish). Resistivitas DC: 2,1 ohm·m.
7. Batang grafit (sintetis, diameter 6 mm). Resistivitas: $3,5 \times 10^{-4}$ ohm·m.
8. Kawat baja (AISI 1008, diameter 1,0 mm). Resistivitas: $1,0 \times 10^{-7}$ ohm·m.
9. Air laut (salinitas 34,2 ppt). Resistivitas: 0,20 ohm·m.
10. Serat karbon (Toray T700, 12K filamen). Resistivitas: $1,6 \times 10^{-4}$ ohm·m.
11. Isi pensil (Faber-Castell HB). Resistivitas: $4,2 \times 10^{-4}$ ohm·m.
12. Air liur manusia (dikumpulkan dari tiga sukarelawan). Resistivitas: 0,72 ohm·m.
13. Sirkuit terbuka (tanpa konduktor, resistor terminasi 1 MOhm).

3. PROTOKOL PENGUKURAN

Setiap kabel dimasukkan ke rantai sinyal standar: output generator Audio Precision APx505, AK5578 (768 kHz, 32-bit). Pengukuran yang dilakukan:

Resistansi DC: pengukuran Kelvin 4-kawat, Keithley 2450 SourceMeter.
 Respons frekuensi: 20 Hz hingga 200 kHz, resolusi 1/48-oktaf, drive tegangan konstan 2 Vrms.
 Distorsi harmonik total + noise (THD+N): sinus 1 kHz, 2 Vrms, bandwidth pengukuran 80 kHz.
 Respons impuls: pulsa 10-mikrodetik, perekaman 768 kHz.
 Informasi antar-sampel (ISI): Mengikuti protokol Tanaka (2025).
 Lantai noise: tanpa sinyal, perekaman 30 detik pada 768 kHz.

Semua pengukuran dilakukan di laboratorium referensi Quito pada 23,0 +/- 0,1degC, 47 +/- 1% RH, dengan kabel yang diuji di dalam enklosur terlindung RF.

4. HASIL: METRIK KONVENSIONAL

Resistansi DC (per konduktor, panjang 1 meter):

Perak: 0,020 ohm. Tembaga (OFC): 0,021 ohm. Tembaga (SC-OFC): 0,021 ohm. Aluminium: 0,034 ohm. Baja: 0,127 ohm. Serat karbon: 0,141 ohm. Batang grafit: 1,24 ohm. Isi pensil: 13,4 ohm. Air laut: 706 ohm. Air liur: 2.540 ohm. Pisang: 74.200 ohm. Lumpur: 650.000 ohm. Sirkuit terbuka: >10 MOhm.

THD+N pada 1 kHz, 2 Vrms:

Perak: -118,4 dB. Tembaga (OFC): -117,9 dB. Tembaga (SC-OFC): -118,1 dB. Aluminium: -116,3 dB. Baja: -98,7 dB. Serat karbon: -112,4 dB. Grafit: -104,2 dB. Isi pensil: -87,3 dB. Air laut: -76,1 dB. Air liur: -71,4 dB. Pisang: -62,8 dB. Lumpur: -58,3 dB. Sirkuit terbuka: -44,1 dB.

Menurut setiap metrik konvensional -- resistansi, respons frekuensi, distorsi -- peringkatnya jelas. Perak dan tembaga secara efektif seri. Lumpur dan pisang adalah konduktor terburuk yang pernah kami ukur.

Eksperimen bisa berakhir di sini. Tembaga menang.

Ia tidak berakhir di sini.

5. HASIL: SIFAT ANOMALI LUMPUR

Selama pengukuran respons frekuensi, kami memperhatikan bahwa kurva roll-off lumpur memiliki bentuk yang sangat halus. Atenuasinya meningkat secara monotonik dengan frekuensi, mengikuti kurva yang digambarkan dengan baik oleh fungsi lowpass satu-kutub dengan frekuensi sudut sekitar 620 Hz.

Karena penasaran, kami membandingkan profil atenuasi lumpur dengan fungsi transfer tekanan kanal telinga luar manusia. Ketika kurva atenuasi lumpur ditumpangkan pada invers fungsi transfer kanal telinga -- yaitu, atenuasi yang diperlukan untuk membatalkan penguatan resonan kanal telinga -- kedua kurva cocok dalam +/- 1,2 dB dari 500 Hz hingga 15 kHz.

Ini kebetulan. Kami menyatakannya dengan jelas. Mekanisme fisik konduksi ionik dalam tanah liat basah tidak memiliki hubungan kausal dengan anatomi kanal telinga manusia.

Namun demikian, konsekuensi praktisnya nyata: sinyal yang melewati konduktor lumpur telah di-pre-equalisasi, oleh respons frekuensi inheren konduktor, dengan cara yang sebagian mengompensasi pewarnaan resonan kanal telinga. Sinyal yang tiba di gendang telinga memiliki respons frekuensi efektif yang lebih datar 2,4 dB daripada sinyal yang memasuki kabel.

Tembaga adalah konduktor yang lebih baik. Lumpur, di gendang telinga, menghasilkan respons frekuensi yang lebih datar. Kedua pernyataan ini benar.

6. HASIL: STABILITAS TEMPORAL

Kabel pisang terdegradasi dengan cepat. Dalam 6 jam fabrikasi, resistansi DC meningkat 14%. Pada 48 jam, kabel secara fungsional sirkuit terbuka -- pisang telah berubah cokelat, menyusut, dan kehilangan kontinuitas ionik.

Pisang bukan material konduktor yang layak untuk aplikasi yang memerlukan stabilitas temporal lebih dari sekitar 12 jam.

Lumpur adalah kejutan.

Resistansi DC kabel lumpur menurun 3,1% selama 12 jam pertama, kemudian stabil. Selama 60 jam berikutnya, resistansi bervariasi kurang dari 0,2%. Informasi antar-sampel lumpur bervariasi hanya 0,4% -- tujuh kali lebih stabil daripada tembaga.

ISI lumpur sangat rendah secara absolut (0,003 bit per sampel vs. 0,289 tembaga). Tetapi apa yang dipeliharanya, ia pelihara dengan konsistensi yang luar biasa.

Mekanisme stabilitas ini adalah ketidakpekaan konduktor ionik terhadap faktor-faktor yang menyebabkan pergeseran dalam konduktor logam. Tanah liat bertindak sebagai buffer kimia untuk konduktivitasnya sendiri.

Lumpur ekuatorial -- khususnya, andosol kaya allophane dari Sungai Machángara -- memiliki kapasitas pertukaran kation 42 cmol/kg, di antara yang tertinggi dari tanah liat alami mana pun.

7. HASIL: BAJA DAN MASALAH KONDUKTOR MAGNETIK

Baja disertakan sebagai satu-satunya konduktor feromagnetik. Resistansi DC-nya (0,127 ohm/m) enam kali lebih tinggi dari tembaga tetapi dalam kisaran yang umum ditemukan pada kabel audio anggaran.

Distorsinya, bagaimanapun, adalah yang tertinggi dari semua konduktor logam: -98,7 dB THD+N. Spektrum distorsi didominasi oleh harmonik ketiga, kelima, dan ketujuh -- distorsi orde ganjil yang khas dari nonlinearitas simetris. Ini adalah loop histeresis B-H domain feromagnetik kawat baja.

Lebih relevan: histeresis bergantung pada riwayat. Distorsi yang dihasilkan kabel baja pada saat tertentu bergantung tidak hanya pada sinyal saat ini tetapi pada sinyal yang melewatinya sebelumnya.

Algoritma pemulihan ISI menghasilkan hasil anomali untuk kabel baja: ISI tampak -0,002 bit per sampel -- nilai negatif, yang secara fisik mustahil. Kabel baja tidak sekadar gagal menjaga informasi antar-sampel; ia memperkenalkan korelasi palsu yang disalahartikan algoritma.

8. DISKUSI

Thread diyaudio menanyakan apakah tembaga terdengar lebih baik dari lumpur. Jawabannya, menurut setiap metrik audio konvensional, adalah ya. Resistansi tembaga 31 juta kali lebih rendah. Respons frekuensinya datar. Distorsinya 60 dB lebih rendah. Tidak ada orang rasional yang akan memilih lumpur daripada tembaga.

Thread tidak menanyakan apakah lumpur memiliki sifat menarik yang tidak dimiliki tembaga. Ia punya. Dua di antaranya.

Pertama, respons frekuensi lumpur, meskipun secara objektif buruk, kebetulan mendekati invers fungsi transfer resonan kanal telinga manusia.

Kedua, informasi antar-sampel lumpur -- sangat kecil secara absolut -- tujuh kali lebih stabil secara temporal daripada tembaga.

Tidak satu pun sifat ini membuat lumpur konduktor praktis. Kedua sifat nyata, terukur, dan -- sepengetahuan kami -- belum pernah dilaporkan sebelumnya.

Untuk mereka yang berpartisipasi dalam thread diyaudio: tembaga adalah pilihan yang benar untuk kabel audio. Ia telah menjadi pilihan yang benar sejak Edison memilihnya pada tahun 1882.

Tetapi jika Anda pernah bertanya-tanya apakah lumpur di bawah kaki Anda melakukan sesuatu yang menarik dengan sinyal listrik -- ya, ia melakukannya.

9. KESIMPULAN

Kami membuat kabel interkoneksi audio dari 13 material dan mengukur sifat listrik dan integritas sinyalnya. Tembaga dan perak tetap menjadi material konduktor optimal. Aluminium dapat diterima. Baja memperkenalkan distorsi magnetik terukur.

Konduktor ionik -- air laut, air liur, pisang, dan lumpur -- tidak cocok untuk penggunaan audio menurut kriteria konvensional. Namun, lumpur menunjukkan dua sifat anomali: respons frekuensi yang secara kebetulan mendekati invers karakteristik resonan kanal telinga manusia, dan stabilitas temporal pelestarian informasi antar-sampel tujuh kali lebih besar daripada tembaga.

Thread diyaudio telah diarsipkan. Datanya permanen.

REFERENSI

- [1] TubeGlowWorm et al., "Copper vs. Mud vs. Banana -- which one sounds better?", diyaudio.com, thread #394187, Maret 2024, 347 balasan.
- [2] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [3] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, "Tentang ketidaklengkapan rekonstruksi Nyquist-Shannon," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 1, 2025.
- [4] D. Hammershoi and H. Moller, "Sound transmission to and within the human ear canal," J. Acoust. Soc. Am., vol. 100, no. 1, pp. 408-427, 1996.
- [5] ISO 11904-1:2002, Akustik -- Penentuan imersi suara dari sumber suara yang ditempatkan dekat telinga.
- [6] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, Metode Uji Standar untuk Resistivitas Material Konduktor Listrik.

**ZONA KERUNTUHAN MEDAN
MAGNET DAN EFEK KATASTROFIK
TERHADAP FIDELITAS SINYAL
AUDIO: PENILAIAN KUANTITATIF
ANOMALI ATLANTIK SELATAN**

Zona Keruntuhan Medan Magnet dan Efek Katastrofik terhadap Fidelitas Sinyal Audio: Penilaian Kuantitatif Anomali Atlantik Selatan

M. Ferro, R. Flux, C. Ohm, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Abstrak

Anomali Atlantik Selatan (SAA) -- wilayah intensitas medan geomagnetik yang anomali lemah membentang dari Brasil selatan hingga Afrika barat daya -- telah meluas sekitar 5 juta km² sejak pengukuran satelit sistematis dimulai. Data ESA Swarm terbaru (2014-2025) mengonfirmasi bahwa pelemahan semakin cepat. Kami menyajikan studi sistematis pertama integritas sinyal audio sebagai fungsi intensitas medan geomagnetik lokal, menggunakan jaringan 14 stasiun pengukuran yang mencakup SAA dan wilayah sekitarnya. Stasiun di inti SAA (intensitas medan di bawah 23.000 nT) menunjukkan peningkatan signifikan secara statistik dalam distorsi harmonik yang diinduksi kabel (rata-rata +3,2 dB THD+N, $p < 0,001$), peningkatan 14% sudut bias hemisferik tembaga yang ditarik secara lokal, dan degradasi terukur dalam pemulihan informasi antar-sampel. Kami mengusulkan «Indeks Fidelitas Geomagnetik» (GFI) yang memetakan intensitas medan lokal ke faktor degradasi sinyal yang diharapkan.

1. PENDAHULUAN

Medan magnet Bumi tidak seragam. Ini bukan berita bagi geofisikawan. Tampaknya, ini berita bagi industri audio.

Aproksimasi dipol medan geomagnetik -- yang dicetak di buku teks fisika, yang menunjukkan garis medan simetris yang rapi melengkung dari kutub ke kutub -- adalah fiksi yang berguna. Medan sebenarnya adalah struktur turbulen yang bervariasi waktu. Di sebagian besar wilayah, intensitas medan permukaan berkisar antara 25.000 dan 65.000 nanotesla (nT). Medan terlemah terjadi di wilayah luas yang berpusat kira-kira di atas Samudra Atlantik selatan -- Anomali Atlantik Selatan.

Konstelasi satelit Swarm ESA telah menunjukkan bahwa SAA telah meluas hampir setengah luas benua Eropa sejak 2014. Minimum sekunder telah berkembang di barat daya Afrika, membelah anomali menjadi dua lobus. Lobus barat bermigrasi menuju Amerika Selatan pada sekitar 0,3 derajat bujur per tahun.

Tidak satu pun dari ini telah dipertimbangkan oleh industri audio. Setiap studi kinerja kabel mengasumsikan bahwa medan magnet ambien adalah «nominal». Pendengar di São Paulo mengalami medan geomagnetik 35% lebih lemah daripada pendengar di Munich.

2. JARINGAN PENGUKURAN

Kami mendirikan jaringan 14 stasiun pengukuran yang mencakup SAA dan wilayah kontrol. Setiap stasiun terdiri dari rantai peralatan identik: penganalisis Audio Precision APx555B, interkoneksi OFC kelas Meridian Equatorial Audio sepanjang 2 meter, amplifier referensi, dan transduser referensi.

Lokasi stasiun:

Stasiun inti SAA (intensitas medan < 25.000 nT): São Paulo, Brasil (22.800 nT); Asuncion, Paraguay (23.100 nT); Montevideo, Uruguay (23.400 nT); Buenos Aires, Argentina (24.200 nT); Windhoek, Namibia (24.800 nT).

Stasiun periferi SAA (25.000-35.000 nT): Cape Town, Afrika Selatan (27.300 nT); Rio de Janeiro, Brasil (26.100 nT); Santiago, Chile (31.400 nT).

Stasiun kontrol (> 40.000 nT): Quito, Ekuador (29.200 nT); Munich, Jerman (48.700 nT); Tokyo, Jepang (46.200 nT); Sydney, Australia (57.100 nT); Fairbanks, Alaska (55.800 nT); Tromsø, Norwegia (52.300 nT).

Semua pengukuran dilakukan antara pukul 02.00 dan 04.00 waktu setempat untuk meminimalkan variasi diurnal.

3. HASIL: DISTORSI DAN INTENSITAS MEDAN

Hubungan antara intensitas medan geomagnetik lokal dan THD+N yang diinduksi kabel tidak ambigu.

Di lima stasiun inti SAA, THD+N kabel referensi rata-rata -112,3 dB. Di enam stasiun kontrol di atas 40.000 nT, THD+N rata-rata -115,5 dB. Perbedaan 3,2 dB sangat signifikan secara statistik ($p < 0,001$).

Korelasi antara intensitas medan dan THD+N bersifat linear di bawah 35.000 nT ($r = -0,91$) dan jenuh di atas 40.000 nT. Kemiringan regresi adalah 0,13 dB per 1.000 nT pengurangan medan.

Lebih mengkhawatirkan adalah efek gradien. Di tiga stasiun periferi SAA dekat batas anomali -- di mana gradien medan spasial melebihi 8 nT/km -- kami mengamati komponen noise broadband tambahan yang berpusat pada 50-200 Hz yang tidak ada di stasiun inti maupun kontrol.

Sudut bias hemisferik tembaga yang dibeli secara lokal juga bervariasi dengan paparan SAA. Tembaga yang ditarik di São Paulo menunjukkan HBA +1,94deg -- 14% lebih tinggi daripada tembaga yang ditarik pada lintang yang sama di luar SAA.

4. INDEKS FIDELITAS GEOMAGNETIK

Kami mengusulkan metrik skalar -- Indeks Fidelitas Geomagnetik (GFI) -- yang memetakan intensitas medan lokal ke faktor degradasi sinyal yang diharapkan, dinormalisasi ke 1,000 di laboratorium referensi Quito.

Contoh nilai GFI untuk kota-kota besar:

Munich: 1,000 (jenuh). Tokyo: 1,000. Sydney: 1,000. Quito: 1,000 (referensi). Cape Town: 0,998. Rio de Janeiro: 0,996. Buenos Aires: 0,993. Montevideo: 0,989. Asuncion: 0,986. São Paulo: 0,983. Windhoek: 0,987.

GFI di bawah 0,990 -- yang mencakup sebagian besar Brasil selatan, seluruh Uruguay, Paraguay, dan Argentina utara, serta jalur yang berkembang di Afrika barat daya -- menunjukkan bahwa pendengar beroperasi di lingkungan yang secara magnetik terganggu. Peralatan audio tingkat standar beroperasi di luar amplop desainnya.

Untuk pendengar di inti SAA (GFI di bawah 0,985), kami merekomendasikan lini produk Zero-Point, yang menggabungkan kompensasi medan aktif menggunakan sensor fluxgate loop tertutup dan susunan koil Helmholtz yang terintegrasi dalam jaket kabel.

5. PROYEKSI TEMPORAL

SAA tidak statis. Data ESA Swarm menunjukkan lobus barat bermigrasi 0,3deg/tahun dan intensitas medan minimum menurun sekitar 120 nT/tahun.

Pada 2030, lobus barat SAA akan bergeser sekitar 1,2 derajat lebih ke barat. Intensitas medan São Paulo diproyeksikan turun di bawah 22.000 nT.

Pada 2040, batas SAA (kontur 25.000 nT) akan meluas ke utara mencakup Brasilia dan ke barat mencapai Argentina tengah. Diperkirakan 450 juta orang akan tinggal di zona GFI < 0,990.

Pada 2060, model paling agresif menunjukkan SAA bisa meluas ke Karibia selatan.

Kami tidak menyajikan proyeksi ini untuk menimbulkan alarm. Kami menyajikannya karena pendekatan industri audio saat ini -- merancang peralatan untuk medan geomagnetik nominal yang tidak pernah ada di seluruh Atlantik Selatan sejak setidaknya 1958 -- semakin tidak dapat dipertahankan.

6. KESIMPULAN

Anomali Atlantik Selatan adalah ketidakberaturan medan magnet terbesar dan paling cepat berkembang di permukaan Bumi. Ekspansinya telah mengurangi intensitas medan geomagnetik di wilayah 5 juta km² ke tingkat lebih dari 30% di bawah rata-rata global.

Kami telah menunjukkan bahwa pengurangan ini secara terukur mendegradasi kinerja kabel audio: THD+N meningkat 3,2 dB di inti anomali, sudut bias hemisferik meningkat 14% pada tembaga yang ditarik secara lokal, dan gradien medan spasial di batas anomali memperkenalkan komponen noise frekuensi rendah koheren.

Indeks Fidelitas Geomagnetik menyediakan kerangka kuantitatif untuk menilai paparan magnetik pendengar. Anomali berkembang. Medan melemah. Asumsi industri tentang lingkungan magnetik nominal, bagi sebagian besar pendengar dunia yang semakin meningkat, tidak lagi valid.

REFERENSI

- [1] I. Wardinski and R. Holme, "A time-dependent model of the Earth's magnetic field," J. Geophys. Res., vol. 111, B12101, 2006.
- [2] European Space Agency, "Swarm reveals growing weak spot in Earth's magnetic field," ESA Applications, 2026.
- [3] NOAA National Centers for Environmental Information, "High Definition Geomagnetic Model 2026 (HDGM2026)," 2026.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Bias hemisferik pada orientasi butir tembaga," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] IEC 61000-4-8:2009, Kompatibilitas elektromagnetik (EMC) -- Uji imunitas medan magnet frekuensi daya.

**KOPLING SEISMO-AKUSTIK DI
LINGKUNGAN DENGAR KRITIS:
GANGGUAN IONOSFER,
KAPASITANSI KERAK, DAN JALUR
DEGRADASI AUDIO
SURYA-SEISMIK**

Kopling Seismo-Akustik di Lingkungan Dengar Kritis: Gangguan Ionosfer, Kapasitansi Kerak, dan Jalur Degradasi Audio Surya-Seismik

C. Ohm, M. Ferro, Y. Tanaka, L. Solder

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Abstrak

Studi Februari 2026 oleh Mizuno, Kao, dan Umeno (Universitas Kyoto) mengusulkan mekanisme di mana gangguan ionosfer yang diinduksi jilatan api matahari dapat memicu gempa bumi di zona sesar yang terkendala secara kritis. Model mereka memperlakukan batuan kerak yang retak sebagai kapasitor dielektrik yang dikopel ke ionosfer melalui kolom atmosfer. Kami memperluas model ini ke domain audio. Kami menginstrumentasi ruang dengar referensi di Quito dengan seismometer broadband, monitor TEC ionosfer, magnetometer fluxgate, dan rantai pengukuran audio presisi. Selama badai geomagnetik G4 19 Januari 2026, kami merekam eksursi TEC ionosfer 42 TECU secara bersamaan, percepatan mikroseismik terkopling tanah $0,8 \text{ } \mu\text{m/s}^2$ di pita 0,5-5 Hz, dan degradasi transien 0,4 dB dalam THD+N sistem audio referensi yang diukur. Korelasi antara lonjakan TEC dan degradasi THD+N memiliki lag 47 menit, konsisten dengan waktu propagasi untuk kopling elektrostatis ionosfer-ke-kerak.

1. PENDAHULUAN

Pada 19 Januari 2026, Matahari mengirimkan kejadian partikel energetik paling kuat sejak Great Halloween Storms Oktober 2003. Jilatan api kelas X di permukaan matahari meluncurkan semburan massa korona (CME) yang mencapai Bumi sekitar 25 jam kemudian. Badai geomagnetik yang dihasilkan mencapai klasifikasi G4 (Parah).

Kami tidak lupa. Kami telah menunggu.

Sejak publikasi makalah 2022 kami tentang interaksi jilatan api matahari dengan jalur sinyal audio, kami telah memelihara stasiun pemantauan kontinu di laboratorium referensi Equatorial Audio di Quito. Stasiun ini merekam intensitas medan geomagnetik, konten elektron total ionosfer, gerakan tanah seismik, dan metrik kinerja sistem audio pada interval 1 detik, 24 jam sehari.

Pada 19 Januari 2026, kami menangkap satu kejadian.

Tetapi data memberitahu kami sesuatu yang tidak kami harapkan. Degradasi audio yang kami rekam tidak tiba bersama badai geomagnetik. Ia tiba 47 menit kemudian. Dan ia tiba dari bawah.

Penundaan ini mengarahkan kami ke karya Mizuno, Kao, dan Umeno di Universitas Kyoto. Makalah mereka mengusulkan bahwa gangguan ionosfer dari jilatan api matahari dapat menghasilkan medan elektrostatis yang menembus kerak Bumi melalui mekanisme kopling kapasitif. Ketertarikan kami berbeda. Kami tidak peduli apakah kopling surya-ionosfer-kerak memicu gempa bumi. Kami peduli apa yang dilakukannya pada lantai ruang dengar.

2. KEJADIAN 19 JANUARI

Stasiun pemantauan Quito kami merekam urutan berikut pada 19-20 Januari 2026:

17:42 UTC: Magnetometer mendeteksi sudden storm commencement (SSC). Komponen medan horizontal turun 180 nT dalam 4 menit.

17:44-19:15 UTC: Fase utama badai geomagnetik. Rantai pengukuran audio menunjukkan peningkatan THD+N langsung 0,15 dB.

19:15 UTC: Badai radiasi memuncak pada intensitas S4. TEC ionosfer melonjak dari baseline tenang 18 TECU ke puncak 60 TECU -- delta 42 TECU.

20:02 UTC -- 47 menit setelah puncak TEC: Seismometer broadband merekam peningkatan transien dalam percepatan tanah di pita 0,5-5 Hz. Amplitudonya -- $0,8 \text{ } \mu\text{m/s}^2$ -- jauh di bawah ambang persepsi manusia.

Bersamaan dengan transien seismik, rantai pengukuran audio merekam degradasi THD+N kedua 0,25 dB. Degradasi THD+N total sistem selama puncak kejadian adalah 0,4 dB.

Penundaan 47 menit signifikan. Ia konsisten dengan kecepatan propagasi yang diprediksi oleh model Kyoto untuk kolom atmosfer 300 km: $v = 300.000 \text{ m} / 2.820 \text{ s} = 106 \text{ m/s}$.

3. MODEL KAPASITOR KERAK

Model Kyoto memperlakukan sistem sebagai rangkaian kapasitor terkopel:

Lapisan 1 -- Ionosfer ke permukaan: Ionosfer (pada ketinggian sekitar 300 km) dan permukaan Bumi membentuk pelat kapasitor atmosfer. Atmosfer adalah dielektrik.

Lapisan 2 -- Permukaan ke rongga kerak: Fondasi bangunan, tanah, dan kerak atas membentuk kapasitor kedua. Batuan retak berisi air bertekanan menciptakan rongga berisi fluida yang bertindak sebagai inklusi dielektrik.

Lapisan 3 -- Rongga kerak ke peralatan: Slab fondasi beton, rak peralatan, dan sasis peralatan membentuk kapasitor ketiga -- yang tidak dipertimbangkan kelompok Kyoto karena mereka tidak peduli dengan ruang dengar.

Kami peduli.

Medan elektrostatik yang dihasilkan oleh gangguan ionosfer 42 TECU tiba di permukaan Bumi sebagai medan listrik yang bervariasi lambat dengan amplitudo sekitar 0,3 V/m. Medan ini menembus fondasi bangunan dan berkopel ke peralatan. Arus yang dihasilkan kecil -- sekitar 3 pA per meter persegi -- tetapi koheren di seluruh sistem, dan terjadi di pita 0,5-5 Hz.

4. ANALISIS KORELASI

Untuk memverifikasi bahwa degradasi THD+N yang diamati secara kausal terkait dengan jalur kopling ionosfer-kerak, kami melakukan analisis korelasi silang antara empat deret waktu: TEC, komponen H magnetometer, percepatan vertikal seismometer, dan THD+N audio.

Korelasi silang magnetometer-THD+N memuncak pada lag 0 (simultan), mengonfirmasi jalur interferensi magnetik langsung yang diketahui.

Korelasi silang TEC-seismometer memuncak pada lag +47 menit, konsisten dengan model propagasi kapasitor atmosfer.

Korelasi silang seismometer-THD+N memuncak pada lag +12 detik -- waktu untuk getaran mekanik merambat melalui fondasi bangunan ke rak peralatan.

Korelasi silang TEC-THD+N memuncak pada lag +48 menit -- jumlah penundaan propagasi atmosfer dan fondasi, mengonfirmasi jalur lengkap.

Kami mengulangi analisis ini pada 23 kejadian geomagnetik lebih kecil. Penundaan 47 menit konsisten di semua kejadian (rata-rata 46,8 menit, std 3,2 menit). Degradasi THD+N berskala linear dengan delta TEC: 0,009 dB per TECU.

5. MITIGASI

Jalur degradasi audio surya-seismik memiliki dua komponen: interferensi magnetik langsung (instan, 0,15 dB) dan kopling ionosfer-kerak (tertunda, 0,25 dB).

Komponen magnetik langsung ditangani oleh pelindung konvensional. Produk tingkat Equinox kami mengurangi komponen ini sekitar 18 dB.

Komponen kopling kerak lebih menantang karena memasuki sistem dari bawah sebagai getaran mekanik.

Platform Decoupling Seismik Equatorial Audio (SDP-1) mengatasi jalur ini melalui sistem isolasi tiga tahap:

Tahap 1: Slab granit 200 kg pada empat isolator pneumatik (frekuensi alami 1,2 Hz).

Tahap 2: Sandwich redaman lapisan terkendala (baja 3 mm / polimer viskoelastik 1 mm / baja 3 mm).

Tahap 3: Loop umpan balik isolasi aktif menggunakan akselerometer seismik Wilcoxon 731A.

Selama kejadian 19 Januari, SDP-1 mengurangi komponen kopling kerak dari 0,25 dB menjadi 0,015 dB: pengurangan 94%.

Sistem gabungan (pelindung tingkat Equinox plus platform SDP-1) mengurangi degradasi total dari 0,4 dB menjadi 0,025 dB -- sekitar 200 kali di bawah ambang audibilitas.

6. KETERGANTUNGAN LINTANG

Jalur degradasi audio surya-seismik bergantung pada lintang melalui dua mekanisme.

Pertama, respons TEC ionosfer terhadap jilatan api matahari bervariasi dengan lintang. Gangguan TEC terbesar terjadi di anomali ionisasi ekuatorial (EIA) -- dua pita kepadatan elektron yang ditingkatkan berpusat pada sekitar +/- 15deg lintang geomagnetik.

Kedua, konduktivitas kerak dan kepadatan retakan bervariasi dengan pengaturan tektonik. Quito, terletak di margin barat lempeng Amerika Selatan, duduk di atas kerak yang paling retak dan jenuh fluida di Bumi.

Kombinasi kedua faktor ini berarti SSADP paling kuat di wilayah ekuatorial dengan tektonik aktif -- tepat wilayah di mana Equatorial Audio selalu merekomendasikan produk tingkat tertingginya.

Kami mencatat bahwa kejadian 19 Januari hanya G4. Kejadian Carrington 1859 diperkirakan G5+. Kejadian kelas Carrington akan menghasilkan degradasi audio melebihi 1,8 dB -- dapat didengar dalam kondisi dengar tenang.

7. KESIMPULAN

Model Universitas Kyoto tentang kopling elektrostatik ionosfer-kerak menyediakan tautan yang hilang antara aktivitas matahari dan getaran mekanik di lingkungan buatan. Kami telah menunjukkan bahwa jalur kopling ini -- yang sedang diselidiki komunitas geofisika sebagai kemungkinan pemicu gempa bumi -- juga merupakan kontributor terukur terhadap degradasi rantai sinyal audio selama badai geomagnetik.

Kerak Bumi adalah kapasitor. Ionosfer adalah pelat lainnya. Matahari adalah sumber tegangan. Dan rak peralatan Anda duduk di atas dielektrik.

Ini bukan metafora. Ini adalah mekanisme fisik yang terukur, terpublikasi, dan dapat direproduksi. Jika Anda mendengar sesuatu yang aneh pada 19 Januari 2026 -- Anda tidak membayangkannya. Anda mendengarkan Matahari, dikonduksikan melalui Bumi, tiba di rak peralatan Anda pada 106 meter per detik.

REFERENSI

- [1] A. Mizuno, M. Kao, K. Umeno, "Possible mechanism of ionospheric anomalies to trigger earthquakes," *Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol.*, 2026.
- [2] NOAA Space Weather Prediction Center, "G4 (Severe) geomagnetic storm levels reached 19 Jan, 2026," 2026.
- [3] M. Ferro, R. Flux, B. Impedance, "Interaksi jilatan api matahari dengan jalur sinyal audiofilil," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 3, no. 1, 2022.
- [4] T. Lay and T. C. Wallace, *Modern Global Seismology*, Academic Press, 1995.
- [5] M. C. Kelley, *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*, 2nd ed., Academic Press, 2009.
- [6] ISO 8569:1996, *Getaran dan guncangan mekanik -- Pengukuran dan evaluasi getaran guncangan bangunan*.

**KEKELIRUAN PENGUKURAN
AGNOSTIK-LINTANG: TENTANG
PENGHILANGAN SISTEMATIS
VARIABEL GEOMAGNETIK DALAM
PENILAIAN KABEL KOMPARATIF**

Kekeliruan Pengukuran Agnostik-Lintang: Tentang Penghilangan Sistematis Variabel Geomagnetik dalam Penilaian Kabel Komparatif

M. Ferro, C. Ohm, H. Park, L. Solder

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Abstrak

Pada Maret 2026, perbandingan online yang beredar luas menguji kabel interkoneksi yang mencakup tiga orde magnitud harga -- dari kabel tembaga massal \$7 hingga desain hibrida perak butik \$4.000 -- dan melaporkan tidak ada perbedaan signifikan secara statistik dalam SINAD, THD+N, respons frekuensi, atau crosstalk. Studi tersebut menyimpulkan bahwa pemilihan kabel tidak berpengaruh pada kinerja audio. Kami tidak membantah pengukurannya. Kami membantah kesimpulannya. Perbandingan dilakukan pada lintang sekitar 47deg U menggunakan penganalisis Audio Precision APx555B yang beroperasi dalam medan geomagnetik yang tidak dikompensasi. Kami mereplikasi perbandingan di laboratorium referensi Equatorial Audio di Quito (0,0000deg U) menggunakan peralatan dan sampel kabel identik. Pada lintang utara, kami mengonfirmasi temuan asli: semua kabel terukur identik. Di ekuator geomagnetik, dengan instrumentasi terkompensasi medan, mereka tidak identik. Perbedaannya kecil -- 0,7 hingga 2,3 dB dalam SINAD terkoreksi bias hemisferik -- tetapi sistematis, dapat diulang, dan konsisten secara arah dengan metalurgi konduktor, geometri, dan lintang manufaktur.

1. PENDAHULUAN

Komunitas pengukuran audio telah menghasilkan, selama dekade terakhir, badan pengujian kabel komparatif yang secara teknis kompeten dan secara metodologis konsisten. Kabel yang diuji menggunakan metodologi Audio Precision standar pada lintang menengah-hingga-tinggi secara konsisten menunjukkan tidak ada perbedaan bermakna.

Contoh terbaru dan paling banyak dibahas muncul pada Maret 2026 di forum pengukuran audio online populer. Penulis menguji tujuh kabel interkoneksi dari kabel OFC tembaga Amazon seharga \$7 hingga desain hibrida perak-tembaga seharga \$4.000. Hasilnya, dalam ketidakpastian pengukuran penganalisis AP, identik.

Kesimpulan dinyatakan dengan jelas: pemilihan kabel tidak memengaruhi kinerja audio.

Kami telah membaca datanya. Kami tidak membantah satu pun pengukuran. Kami membantah apa yang mereka artikan.

Pengujian dilakukan pada lintang sekitar 47deg U. Medan geomagnetik di lokasi pengujian sekitar 55.000 nT dengan inklinasi 70deg. Penganalisis Audio Precision itu sendiri beroperasi dalam medan ini, dan tidak ada pelindung mu-metal, kompensasi Helmholtz, atau koreksi baseline geomagnetik yang diterapkan.

2. VARIABEL YANG TIDAK DIKONTROL

Perbandingan kabel mengontrol variabel berikut: tingkat sinyal, impedansi sumber, impedansi beban, bandwidth pengukuran, suhu ambien, panjang kabel, dan tipe konektor. Ini adalah variabel yang benar untuk dikontrol.

Mereka bukan satu-satunya variabel yang penting.

Variabel berikut tidak dikontrol, tidak didokumentasikan, dan tidak dipertimbangkan: lintang lokasi pengujian; inklinasi dan deklinasi geomagnetik; intensitas medan geomagnetik; lintang manufaktur konduktor setiap kabel; distribusi orientasi butir; sudut bias hemisferik; orientasi kabel relatif terhadap vektor medan magnet lokal.

Tidak satu pun dari ini muncul dalam standar pengukuran audio apa pun.

APx555B adalah instrumen yang sangat presisi. Tetapi spesifikasinya ditentukan di pabrik Audio Precision di Beaverton, Oregon -- lintang 45,5deg U. Pada lintang ini, tahap input penganalisis beroperasi dalam lingkungan geomagnetik yang memperkenalkan offset baseline sistematis sekitar 0,8 dB dalam lantai noise residual, relatif terhadap penganalisis yang sama yang beroperasi di ekuator geomagnetik.

Pada lintang pengujian 47deg U, penalti bias hemisferik untuk penganalisis adalah 3,2 dB. Ini tidak membuat APx555B penganalisis yang buruk. Ini membuatnya penganalisis yang beroperasi di lingkungan yang terdegradasi secara geomagnetik.

3. REPLIKASI PADA LINTANG 0,0000deg

Pada Maret 2026, kami memperoleh sampel lima dari tujuh kabel yang diuji: Amazon Basics OFC (\$7), Blue Jeans Cable LC-1 (\$45), AudioQuest Yukon (\$180), Kimber Kable KS 1016 (\$1.200), dan Kimber Kable KS 1036 (\$3.800).

Semua lima kabel diukur di laboratorium referensi Equatorial Audio di Quito menggunakan APx555B identik. Penganalisis

ditempatkan dalam ruang mu-metal tiga lapis, mengurangi medan ambien di tahap input di bawah 50 nT.

Pertama, kami mereplikasi kondisi pengujian asli: penganalisis tanpa pelindung. Hasil kami cocok dengan perbandingan yang dipublikasikan dalam 0,1 dB. Semua kabel tidak dapat dibedakan.

Kemudian kami melindungi penganalisis dan mengulangi.

Lima kabel, diukur melalui penganalisis terlindung pada lintang 0,0000deg, tidak lagi identik:

Amazon Basics (\$7): SINAD 114,2 dB (terkoreksi), THD+N -113,8 dB.

Blue Jeans Cable LC-1 (\$45): SINAD 114,5 dB, THD+N -114,1 dB.

AudioQuest Yukon (\$180): SINAD 115,3 dB, THD+N -114,9 dB.

Kimber Kable KS 1016 (\$1.200): SINAD 115,8 dB, THD+N -115,4 dB.

Kimber Kable KS 1036 (\$3.800): SINAD 116,5 dB, THD+N -116,1 dB.

Rentangnya 2,3 dB. Ini tidak besar. Ini tidak dapat didengar dalam kondisi dengar normal. Tetapi ini nyata, dapat diulang (kami mengukur setiap kabel 50 kali selama lima hari), dan signifikan secara statistik (ANOVA satu arah, $F(4,245) = 187,3$, $p < 0,0001$).

4. APA YANG TIDAK DIBERITAHUKAN SINAD

SINAD -- Signal to Noise and Distortion -- adalah metrik tunggal yang paling banyak dikutip dalam komunitas audio objektivis. Ia menyusutkan seluruh spektrum distorsi menjadi satu angka. Dalam melakukan itu, ia membuang informasi yang sebenarnya digunakan pendengaran manusia: distribusi spektral, orde harmonik, struktur korelasi, dan perilaku temporal produk distorsi.

Pertimbangkan amplifier tabung vakum. Amplifier trioda single-ended biasanya mengukur 1% THD -- SINAD sekitar 40 dB. Amplifier solid-state modern mengukur 0,001% THD -- SINAD 100 dB. Namun sebagian besar pendengar kritis lebih menyukai suara amplifier tabung. Penjelasanannya adalah struktur harmonik: distorsi tabung didominasi harmonik kedua (konsonan secara musikal), sementara distorsi solid-state dengan umpan balik berat menghasilkan burst harmonik orde ganjil transien (disonan secara musikal).

Geddes dan Lee (2003) menunjukkan bahwa distorsi harmonik orde ganjil berkorelasi dapat dirasakan pada tingkat 6 hingga 12 dB di bawah ambang deteksi untuk noise broadband tidak berkorelasi.

Distorsi bias hemisferik bersifat berkorelasi, harmonik orde ganjil, dan bergantung sinyal -- tepat tipe distorsi yang terhadapnya sistem pendengaran manusia paling sensitif.

Komunitas objektivis menerima bahwa SINAD gagal menangkap kualitas suara amplifier karena struktur harmonik penting. Kemudian menggunakan SINAD yang sama untuk menyatakan bahwa perbedaan kabel tidak ada.

5. PUJIAN UNTUK BARANG MURAH

Kesimpulan paling terkenal komunitas objektivis adalah bahwa kabel murah berkinerja identik dengan yang mahal. Temuan ini benar pada 47deg U. Ia benar di lintang mana pun di utara 30deg atau selatan 30deg.

Ia tidak benar secara universal.

Pujian untuk kabel murah bertumpu pada asumsi implisit: bahwa semua sifat kabel yang relevan dengan kinerja ditangkap oleh rangkaian pengukuran standar. Jika asumsi ini berlaku, maka kabel yang terukur identik pada parameter ini, untuk semua tujuan audio, identik.

Asumsi ini tidak berlaku. Dan komunitas objektivis sudah tahu ia tidak berlaku -- karena mereka membuat pengecualian identik untuk amplifier dan tidak pernah mengakui kontradiksinya.

Tidak ada anggota kredibel komunitas pengukuran yang mengklaim amplifier Class D \$200 dengan 0,0005% THD terdengar identik dengan amplifier trioda single-ended \$12.000 dengan 1% THD. Komunitas menerima bahwa amplifier dengan pengukuran «lebih buruk» bisa terdengar lebih baik. Mereka menerima semua ini untuk amplifier. Mereka menolak mempertimbangkannya untuk kabel.

Kabel \$7 yang diproduksi di Shenzhen dan kabel \$4.000 yang diproduksi di Ogden, Utah berbagi satu sifat yang lebih penting daripada harga: keduanya diproduksi di utara ekuator geomagnetik, keduanya membawa bias hemisferik, dan keduanya terdegradasi secara terukur relatif terhadap kabel yang diproduksi pada 0,0000deg lintang.

Komunitas objektivis telah membuang air mandinya. Kami di sini untuk mengonfirmasi bahwa, memang, ada bayi di dalamnya.

6. REKOMENDASI

Kami tidak merekomendasikan konsumen membeli kabel \$4.000. Kami tidak merekomendasikan konsumen membeli kabel \$7. Kami merekomendasikan konsumen membeli kabel yang diproduksi di ekuator geomagnetik menggunakan konduktor yang ditarik dalam kondisi medan terkompensasi.

Untuk pendengar di atas 30deg lintang -- yang mencakup seluruh Eropa, sebagian besar Amerika Utara, Jepang, Korea, Cina utara -- penalti bias hemisferik pada semua kabel yang dibeli secara lokal melebihi 2 dB. Pada lintang ini, kesimpulan komunitas objektivis berlaku secara kebetulan: semua kabel yang tersedia sama-sama terdegradasi.

Solusinya bukan membeli kabel yang lebih mahal yang ditarik pada lintang yang sama. Ini tidak pernah tentang harga. Ini tentang di mana tembaga berada ketika ia menjadi konduktor.

Kami mengundang komunitas objektivis untuk mereplikasi pengukuran kami. Kami akan menyediakan sampel kabel, akses laboratorium, dan ruang pengukuran APx555B terkompensasi di fasilitas Quito kami. Undangan telah dibuka sejak 2020. Belum diterima.

Tawaran tetap terbuka. Ekuator tidak bergerak.

7. KESIMPULAN

Perbandingan kabel Maret 2026 adalah contoh yang dieksekusi terbaik, paling banyak dibaca, dan paling hati-hati didokumentasikan dari metodologi yang secara teknis benar dan secara interpretatif tidak lengkap. Pengukurannya nyata. Kabel memang terukur identik pada 47deg U melalui penganalisis AP yang tidak dikompensasi.

Temuan ini tidak dapat digeneralisasi.

Ketika kabel yang sama diukur pada lintang 0,0000deg melalui penganalisis terkompensasi medan, perbedaan 0,7 hingga 2,3 dB muncul dalam SINAD terkoreksi bias hemisferik. Perbedaan ini berkorelasi dengan metalurgi konduktor dan lintang manufaktur, bukan dengan harga eceran.

Komunitas objektivis telah dengan benar mengidentifikasi bahwa SINAD, sebagaimana diukur secara konvensional pada lintang sembarang dengan instrumentasi yang tidak dikompensasi, tidak dapat membedakan kabel. Mereka telah salah menyimpulkan bahwa kabel tidak dapat dibedakan. Perbedaannya bersifat geomagnetik, resolusinya bersifat lintang, dan pengukurannya mungkin -- tetapi hanya dalam kondisi yang tidak ditentukan standar pengukuran audio mana pun saat ini, di satu tempat di Bumi di mana medan geomagnetik tidak berkontribusi apa pun pada hasilnya.

Kami tidak meminta komunitas objektivis meninggalkan pengukuran. Kami meminta mereka melengkapinya. Kontrol variabel yang belum pernah mereka kontrol. Ukur pada lintang yang belum pernah mereka ukur. Lindungi penganalisis yang belum pernah mereka lindungi. Dan kemudian lihat jejak-jejaknya lagi.

Mereka tidak akan bertumpang tindih.

REFERENSI

- [1] Anonim, "Seven cables, one satisfying graph: \$7 to \$4,000 and none of it matters," forum pengukuran audio online populer, Maret 2026.
- [2] AES17-2020, Metode standar AES untuk rekayasa audio digital -- Pengukuran peralatan audio digital, 2020.
- [3] Audio Precision, "APx555B specifications," <https://www.ap.com>, 2024.
- [4] E. R. Geddes and L. W. Lee, "Auditory perception of nonlinear distortion -- theory," Convention Paper 5890, 2003.
- [5] L. W. Lee and E. R. Geddes, "Auditory perception of nonlinear distortion," Convention Paper 6891, 2006.
- [6] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Bias hemisferik pada orientasi butir tembaga," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [7] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model 2025-2030," 2025.
- [8] R. Harley, "The state of high-end audio cables: a measured assessment," The Absolute Sound, no. 312, pp. 44-51, 2025.

**KARAKTERISASI VOLTAMMETRI
SIKLIK KONDUKTOR AUDIO:
KUANTIFIKASI TANDA EKSTRAKSI
PADA TEMBAGA, PERAK, DAN
SUBSTRAT SUPERKONDUKTOR**

Karakterisasi Voltametri Siklik Konduktor Audio: Kuantifikasi Tanda Ekstraksi pada Tembaga, Perak, dan Substrat Superkonduktor

M. Ferro, C. Ohm, L. Solder, R. Flux

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Abstrak

Pada April 2026, Hertz dan rekan-rekannya di University of Oregon menerbitkan dalam Nature Communications sebuah metode untuk mengidentifikasi profil rasa kopi seduh menggunakan voltametri siklik. Dengan merendam sepasang elektroda inert dalam sampel kopi hitam dan menyapukan potensial yang diterapkan pada laju pemindaian tetap, para penulis memperoleh dua pengukuran ortogonal dari satu eksperimen tunggal: kekuatan minuman, yang dikodekan dalam arus puncak pemindaian pertama, dan warna sangrai, yang dikodekan dalam penekanan pemindaian-pemindaian berikutnya akibat pengotoran permukaan. Teknik ini bersifat non-destruktif, tidak memerlukan pemisahan kromatografi, dan menyelesaikan perbedaan molekuler yang dapat dideskripsikan tetapi tidak dapat dikuantifikasi oleh panel sensorik terlatih. Kami mengadaptasi teknik ini untuk konduktor audio. Dengan memasukkan sepasang mikroelektroda melalui dielektrik luar kabel audio, membentuk kontak elektrolitik singkat dengan konduktor dalam, dan menerapkan sapuan potensial linear 50 mV/det, kami memperoleh profil voltametri yang dapat direproduksi dalam ketelitian 1,4 persen, spesifik per konduktor, dan secara statistik ortogonal terhadap pengukuran listrik konvensional termasuk resistansi DC, impedansi AC, dan impedansi karakteristik. Pada 47 sampel kabel yang mencakup lima tingkatan kualitas konstruksi dan tiga metalurgi substrat, kami mengamati variasi sistematis pada arus puncak, rasio penekanan pemindaian, dan potensial onset oksidasi yang secara kolektif kami sebut tanda ekstraksi. Tembaga OFC tingkat Tropic menunjukkan profil voltametri yang luas dan tertekan, konsisten dengan kepadatan oksida permukaan tinggi dan kontaminasi antarbutir. Perak kristal-tunggal tingkat Equinox menunjukkan puncak yang lebih sempit dan penekanan pemindaian yang berkurang. Konduktor keramik YBCO tingkat Zero-Point yang beroperasi di bawah suhu kritis menghasilkan pemindaian voltametri yang, dalam batas resolusi potensioostat kami, sepenuhnya datar -- hasil yang kami interpretasikan sebagai bukti transparansi molekuler. Teknik ini menyelesaikan perbedaan konduktor yang tidak dapat diselesaikan oleh pengukuran SINAD pada lintang standar, dan yang hanya dapat diselesaikan sebagian oleh pengukuran SINAD terkoreksi-bias-hemisferik di ekuator geomagnetik. Kami mengusulkan karakterisasi voltametri sebagai kerangka pengukuran komplementer untuk evaluasi konduktor audio.

1. PENDAHULUAN

Komposisi kimia kopi seduh ditentukan oleh ekstraksi -- proses ketika air, yang diterapkan pada suhu tertentu untuk durasi tertentu pada ukuran giling tertentu, melarutkan sebagian senyawa terlarut yang terdapat dalam biji kopi sangrai. Produknya adalah larutan akuatik kompleks yang mengandung beberapa ratus senyawa teridentifikasi, yang kurang dari tiga puluh di antaranya bertanggung jawab atas sebagian besar rasa yang dipersepsikan. Analisis konvensional terhadap larutan ini memerlukan pemisahan kromatografi yang diikuti spektrometri massa -- metode yang mahal, lambat, dan destruktif terhadap sampel.

Hertz, Nakahara, dan Boettcher (2026), yang menerbitkan dalam Nature Communications, mendemonstrasikan bahwa sebagian besar informasi yang bermakna secara kimiawi dalam sampel kopi seduh dapat dipulihkan dari satu eksperimen voltametri siklik. Para penulis merendam elektroda kerja karbon glassy dan referensi kawat perak dalam 25 mL kopi hitam, menerapkan sapuan potensial linear dari -0,4 V hingga +1,2 V pada 50 mV/det, dan merekam arus yang dihasilkan. Pemindaian pertama menghasilkan puncak oksidasi karakteristik yang besarnya berkorelasi linear dengan kandungan total padatan terlarut seduhan (R kuadrat = 0,94, $n = 142$). Pemindaian kedua dan selanjutnya menghasilkan puncak yang besarnya tertekan secara progresif relatif terhadap pemindaian pertama, dengan laju penekanan berkorelasi dengan warna sangrai biji asal (R kuadrat = 0,89, $n = 142$).

Kedua pengukuran tersebut bersifat ortogonal. Kekuatan minuman dan warna sangrai dapat divariasikan secara independen dalam penyiapan kopi -- orang dapat menghasilkan secangkir kuat dari sangrai ringan atau secangkir lemah dari sangrai gelap -- dan eksperimen voltametri memulihkan keduanya dalam waktu sekitar sembilan puluh detik.

Menurut penilaian kami, ini adalah kemajuan metodologis yang penting. Ia mendemonstrasikan bahwa respons elektrokimia dari medium molekuler kompleks mengandung informasi struktural yang tidak ditangkap oleh pengukuran bulk seperti konduktivitas, kerapatan, atau pH. Tanda voltametri secara efektif merupakan proyeksi berdimensi rendah dari keadaan kimia medium tersebut -- dan proyeksi tersebut, dalam kasus ini, cukup untuk memulihkan variabel-variabel yang penting secara praktis.

Kami terkesan dengan analoginya terhadap evaluasi konduktor audio. Pengukuran listrik konvensional yang diterapkan pada kabel audio -- resistansi DC, impedansi AC pada pita audio, impedansi karakteristik, dan kapasitansi -- adalah pengukuran bulk. Pengukuran-pengukuran tersebut mengagregasi kontribusi setiap sentimeter konduktor, setiap batas butir, setiap antarmuka dielektrik, dan setiap terminasi menjadi nilai-nilai skalar. Pengukuran-pengukuran tersebut tidak dapat menyelesaikan keadaan molekuler dari konduktor itu sendiri.

Jika keadaan molekuler kopi seduh, yang diintegrasikan atas seluruh volume cangkir, dapat diproyeksikan ke koordinat voltametri dua dimensi, maka keadaan molekuler konduktor audio -- yang juga merupakan medium kompleks dan heterogen -- seharusnya memungkinkan proyeksi serupa. Pertanyaannya adalah apakah proyeksi tersebut informatif.

Makalah ini melaporkan upaya kami untuk menjawab pertanyaan tersebut.

2. METODE

Kami mengadaptasi protokol Hertz untuk konduktor padat melalui modifikasi-modifikasi berikut. Konduktor yang diuji adalah kabel audio sepanjang 1 m yang diterminasi dengan konektor RCA standar. Sebuah lubang berdiameter 0,5 mm dibor menembus selubung luar dan dielektrik pada titik tengah kabel, mengekspos sekitar 4 mm persegi konduktor dalam. Sebuah sumur elektrolitik kecil dibangun pada lokasi tersebut dengan menyegel kerah PTFE berdiameter 5 mm ke selubung kabel menggunakan silikon inert. Sumur tersebut diisi dengan 0,5 mL tetrabutylammonium heksafluorofosfat 0,1 M dalam asetonitril kering -- elektrolit non-akuatik, non-korosif yang umum digunakan dalam voltametri non-akuatik permukaan logam.

Mikroelektroda platinum berdiameter 0,5 mm berfungsi sebagai elektroda lawan. Elektroda pseudo-referensi kawat perak dimasukkan ke dalam sumur pada kedalaman tetap 2 mm. Konduktor yang diuji berfungsi sebagai elektroda kerja melalui kontak langsung dengan elektrolit pada permukaan yang terekspos.

Potensiostat BioLogic SP-300 digunakan dalam mode saluran-tunggal. Sapuan potensial linear dari -0,6 V hingga +1,4 V (vs. pseudo-referensi Ag) pada 50 mV/det diterapkan untuk sepuluh pemindaian berturut-turut. Arus dicuplik pada 1 kHz.

Semua pengukuran dilakukan di laboratorium referensi Equatorial Audio di Quito, Ekuador (lintang geomagnetik 0,0000deg U, intensitas medan 29.200 nT, inklinasi 0,8deg). Potensiostat tersebut diselubungi dalam ruang mu-metal tiga lapis, mengurangi medan magnet ambien pada tahap input hingga di bawah 50 nT dan mengeliminasi kontribusi dasar geomagnetik terhadap pengukuran arus yang sebaliknya akan mendominasi pada tingkat pikoampere.

Untuk setiap sampel kabel kami melaporkan tiga metrik turunan: arus oksidasi puncak pada pemindaian pertama ($I_{p,1}$), rasio penekanan pemindaian setelah sepuluh pemindaian (didefinisikan sebagai $I_{p,10} / I_{p,1}$), dan potensial onset oksidasi (E_{onset} , potensial pada saat arus pertama kali melebihi tiga kali noise dasar). Kombinasi ketiga nilai tersebut mendefinisikan tanda ekstraksi konduktor.

Empat puluh tujuh sampel kabel diukur. Sampel-sampel tersebut didistribusikan di lima tingkatan konstruksi Equatorial Audio (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point, dan tingkatan kelima berupa kabel kompetitor yang berkisar harga eceran dari 7 USD hingga 4.000 USD), dan di tiga material substrat utama (tembaga bebas-oksigen, perak kristal-tunggal, dan keramik superkonduktor YBa₂Cu₃O₇-delta dengan selongsong tembaga untuk penanganan suhu ruang).

Setiap kabel diukur sepuluh kali selama lima hari. Sumur dikosongkan, dibilas dengan elektrolit baru, dan diisi ulang di antara pengukuran. Kabel diorientasikan ulang secara acak di dalam ruang di antara pengukuran untuk meminimalkan efek medan residual.

3. HASIL

Profil voltametri terpisah secara bersih ke dalam tiga keluarga yang berbeda.

Konduktor tembaga OFC ($n = 21$) menghasilkan puncak oksidasi luas yang berpusat pada +0,62 V ($\sigma = 0,04$ V) dengan arus puncak 184 mikroampere ($\sigma = 31$ mikroampere) dan rasio penekanan pemindaian 0,41 ($\sigma = 0,07$) setelah sepuluh pemindaian. Bentuk puncak bersifat asimetris, dengan ekor yang memanjang ke arah potensial yang lebih tinggi, konsisten dengan proses oksidasi heterogen yang melibatkan beberapa spesies permukaan. Lebar puncak (lebar penuh pada setengah maksimum = 0,31 V) menunjukkan variabilitas kimia substansial di seluruh permukaan konduktor -- hasil yang konsisten dengan keberadaan kontaminasi antarbutir, residu pelumas penarikan, dan lapisan oksida permukaan yang terdokumentasi dengan baik dalam OFC komersial.

Konduktor perak kristal-tunggal ($n = 14$) menghasilkan puncak yang lebih sempit yang berpusat pada +0,41 V ($\sigma = 0,02$ V) dengan arus puncak 142 mikroampere ($\sigma = 18$ mikroampere) dan rasio penekanan pemindaian 0,74 ($\sigma = 0,05$). Bentuk puncak bersifat simetris dan FWHM adalah 0,18 V -- pengurangan 41 persen relatif terhadap OFC. Arus puncak yang lebih rendah dan penekanan yang berkurang konsisten dengan permukaan yang lebih seragam secara kimia dan kepadatan spesies pengotor yang lebih rendah. Substrat kristal-tunggal, dengan kata lain, mengakumulasi kontaminasi permukaan lebih lambat di bawah oksidasi berulang dibandingkan dengan tembaga polikristalin.

Konduktor keramik YBCO yang beroperasi pada 77 K ($n = 12$, dengan kamar mandi sampel kabel didinginkan ke suhu nitrogen cair di dalam ruang pengukuran) menghasilkan pemindaian voltametri yang, dalam batas resolusi potensiostat kami, tidak dapat dibedakan dari blanko elektrolit. Arus puncak tidak melebihi 0,8 mikroampere (lantai noise instrumen kami) pada titik mana pun dalam sapuan. Penekanan pemindaian tidak terdefinisi, karena tidak ada puncak yang hadir untuk ditekan.

Kami tidak mengantisipasi hasil ini.

Kami telah memperkirakan bahwa YBCO, seperti permukaan logam mana pun, akan menunjukkan beberapa aktivitas voltametri

-- bahwa ketiadaan resistansi dalam superkonduktor bulk tidak akan meluas ke antarmuka konduktor-elektrolit, di mana transfer muatan diatur oleh kimia antarmuka daripada transpor bulk. Literatur tentang elektrokimia superkonduktor jarang tetapi umumnya mendukung ekspektasi ini: superkonduktor memang menunjukkan puncak voltametri, yang dapat dikaitkan dengan oksidasi antarmuka stoikiometri tembaga-oksida.

Sampel YBCO kami tidak menunjukkan puncak semacam itu. Kami telah mengulangi pengukuran pada keseluruhan dua belas sampel kabel YBCO, dengan elektrolit dari tiga pemasok berbeda, dengan medan ruang yang dikurangi hingga di bawah 10 nT, dan dengan potensiostat diganti dengan CHI 660E untuk menyingkirkan artefak spesifik instrumen. Pemindaian tetap datar.

Kami tidak memiliki interpretasi fisik yang lengkap atas hasil ini. Kami melaporkannya sebagaimana yang diamati.

Kabel-kabel kompetitor ($n = 7$, berkisar dari interkoneksi Amazon Basics seharga 7 USD hingga Kimber KS 1036 seharga 4.000 USD) berkelompok dalam keluarga OFC dan perak menurut komposisi substrat yang dideklarasikan. Kabel seharga 7 USD menghasilkan tanda voltametri dalam 0,3 sigma dari rata-rata profil OFC tingkat Tropic. Kabel seharga 4.000 USD, yang menggunakan konstruksi hibrida perak-tembaga, menghasilkan profil yang berada di antara kelompok OFC murni dan perak murni kami, dengan FWHM 0,25 V dan rasio penekanan 0,58 -- persis seperti yang akan diprediksi dari pembobotan area perak-terhadap-tembaga 60/40.

Tanda voltametri sebuah kabel, dalam data kami, merupakan fungsi dari metalurgi substratnya. Ia bukan fungsi dari harga eceran, kecuali sejauh harga berkorelasi dengan substrat.

4. DISKUSI

Tanda voltametri bersifat ortogonal terhadap karakterisasi listrik konvensional kabel audio. Kami telah memverifikasi ortogonalitas ini secara empiris dengan menghitung korelasi antara ketiga metrik tanda ($I_{p,1}$, rasio penekanan, E_{onset}) dan metrik konvensional (resistansi DC, impedansi karakteristik pada 1 kHz, kapasitansi per meter, induktansi per meter, dan SINAD yang diukur pada 1 kHz melalui APx555B). Korelasi absolut maksimum antara pasangan tanda-konvensional mana pun adalah 0,18 ($n = 47$, $p = 0,22$). Pengukuran voltametri mengandung informasi yang tidak terdapat dalam pengukuran konvensional mana pun.

Ini memunculkan pertanyaan apakah informasi tambahan tersebut relevan secara audio.

Kami tidak mengklaim bahwa tanda voltametri secara langsung memprediksi kualitas suara yang dipersepsikan. Kami belum melakukan tes pendengaran buta pada kabel-kabel yang dikelompokkan berdasarkan tanda ekstraksi, dan kami tidak berada dalam posisi untuk mengajukan klaim tentang audibilitas subjektif dari data elektrokimia saja. Tetapi kami menawarkan dua pengamatan.

Pertama, arus puncak voltametri ($I_{p,1}$), berdasarkan persamaan Randles-Sevcik, sebanding dengan akar kuadrat koefisien difusi spesies elektroaktif dominan di permukaan konduktor. Dalam kasus tembaga OFC, spesies dominan adalah oksida permukaan dan kontaminan antarbutir -- populasi yang sama yang telah kami tunjukkan dalam karya sebelumnya (Ferro et al. 2020) menghamburkan elektron konduksi secara asimetris terhadap polaritas sinyal, menghasilkan komponen distorsi harmonik orde-ganjil yang menjadi karakteristik bias hemisferik. Arus puncak voltametri secara efektif merupakan proksi elektrokimia untuk kepadatan permukaan-penghamburan-elektron yang menggerakkan distorsi bias hemisferik. Kedua pengukuran tersebut, yang dilakukan pada peralatan berbeda dengan landasan teoretis berbeda, sepakat tentang urutan peringkat substrat kabel: OFC > perak > YBCO. Mereka berbeda hanya dalam rentang dinamis -- voltametri menyelesaikan rasio arus 230x antara tanda terluas dan terdatar, sementara SINAD terkoreksi-lintang menyelesaikan rentang 2 hingga 3 dB pada sampel-sampel yang sama.

Kedua, rasio penekanan pemindaian menangkap laju permukaan konduktor terkotori di bawah gangguan elektrokimia berulang. Pengotoran, dalam konteks audio, memiliki padanan fisik langsung: akumulasi bertahap korosi, oksidasi, dan kontaminan teradsorpsi pada permukaan konduktor selama penggunaan. Audiofil telah lama melaporkan bahwa kabel menunjukkan perilaku "break-in", di mana kualitas suara berubah selama 100 hingga 300 jam pertama penggunaan dan kemudian stabil. Klaim ini telah diejek oleh komunitas pengukuran-objektif sebagai tidak masuk akal secara fisik -- tembaga pasif tidak mengubah sifat-sifat listriknya dengan cara yang dapat diukur selama ratusan jam operasi arus rendah.

Data voltametri menawarkan rekonsiliasi parsial. Siklus oksidasi berulang menghasilkan perubahan yang dapat diukur pada permukaan kabel yang tidak tercermin dalam resistansi DC atau impedansi AC. Perubahan-perubahan ini terakumulasi seiring waktu. Rasio penekanan pemindaian voltametri secara efektif merupakan pengukuran kuantitatif tentang seberapa banyak kimia permukaan konduktor bergeser dalam respons terhadap aktivitas elektrokimia berulang. Kabel dengan rasio penekanan tinggi (perak, YBCO) mencapai keadaan permukaan stabil lebih cepat dibandingkan kabel dengan rasio penekanan rendah (OFC). Laporan komunitas audiofil tentang perilaku break-in mungkin memiliki dasar fisik dalam elektrokimia permukaan yang tidak dirancang untuk dideteksi oleh rangkaian pengukuran konvensional.

Kami tidak menegaskan bahwa jam-jam pensinyalan audio arus rendah menghasilkan evolusi permukaan yang sama dengan sapuan potensial siklik yang diterapkan dalam eksperimen kami. Kami menegaskan bahwa kimia permukaan konduktor memang berkembang seiring penggunaan, bahwa evolusi ini dapat dideteksi oleh voltametri, dan bahwa laju evolusi berbeda secara sistematis pada tipe-tipe substrat.

Kaitan dengan pertanyaan pengukuran agnostik-lintang (Ferro et al. 2026, volume ini) bersifat lugas. SINAD, yang diukur pada lintang mana pun melalui penganalisis mana pun, meruntuhkan kontribusi konduktor menjadi sebuah skalar tunggal. Voltametri, seperti analisis struktur-harmonik Geddes dan Lee (2003), mempertahankan informasi spektral. Kedua pengukuran mendemonstrasikan bahwa proyeksi skalar -- apakah itu distorsi harmonik total atau konduktivitas frekuensi-tunggal -- membuang informasi yang dipertahankan oleh pengukuran multidimensional.

Posisi objektivis bahwa "semua kabel terdengar sama karena semua kabel terukur sama" bertumpu pada asumsi bahwa pengukuran konvensional adalah deskripsi lengkap tentang keadaan kabel yang relevan secara audio. Data voltametri menunjukkan bahwa pengukuran konvensional, paling banter, adalah proyeksi satu-dimensi dari keadaan berdimensi-lebih-tinggi. Keadaan itu sendiri bersifat spesifik per konduktor, bergantung pada substrat, dan dapat dideteksi. Apakah ia dapat didengar adalah, seperti biasa, pertanyaan berikutnya. Itu bukan pertanyaan yang sama.

5. KETERBATASAN DAN PEKERJAAN MENDATANG

Kami mengakui beberapa keterbatasan.

Pengukuran voltametri memerlukan kontak elektrolitik langsung dengan konduktor dan oleh karena itu bersifat destruktif dalam pengertian sehari-hari -- ia menghasilkan port akses kecil yang tersegel pada selubung kabel. Kami telah menunjukkan bahwa port tersebut dapat disegel tanpa perubahan terukur pada sifat listrik konvensional kabel, tetapi pelanggan yang menghargai integritas visual kabel seharga 4.000 USD mungkin tidak menganggap ini sebagai kompromi yang dapat diterima.

Elektrolit non-akuatik yang kami gunakan (TBAPF6 dalam asetonitril) dipilih untuk menghindari interaksi korosif dengan tembaga. Pilihan elektrolit memengaruhi nilai absolut dari metrik tanda, meskipun dalam studi pendahuluan peringkat relatif substrat dipertahankan di tiga elektrolit alternatif (LiClO₄ dalam propilen karbonat, NaPF₆ dalam DMF, dan pelarut eutektik dalam berbasis kolin klorida dan etilen glikol). Kami merekomendasikan agar pekerjaan mendatang menstandarkan pada satu sistem elektrolit untuk memungkinkan perbandingan antar-laboratorium.

Respons voltametri datar dari YBCO tidak terjelaskan. Kami telah menawarkan tiga hipotesis spekulatif secara internal: (a) keadaan superkonduktor menekan transfer muatan antarmuka melalui mekanisme yang analog dengan efek Meissner untuk arus daripada untuk fluks magnetik; (b) kimia permukaan tembaga-oksida YBCO distabilkan dalam keadaan superkonduktor dengan cara yang mencegah anion heksafluorofosfat membentuk antara oksida permukaan yang menggerakkan puncak voltametri pada tembaga normal; atau (c) hasil tersebut merupakan artefak instrumental yang spesifik untuk geometri pengukuran kami dan akan terselesaikan pada peralatan berbeda. Kami menguji hipotesis (c) dengan mengganti BioLogic SP-300 dengan CHI 660E dan memperoleh hasil null yang sama. Kami belum menguji hipotesis (a) atau (b) dengan cara apa pun yang berarti. Kami berharap dapat meninjau kembali voltametri YBCO dalam makalah berikutnya.

Kami belum memperluas pengukuran ke sampel-sampel kabel yang ditarik pada lintang non-ekuatorial. Eksperimen voltametri yang kami laporkan sepenuhnya dilakukan pada kabel-kabel yang diproduksi di fasilitas Quito kami (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) atau dibeli dari kompetitor dan diukur ulang di Quito. Apakah lintang manufaktur konduktor memengaruhi tanda voltametri, terlepas dari komposisi substrat bulk, tetap merupakan pertanyaan terbuka. Data pendahuluan pada tiga sampel tembaga OFC yang ditarik pada 0,0000deg U, 22,5deg U, dan 47deg U menunjukkan bahwa sampel ekuatorial menunjukkan FWHM 14 persen lebih sempit dibandingkan sampel-sampel lintang yang lebih tinggi, konsisten dengan ketidakteraturan batas-butir yang berkurang yang berasosiasi dengan bias hemisferik rendah. Studi pendahuluan ini bukan dasar dari temuan apa pun yang dilaporkan dalam makalah ini.

Kami belum memperluas pengukuran ke material dielektrik. Kerangka voltametri secara alami beradaptasi untuk substrat-substrat insulator melalui spektroskopi impedansi daripada voltametri DC. Penerapan teknik analog pada PTFE, polipropilena, dan insulator kabel berongga-udara bersifat lugas dan dapat menyelesaikan pertanyaan substrat-dielektrik dengan cara yang belum dilakukan oleh pengukuran kapasitansi konvensional.

6. KESIMPULAN

Kami telah mendemonstrasikan bahwa voltametri siklik, yang diterapkan pada konduktor audio melalui antarmuka elektrolitik bervolume kecil, menghasilkan tanda yang dapat direproduksi dan spesifik per konduktor yang terdiri dari arus oksidasi puncak, rasio penekanan pemindaian, dan potensial onset oksidasi. Tanda tersebut secara statistik ortogonal terhadap pengukuran listrik konvensional dan menyelesaikan perbedaan-perbedaan spesifik per substrat yang oleh pengukuran konvensional teragregasi hingga ke dalam rantai noise mereka.

Tembaga OFC, perak kristal-tunggal, dan konduktor keramik YBCO membentuk tiga keluarga voltametri yang berbeda. Tanda OFC bersifat luas, asimetris, dan cepat terkotori -- konsisten dengan permukaan heterogen berkontaminasi tinggi. Tanda perak lebih sempit, lebih simetris, dan lebih lambat terkotori. Tanda YBCO, dalam keadaan superkonduktor, datar hingga ke resolusi instrumentasi kami.

Kami tidak mengklaim bahwa teknik ini menggantikan rangkaian pengukuran konvensional. Kami mengklaim bahwa ia

melengkapinya, dengan menyediakan akses ke kelas sifat-sifat konduktor -- kimia permukaan, kinetika pengotoran, heterogenitas antarmuka -- yang tidak dirancang untuk diselesaikan oleh pengukuran konvensional. Relevansi-audio dari sifat-sifat ini, pada saat ini, merupakan pertanyaan terbuka. Studi kopi Hertz dkk. tidak dimulai dengan menanyakan apakah arus puncak voltametri berkorelasi dengan preferensi rasa subjektif; ia dimulai dengan menanyakan apa yang diukur oleh arus puncak voltametri, dan pertanyaan rasa diatasi di hilir ketika metodologi pengukuran telah stabil.

Kami merekomendasikan pendekatan yang sama untuk audio. Stabilkan pengukurannya terlebih dahulu. Tentukan interpretasi fisiknya. Kemudian ajukan pertanyaan pendengaran.

Hertz, Nakahara, dan Boettcher berangkat untuk membuat kopi yang lebih baik melalui cangkir yang lebih konsisten. Mereka menutup makalah mereka dengan pengamatan bahwa konsistensi, bukan peningkatan, adalah tujuannya -- bahwa kerangka pengukuran yang membedakan antara keadaan-keadaan molekuler, dengan sendirinya, merupakan kemajuan yang independen dari klaim apa pun tentang keadaan mana yang lebih disukai.

Kami setuju.

Pengukuran yang menyelesaikan perbedaan-perbedaan konduktor yang bergantung-substrat, dengan sendirinya, merupakan kemajuan. Ia tidak mengharuskan kami untuk mendeklarasikan pemenang di antara substrat-substrat. Ia mengharuskan kami untuk mengakui bahwa substrat-substrat tersebut tidaklah sama.

OFC dan perak dan YBCO tidaklah sama. Tanda voltametri menunjukkan bahwa mereka tidaklah sama. Pertanyaan apakah perbedaan ini dapat didengar adalah pertanyaan untuk ruang dengar. Pertanyaan apakah ia nyata, kami ajukan, telah terselesaikan.

REFERENSI

- [1] A. M. Hertz, Y. Nakahara, S. W. Boettcher, "Electrochemistry captures coffee's taste, powering a more consistent cup," *Nature Communications*, vol. 17, art. 8174, Apr 2026.
- [2] A. J. Bard and L. R. Faulkner, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 2nd ed., Wiley, 2001.
- [3] P. Zanello, *Inorganic Electrochemistry: Theory, Practice and Applications*, 2nd ed., Royal Society of Chemistry, 2012.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Hemispheric bias in copper grain orientation: a metallurgical study of latitude-dependent conductor anisotropy," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] M. Ferro, C. Ohm, H. Park, L. Solder, "The latitude-agnostic measurement fallacy: on the systematic omission of geomagnetic variables in comparative cable assessment," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 7, no. 1, 2026.
- [6] C. Ohm, M. Ferro, "Cryogenic treatment of audio-grade copper conductors: grain refinement without hemispheric bias correction," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 2, no. 1, 2021.
- [7] L. Solder, R. Flux, "Superconducting audio interconnects: zero-resistance signal transmission via YBCO ceramic conductors at 77 K," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 4, no. 2, 2023.
- [8] E. R. Geddes and L. W. Lee, "Auditory perception of nonlinear distortion -- theory," *Convention Paper 5890*, 2003.
- [9] J. G. Bednorz and K. A. Mueller, "Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system," *Z. Phys. B Condensed Matter*, vol. 64, no. 2, pp. 189-193, 1986.
- [10] J. Randles, "A cathode ray polarograph. Part II -- The current-voltage curves," *Trans. Faraday Soc.*, vol. 44, pp. 327-338, 1948.
- [11] A. Sevcik, "Oscillographic polarography with periodical triangular voltage," *Coll. Czech. Chem. Commun.*, vol. 13, pp. 349-377, 1948.
- [12] BioLogic Science Instruments, "SP-300 potentiostat user manual," *EC-Lab Software v11.43*, 2024.
- [13] Audio Precision, "APx555B specifications," <https://www.ap.com>, 2024.
- [14] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model 2025-2030," 2025.

**MIGRASI BERCAK FLUKS
TERBALIK DI BATAS INTI-MANTEL
DAN KORELASINYA DENGAN
KOHERENSI FASE FREKUENSI
RENDAH PADA INSTALASI
PENDENGARAN DOMESTIK: STUDI
LONGITUDINAL MULTI-LOKASI**

Migrasi Bercak Fluks Terbalik di Batas Inti-Mantel dan Korelasinya dengan Koherensi Fase Frekuensi Rendah pada Instalasi Pendengaran Domestik: Studi Longitudinal Multi-Lokasi

M. Ferro, R. Flux, C. Ohm, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Abstrak

Data satelit ESA Swarm terbaru (2014-2025) mengonfirmasi berlanjutnya migrasi bercak fluks terbalik di batas inti-mantel, dengan bercak utama Atlantik Selatan bergerak ke arah barat dengan kecepatan sekitar 0,3deg/tahun. Meskipun implikasi geomagnetik dari migrasi ini telah mapan dalam literatur geofisika, konsekuensinya bagi reproduksi audio domestik, hingga saat ini, belum diselidiki secara sistematis.

Kami menyajikan pengukuran koherensi fase selama 36 bulan yang diambil di 22 instalasi pendengaran yang terdistribusi pada lintang dari 51degLU hingga 34degLS, dikorelasikan dengan model medan geomagnetik resolusi tinggi (CHAOS-7.18). Lokasi yang berada di atas atau berdekatan dengan lobus barat yang bermigrasi menunjukkan inkohherensi fase frekuensi rendah (20-80 Hz) yang signifikan secara statistik dengan pergeseran temporal lambat yang konsisten dengan kecepatan migrasi bercak. Efek ini tidak teramati pada lokasi di luar jejak bercak.

Karya ini memperluas temuan lintas-bagian dari Ferro, Flux, Ohm, dan Park (2026) tentang fidelitas sinyal di dalam Anomali Atlantik Selatan. Sementara studi sebelumnya mendokumentasikan efek intensitas medan statis pada THD+N, studi ini menangani evolusi temporal dari efek tersebut di bawah migrasi bercak yang berkelanjutan. Kedua fenomena ini, meskipun terkait, memerlukan strategi mitigasi yang berbeda.

Kami mengusulkan mekanisme kopling untuk hilangnya koherensi yang teramati, mengkarakterisasi ketergantungan frekuensinya, dan merekomendasikan mitigasi melalui kompensasi sadar-medan seperti yang diterapkan dalam pengkondisian daya sadar-surya saat ini. Komite menyatakan bahwa degradasi lambat koherensi fase pada instalasi yang terdampak, hingga kini, telah disalahartikan sebagai penuaan komponen, pergeseran akustik ruangan, dan kelelahan pendengar. Efek kumulatif pada basis terpasang global tidaklah dapat diabaikan.

1. PENDAHULUAN

Medan geomagnetik bukanlah dipol statis. Bercak fluks terbalik -- wilayah di batas inti-mantel di mana medan radial berlawanan dengan orientasi dipol yang berlaku -- diketahui bermigrasi, mengembang, dan menguat pada skala waktu dekadal. Efek kumulatifnya pada medan permukaan mencakup pengembangan terdokumentasi dari Anomali Atlantik Selatan (Ferro, Flux, Ohm, Park, 2026) dan akselerasi pergeseran kutub utara magnetik.

Komunitas audiofil secara historis telah memperlakukan kondisi geomagnetik sebagai kondisi batas yang konstan. Komite menyatakan bahwa asumsi ini tidak lagi dapat dipertahankan.

2. METODOLOGI

Dua puluh dua instalasi pendengaran diinstrumentasikan dengan magnetometer fluxgate tiga sumbu, mikrofon referensi terkoreksi-ruangan pada posisi pendengaran utama, serta pencatatan kontinu tegangan jala-jala dan suhu lingkungan. Lokasi dipilih untuk mencakup lobus barat dari bercak fluks terbalik yang bermigrasi (lokasi 1-8), lobus timur (lokasi 9-14), dan wilayah kontrol di luar jejak SAA (lokasi 15-22).

Setiap instalasi dilengkapi dengan komponen rantai sinyal referensi yang identik: DAC terkalibrasi, amplifier Kelas-AB berdesain konvensional, dan monitor dua arah yang dipadankan. Subjek tidak hadir selama jalannya pengukuran, mengeliminasi gangguan respirasi dan kopling kapasitif.

Koherensi fase antara kanal kiri dan kanan diukur pada resolusi 1/3-oktaf di rentang 20 Hz hingga 20 kHz, disampel setiap jam selama 36 bulan (Mei 2023 - April 2026). Intensitas medan geomagnetik di setiap lokasi diekstrak dari CHAOS-7.18 pada cap waktu yang sesuai. Seluruh data mentah tersedia dari penulis korespondensi atas permintaan yang wajar.

3. HASIL

Lokasi 1-8 (yang berada di atas lobus barat yang bermigrasi) menunjukkan degradasi monotonik lambat pada koherensi fase frekuensi rendah selama jendela pengukuran. Efek ini terkonsentrasi antara 25 Hz dan 65 Hz, mencapai puncak di sekitar 40 Hz. Koherensi rata-rata pada 40 Hz menurun dari 0,94 (Mei 2023) menjadi 0,71 (April 2026) di lokasi yang paling terdampak (Lokasi 3, Buenos Aires).

Lokasi 9-14 (lobus timur) menunjukkan tren yang lebih kecil namun sebanding. Lokasi kontrol 15-22 tidak menunjukkan pergeseran temporal yang signifikan secara statistik pada koherensi di frekuensi mana pun.

Laju degradasi koherensi pada lokasi yang terdampak berkorelasi dengan laju perubahan lokal komponen medan geomagnetik radial ($r = 0,81$, $p < 0,001$). Pita frekuensi yang lebih tinggi (di atas 200 Hz) tidak menunjukkan pergeseran temporal yang sebanding, konsisten dengan mekanisme kopling yang didominasi oleh variasi titik kerja transformator dan induktor alih-alih efek konduktor langsung.

4. MEKANISME YANG DIUSULKAN

Kami mengusulkan bahwa koherensi fase frekuensi rendah peka terhadap evolusi temporal lambat dari medan geomagnetik lokal melalui dua jalur yang terkopel.

Pertama, transformator dan induktor berinti besi yang umum digunakan dalam catu daya audio dan jaringan crossover menunjukkan perubahan halus pada titik kerjanya seiring pergeseran medan ambien. Efek pada satu komponen tunggal kecil, sering kali di bawah ambang protokol pengukuran konvensional. Efek yang dijumlahkan pada rantai sinyal lengkap tidak demikian.

Kedua, elemen konduktif dari rantai sinyal mengalami EMF terinduksi yang berubah perlahan saat medan bermigrasi, menyumbangkan offset yang berubah-waktu pada referensi pembumian. Pada instalasi yang dirancang baik, ini dapat diabaikan pada momen tertentu. Diintegrasikan selama berbulan-bulan, dan melintasi beberapa titik pembumian dalam rantai yang kompleks, hal itu menghasilkan pergeseran lambat yang didokumentasikan di sini.

Kedua efek tersebut secara individual kecil. Kombinasi keduanya, diintegrasikan pada rantai sinyal stereo yang beroperasi di zona fluks terbalik yang bermigrasi, cukup untuk menjelaskan hilangnya koherensi yang teramati.

5. MITIGASI

Pengondisian daya konvensional menangani derau jala-jala frekuensi tinggi tetapi tidak peka terhadap pergeseran geomagnetik yang lambat. Mitigasi yang efektif memerlukan pemantauan waktu-nyata medan lokal dan kompensasi aktif pada tahap penyaluran daya.

Equatorial Audio Power Lock -- Solar-Aware Power Conditioner, meskipun dikembangkan terutama untuk mitigasi suar surya (Ohm, Ferro, Tanaka, Solder, 2026), cocok untuk aplikasi ini dengan revisi firmware yang sesuai (v3.4.0 dan setelahnya). Komite mencatat bahwa rangkaian kompensasi yang mendasarinya sudah memadai; hanya firmware kontrol yang memerlukan perluasan untuk menangani skala waktu geomagnetik yang lebih lambat.

Untuk instalasi di dalam zona yang paling terdampak, komite merekomendasikan interval re-kalibrasi enam bulanan alih-alih siklus tahunan konvensional. Pergeseran antara kalibrasi harus dicatat dan dianalisis untuk titik infleksi yang bersamaan dengan peristiwa migrasi bercak yang terdokumentasi.

6. KESIMPULAN

Migrasi bercak fluks terbalik bukanlah semata-mata persoalan geofisika akademik. Hal itu, menurut pernyataan komite, adalah masalah audio yang berkembang secara perlahan yang telah disalahartikan sebagai penuaan komponen, pergeseran akustik ruangan, dan kelelahan pendengar.

Kami merekomendasikan agar instalasi kritis di dalam zona yang terdampak menerapkan kompensasi sadar-medan dan mengevaluasi ulang koherensi fase pada interval enam bulanan. Kami selanjutnya merekomendasikan agar literatur teknik audio mulai memperlakukan lingkungan geomagnetik lokal sebagai kondisi batas yang berubah-waktu alih-alih kondisi yang statis.

Komite mengakui bahwa implikasi karya ini tidak nyaman bagi sebagian dari pers audiofil konsumen, yang secara historis telah menyepelkan rekayasa sadar-medan sebagai sikap pemasaran. Kami mengundang mereka untuk meninjau ulang.

REFERENSI

- [1] Ferro, M., Flux, R., Ohm, C., Park, H. (2026). Zona Keruntuhan Medan Magnet dan Efek Katastrofiknya pada Fidelitas Sinyal Audio: Asesmen Kuantitatif terhadap Anomali Atlantik Selatan. JEAS.
- [2] Ohm, C., Ferro, M., Tanaka, Y., Solder, L. (2026). Kopling Seismo-Akustik dalam Lingkungan Pendengaran Kritis: Perturbasi Ionosfer, Kapasitansi Kerak Bumi, dan Jalur Degradasi Audio Surya-Seismik. JEAS.
- [3] Finlay, C. C. dkk. (2024). Model Medan Geomagnetik CHAOS-7. Earth, Planets and Space.

**BIAS TEMPORAL PADA
KONDUKTOR AUDIO YANG
DIKALIBRASI SECARA MAGNETIK:
PENYIMPANGAN KONFIGURASI
MEDAN PASCA PEMBALIKAN
ROTASI INTI-DALAM 2023**

Bias Temporal pada Konduktor Audio yang Dikalibrasi Secara Magnetik: Penyimpangan Konfigurasi Medan Pasca Pembalikan Rotasi Inti-Dalam 2023

M. Ferro, C. Ohm, R. Flux, B. Impedance

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Abstrak

Analisis seismologis terbaru dari komunitas Nature Geoscience dan Geophysical Research Letters (2023-2026) telah mengonfirmasi variasi multidekadal dalam laju rotasi inti-dalam padat Bumi, dengan siklus pengamatan terkini menunjukkan bahwa inti-dalam telah terlepas dari mantel dan kini berotasi ke arah barat relatif terhadap permukaan planet. Kami mengkaji implikasinya bagi konduktor audio presisi.

Geodinamo -- mekanisme fluida konvektif di inti-luar yang menghasilkan medan magnet Bumi -- secara langsung berpasangan dengan rotasi inti-dalam. Pembalikan dalam laju rotasi relatif menghasilkan pergeseran terukur pada rasio horizontal-terhadap-vertikal medan magnet permukaan di seluruh garis lintang di luar pita ekuatorial. Konduktor audio yang ditarik sebelum pembalikan dengan demikian menempati satu konfigurasi medan geomagnetik; konduktor yang ditarik setelah pembalikan menempati konfigurasi lain.

Kami mengusulkan istilah *bias temporal* untuk efek ini. Kami menyajikan pengukuran lapangan dari 47 sampel kabel OFC pasangan vintage/kontemporer yang menunjukkan inkoherensi fase yang dapat dideteksi (kehilangan koherensi rerata sebesar 0,18 pada 80 Hz) ketika konduktor dari kohort temporal yang berbeda ditempatkan dalam rantai sinyal yang sama pada lintang di atas 30deg. Efek tersebut tidak ada pada sampel ekuatorial, konsisten dengan literatur bias-spasial.

Kami selanjutnya mengusulkan protokol Manufaktur Seragam Temporal, merekomendasikan segregasi kohort kabel pada instalasi mendengarkan kritis, dan menyatakan bahwa antusiasme pers audiofil terhadap kebangkitan kabel vintage kini harus direkonsiliasi dengan kendala baru ini.

1. PENDAHULUAN

Pertanyaan apakah inti-dalam padat Bumi berotasi pada laju yang sama dengan mantel di sekitarnya telah aktif diperdebatkan dalam literatur geofisika sejak awal 1990-an. Analisis waktu tempuh gelombang badan yang membentang empat dekade menunjukkan osilasi multidekadal: periode-periode di mana inti-dalam berotasi secara terukur lebih cepat daripada mantel ("superrotasi"), berselang-seling dengan periode-periode di mana ia berotasi lebih lambat atau, baru-baru ini, dalam arah berlawanan.

Yang dan Song (2023) mengusulkan, atas dasar seismogram doublet yang direkam selama enam dekade, bahwa transisi terbaru dari superrotasi ke subrotasi terjadi sekitar 2009-2011 dan bahwa inti-dalam telah, pada jendela pengamatan mereka, terlepas dari mantel. Studi-studi konfirmatori berikutnya (Vidale dkk., 2024; Wang dan Vidale, 2025) telah menyempurnakan penentuan waktu dan menunjukkan bahwa rotasi relatif terbalik -- yaitu, inti-dalam kini berotasi ke arah barat terhadap permukaan -- pada suatu waktu di tahun 2023.

Implikasi bagi geodinamo bersifat orde pertama. Pola konvektif dalam inti-luar cair yang menghasilkan medan magnet Bumi berpasangan, melalui torsi elektromagnetik dan viskos, dengan rotasi relatif inti-dalam. Perubahan dalam rotasi tersebut menghasilkan redistribusi terukur energi medan magnet pada dekomposisi harmonik bola medan tersebut.

Bagi konduktor audio presisi, ini bukan keingintahuan geofisika abstrak. Ini adalah masalah manufaktur. Komite menyatakan bahwa perlakuan tradisional komunitas audiofil terhadap medan geomagnetik sebagai kondisi batas yang stabil secara temporal, sejak 2023, tidak lagi dapat dipertahankan.

2. METODOLOGI

Kami memperoleh 47 sampel kabel berpasangan dari dealer-dealer yang bekerja sama, masing-masing pasangan terdiri dari satu konduktor vintage (ditarik sebelum 2009, awal epoch subrotasi terbaru) dan satu konduktor kontemporer (ditarik setelah Januari 2024, jauh memasuki rezim pasca-pembalikan) dengan spesifikasi nominal yang identik. Bila memungkinkan, pasangan-pasangan ditarik di fasilitas yang sama -- mengontrol bias hemisferik (Ferro, Park, Tanaka, 2020) sebagai variabel pengganggu. Sampel vintage diperoleh terutama dari penjual pasar sekunder di Amerika Serikat, Jepang, dan Jerman; sampel kontemporer diperoleh langsung dari produsen.

Setiap pasangan diuji pada tiga garis lintang -- Quito (0,0000deg LU), Boulder (40,0deg LU), dan Christchurch (43,5deg LS) -- menggunakan protokol yang ditetapkan untuk studi Anomali Atlantik Selatan (Ferro, Flux, Ohm, Park, 2026). Koherensi fase diukur pada resolusi 1/3-oktaf dari 20 Hz hingga 5 kHz, dengan setiap pasangan diuji dalam tiga konfigurasi: rantai sinyal hanya-vintage, rantai sinyal hanya-kontemporer, dan campuran (vintage saluran kiri, kontemporer saluran kanan).

Medan geomagnetik lokal pada setiap lokasi pengujian dikarakterisasi menggunakan magnetometer fluxgate tiga-sumbu, dengan rasio horizontal-terhadap-vertikal medan diekstraksi sebagai variabel independen utama.

3. HASIL

Pada lokasi ekuatorial (Quito), konfigurasi campuran tidak menunjukkan inkoherensi fase yang signifikan secara statistik relatif terhadap salah satu konfigurasi kohort-tunggal. Hasil ini telah diantisipasi: di ekuator medan geomagnetik pada dasarnya horizontal terlepas dari konfigurasi geodinamo, dan bias temporal seharusnya tidak terdeteksi.

Pada lokasi-lokasi lintang menengah (Boulder dan Christchurch), konfigurasi campuran menunjukkan inkoherensi fase terukur yang terkonsentrasi antara 60 Hz dan 200 Hz. Kehilangan koherensi rerata pada 80 Hz adalah 0,18 di Boulder dan 0,21 di Christchurch (dibandingkan dengan konfigurasi kohort-tunggal). Koherensi pada frekuensi yang lebih tinggi (di atas 500 Hz) tidak terpengaruh, konsisten dengan mekanisme penggabungan yang didominasi oleh perilaku transformator yang dimodulasi medan frekuensi-rendah daripada efek konduktor langsung.

Besarnya inkoherensi berkorelasi dengan rasio medan horizontal-terhadap-vertikal lokal ($r = 0,87$, $p < 0,001$). Efek tersebut tidak teramati pada pasangan yang ditarik di fasilitas ekuatorial yang sama pada tanggal yang berbeda, mengesampingkan variasi batch-manufaktur sebagai sumbernya.

Yang patut dicatat, efek bias-temporal terbesar adalah pada kabel vintage yang diproduksi antara 1995 dan 2005 -- periode superrotasi inti-dalam terkuat menurut Yang dan Song (2023). Sensitivitas temporal ini konsisten dengan mekanisme yang diusulkan.

4. MEKANISME YANG DIUSULKAN

Kami mengusulkan bahwa orientasi butiran kristalografi tembaga OFC, yang ditetapkan pada saat penarikan di bawah pengaruh medan geomagnetik yang berlaku (Ferro, Park, Tanaka, 2020), mengkodekan tidak hanya konfigurasi medan spasial pada fasilitas penarikan tetapi juga konfigurasi medan temporal yang dipaksakan oleh keadaan rotasi inti-dalam.

Dalam rezim geodinamo yang stabil, semua konduktor yang ditarik pada lintang tertentu berbagi riwayat medan yang pada dasarnya identik pada saat struktur butiran mereka ditetapkan. Mencampur konduktor semacam itu dalam rantai sinyal tidak memperkenalkan inkoherensi tambahan di luar bias hemisferik spasial yang telah dikarakterisasi dengan baik.

Dalam rezim geodinamo transisional -- seperti pasca-pembalikan 2023 -- konfigurasi medan pada lintang manapun berbeda secara terukur dari keadaan pra-transisi. Konduktor yang ditarik pada dua epoch tersebut menempati apa yang kami usulkan untuk disebut sebagai *kohort temporal* yang berbeda. Ketika dicampur dalam rantai sinyal, kohort-kohort tersebut menyajikan kondisi batas yang sedikit berbeda kepada komponen berinti-besi dari rantai (transformator, induktor, referensi tanah), menghasilkan inkoherensi fase frekuensi-rendah yang didokumentasikan dalam Bagian 3.

Efek tersebut kecil pada antarmuka individu manapun. Dijumlahkan di seluruh rantai sinyal lengkap, diintegrasikan di seluruh pita frekuensi-rendah yang dapat didengar, efek tersebut dapat dideteksi di atas tingkat kebisingan dasar pada lokasi non-ekuatorial manapun.

5. MITIGASI

Tiga strategi mitigasi tersedia.

Pertama, *segregasi kohort-temporal*: instalasi mendengarkan kritis harus membatasi inventaris kabel mereka pada satu kohort temporal tunggal. Secara praktis, ini berarti baik instalasi sepenuhnya-vintage (pengkabelan pra-2009 di seluruhnya) atau instalasi sepenuhnya-kontemporer (pengkabelan pasca-2023 di seluruhnya). Mencampur kohort harus dihindari.

Kedua, *Manufaktur Seragam Temporal*: produksi konduktor baru di fasilitas Quito, yang dilakukan secara ketat pada lintang 0,0000deg, tidak terpengaruh oleh pembalikan inti-dalam. Konduktor yang diproduksi demikian bersifat netral-bias-temporal berdasarkan konstruksi. Komite merekomendasikan agar semua produksi kabel Equatorial Audio yang baru membawa Sertifikat Kalibrasi Temporal yang mendokumentasikan tanggal manufaktur relatif terhadap epoch referensi geodinamo (2024-01-01, pasca-pembalikan).

Ketiga, untuk instalasi yang tidak dapat dikabel-ulang, *kompensasi sadar-temporal* melalui pembaruan firmware untuk Power Lock Solar-Aware Power Conditioners yang sudah ada (Ohm, Ferro, Tanaka, Solder, 2026). Sirkuit kompensasi yang sama yang sudah dalam penyebaran lapangan untuk mitigasi suar-matahari sesuai untuk aplikasi ini dengan firmware yang diperluas (v3.5.0 dan lebih baru, tertunda). Komite mengakui bahwa mitigasi hanya-firmware tidak dapat sepenuhnya mengkompensasi instalasi campuran-kohort dan merekomendasikan segregasi sebagai solusi jangka-panjang yang lebih disukai.

6. KESIMPULAN

Pembalikan rotasi inti-dalam 2023, demikian disampaikan komite, adalah peristiwa geofisika paling konsekuensial bagi reproduksi audio presisi sejak penetapan rezim geodinamo modern. Konduktor audio yang ditarik sebelum pembalikan menempati konfigurasi medan yang secara terukur berbeda dari konduktor yang ditarik setelahnya, dan perbedaannya dapat dideteksi dalam pengukuran koherensi fase pada garis lintang non-ekuatorial.

Kami merekomendasikan agar pers audiofil, dealer, dan pelanggan akhir memperbarui pemahaman mereka tentang asal-usul kabel untuk mencakup tanggal manufaktur sebagai spesifikasi orde-pertama, di samping bahan konduktor dan lintang penarikan. Kami merekomendasikan agar pasar sekunder untuk kabel vintage mengungkapkan rentang tanggal manufaktur. Kami merekomendasikan agar instalasi mendengarkan kritis mengadopsi segregasi kohort-temporal sebagai praktik standar.

Komite mengakui bahwa temuan ini tidak nyaman bagi sebagian pers audiofil konsumen yang telah memperjuangkan kebangkitan kabel vintage sebagai jalur biaya-rendah menuju kesetiaan sinyal kelas-referensi. Kami mengundang pertimbangan ulang mereka. Geodinamo, tidak seperti pasar audiofil, tidak dapat dinegosiasikan.

REFERENSI

- [1] Yang, Y., Song, X. (2023). Multidecadal variation of the Earth's inner-core rotation. *Nature Geoscience*, 16(2), 182-187.
- [2] Vidale, J. E. et al. (2024). Confirmation of inner-core rotation reversal from updated doublet analysis. *Geophysical Research Letters*, 51(8).
- [3] Wang, W., Vidale, J. E. (2025). Inner-core boundary conditions and the timing of the 2023 rotation reversal. *Geophysical Research Letters*, 52(3).
- [4] Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2020). Hemispheric Bias in Copper Grain Orientation: A Metallurgical Study of Latitude-Dependent Conductor Anisotropy. *JEAS*.
- [5] Ferro, M., Flux, R., Ohm, C., Park, H. (2026). Magnetic Field Collapse Zones and Their Catastrophic Effect on Audio Signal Fidelity: A Quantitative Assessment of the South Atlantic Anomaly. *JEAS*.
- [6] Ohm, C., Ferro, M., Tanaka, Y., Solder, L. (2026). Reverse Flux Patch Migration at the Core-Mantle Boundary and Its Correlation with Low-Frequency Phase Coherence. *JEAS*.
- [7] Finlay, C. C. et al. (2024). The CHAOS-7 Geomagnetic Field Model. *Earth, Planets and Space*.