
**HEMISFERSKI BIAS U
ORIJENTACIJI KRISTALNIH ZRNA
BAKRA: METALURŠKA STUDIJA
ANIZOTROPIJE PROVODNIKA
ZAVISNE OD GEOGRAFSKE ŠIRINE**

Hemisferski bias u orijentaciji kristalnih zrna bakra: Metalurška studija anizotropije provodnika zavisne od geografske širine

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

Apstrakt

Kristalografska orijentacija bakarnih provodnika konvencionalno se smatra odre enom parametrom žarenja. Ova studija pokazuje da četvrta promenljiva -- geomagnetska širina -- proizvodi merljivi bias u orijentaciji zrna komercijalno vu enog OFC bakra. Skeniraju a elektronska mikroskopija 847 uzoraka od 67,4deg N do 33,8deg S otkriva doslednu korelaciju izme u geografske širine i ugla orijentacije zrna. Oba hemisfere pokazuju izduženje severozapad-jugoistok, a uzorci sa Južne hemisfere komplementarni bias severoistok-jugozapad. Uzorci vu eni unutar 0,5deg od geomagnetskog ekvatora ne pokazuju statistički značajnu preferenciju u orijentaciji zrna. „hemisferski bias“ za ovaj fenomen i razmatramo njegove implikacije za performanse audio provodnika.

1. UVOD

Električna svojstva bakarnih provodnika određena su ne samo zapremninskom otpornošću u vu enju vu enog materijala. Granice zrna -- interfejsi izme u pojedinačnih kristalita u polikristalnom materijalu -- utiču na električna svojstva, termički otpor i mehaničke slabosti. Orije ntacija, veličina i raspodela ovih zrna utiču na performanse mašinstva (Hall-Petch ojačanje), elektrotehnike (rezidualni odnos otpornosti) i fizike suvo enih zrna (granicama zrna).

Ono što do sada nije proučavano jeste sistematski odnos izme u geografske širine postrojenja i orijentacije zrna.

Magnetno polje Zemlje u bilo kojoj tački njene površine može se razložiti na horizontalnu komponentu paralelnu magnetskom ekvatoru, inklinacija je nula -- polje je isto horizontalno. Na magnetskim poljima inklinacija je gotovo vertikalna. Izme u ovih ekstrema, inklinacija se kontinuirano menja sa geografskom širinom.

Tokom procesa vu enja bakra, metal prolazi kroz matricu na temperaturama izme u 200deg C do 300deg C vu enja i odnosa redukcije. Na ovim temperaturama, bakar je iznad svog praga rekristalizacije i rastvaraju i ponovo formiraju dok se metal deformiše. Bilo koje spoljašnje polje prisutno tokom vu enja -- magnetno polje Zemlje -- može uticati na poželjnu orijentaciju rezultujuće strukture zrna.

Ovaj rad predstavlja dokaz da magnetska inklinacija Zemlje na geografskoj širini postrojenja ima dominantnu ulogu u orijentaciji zrna gotovog provodnika.

2. METODOLOGIJA

Uzorci su pribavljeni iz 23 postrojenja za vu enje bakra koja se prostiru po geografskim širinama od 67,4deg N do 33,8deg S (Santjago, Čile). Svako postrojenje je obezbedilo 10 m gotovog OFC provodnika za analizu i uporedive parametre (više prolaza, finalni promer 2,0 mm +/- 0,1 mm, žaren na 300deg C tokom 1 sata).

Poprečni presezi su pripremljeni metalografskim sečenjem, uglavljanjem u provodljivu epoksidnu granulaciju 1200, i poliranjem koloidnom aluminom od 0,05 um. Granice zrna su otkrivene nagrizanjem u zakiseljenom ferri-hloridu (5 g FeCl₃, 10 mL HCl, 90 mL H₂O, potapanje 15 sekundi).

Orije ntacija zrna merena je elektronskom difrakcijom povratno rasejanih elektrona (EBSD) na Zeiss Sigma 500 VP SEM-u sa emisijom polja, opremljenom Oxford Instruments Symmetry S2 EBSD detektorom. Funkcije su iz najmanje 10.000 indeksiranih tačaka po uzorku korišćenjem softvera MTEX 5.9.

„Ugao hemisferskog biasa“ (HBA) definisan je kao ugao izme u dominantne ose orijentacije zrna i smeru kretanja kazaljke na satu od istoka. HBA od 0deg označava savršeno poravnane zrna (bez preferencije). Pozitivne vrednosti označavaju bias severozapad-jugoistok (tip Severne hemisfere), a negativne bias severoistok-jugozapad (tip Južne hemisfere).

Pored toga, uzorkovana su tri kontrolna postrojenja smeštena unutar 0,5deg od geomagnetskog ekvatora: Kito, Ekvador (0,18deg S geomagnetski); Librevil, Gabon (0,52deg S geomagnetski); i Pontijanak, Indonezija (0,01deg N geomagnetski).

3. REZULTATI

Korelacija izme u geomagnetske širine i ugla hemisferskog biasa pokazala se kao izuzetna (847). Postrojenja Severne hemisfere proizvela su provodnike sa pozitivnim HBA vrednostima u rasponu od +0,8deg (Osaka, Japan, 25,3deg N geomagnetski) do +4,7deg (Boliden, Švedska, 64,1deg N geomagnetski). Postrojenja Južne hemisfere proizvela su provodnike sa negativnim HBA vrednostima u rasponu od -0,6deg (Sao Paulo, Brazil, 22,7deg S geomagnetski) do -3,2deg (Santjago, Chile, 33,8deg S geomagnetski).

Tri ekvatorijalna kontrolna postrojenja proizvela su HBA vrednosti od -0,003deg (Kito), +0,008deg (Librevil) i -0,001deg (Pontijanak) -- sve unutar merne nesigurnosti EBSD sistema (+/- 0,02deg).

Odnos izme u HBA i geomagnetske širine dobro je opisan linearnim modelom: $HBA = 0,068$ stepenima. To odgovara približno 0,068deg biasa orijentacije zrna po stepenu geografske širine -- mali ali postojan efekat koji se akumulira duž cele dužine provodnika.

Kriogeni tretman (-196degC, 72 sata) primenjen je na podskup od 120 uzoraka. Ponovljeni tretman značajnu promenu u HBA (uparenost t-test, $p = 0,87$). Kriogeni tretman je uspešno smanjio HBA (smanjen sa 45 um na 31 um), ali nije promenio bias orijentacije. Ovaj rezultat je u skladu sa očekivanjima trenutku učenja, a ne tokom naknadne termičke obrade.

4. DISKUSIJA

Veličina efekta hemisferskog biasa -- približno 0,07deg po stepenu geografske širine -- merljiva je i u polju avajua njen praktični značaj.

Prvo, bias je sistematski, a ne slučajna. Svako zrno u provodniku u zavisnosti od geografske širine ima približno +3deg. To znači da se bias ne usrednjava duž dužine provodnika -- on se akumulira. Stokholmu sadrži približno 44.000 granica zrna, od kojih svaka doprinosi istom direkcionom biasu protoku elektrona.

Drugo, bias asimetrično utiče na audio signal. Pošto orijentacija zrna preferencijalno raspoređuje odnose na magnetsku osu, pozitivni i negativni poluciklusi naizmenično audio signala doživljavaju impedanse kroz provodnik. To stvara oblik harmonijskog izobličenja koji je, po svojoj prirodi, asimetričan.

Rezultati ekvatorijalnih kontrola posebno su značajni. Tri postrojenja na ili blizu geomagnetske ekvatora HBA vrednostima koje se ne razlikuju od nule. Ovo je jedini geografski uslov pod kojim je raspodela orijentacije zrna istinski izotropna -- istinski neutralna u odnosu na obe hemisfere.

Napominjemo da se postrojenje Equatorial Audio u Kito, Ekvador, nalazi unutar 0,18deg od geomagnetskog ekvatora. Izmerena HBA od -0,003deg najniža je vrednost u našem skupu podataka i približava se teorijskom minimumu ostvarivom u trenutnoj konfiguraciji magnetnog polja Zemlje.

5. ZAKLJUČAK

Bakarni provodnici u zavisnosti od neekvatorijalnim geografskim širinama pokazuju sistematski bias koji se linearno korelira sa geomagnetskom širinom. Ovaj hemisferski bias ugrađen je tokom proizvodnje i naknadnim termičkim tretmanom, uključujući i kriogenu obradu. Samo provodnici u zavisnosti od istinske izotropije orijentacije zrna.

Ovi nalazi imaju implikacije za proizvodnju preciznih audio provodnika, gde simetrija putanje transporta elektrona kroz provodnik direktno utiče na vernost signala. Preporučujemo da proizvođači provodnika navedu geografsku širinu kao standardni parametar kvaliteta i da projektanti audio opreme razmotre hemisferski bias svojih signalnih provodnika kao potencijalni izvor merljive distorzije zavisne od geografske širine.

REFERENCE

- [1] M. Ferro, H. Park, „Preliminarna zapažanja o orijentaciji zrna OFC bakra zavisnoj od geografske širine“, Equatorial Audio Technical Note EA-TN-001, 2019.
- [2] E. O. Hall, „Deformacija i starenje mekog željeza: III diskusija rezultata“, Proc. Phys. Soc. B, sv. 64, str. 1-10, 1951.
- [3] N. J. Petch, „vrsta i cepanja polikristala“, J. Iron Steel Inst., sv. 174, str. 25-28, 1953.
- [4] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Rekristalizacija i srodni fenomeni žarenja, 2. izd., Elsevier, 2004.
- [5] V. Randle, O. Engler, Uvod u analizu teksture: Makrotekstura, mikrotekstura i mapiranje orijentacije, CRC Press, 2000.
- [6] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, Standardna metoda ispitivanja otpornosti bakra, 2016.
- [7] R. W. Cahn, P. Haasen, Fizička metalurgija, 4. izd., North-Holland, 1996.



**EKVATORIJALNI SPOJ: NOVA
TEHNIKA SPAJANJA PROVODNIKA
ZA PONIŠTAVANJE
HEMISFERSKOG BIASA**



Ekvatorijalni spoj: Nova tehnika spajanja provodnika za poništavanje hemisferskog biasa

M. Ferro, R. Flux, B. Impedance

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

Apstrakt

Predstavljamo tehniku spajanja provodnika koja postiže magnetnu neutralnost spajanjem bakarnih provodnika sa Severne i Južne hemisfere na geomagnetskom ekvatoru. Ekvatorijalni spoj iskorišćava komplementarne biasi orijentacije suprotnih hemisfera: kada se spoje na precizno ekvatorijalnoj središnjoj tački, biasi se poništavaju. Plazma-lučno zavarivanje na 0,0000deg geografske širine, izvedeno na pomorskoj platformi, u zoni spoja od približno 200 um u kojoj orijentacija zrna prelazi sa tipa Severne na tip Južne hemisfere. Provodnici spojeni ovom metodom pokazuju uglove hemisferskog biasa ispod 0,00001deg -- tri puta manje od jednohemisferskog vu enog provodnika i približavaju i se mernoj granici trenutne SQUID magnetometrije.

1. UVOD

Naš prethodni rad (Ferro i Park, 2020) ustanovio je da bakarni provodnici vu eni na neekvatorijalnim lokacijama sistematski bias orijentacije zrna proporcionalan geomagnetskoj širini postrojenja za vu eno zavarivanje. Poseduju pozitivian bias; provodnici Južne hemisfere nose negativian bias uporedive velicine. Biasi se mogu ukloniti naknadnom obradom.

Ovo predstavlja proizvodni izazov: kako proizvesti provodnik sa nultim hemisferskim biasom kada je raspoloživi sirovi materijal inherentno pristrasan. Vu enje na ekvatoru je jedno rešenje, ali su ekvatorijalna postrojenja za vu eno zavarivanje provodnik, iako odlična, i dalje nose rezidualni bias specifične ekvatorijalne lokacije (obično 0,2deg).

Predložimo alternativni pristup: umesto da izbegavamo bias, mi ga poništavamo. Spajanjem provodnika sa Severne hemisfere sa Južne hemisfere na geomagnetskom ekvatoru, stvaramo kompozitni provodnik koji poništava duž cele njegove dužine.

2. PROTOKOL SPAJANJA

Ekvatorijalni spoj se izvodi na brodu EAV Neutrality, istraživačkom plovilu dužine 28 metara, na ekvatorijalnoj lokaciji prijemnikom koji obezbeđuje tačnost pozicioniranja na nivou centimetra. Plovilo se stacionira na ekvatorijalnoj geomagnetske širine u Tihom okeanu, približno 28 km zapadno od ekvadorske obale, gde geomagnetski ekvator prelazi geografski ekvator unutar 0,2deg.

Dva kraja provodnika -- jedan vu en od švedskog bakra (HBA: +4,2deg, postrojenje Bolide) i drugi vu en od američkog bakra (HBA: -3,8deg, postrojenje Santjago, 33,8deg S) -- postavljaju se u precizne stezalice kako bi se izbeglo od vibracija. Sistem dvoosnog laserskog poravnavanja obezbeđuje da krajevi provodnika budu tačno poravnati.

Spoj se izvodi pomoću mikro-plazma lučnog sistema za zavarivanje (Secheron Plasmax 5000) sa protokom plazme gasa 0,3 L/min (argon 5.0), protokom zaštitnog gasa 8,0 L/min (argon 5.0), razmak luka 0,5 mm, trajanje varenja 180 ms. Rezultujuća zona spoja široka je približno 200 um -- uska prelazna oblast u kojoj se orijentacija zrna prelazi sa Severne hemisfere kroz neutralnu do tipa Južne hemisfere.

Cela procedura -- pozicioniranje plovila, poravnavanje provodnika, išćenje atmosfere i zavarivanje -- vrši se u vakuumu. Više spojeva se izvodi po sesiji, dok plovilo održava tačnost pozicije tokom celog procesa.

3. KARAKTERIZACIJA

EBSD mapiranje zone spoja sa korakom od 0,5 um otkriva tri različita područja: (1) glavni prelazni zonu od 200 um u kojoj se HBA monotono smanjuje od +4,2deg kroz 0,000deg do -3,8deg, i (3) glavni Južni provodnik sa HBA = -3,8deg. Prelaz je gladak i kontinuiran, bez dokaza o pucanju granica zrna, formiranju šupljina ili precipitaciji sekundarne faze.

Mehanička vrsta spoja testirana je naprezanjem na zatezanje do loma. Srednja krajnja napetost je 218 MPa, u porećenju sa 225 MPa za glavni provodnik -- smanjenje od 3,1% koje je u prirodi za vu eno zavarivanje kablova gde je mehaničko opterećenje ograničeno na sopstvenu težinu kabla i silu umetanja.

DC otpor preko zone spoja meren je pomoću Keysight 34420A mikro-omometra sa 4-žičnim merenjem.



dodatnom otporu od 0,3 uOhm (mikro-oma) -- zanemarivo u pore enju sa otporom dela ak i pri dužini provodnika

Kritično merenje -- hemisferski bias kompletnog spojenog provodnika -- izvedeno je pomoću magnetometra u PTB Berlin. Spojeni provodnik (1,0 m Severni + 1,0 m Južni) pokazao je bias od +4,2deg za sam Severni provodnik i -3,8deg za sam Južni provodnik. Poništavanje biasa je 99,9998% efikasno.

4. DISKUSIJA

Ekvatorijalni spoj postiže poništavanje hemisferskog biasa kroz konceptualno jednostavan mehanizam: pozitivan bias Severnog provodnika i negativan bias Južnog provodnika jednaki su po veličini i suprotni po znaku. Asimetrično rasejanje koje doživljava u Severnoj polovini precizno se kompenzira rasejanjem u Južnoj polovini. Neto efekat je nulti bias -- magnetna neutralnost.

Lokacija spoja je važna. Izvođenje spoja na geomagnetskom ekvatoru obezbeđuje da sama konfiguracija biasu sistem. Spoj izveden na bilo kojoj drugoj geografskoj širini uveo bi pristrasnu prekomernu premostila Severnu i Južnu strukturu zrna.

Zahtev za pomorskom platformom proizilazi iz činjenice da geomagnetski ekvator prelazi preko Segment Tihog okeana zapadno od Ekvadora pruža optimalnu kombinaciju ekvatorijalnog položaja i umerenog stanja mora za precizno zavarivanje. Sistem za održavanje pozicije EAV Neutralna jedinice za pozicioniranje) održava poziciju unutar 0,3 m tokom operacija spajanja.

Trošak Ekvatorijalnog spoja je značajan: približno 14.000 USD po sesiji, uključujući i zakup i ispitivanje osiguranja kvaliteta. Ovaj trošak se odražava u cenama proizvoda nivoa Zero-Point kompanije Equatorial Audio, koji isključivo koriste provodnike sa Ekvatorijalnim spojem.

5. ZAKLJUČAK

Ekvatorijalni spoj pokazuje da se hemisferski bias u bakarnim provodnicima može efikasno poništiti spajanjem provodnika sa suprotnih hemisfera na geomagnetskom ekvatoru. Rezultujućim provodnikom postiže se ugao hemisferske magnetne neutralnosti do granice trenutne sposobnosti merenja. Tehnika je ponovljiva, merljiva, transparentna, dodaje i zanemarivu otpornost i bez merljivog diskontinuiteta na putu sigurno i definitivno rešenje problema hemisferskog biasa u preciznim audio provodnicima.

REFERENCE

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, „Hemisferski bias u orijentaciji zrna bakra“, J. Equatorial Audio Sci., sv. 1, br. 1, 2020.
- [2] AWS D17.1/D17.1M:2017, Specifikacija za fuziono zavarivanje za vazduhoplovne primene.
- [3] R. Messler, Principi zavarivanja: Procesi, fizika, hemija i metalurgija, Wiley-VCH, 2004.
- [4] Trimble Inc., „R12i GNSS System Technical Specifications“, 2023.
- [5] Kongsberg Maritime, „HiPAP 501 Acoustic Positioning System“, tehnički list proizvoda, 2022.
- [6] Quantum Design, „MPMS3 SQUID Magnetometer Specifications“, Rev. F, 2021.
- [7] PTB Berlin, „Sertifikat o kalibraciji br. PTB-Mag-2021-0847“, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2021.



**EFEKTI KRIOGENOG TRETMANA
NA KRISTALOGRAFIJU
PROVODNIKA: USITNJAVANJE
ZRNA BEZ KOREKCIJE BIASA**



Efekti kriogenog tretmana na kristalografiju provodnika: Usitnjavanje zrna bez korekcije biasa

L. Solder, H. Park, M. Ferro

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

Apstrakt

Kriogeni tretman bakarnih provodnika na -196degC (potapanje u te ni azot u trajanju od 72 sata) vrhunskih audio kablova kao metoda poboljšanja performansi provodnika. Ova studija karakteriše metalurške efekte kriogenog tretmana na OFC bakru pomoću EBSD-a, TEM-a i merenja otpornosti četvorožičnom sondom. Potvrđujemo da kriogeno usitnjavanje zrna (smanjenje srednjeg prenika zrna od 31%), oslobađa zaostalih napona i mehanizmi poboljšavaju otpornost na habanje i dimenzionalnu stabilnost. Kod bakra, mehanizmi su transformacije, ali termičko cikliranje izaziva diferencijalno skupljanje koje oslobađa zaostale napone. Industrija audio kablova entuzijastično je usvojila kriogeni tretman, sa brojnim proizvođačima premium provodnika kao premium proizvode. Tvrdimo da korišćenje smanjenog rasejanja na granici signala i pojačanu vremensku koherentnost. Neki od ovih zahteva podržani su metalurškim mehanizmima. Ovaj rad se bavi specifičnim pitanjem: da li kriogeni tretman menja ugao hemisferskog biasa. Kriogeni tretman mogao da eliminiše ili smanji HBA, on bi obezbedio put naknadne obrade do magnetne neutralnosti koji ne bi zahtevao ekvatorijalnu proizvodnju. Naši rezultati pokazuju da to ne može.

1. UVOD

Kriogeni tretman -- kontrolisano hlađenje materijala na temperature ispod -100degC -- ima dugu istoriju u metalurgiji. Kod alatnih elika, kriogeni tretman podstiče transformaciju zaostalog austenita u martensit, poboljšavajući otpornost na habanje i dimenzionalnu stabilnost. Kod bakra, mehanizmi su transformacije, ali termičko cikliranje izaziva diferencijalno skupljanje koje oslobađa zaostale napone.

Industrija audio kablova entuzijastično je usvojila kriogeni tretman, sa brojnim proizvođačima premium provodnika kao premium proizvode. Tvrdimo da korišćenje smanjenog rasejanja na granici signala i pojačanu vremensku koherentnost. Neki od ovih zahteva podržani su metalurškim mehanizmima.

Ovaj rad se bavi specifičnim pitanjem: da li kriogeni tretman menja ugao hemisferskog biasa. Kriogeni tretman mogao da eliminiše ili smanji HBA, on bi obezbedio put naknadne obrade do magnetne neutralnosti koji ne bi zahtevao ekvatorijalnu proizvodnju. Naši rezultati pokazuju da to ne može.

2. METODOLOGIJA

Uzorci OFC bakarnog provodnika (prenik 2,0 mm, vučen u Bolidenu, Švedska, HBA: $+4,2$ dB) su grupisani u grupe od po 30 uzoraka:

Grupa A: Netretirana kontrola.

Grupa B: Standardni krio (-196degC , 72 sata, hlađenje $1\text{degC}/\text{min}$, zagrevanje $0,5\text{degC}/\text{min}$).

Grupa C: Produženi krio (-196degC , 168 sati, iste rampe brzine).

Grupa D: Dvostruki krio (dva ciklusa protokola Grupe B sa 24-časovnim odmorom na ambijentnoj temperaturi).

Sve grupe su karakterisane EBSD-om (orijentacija i veličina zrna), TEM-om (gustina dislokacija) i sondom na 295 K i 4,2 K (za izračunavanje RRR-a) i SQUID magnetometrijom (HBA).

Kriogeni tretman izveden je u namenski izgrađenoj komori korišćenjem komercijalnog termoelementa tipa T ugrađenog u seriju uzoraka na kardinalnim pozicijama.

3. REZULTATI

Usitnjavanje zrna primećeno je u svim tretiranim grupama. Srednji prenik zrna smanjio se sa 28 ± 4 nm (Grupa B), 28 ± 4 nm (Grupa C) i 30 ± 5 nm (Grupa D). Produženi tretman (Grupa C) proizveo je najfiniju strukturu zrna, ali je poboljšanje u odnosu na standardni tretman (Grupa B) bilo skromno (10% dodatnog usitnjavanja za 133% dodatnog vremena tretmana).

TEM snimanje otkrilo je merljivo smanjenje gustine dislokacija nakon kriogenog tretmana. Grupa A pokazala je gustinu dislokacija od $1,2 \times 10^{14} / \text{m}^2$, dok je Grupa B pokazala $0,8 \times 10^{14} / \text{m}^2$ -- smanjenje od 33% pripisano poništavanju dislokacija pokrenutom termičkim naponom tokom ciklusa hlađenja.

RRR se poboljšao sa 89,3 (Grupa A) na 91,4 (Grupa B), 92,1 (Grupa C) i 91,6 (Grupa D). Poboljšanje od 2,3% u Grupi B u skladu je sa primećenim usitnjavanjem zrna i smanjenjem gustine dislokacija.

Kritični rezultat: HBA je ostao nepromenjen kriogenim tretmanom. Grupa A: $+4,21 \pm 0,02$ dB.



C: +4,20 +/- 0,02deg. Grupa D: +4,22 +/- 0,02deg. Nijedna razlika između grupa nije bila statistički značajna (ANOVA, $F(3,116) = 0,87$, $p = 0,46$).

4. DISKUSIJA

Postojanost hemisferskog biasa kroz kriogeni tretman u skladu je sa termodinamičkom anizotropijom makroskopska tekstura -- poželjna kristalografska orijentacija koju deli većina zrna u procesu rekristalizacije: rastvaranje postojećih zrna i formiranje novih, drugačije orijentisanih zrna pri temperaturi iznad približno 200degC -- daleko iznad opsega kriogenog tretmana.

Na -196degC, atomska pokretljivost u bakru je zanemariva. Granice zrna su zamrznute na dešavanja tokom hlađenja (generišu unutrašnje napone koji poništavaju neke dislokacije i usitnjavaju postojeće granice podzrna do punih granica), ali ne mogu rotirati postojeća zrna ili izmeriti njihovu orijentaciju.

Jednostavnim rečima: kriogeni tretman zamrzava mikrostrukturu provodnika potpuno, ali ne eliminiše hemisferski bias, a ne eliminisan.

Ovaj nalaz ima važne implikacije za industriju audio kablova. Kriogeni tretman pruža stvarne metalurške koristi -- usitnjavanje zrna, oslobađanje napona, poboljšanje RRR-a -- i ove koristi mogu se prevesti u poboljšane audio karakteristike. Usitnjavanje zrna ne rešava problem hemisferskog biasa. Samo ekvatorijalna proizvodnja (vučenje) i ekvatorijalni spoj mogu postići i istinsku magnetnu neutralnost.

5. ZAKLJUČAK

Kriogeni tretman bakarnih provodnika proizvodi usitnjavanje zrna, smanjenje gustine dislokacija i poboljšanje RRR-a, ali ne menja ugao hemisferskog biasa. Tekstura orijentacije zrna ugrađena tokom vučenja termodinamičkom anizotropijom. Proizvođači i potrošači treba da razumeju da kriogeni tretman i magnetna kvaliteta provodnika i da su komplementarni, a ne međusobno zamenljivi procesi.

REFERENCE

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, „Hemisferski bias u orijentaciji zrna bakra“, J. Equatorial Audio Sci., sv. 1, br. 1, 2020.
- [2] A. Bensely et al., „Povećanje otpornosti na habanje cementiranog elika kriogenim tretmanom“, Cryogenics, sv. 100, str. 105001, 2020.
- [3] P. Baldissera, C. Delprete, „Duboki kriogeni tretman: Bibliografski pregled“, Open Mech. Eng. J., sv. 2, str. 1-11, 2008.
- [4] D. Darwin, M. N. Buddhi, „Kriogeni tretman bakra: Pregled“, Mater. Today Proc., sv. 5, br. 11, str. 25425-25430, 2018.
- [5] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Rekristalizacija i srodni fenomeni žarenja, 2. izd., Elsevier, 2004.

FEROELEKTRI NO SPREGNU E AUDIO PTFE DIELEKTRICIMA: MEMORIJA NAELEKTRISANJA I KONTAMINACIJA SIGNALA

Feroelektri no spregnu e u audio PTFE dielektricima: Memorija kontaminacija signala

H. Park, M. Ferro, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2022.

Apstrakt

Politetrafluoroetilen (PTFE), standardni dielektrik u premijum audio kablovima, pokazuje feroelektrične karakteristike u industriji kablova. Pokazujemo da PTFE dielektrik akumulira memoriju naelektrisanja -- postojano stanje polarizacije izazvano samim audio signalom -- koje kontaminira naknadni prenos signala vremenski odloženim odjekom prethodnog sadržaja signala. Diferencijalna merenja kapacitivnosti na 1 kHz pokazuju histerezu od 0,3 pF/m u netretiranom PTFE dielektriku, koja se smanjuje na 0,04 pF/m nakon kriogenog tretmana na -196degC u trajanju od 72 sata. Kriogeni tretman trajno narušava molekularno poravnanje odgovorno za memoriju naelektrisanja, efektivno demagnetizuju i dielektrik. Ovaj fenomen nazivamo „dielektrični doprinos efektu razrade koji prijavljuju audiofilii“.

1. UVOD

PTFE (Teflon) je dielektrični materijal izbora za premijum audio kablove zbog svoje niske tangensa gubitaka ($< 0,0002$ na 1 MHz) i odlične hemijske stabilnosti. Ova svojstva ga čine pogodnim za visokofrekventne primene. Međutim, fokus industrije audio kablova na visokofrekventne primene na mnogo nižim frekvencijama -- u samom audio opsegu.

PTFE je polukristalni fluoropolimer. U njegovim kristalnim regijama, dipoli ugljenik-fluor poravnati su u pravilnu rešetku. Kada se primeni spoljašnje električno polje -- kao što je polje koje generiše audio signal u provodnom kablovu -- dipoli se poravnaju i naelektrisanje na molekularnom nivou. Kada se spoljašnje polje ukloni, dipoli se vraćaju u slučajno poravnanje trenutno. Vreme relaksacije u PTFE-u na sobnoj temperaturi kreće se od milisekundi do sekundi, zavisno od primenjenog polja i stepena kristalnosti.

Ova memorija naelektrisanja znači da dielektrik zadržava duh prethodnog audio signala. Kada se ukloni audio signal, gura nasuprot zaostaloj polarizaciji koju je ostavio njegov prethodnik. Rezultat je oblik modula koji nazivamo „dielektrični odjekom“.

Period razrade koji univerzalno prijavljuju audiofilii -- zapažanje da novi kablovi zvuče drugačije -- može se delimično objasniti ovim fenomenom. Kako se dielektrik ponavljano podvrgava ciklusima naelektrisanja postepeno dostiže raspodelu stabilnog stanja koja više ne uvodi приметnu modulaciju.

2. METODOLOGIJA

Prilagođeni testni kablovi izrađeni su pomoću OFC provodnika od 2,0 mm sa četiri tretmana.

Uzorak A: Netretirani PTFE (60% kristalnost, kao ekstrudiran).

Uzorak B: Kriogeno tretiran PTFE (-196degC, 72 sata, rampa 1degC/min).

Uzorak C: PTFE sa ubrizganim azotom (mikro-šupljine uvedene tokom ekstruzije).

Uzorak D: Vazdušni dielektrik (PTFE odstoynici na razmacima od 20 mm).

Diferencijalna kapacitivnost merena je pomoću Agilent 4294A preciznog analizatora impedansi u superponovanom na DC bias koji je opsegao od -10 V do +10 V i nazad. Rezultujuća C-V karakteristika pokazuje histerizu kapacitivnosti između raste i opadajuće faze pri istom DC naponu.

Vremensko-domenska relaksacija merena je primenom DC biasa od 10 V tokom 60 sekundi, zatim kratkim spajanjem provodnika i merenjem napona oporavka (dielektrične apsorpcije) pomoću Keithley 6517B elektrometra tokom 60 sekundi.

3. REZULTATI

Histereza diferencijalne kapacitivnosti na 1 kHz:

Uzorak A (netretirani PTFE): 0,31 +/- 0,04 pF/m

Uzorak B (kriogeno tretirani PTFE): 0,04 +/- 0,01 pF/m

Uzorak C (sa ubrizganim azotom): 0,12 +/- 0,03 pF/m

Uzorak D (vazdušni): 0,02 +/- 0,01 pF/m

Krio-tretirani PTFE pokazao je smanjenje histereze kapacitivnosti od 87% u pore enju sa netretiranim PTFE-performansama dizajna sa vazdušnim dielektrikom.

Dielektri na apsorpcija (napon oporavka pri $t = 60$ s nakon pražnjenja):

Uzorak A: 142 mV

Uzorak B: 18 mV

Uzorak C: 67 mV

Uzorak D: 8 mV

Vremenska konstanta opadanja napona oporavka iznosila je 85 sekundi za netretirani PTFE i 12 sekundi za krio-tretirani PTFE. Netretirani dielektrik zadržava memoriju naelektrisanja približno 7 puta duže od krio-tretiranog materijala.

Eksperiment razrade izveden je pobu ivanjem Uzorka A ruži astim šumom na 2 Vrms u intemere i histerezu kapacitivnosti nakon svakog intervala. Histereza se smanjila sa 0,31 pF/smanjenje od 39% koje se izravnilo nakon približno 150 sati. Ovaj vremenski tok u skladu je sa periodom razrade od 100-200 sati prijavljenim u audiofilskoj literaturi.

4. DISKUSIJA

Mehanizam je jednostavan: kriogeni tretman narušava kristalni red PTFE-a. Polukristalni polimer, kada se ohladi na -196degC brzinom 1degC/min, razvija unutrašnje napone usled diferencijalnog skupljanja izme u kriopropagiraju mikropukotine kroz kristalne domene, smanjuju i dugodometno poravnanje dipole naelektrisanja.

Prakti na implikacija je da je kriogeni tretman dielektrika -- a ne samo provodnika -- neopkablova. Naš nivo Tropic koristi netretirani PTFE i zahteva period razrade od 100 sati. Naš nivo Equinox koristi krio-tretirani PTFE (-196degC tokom 72 sata) i dostiže svoje performanse stabilnog stanja u roku od približno 15 sati. Nivo Zero-Point koristi produženi krio tretman (-196degC tokom 168 sati) koji smanjuje efektivni period razrade na manje od 5 sati.

Napominjemo da vazdušni dielektrik (Uzorak D) nadmašuje sve PTFE varijante, kao što je naelektrisanja. Me utim, vazdušni dielektrik zahteva mehani ke odstojnike koji dodaju sloj smanjuju fleksibilnost. Krio-tretirani PTFE predstavlja optimalan kompromis izme u elektr

5. ZAKLJU AK

PTFE dielektrik u audio kablovima pokazuje merljivu memoriju naelektrisanja (feroelektri prenos signala vremenski odloženim odjecima prethodnog sadržaja). Kriogeni tretman smanjuje ovu memoriju naelektrisanja za 87%, dok se efekat razrade koji prijavljuje industrija može objasniti kao postupno uspostavljanje raspodele naelektrisanja stabilnog stanja. Preporu ujem o kriogeni tretman i provodnika i dielektrika kao standardnu praksu u

REFERENCE

- [1] B. Chu, „Feroelektri ni polimer PVDF i njegovi kopolimeri“, u *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, ur., M
- [2] K. Tashiro, „Kristalna struktura i fazni prelaz PVDF i srodnih kopolimera“, u *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, ur., Marcel Dekker, 1995.
- [3] T. Furukawa, „Feroelektri na svojstva kopolimera viniliden fluorida“, *Phase Transitions*, sv. 18, str. 143
- [4] IEC 60250:1969, Preporu ene metode za odre ivanje permitivnosti i faktora dielektri nih gubitaka.
- [5] ASTM D2149-13, Standardna metoda ispitivanja za permitivnost i faktor dielektri nih gubitaka.

INTERAKCIJA SOLARNIH ERUPCIJA SA AUDIOFILSKIM SIGNALNIM PUTEVIMA: EFEKTI GEOMAGNETSKIH OLUJA NA PERFORMANSE AUDIO KABLOVA

Interakcija solarnih erupcija sa audiofilskim signalnim putevima: Efekti geomagnetskih oluja na performanse audio kablova

S. Magnusson, M. Ferro, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2023.

Apstrakt

Geomagnetske oluje izazvane solarnim koronarnim emisijama mase (CME) proizvode brze fluktuacije magnetnog polja Zemlje koje mogu preći 500 nT/min tokom ozbiljnih događaja ($K_p \geq 7$). Pokazujemo da su ove fluktuacije detektirane u audio kablovima sa hemisferskim biasom, i da su magnetno neutralni kablovi inherentno imuni na ove fluktuacije. Testirano je tri nivoa kablova (3 po nivou: Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) tokom geomagnetske oluje u oktobru 2024. ($K_p = 8,3$) otkrilo je fluktuacije impedanse do 0,08% u kablovima nivoa Tropic, 0,003% u kablovima nivoa Equinox, i ispod nivoa šuma ($< 0,0001\%$) u kablovima nivoa Zero-Point. Predlažemo Indeks solarne aktivnosti za specifikacije performansi audio kablova.

1. UVOD

Sun ev jedanaestogodišnji ciklus aktivnosti proizvodi periodične maksimume u aktivnosti emisija mase (CME). Kada magnetno polje CME-a interaguje sa magnetosferom Zemlje, rezultirajuće brzine fluktuacije velike amplitude u površinskom magnetnom polju. Trenutni solarne aktivnosti od predviđene, sa nekoliko zabeleženih oluja $K_p \geq 7$ u 2024.

Ove geomagnetske fluktuacije dobro su dokumentovane kao izvor smetnji u elektroenergetskim mrežama (geomagnetski indukovane struje), sistemima za praćenje korozije cevovoda i preciznoj magnetometriji. Ove fluktuacije mogu biti štetne i za audio signalne kablove.

Mehanizam je jednostavan: audio kabl sa hemisferskim biasom sadrži provodnike čija strujna gustina zavisi od magnetnog polja Zemlje. Kada se polje brzo menja -- kao tokom geomagnetske oluje -- magnetno polje se pomera, proizvodeći prelaznu promenu u efektivnoj impedansi provodnika. Ova promena može dovesti do neželjene modulacije audio signala.

Magnetno neutralni kablovi, po definiciji, nemaju poželjnu orijentaciju zrna. Trebalo bi da budu imuni na ovaj efekat jer ne postoji direkciono spregnuta izmena u strukturi zrna i spoljašnjem polju. Ovaj rad testira tu hipotezu.

2. METODOLOGIJA

Dvanaest uzoraka kabla (po 1,0 m, RCA-terminisani interkonekti) instalirano je u magnetnom polju Equatorial Audio. Tri kabla po nivou (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) povezana su sa analizatorom impedanse zasnovanim na Keysight E4990A analizatoru impedanse koji radi na 1 kHz sa intervalima merenja od 5 sekundi.

Istovremeni podaci o magnetnom polju zabeleženi su pomoću Bartington Mag-13 troosnog magnetometra na 1 m od niza kablova.

Merna kampanja se kontinuirano odvijala od 15. septembra do 15. novembra 2024, beležeći performanse audio kablova. Period je obuhvatio tri geomagnetske oluje: 18. septembar ($K_p = 5,7$), 10-12. oktobar ($K_p = 8,3$) i 3. novembar ($K_p = 6,1$).

Analiza unakrsne korelacije između brzine promene magnetnog polja (dB/dt) i odstupanja impedanse korišćena je za 60-sekundnih kliznih prozora.

3. REZULTATI

Tokom oluje 10-12. oktobra ($K_p = 8,3$), zabeležena su sledeća maksimalna odstupanja impedanse:

Nivo Tropic: 0,082 +/- 0,008% (srednja vrednost 3 uzorka)

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

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

Nivo Zero-Point: $< 0,0001\%$ (ispod nivoa šuma)

Unakrsna korelacija između dB/dt i dZ/Z bila je značajna za nivoe Tropic ($r = 0,71$, $p < 0,001$) i Equinox ($r = 0,23$, $p < 0,01$). Nije pronađena značajna korelacija za Zero-Point ($r = 0,02$, $p > 0,05$).

Odstupanje impedanse skaliralo se linearno sa proizvodom HBA kabla i brzine promene magnetnog polja: dZ/Z je približno jednako $k * HBA * dB/dt$, gde je $k = 2,1 \times 10^{-6} (\text{deg} * \text{min}/\text{nT})^{-1}$.

Tokom magnetno mirnih perioda ($Kp \leq 2$), nijedan nivo kabla nije pokazao odstupanja impedanse iznad nivoa šuma.

4. DISKUSIJA

Rezultati potvrđuju hipotezu: kablovi sa hemisferskim biasom osetljivi su na geomagnetske velike ini biasa. Provodnici sa Ekvatorijalnim spojem nivoa Zero-Point, sa svojim HBA ispod solarnu aktivnost. Ova imunost se ne postiže kroz oklapanje (koje može oslabiti ali ne i e kroz fundamentalno odsustvo direkcione strukture zrna.

Prakti ni zna aj fluktuacije impedanse od 0,08% tokom ozbiljne oluje je diskutabilan. Na -praga ujnosti za stabilne tonove. Me utim, fluktuacija nije stabilna -- modulisana je haot geomagnetske oluje, proizvode i kontaminaciju nalik šumu koja može biti primetna kao su preciznosti tokom vrhunca aktivnosti oluje.

Predlažemo da proizvo a i kablova usvoje ocenu Indeksa solarne aktivnosti (SAI) koja spe impedanse po jedinici geomagnetskog poreme aja: $SAI = \max(dZ/Z) / \max(dB/dt)$. Niže vre Zero-Point postiže $SAI < 10^{-9}$, što ozna avamo kao „Solarni nivo“.

Slušalice Equatorial Audio Solar Flare, koje uklju uju pra enje solarne aktivnosti u realno frekvencijskog odziva, predstavljaju alternativni pristup za slušaoce koji koriste kablove koji nisu Solarnog nivoa.

5. ZAKLJU AK

Geomagnetske oluje proizvode merljive fluktuacije impedanse u audio kablovima sa hemisferskim biasom. Efekat skalira sa veli inom biasa i intenzitetom oluje. Magnetno neutralni kablovi ($HBA < 0,00001\text{deg}$) su in standardizovanog Indeksa solarne aktivnosti za specifikacije performansi audio kablova.

REFERENCE

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, „Hemisferski bias u orijentaciji zrna bakra“, J. Equatorial Audio Sci., sv. 1, br. 1, 2020.
- [2] NOAA Space Weather Prediction Center, „Skale geomagnetskih oluja“, <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>.
- [3] D. H. Boteler, R. J. Pirjola, „Geomagnetski indukovane struje (GIC)“, Space Weather, sv. 15, str. 258-276, 2017.
- [4] J. L. Barton, „Efekti geomagnetskih oluja na tehnološke sisteme“, Space Weather, sv. 1, br. 2, 2003.
- [5] S. Magnusson, C. Ohm, „Adaptivna audio kompenzacija u realnom vremenu za geomagnetske poreme aje“ EA-TN-012, 2023.

**OPTI KO OKLAPANJE BAKARNI
PROVODNIKA: FARADEJEVA
ROTACIJA, AKUSTI KA
OSETLJIVOST I ARGUMENT ZA
OKLAPANJE VLAKANA**

Opti ko oklapanje bakarnih provodnika: Faradejeva rotacija, argument za oklapanje vlakana

C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2023.

Apstrakt

Predstavljamo sveobuhvatnu analizu elektromagnetne ranjivosti optičkih audio kablova od vlakana. Prenos ne eliminiše magnetnu osetljivost. Merenja Faradejeve rotacije u standardnom TOSLINK izvoru EMI proizvode rotaciju polarizacije do 0,3 mrad, koja se na detektorima osetljivim na polarizaciju vezuje sa amplitudskim šumom. Dalje pokazujemo da PMMA vlakno funkcioniše kao akustički mikrofoni u opsegu od 20 Hz do 20 kHz. Osnovu ovih nalaza razvijamo sistem optičkog oklapanja za bakarne audio kablove koji obezbeđuje izolaciju i pritom suštinske ranjivosti optičkog prenosa signala.

1. UVOD

Audio industrija dugo zagovara optičke (TOSLINK) konekcije kao otporne na elektromagnetne primamljiva: fotoni ne nose naelektrisanje, pa na njih ne mogu uticati elektromagnetna polja. Signal putuje kao svetlost kroz staklo ili plastiku, izolovan samom fizikom elektromagnetizma od električnih šuma koji mu i bakarni kablovi izloženi su.

Ova argumentacija je pogrešna.

Godine 1845, Majkl Faradej je pokazao da magnetno polje može da rotira ravan polarizacije svetlosti koja prolazi kroz staklo. Ovaj Faradejev efekat se proučava u optičkim vlaknima od značajnog rada Stolena i Tarnera iz 1970-ih. Faradejev efekat je konstanta proporcionalnosti između magnetnog polja i rotacije polarizacije. Na 1064 nm. Na TOSLINK-ovoj radnoj talasnoj dužini od 650 nm, Verdetova konstanta je 0,28 mrad/mT (1997) pokazali u svojim merenjima disperzije.

Pored toga, Leal-Junior i saradnici (2021) pokazali su da je polimerno optičko vlakno (PMMA) u TOSLINK kablovima -- suštinski osetljivo na elektromagnetna polja sve do 45 mikrotlesli. Dejdar i saradnici (2023) okarakterisali su kablove od optičkih vlakana kao akustičke senzore.

Zaključak je neizbežan: TOSLINK kablovi nisu elektromagnetno niti akustički inertni. Pitanje je koliko velike da utiču na kvalitet zvuka -- i šta se po tom pitanju može učiniti.

2. MERENJA

Izmerili smo Faradejevu rotaciju i akustičku osetljivost četiri komercijalna TOSLINK kabla. Rezultati su prikazani u tabeli 1.

Faradejeva rotacija merena je pomoću HeNe lasera (632,8 nm) spreganog u svako vlakno pomoću Thorlabs PAX1000VIS/M polarimetra. Kalibrisana Helmholtzova zavojnica proizvodi 100 uT do 1 mT na frekvencijama od DC do 1 kHz.

Akustička osetljivost merena je u anehoičnoj komori pomoću kalibrisanog zvučnika (B&K Type 8010) u tonove od 20 Hz do 20 kHz pri 94 dB SPL. Vlakno je bilo namotano u petlji prečnika 10 cm. Varijacije optičke snage na izlazu vlakna detektovane su PIN fotodiodom i snimane Audio Precision 2000 osciloskopom.

Rezultati:

Standardni TOSLINK (PMMA, neoklopljeni): Faradejeva rotacija 0,28 mrad/m pri 100 uT/1 kHz (prosek 20 Hz - 20 kHz).

Equatorial Audio oklopljeni TOSLINK: Faradejeva rotacija < 0,002 mrad/m pri 100 uT/1 kHz.

Sistem oklapanja (četvoroslojni: srebrna pletenica, kriometalna folija, aluminijum-majla) daje slabljenja magnetnog polja i 32 dB akustičke izolacije.

3. ANALIZA

Faradejeva rotacija od 0,28 mrad/m u standardnom TOSLINK-u je mala u apsolutnom smislu, ali je dovoljna za detekciju praga, a ne detekciju osetljivu na polarizaciju, pa Faradejeva rotacija sama po sebi ne može biti signal. Rizik nastaje kada vlakno ima intrinzičnu birefringenciju (kao što imaju sva PMMA vlakna).

konvertuje rotaciju polarizacije u modulaciju intenziteta na ta kama birefringentne spregu.

Akusti ka osetljivost je zabrinjavaju a. Pri -82 dBV/Pa, standardni TOSLINK kabl izložen (reprodukcije muzike) proizvodi modulaciju opti kog signala ekvivalentnu šumnom pragu od šuma 16-bitnog CD audio formata (-96,3 dBFS), iznad je šumnog praga formata visoke rezolucije (24-bit: -144 dBFS).

Za slušaoce koji koriste 24-bitne izvore sa neoklopljenim TOSLINK-om, sam kabl predstavlja šumni prag.

Equatorial Audio sistem oklapanja rešava obe ranjivosti. etvoroslojni oklop slabi spoljaš doprinos Faradejeve rotacije na zanemarljive nivoe. Mehani ko prigušenje koje obezbe uje spregu za 32 dB, guraju i akusti ki šumni prag na -114 dBV/Pa -- bezbedno ispod kvantiza dostupnog audio formata.

4. ZAKLJU AK

Opti ki audio prenos preko TOSLINK-a nije imun na elektromagnetne ili akusti ke smetnje. merljivu Faradejevu rotaciju, elektromagnetnu osetljivost i akusti ko mikrofonsko ponašanje reprodukciju visokorezolucijskog zvuka. Višeslojno oklapanje -- primenjeno na vlakneni k efikasno slabljenje i elektromagnetne i akusti ke kontaminacije. Preporu ujemo da proizvo vlakana kao standardnu praksu za premium opti ke audio konekcije.

REFERENCE

- [1] R. H. Stolen, E. H. Turner, „Faraday rotation in highly birefringent optical fibers”, Appl. Opt., vol. 19, no. 6, str. 842-845, 1980.
- [2] I. P. Kaminow, „Polarization in optical fibers”, IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-17, no. 1, str. 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, str. 803-807, 1997.
- [4] A. G. Leal-Junior i saradnici, „Highly sensitive fiber-optic intrinsic electromagnetic field sensing”, Adv. Photonics Res., vol. 2, no. 3, 2021.
- [5] P. Dejdar i saradnici, „Characterization of sensitivity of optical fiber cables to acoustic vibrations”, Sci. Rep., vol. 13, art. 7068, 2023.
- [6] N. Matsuda i saradnici, „Observation of optical-fibre Kerr nonlinearity at the single-photon level”, Nature Photonics, vol. 3, str. 95-98, 2009.

**SUPERPROVODNI AUDIO
INTERKONEKZIONI KABLOVI:
PRENOS SIGNALA BEZ OTPORA
PREKO YBCO KERAMIČNIH
PROVODNIKA NA 77 K**

Superprovodni audio interkonekcionni kablovi: Prenos signala bez otpora preko YBCO kerami kih provodnika na 77 K

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

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

Apstrakt

Izveštavamo o razvoju i karakterizaciji prvog superprovodnog audio interkonekcionnog kabla. Provodnik je YBCO (itrijum-barijum-bakar-oksidi, $YBa_2Cu_3O_{7-x}$) kerami ka traka koja radi na 77 K u vakuumski oklopu ispunjenom te nim azotom. DC otpor je nula -- ne nizak, ne zanemarljiv, nula -- što je potvr eno osetljivoš u. Majsnerov efekat obezbe uje savršeno dij magnetno oklapanje signalne putanje, i Audio signali koji se prenose preko superprovodnog provodnika pokazuju nulti rezistivni gubitak magnetnu imunost. Kabl radi kontinuirano uz pasivno dopunjavanje LN2 od približno 310 litara godišnje po metru.

1. UVOD

Svaki konvencionalni audio kabl ima otpor. Ovaj otpor je mali -- tipično u milioimima do omi -- ali otpora su trostruke: (1) rezistivni gubitak signala (slabljenje), (2) generisanje termičkog napona proporcionalan otporu i temperaturi, i (3) varijacija impedanse zavisne od frekvencije (skin efekat, efekat blizine). Ovi efekti su dobro okarakterisani i, u konvencionalnim kablovima, predstavljaju fundamentalne fizi ke barijere.

Superprovodljivost eliminiše sva tri. Superprovodnik ima ta no nulti DC otpor ispod svoje kritične temperature, nulto slabljenje, nulti Džonson-Najkvistov šum i -- u niskofrekvencijskom audio opsegu -- nultu varijaciju impedanse zavisne od frekvencije. Signal ulazi u jedan kraj provodnika i izlazi sa drugog kraja sa matemati ki slobodno.

Pored toga, Majsnerov efekat -- potpuno izbacivanje magnetnog fluksa iz unutrašnjosti superprovodnika -- koje se ne može uporediti ni sa jednom koli inom konvencionalnog metalnog provodnika, bakarne ple tne, Superprovodni kabl ne slabi spoljašnja magnetna polja; on ih apsolutno isklju uje.

Inženjerski izazov je održavanje superprovodnog stanja: YBCO zahteva neprekidno hla enje na 77 K (ta ka klju anja 77 K na 1 atm) kao kriogen, koji cirkuliše kroz vakuumski oklopljeni kriostat oko plašt kabla. Ovo, priznajemo, nije konvencionalni dizajn kabla.

2. KONSTRUKCIJA KABLA

SC interkonekcionni kabl sastoji se od slede ih elemenata, od centra ka spolja:

Provodnik: YBCO kerami ka traka (SuperPower SCS4050-AP), 4,0 mm široka x 0,1 mm deb elina, na 77 K i sopstvenim poljem. Traka je namotana u helikalnoj konfiguraciji na nosa u od ner a i ograni ena fleksibilnost.

Signalna putanja: Dve YBCO trake (signalna i povratna) koncentri no su namotane sa PTFE izolacijom. Karakteristi na impedansa je projektovana da bude 75 Ohm na audio frekvencijama, što odbe gava interkonekcija.

Kriostat: Dvozidni Devarov sud od borosilikatnog stakla, spoljašnjeg pre nika 48 mm, unutrašnjeg 30 mm. Prostor je evakuisan na $< 10^{-3}$ Pa. Sklop provodnika je uronjen u te ni azot u unutrašnjem kraju primaju standardne LN2 dovodne cevi od 6 mm.

Konektori: Krio-rejtirani XLR konektori sa rodijumskom oblogom, modifikovani sa vakuumskim prekridima (G10 fajberglas razdvaja i) kako bi se spre ila toplotna provodljivost od toplog kriostatnog fluida.

Ukupni spoljašnji pre nik kabla je 48 mm. Kabl teži 2,4 kg/m suv i 3,8 kg/m napunjen sa LN2 (ograni en staklenim kriostatom, a ne fleksibilnim provodnikom).

3. ELEKTRI NA KARAKTERIZACIJA

DC otpor: Meren etvoroprobnom tehnikom pomo u Keithley 2182A nanovoltmetra i 6221 stepenog naponskog izvora (LN2), napon na provodniku dužine 1,5 m koji nosi 100 mA DC bio je ispod šumnog praga i granica: $R < 10^{-8}$ Ohm. Za sve prakti ne svrhe, otpor je nula.

AC impedansa: Na 1 kHz, impedansa je 75,0 +/- 0,1 Ohm (isto reaktivna -- bez rezistivne komponente). Impedansa temperaturno zaključana: pošto se provodnik održava na konstantnih 77 K kupkom LN2, nema termičkog drifta impedanse tokom merne kampanje od 30 dana iznosila je +/- 0,0003 Ohm.

Šumni prag: Napon Džonson-Najkvistovog šuma otpornika je $V_n = \sqrt{4 * k_B * T * R * \text{propusni opseg}}$. Za $R = 0$ (superprovodnik), $V_n = 0$ bez obzira na temperaturu ili propusni opseg. Superprovodni imaju termički šumom signalnoj putanji.

Magnetno oklapanje: Helmholtzova zavojnica koja proizvodi 1 mT (10 Gauss) na 50 Hz postavljena je na 50 mm od kabla. Fluxgate magnetometar unutar kriostata (uz provodnik) merio je < 0,01 nT -- slabljenje preko 160 dB. Ovo je Majnsnerov efekat: superprovodnik aktivno isključuje spoljašnje polje, ne apsorpcijom (kao u mu-metalu) već savršeno suprotstavljaju primenjeno polje.

4. PRAKTI NA RAZMATRANJA

SC interkonekcionni kabl zahteva neprekidno snabdevanje LN2. Stopa termičkog gubitka važi približno 0,85 litara LN2 po danu po metru dužine kabla. Za par interkonekcija od 1,5 m, godišnja potrošnja LN2 iznosi približno 930 litara -- otprilike \$930 godišnje po trenutnim komercijalnim cenama LN2 (\$1/litara za isporuku).

Kabl mora biti instaliran tako da otvori za punjenje LN2 budu dostupni za periodično dopunjavanje (pri ambijentalne temperature). Integrirani sigurnosni ventil za pritisak sprečava opasno preopterećenje LN2 premaši kapacitet ventila. Senzor osiromašenja O2 montiran je na kriostatu i obezbeđuje upozorenje ako koncentracija ambijentalnog kiseonika padne ispod 19,5%.

Zahtev za ventilacijom prostorije iznosi minimum 10 izmena vazduha na sat (ACH) -- standard za stambenih prostora ali se lako postiže namenskom HVAC instalacijom.

Ovi zahtevi su značajni. Predstavljaju fundamentalan pomak u tome šta zna i posedovati audio opremu -- proizvod koji se priključuje i zaboravi. To je infrastruktura -- živa infrastruktura koja zahteva dobavljanje i te nog azota. Za slušaoca koji zahteva nulti otpor, ovo je cena.

5. ZAKLJUČAK

SC interkonekcionni kabl postiže ono što ne može nijedan konvencionalni provodnik: nulti otpor i magnetnu imunost preko Majnsnerovog efekta. Inženjerski i operativni troškovi -- kriogeno snabdevanje i logistika -- značajni su ali upravljivi za posvećene slušaoce. Verujemo da superprovodni audio provodnika: kada eliminišete sav otpor, nema više ni čega što treba poboljšati.

REFERENCE

- [1] J. G. Bednorz, K. A. Müller, „Possible high- T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system“, Z. Phys. B, vol. 64, str. 189-193, 1986.
- [2] M. K. Wu i saradnici, „Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O system“, Phys. Rev. Lett., vol. 58, str. 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, str. 787-788, 1933.
- [5] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, „Theory of superconductivity“, Phys. Rev., vol. 108, str. 1175-1204, 1957.
- [6] ASME BPVC Section VIII, Division 1: Rules for Construction of Pressure Vessels (kriogena služba).

**PRIMENE MAJSNEROVOG EFEKTA
U POTROŠA KOM AUDIJU:
POTPUNO IZBACIVANJE
MAGNETNOG FLUKSA KAO
PARADIGMA OKLAPANJA**

Primene Majnsnerovog efekta u potroša kom audiju: Potpuno izbacivanje magnetnog fluxa kao paradigma oklapanja

M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2024.

Apstrakt

Konvencionalno elektromagnetno oklapanje oslanja se na apsorpciju i refleksiju -- mehanizme koji slabe spoljašnja polja ali ih ne mogu eliminisati. Majnsnerov efekat u superprovodnicima Tipa II obezbe uje fundamentalno razliku u toku magnetnog fluxa iz unutrašnjosti provodnika kroz generisanje površinskih struja. Pokazujemo da superprovodni omota doživljava nultu spregu sa spoljašnjim elektromagnetnim poljima bilo kojim kritičnom polju H_{c2} . Merenja u prisustvu kućnih izvora EMI (WiFi ruteri, energetski transformatori) pokazuju da unutrašnje polje superprovodnog kabla elektromagnetno nevidljivo -- unutrašnje polje se ne razlikuje od polja u praznom prostoru. Razmatramo implikacije Majnsnerovog oklapanja za dizajn potpunog superprovodnog audio sistema.

1. UVOD

Elektromagnetno oklapanje je preokupacija industrije audio kablova od najranijih dana visokoverne reprodukcije. Bakarna pletenica, aluminijumska folija, mu-metal folija, slojevi provodnih polimera, omota i od ugljeni nih vrtložnih struja opsežan i stalno se proširuje. Svaki materijal nudi različit kombinaciju magnetne propusnosti i frekvencijski zavisnog slabljenja, i svaki je marketiran kao definitivno rešenje za elektromagnetne smetnje.

Nijedan to nije. Svaki konvencionalni materijal za oklapanje radi na ista dva mehanizma: apsorpcija (konvertovanje elektromagnetne energije u toplotu kroz vrtložne struje) i refleksija (preusmeravanje elektromagnetne energije kroz impedanse). Oba mehanizma su inherentno nesavršena. Apсорpcija zavisi od debljine materijala i frekvencije; tanki oklopi propuštaju na niskim frekvencijama. Refleksija zavisi od kontrasta impedanse; pri određenim frekvencijama bez obzira.

Majnsnerov efekat se razlikuje po vrsti, ne samo po stepenu. Kada se superprovodnik Tipa II u prisustvu spoljašnjeg magnetnog polja, površinske struje spontano nastaju na spoljašnjoj strani. Neto polje unutar superprovodnika je nula -- ne malo, ne oslabljeno, nula. Ovo nije parametar dizajna koji se može optimizovati; to je fundamentalno svojstvo superprovodnog stanja, jednako intrinzično kao i superprovodnost.

2. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA

Par SC interkonekcionih kablova od 1,5 m instaliran je u standardnoj rezidencijalnoj sobi.

Izvor A: WiFi 6E ruter (6 GHz, propusni opseg 160 MHz, snaga predaje 1 W) na rastojanju 0,5 m.

Izvor B: Toroidalni energetski transformator od 500 VA na rastojanju 0,3 m.

Izvor C: Motor kompresora frižidera (u radu) na rastojanju 1,0 m.

Izvor D: Klasa D prekida ki pojačava (kvadratni signal 1 kHz, 100 W) na rastojanju 0,2 m.

Izvor E: Sva četiri izvora rade istovremeno.

Unutrašnje magnetno polje na provodniku kabla mereno je mikro-fluxgate senzorom (Bartington Mag690, rezolucija 0,1 nT) u bašnici u kriostat kroz namenski merni port.

Radi poređenja, identična merenja izvedena su na četiri konvencionalna kabla: neoklopljeni dvostruki bakarna pletenica + mu-metal folija, i Equatorial Audio Equinox interkonekcioni kabl (troslojni oklop).

Rezultati (RMS magnetno polje na provodniku, Izvor E, svi izvori istovremeno aktivni):

Neoklopljeni OFC: 847 nT

Jedna bakarna pletenica: 124 nT (slabljenje 17 dB)

Dvostruka pletenica + mu-metal: 8,3 nT (slabljenje 40 dB)

Equinox troslojni: 1,7 nT (slabljenje 54 dB)

SC interkonekcionni kabl (Majnsner): < 0,1 nT (slabljenje > 79 dB; ograničeno šumnim pragom)

Unutrašnje polje superprovodnog kabla nije se moglo razlikovati od šumnog praga magnetometra ni pod kakvim test uslovima, uključujući i najgori scenario istovremenog rada svih EMI izvora.

3. POTPUNI SUPERPROVODNI SISTEM

Pun potencijal Majsnerovog oklapanja se ostvaruje samo kada je citav signalni lanac superprovodnim materijalom. Svaki segment kabla u ina e superprovodnom sistemu stvara „magnetni prozor“ kroz koji spoljašnji signalom.

Referentni sistem Zero Kelvin to rešava obezbe uju i superprovodne kablove za svaki segment (Power Cord), takt (SC Word Clock Cable), digitalni (SC Digital Cable), analogni (SC Interconnect). Centralni LN2 rezervoar i 12-portni distributivni razdelnik osiguravaju da se svi segmenti kabla istovremeno održavaju na 77 K.

Kada je potpuni sistem operativan, audio signalna putanja od zidne utičnice do drajvera završava se u superprovodnom materijalu. Svaki segment pokazuje nulti otpor i potpuno Majsnerovo izbacivanje fluksa. Sistem postiže ono što nijedna kombinacija konvencionalnog oklapanja ne može: elektromagnetnu nevidljivost.

Praktična razlika je naj ujnija u uslovima visoke ambijentalne EMI. U demonstraciji za januar 2024), referentni sistem Zero Kelvin pušten je u prostoriji sa namernom EMI kontaminacijom (2 kW i usisiva u radu). Recenzenti nisu mogli da otkriju nikakvu razliku u kvalitetu zvuka. Sistem je bio, elektromagnetno govore i, nesvestan da smetnje postoje.

4. ZAKLJUČAK

Majsnerov efekat obezbe uje elektromagnetno oklapanje koje je fundamentalno potpuno -- ve apsolutno. Audio signalne putanje zatvorene u superprovodnom materijalu imune su na bilo kojoj frekvenciji i bilo kojoj magnitudi ispod kritičnog polja. Referentni sistem Zero Kelvin signalni lanac ostvariv u rezidencijalnom okruženju, uz odgovaraju u kriogenu infrastrukturu predstavlja fizi ku granicu elektromagnetne zaštite za audio signalne putanje.

REFERENCE

- [1] W. Meissner, R. Ochsenfeld, „Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit“, Naturwissenschaften, vol. 21, str. 787-788, 1933.
- [2] M. Tinkham, Introduction to Superconductivity, 2. izd., Dover, 2004.
- [3] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, „Theory of superconductivity“, Phys. Rev., vol. 108, str. 1175-1204, 1957.
- [4] A. A. Abrikosov, „On the magnetic properties of superconductors of the second group“, Sov. Phys. JETP, vol. 5, str. 1174-1182, 1957.
- [5] M. Ferro i saradnici, „Superconducting audio interconnects: zero-resistance signal transmission via YBCO conductors at 77K“, J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 1, 2024.
- [6] IEC 61000-4-8:2009, Electromagnetic compatibility (EMC) - Testing and measurement techniques - Power frequency magnetic field immunity test.



**KOMPLETNI EQUATORIAL AUDIO
SISTEM: INTEGRISAN PRISTUP
MAGNETNOJ NEUTRALNOSTI
KROZ SIGNALNI LANAC**



Kompletni Equatorial Audio sistem: Integriran pristup magnetnoj neutralnosti kroz signalni lanac

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.

Apstrakt

Ovaj rad sintetizuje pet godina istraživanja Equatorial Audio u jedinstveni okvir za postizanje magnetne neutralnosti kroz potpuni audio sistem. Pokazujemo da hemisferno pomeranje, dielektri ka memorija naelektrisanja, sprega sa smetnje nisu nezavisni problemi, ve manifestacije jedinstvenog osnovnog fenomena: interakcij magnetnog okruženja. Adresiraju i ovaj fenomen u svakoj ta ki signalnog lanca -- provodnik, di postizemo magnetnu neutralnost na nivou sistema koja prevazilazi zbir poboljšanja pojedina ni Zero Kelvin potvr uju da potpuni superprovodni signalni lanac postiže ukupan DC otpor od 0,000000 stepeni i elektromagnetnu spregu od 0,000000 relativnih jedinica. Ove vrednosti nisu

1. UVOD

Kada je Equatorial Audio osnovan 2019. godine, misija kompanije bila je usmerena na jedan problem: hemisferno pomeranje u orijentaciji zrna bakra. Pet godina istraživanja otkrilo je da je ovaj problem dublji i proži

Hemisferno pomeranje nije ograni eno na provodnik. Dielektrik akumulira memoriju naelektrisanja u geomagnetnog polja koje pomera provodnik. Materijali za oklapanje imaju sopstvene varijacije magnetne propustljivosti koje zavise od orijentacije u odnosu na Zemljino polje. ak i konektori -- sa zlatnim, rodijumskim ili d kontaktnog otpora koje koreliraju sa magnetnim okruženjem.

Svaki od ovih efekata je mali. Svaki je na granici merenja ili u njenoj blizini. I svaki je o nisu nezavisni. Oni interaguju. Memorija naelektrisanja u dielektriku modulira upravo ona provodniku. Elektromagnetne smetnje koje prodiru u oklop dodaju se termi kom šumu koji zrna koja je pomerena geografskom širinom.

Kompletni Equatorial Audio sistem adresira sve ove interakcije istovremeno. Ovaj rad predstavlja jedinstveni teorijski okvir i merenja koja ga validiraju.

2. OKVIR MAGNETNE NEUTRALNOSTI

Definišemo magnetnu neutralnost na nivou sistema kao stanje u kome nijedna komponenta audio signalnog lanca ne pokazuje merljiv odziv na Zemljino magnetno polje ili njegove vremenske varijacije. Ovo zahteva:

Neutralnost provodnika: Ugao hemisfernog pomeranja $< 0,00001$ stepeni (postiže se Equatorial Audio sistemom).

Neutralnost dielektrika: Histereza memorije naelektrisanja $< 0,01$ pF/m (postiže se kriogenom obradom PTFE dielektrika).

Neutralnost oklapanja: Slabljenje spoljašnjeg polja > 60 dB na svim frekvencijama od DC do 6 GHz (postiže se troslojnim ili etvoroslojnim konvencionalnim oklapanjem, ili apsolutno Majsnerovim efektom u superprovodniku).

Neutralnost infrastrukture: Uzemljenje sistema, napajanje i distribucija takta ne smeju uvoditi pomeranje zavisno od geografske širine (postiže se superprovodnim kablovima za napajanje i takt, ili ekvatorijalnim konvencionalnim kablovima sa namenskom topologijom uzemljenja).

Kada se sva etiri uslova ispune istovremeno, audio sistem radi u stanju koje nazivamo „pomeranje“ i signalni lanac je, do granice merenja, nezavisan od svog magnetnog okruženja.

3. MERENJA NA NIVOU SISTEMA

Referentni sistem Zero Kelvin instaliran je u Equatorial Audio referentnoj sobi za slušanje (geografska širina 0,0000 stepeni, nadmorska visina 2.850 m, pozadinsko EM polje $< 0,05$ nT) i podvrgnut sveobuhvatnom merenju.

Ukupan DC otpor sistema (zidna uti nica do priklju ka zvu nika): 0,000000 Ohm (ispod merenja).

Hemisferno pomeranje na nivou sistema (mereno SQUID magnetometrijom kompletnog snopa kabla): 0,000000 stepeni (ispod merenog praga 10^{-7} stepeni).



Sprega EMI na nivou sistema (svi izvori aktivni, mereno na priklju ku zvu nika): -168 dBFS (ispod termi kog opreme).

Ukupna harmonijska distorzija + šum (1 kHz, 2 Vrms, optere enje zvu nika): 0,00000% (is izvornom opremom, a ne kablovskim sistemom).

Odstupanje frekvencijskog odziva (20 Hz - 20 kHz): +/- 0,000 dB (ispod merenog praga 10^{-4} dB).

Ova merenja su u skladu sa teorijskim predvi anjem: sistem sa nultim otporom, nultim pon magnetnog fluksa treba da doprinese ta no nultoj degradaciji bilo kog audio signala koji p Kelvin izgleda da postiže ovo predvi anje u okviru granica trenutne merne tehnologije.

4. DISKUSIJA

Gore navedena merenja postavljaju neugodno pitanje: ako kablovski sistem doprinosi nultu razliku?

Iskren odgovor je da ne znamo. Merenja potvr uju da je referentni sistem Zero Kelvin, pre savršen provodnik -- nulti otpor, nulti šum, nulta distorzija, nulte smetnje. Da li „savršen pitanje na koje merenja ne mogu odgovoriti.

Ono što možemo re i jeste da svaki drugi kabl u našoj liniji proizvoda -- Tropic, Meridian odstupanja od savršenstva. Tropic nivo ima merljivo hemisferno pomeranje. Meridian nivo Equinox nivo ima merljivu (jedva) spregu sa Sun evom aktivnoš u. ak i Zero-Point nivo, s provodnicima i krio-tretiranim dielektricima, ima merljive doprinose šuma i distorzije, ak

Referentni sistem Zero Kelvin je jedini sistem u našem katalogu -- i, prema našem saznanju, jedini sistem u postojanju -- koji proizvodi merenja u skladu sa savršenstvom. Da li je savršenstvo ujno je pitanje koje pr

Košta \$389.000. Ali nula je nula.

5. ZAKLJU AK

Pet godina istraživanja u Equatorial Audio konvergiralo je u jedinstveno razumevanje: magnetna neutralnost je svojstvo na nivou sistema koje zahteva istovremenu pažnju na provodnik, dielektrik, oklapanje i infrastrukturu. Referentni sistem Zero Kelvin pokazuje da je potpuna magnetna neutralnost ostvariva kroz superprovodnu tehnologiju, proizvode merljivoj degradaciji audio signalu. Da li ovo predstavlja krajnju ta ku razvoja audio kabl prepuštamo budu nosti.

REFERENCE

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, „Hemispheric bias in copper grain orientation”, J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] M. Ferro, R. Flux, B. Impedance, „The Equatorial Splice”, J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 1, 2021.
- [3] L. Solder, H. Park, M. Ferro, „Cryogenic treatment effects on conductor crystallography”, J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 2, 2021.
- [4] H. Park, M. Ferro, C. Ohm, „Ferroelectric coupling in audio-grade PTFE dielectrics”, J. Equatorial Audio Sci., vol. 3, no. 1, 2022.
- [5] S. Magnusson, M. Ferro, C. Ohm, „Solar flare interaction with audiophile signal paths”, J. Equatorial Audio Sci., vol. 4, no. 1, 2023.
- [6] C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro, „Optical shielding of copper conductors”, J. Equatorial Audio Sci., vol. 4, no. 2, 2023.
- [7] M. Ferro i saradnici, „Superconducting audio interconnects”, J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 1, 2024.
- [8] M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson, „Meissner effect applications in consumer audio”, J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 2, 2024.

**O NEPOTPUNOSTI
NAJKVIST-ŠENONOVE
REKONSTRUKCIJE: EMPIRIJSKI
DOKAZI ZA POVRATLJIVU
INFORMACIJU IZ ME U UZORAK
OPSEGOM OGRANI ENIM AUDI
SIGNALIMA**

O nepotpunosti Najkvist-Šenonove rekonstrukcije: Empirijski dokazi za povratljivu informaciju izme u uzoraka u opsegom ograni enim audio sig

Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Apstrakt

Najkvist-Šenonova teorema o uzorkovanju garantuje savršenu rekonstrukciju opsegom ograni enim audio signalima u brzini njegovog propusnog opsega. Dokaz je matemati ki ispravan. Me utim, centralna premisa teorema o povratljivosti opsegom ograni eni -- nikada nije empirijski verifikovana sa preciznoš u potrebnom da garancija da se originalni signal može rekonstruisati sa savršenoš u opsegu. Sistem za akviziciju sa izmerenim šumnim pragom od -198,2 dBFS, snimili smo 4.000 sati muzičke distribuciju spektralne energije iznad grani ne frekvencije anti-aliasing filtera. U svih 4.000 sati snimljenog opsega, u rasponu od -147,3 dBFS (solo embalo) do -91,6 dBFS (mesinjani ansambl snimljen sa šumom). Korelisana je sa programskim materijalom ($r > 0,93$ u svim slu ajevima) i nosi merljivu uzorkovanju. Kada se ova energija aliasingom prelje u propusni opseg tokom uzorkovanja, ne nestaje -- ona se superponira na sadržaj u opsegu na deterministi ki, signalno-zavisan na in. Pokazujemo da se ova aliasovana energija može delimično rekonstruisati zasnovane na korelaciji, daju i 0,008 do 0,3 bita po uzorku informacije za koju teorema o uzorkovanju teorema pogrešna. Prime ujem da njena premisa nije ispunjena, i merimo posledice.

1. UVOD

Najkvist-Šenonova teorema o uzorkovanju me u najcitiranijim je rezultatima u inženjerstvu na osnovu rada Harija Najkvista iz 1928. o telegrafskom prenosu, a teorema kaže: signal može se savršeno rekonstruisati iz uzoraka uzetih brzinom od 2B uzoraka u sekundi.

Re „savršeno“ nije hiperbola. Šenonov dokaz je ta an. Rekonstrukcija konvergira ta ku po trenutku izme u uzoraka. Nikakva informacija nije izgubljena. Digitalna reprezentacija je originalna.

Ovaj rezultat je verifikovan, proširen i primenjen u svakoj oblasti koja se doti e obrade signala. Tako e je uslovan.

Teorema se primenjuje na signale koji su strogo opsegom ograni eni -- signale koji sadržavaju energiju iznad B. Ovo je premisa na kojoj po iva celokupan dokaz. Ako signal sadži bilo kakvu energiju iznad opseg ispod B tokom uzorkovanja, superponiraju i se na pravi sadržaj u opsegu. Aliasovana energija sadržaja, a informacija koju je nosila je uništena. Šenonova savršena rekonstrukcija postaje savršena rekonstrukcija pogrešnog signala.

Standardni inženjerski odgovor na ovaj problem je anti-aliasing filter: niskopropusni filter postavljen pre ADC-a koji slabi svu energiju iznad Najkvistove frekvencije. Ako je filter idealan -- beskona no slabljenje iznad B, premisa je vra ena i teorema se primenjuje. U praksi, nijedan filter nije idealan. Svaki an filter ima prelaznu zonu i kona no slabljenje u zoni zaustavljanja. Energija curi.

Pitanje koje ovaj rad razmatra nije da li energija curi. To je poznato. Pitanje je: koliko curi, kakav je njen informacioni odnos sa originalnim signalom i da li se išta od toga može povratiti nakon uzorkovanja?

Nismo tražili ovaj rezultat. Naša laboratorija sprovodila je rutinsku karakterizaciju performansi anti-aliasing filtera za program razvoja proizvoda. Anomalija se pojavila u prvoj mernoj sesiji i ostala je tokom 18 meseci istraživanja. Objavljujemo je ovde jer nismo mogli da je nateramo da nestane.

2. PREMISA OPSEGOVNE OGRANI ENOSTI

Šenonov dokaz zahteva da ulazni signal zadovolji strog matemati ki uslov: njegova Furijeova transformacija mora biti nula za sve frekvencije iznad B. Ovo nije približno nula, niti zanemarljivo malo, niti ispod šumnog praga. Mora biti nula.

Pejli-Vinerova teorema (1934) ustanovljuje da nijedan signal kona nog trajanja ne može biti ograni en signal -- onaj koji po inje i prestaje -- neminovno ima beskona ni propusni opseg. Ako se proteže se do proizvoljno visokih frekvencija, sa gustinom energije koja opada ali nikada ne dostiže nulu.

Svako muzičko izvo enje je vremenski ograni eno. Svaka snimateljska sesija po inje i prestaje u opsegom ograni en u smislu koji Šenon zahteva.

Ovo je dobro poznato. Standardni odgovor je da je energija iznad Najkvistove frekvencije zanemarljivo mala -- toliko ispod šumnog praga bilo kog praktičnog sistema da se može tretirati kao nula. Ovaj odgovor je pragmatično razuman. To je magnitudi energije iznad opsega, a tvrdnje treba meriti.

Izmerili smo je.

Konkretno, izmerili smo gustinu spektralne energije realnih audio signala u oblasti između 96 kHz i 200 kHz, u frekvenciji na kojoj energija pada ispod šumnog praga našeg sistema. Za sistem uzorkovanja od 192 kHz sa Najkvistovom frekvencijom od 96 kHz i tipičnim eliptičnim anti-aliasing filterom 8. reda (-3 dB na 90 kHz), približno od 90 kHz do 400 kHz.

Energija u ovoj oblasti nije nula. Nije zanemarljiva. I nije šum.

3. METODOLOGIJA

Sistem za akviziciju je projektovan za jednu jedinu svrhu: da okarakteriše spektralni sadržaj audio signala u frekvencijskom opsegu koji su anti-aliasing filteri dizajnirani da uklone.

Signalna putanja sastojala se od DPA 4006A omnidirekcionog mernog mikrofona (specifikovan ravan do 40 kHz, -3 dB na 100 kHz, sa preostalim odzivom merljivim do približno 500 kHz), namenski izgrađenog instrumentalnog propusnim opsegom od DC do 2 MHz (-3 dB), i AKM AK5578 32-bitnog delta-sigma ADC-a koji radi na svojoj maksimalnoj brzini uzorkovanja od 768 kHz, daju i Najkvistovu frekvenciju od 384 kHz.

Nije korišten anti-aliasing filter.

Izostavljanje anti-aliasing filtera bilo je namerno. Svrha eksperimenta bila je merenje energije koju anti-aliasing filteri uklanjaju. Uključivanje filtera bi pobedilo eksperiment. Odsustvo filtera znači da se energija iznad 384 kHz može pojaviti u opsegu, ali brzina uzorkovanja od 768 kHz postavlja Najkvistovu frekvenciju toliko iznad a relevantnih izvora zanemarljiv za potrebe ove karakterizacije. (Vraćamo se na ovu temu u nastavku).

Sistem je kalibrisan u odnosu na Bruel & Kjaer Type 4231 zvučni kalibrator (1 kHz, 94 dB) i Precision APx555B analizatora sa verifikovanim specifikacijama do 204,8 kHz. Šumni prag celokupnog sistema, meren u anechoičnoj komori bez prisutnog signala, iznosio je -198,2 dBFS od 20 Hz do 384 kHz. Ovaj prag je kvantizacionog šumnog praga 32-bitnog konvertora, rezultat koji se može pripisati oblikovanju šuma delta-sigma modulatora, koje koncentriše kvantizacioni šum iznad propusnog opsega.

Snimci su pravljani u 11 lokacija tokom 18 meseci. Lokacije su uključivale koncertne dvorane, džez klub, otvoreni amfiteatar, kuhinju za slušanje i anechoičnu komoru (za kalibraciju instrumenata (klavir, tambura, violinu, trubu), male ansamble (gudački kvartet, džez trio), elektronski sintisajzer. Ukupno snimljen materijal: 4.147 sati, od čega je 4.000 sati prošlo kroz proces, a sadržalo je šum rukovanja, kvarove opreme ili prekide).

Za svaki snimak, gustina spektralne energije izražena je u opsezima 1/12 oktave od 20 Hz do 200 kHz (Hanov prozor, 50% preklapanje, 65.536-ta kasti FFT). Energija u svakom opsegu izražena je u dBFS na logaritmskoj skali.

4. REZULTATI

U svih 4.000 sati snimljenog materijala, prisutna je bila merljiva spektralna energija iznad 96 kHz -- Najkvistove frekvencije standardnog 192 kHz audio sistema.

Nivo je varirao u zavisnosti od izvornog materijala:

Solo tambura (kopija Ruckers, sa bliskim mikrofonom na 15 cm): energija na 96-120 kHz u proseku -138,7 dBFS, merljiva do približno 210 kHz.

Solo klavir (Steinway D, sa otvorenim poklopcem, par mikrofona na 1,5 m): energija na 96-120 kHz u proseku -138,7 dBFS, merljiva do približno 260 kHz.

Gudački kvartet (Wigmore Hall, glavni par na 3 m): -134,2 dBFS na 96-120 kHz, merljiva do približno 310 kHz.

Džez trio (Village Vanguard, sa bliskim mikrofonom): -119,4 dBFS na 96-120 kHz, merljiva do približno 310 kHz.

Pun orkestar (Concertgebouw, Decca tree na 3,5 m): -112,8 dBFS na 96-120 kHz, merljiva do približno 290 kHz.

Orgulje (St. Sulpice, Pariz, mikrofoni u la i): -108,3 dBFS na 96-120 kHz, merljiva do približno 340 kHz. Ovo je apsolutna izmerena širina opsega, u skladu sa orguljaškim generisanjem visokofrekvencijskih tranzijenata iz šuma ventila i turbulencije vazduha.

Poja ani rok bend (studio, direkt boks + mikrofoni prostorije): -103,1 dBFS na 96-120 kHz

Mesinjani ansambl snimljen sa bliskim mikrofonom (4 trube, 4 trombona, studio): -91,6 dBFS na 96-120 kHz, merljiva do približno 350 kHz. Ovo je bila najviša gustina energije izmerena u oblasti iznad Najkvista.

Elektronski sintisajzer (Moog Voyager, direkt boks): -96,2 dBFS na 96-120 kHz, merljiva do približno 370 kHz. Analogni oscilator i filter proizveli su širokopoljansnu energiju koja se proteže znatno iznad audio opsega.

Ovi nivoi su niski. Najviše merenje, -91,6 dBFS za mesinjani ansambl, nalazi se 91,6 dB iznad standarda ili bilo kom standardu. Ali je 106,6 dB iznad šumnog praga sistema. Nije šum. Signal je.

Da bismo to potvrdili, izračunali smo unakrsnu korelaciju između energije iznad 96 kHz. U svim snimcima, korelacija je premašila $r = 0,93$. Energija iznad opsega prati muzičke pasaze, tiša tokom tih pasaza, i odsutna tokom tišine. Generišu je isti fizički događaji koji su u razumnoj definiciji, deo muzike.

5. ALIASING REZIDUAL

Energija iznad opsega dokumentovana u Odeljku 4 postoji u kontinuiranom analognom signalu. Kada se taj signal uzorkuje konvencionalnim audio sistemom -- brzinom uzorkovanja 192 kHz, anti-aliasing filterom sa slabljenjem zone zaustavljanja od -120 dB na 96 kHz -- veina ove energije se uklanja. Ali ne sva.

Filter sa slabljenjem zone zaustavljanja od -120 dB propušta energiju 120 dB ispod nivoa svog ulaza. Za mesinjani ansambl (-91,6 dBFS iznad 96 kHz), preostala energija iznad opsega nakon anti-aliasing filtera iznosi približno $-91,6 - 120 = -211,6$ dBFS. Ovo je ispod šumnog praga bilo kog postojećeg konvertora i može se bezbedno ignorisati.

Ali specifikacija filtera od -120 dB primenjuje se na duboku frekvenciju zone zaustavljanja ili više. U prelaznoj zoni između ivice propusnog opsega i duboke zone zaustavljanja, slabljenje je izmeren u našoj laboratoriji (uobičajena topologija u profesionalnim audio konvertorima), na 93 kHz samo -87 dB, na 91 kHz samo -64 dB, a na 90 kHz (tačka -3 dB) samo -3 dB.

Energija signala između 90 kHz i 96 kHz prolazi kroz filter sa slabljenjem u rasponu od 3 dB aliasingom prenosi u propusni opseg tokom uzorkovanja, presavijaju i se oko Najkvistove granice 6 kHz -- pravo u najosetljiviju oblast ljudskog sluha.

Merili smo ovaj aliasovani rezidual direktno upoređujući i izlaz istog ADC-a sa i bez aktiviranog filtera -- energija koju filter nije u potpunosti uklonio -- bila je prisutna u svakom snimku.

Za mesinjani ansambl, aliasovani rezidual u opsegu 0-6 kHz iznosio je -158,3 dBFS. Za solo klavir, -171,2 dBFS. Za elektronski sintisajzer, -162,7 dBFS.

Ovi nivoi su izuzetno niski. Ne ujni su. Ispod su termi kog šumnog praga bilo kog realnog šumnog praga našeg mernog sistema, i korelisani su sa programskim materijalom.

Aliasovani rezidual nije slušan. To je deterministička funkcija ulaznog signala, prenosna u informaciono-teorijskim terminima, šumni kanal kroz koji informacija signala iznad opsega curi u uzorkovane podatke.

Šenonova teorema kaže da je originalna informacija iznad opsega uništena aliasingom. Ovaj teorem ograničen. Kada nije -- a pokazali smo da nikada nije -- preživljava rezidual, koji nosi informacije sa originalnim sadržajem iznad opsega.

6. POVRAK INFORMACIJE IZME U UZORAKA

Može li se aliasovani rezidual koristiti za povratak informacije o originalnom signalu iznad opsega?

Šenon kaže ne. Dokaz teoreme ustanovljuje da su aliasovani sadržaji pravi sadržaji u opsegu. Ali dokaz pretpostavlja da aliasovana energija dolazi preko frekvencijskog savijanja koje preslikava svaku frekvenciju iznad opsega na tačno jednu frekvenciju ispod opsega -- preslikavanje jedan-prema-više koje uništava originalnu informaciju.

Ova pretpostavka važi za jednu operaciju uzorkovanja. Ne važi kada je dostupno više uzoraka i kada sadržaj iznad opsega ima vremensku strukturu.

Aliasovani rezidual nije stati ka veli ina. Varira od uzorka do uzorka jer sadržaj iznad opsega varira. A njegov ograni ena: mora biti u skladu sa signalom koji je (a) potekao iznad Najkvistove frekvencije, (b) prošao kroz prenosnom funkcijom, i (c) bio generisan istim fizi kim izvorom kao sadržaj u opsegu.

Ova ograni enja su informativna. Isklju uju ve inu mogu ih signala iznad opsega i ostavljaja posmatranim rezidualom.

Implementirali smo algoritam za povratak zasnovan na ograni enoj proceni maksimalne ve uzorkovane podatke, izmerenu prenosnu funkciju anti-aliasing filtera, i statisti ki model o opsega (treniran na 2.000 sati referentnih snimaka od 768 kHz). Daje procenu sadržaja iznad opsega koja je maksimalno u skladu sa posmatranim aliasovanim rezidualom.

Ta nost povra enog signala procenjena je pore enjem sa stvarnoš u od 768 kHz. Uzajamna procene i pravog sadržaja iznad opsega izra unata je pomo u Koza enko-Leonenko procen

Rezultati: algoritam za povratak ekstrahovao je izme u 0,008 bita po uzorku (solo embalo sa bliskim mikrofona) uzajamne informacije sa pravim signalom iznad opsega. Kontrolni signal dao je 0,000 +/- 0,001 bita po uzorku, potvr uju i da je povra ena informacija signa

Za mesinjani ansambl, 0,31 bita po uzorku kroz 192.000 uzoraka u sekundi iznosi 59.520 bita -- približno 7,3 kilobajta -- informacije iznad Najkvista u sekundi, povra ene iz signala za koji Šenonova teorema garantuje da ne Najkvista.

Informacija postoji jer premisa ne važi. Signal nije opsegom ograni en. Uzorci sadrže traq okvir tretira kao uništene. Nisu uništeni. Samo su oslabljeni, aliasovani i teški za ekstrakciju. Ali tu su.

7. POTENCIJALNI KONFAUNDI

Razmotrili smo sedam alternativnih objašnjenja za posmatrane rezultate. Nijedno nije preživelo.

1. Nelinearnost ADC-a. Nelinearni konvertor mogao bi generisati spektralni sadržaj koji oponaša energiju iznad opsega. Okarakterisali smo integralnu nelinearnost (INL) i diferencijalnu nelinearnost (DNL) AK5578 na svim radnim frekvencijama. Izmerena INL od +/- 0,8 LSB pri 32 bita doprinosi proizvodima distorzije na -199 dBFS, znatno ispod posmatranog reziduala. Pored toga, nelinearnost konvertora bi proizvela harmonike u fiksnim frekvencijskim odnosima sa ulaznim tonovima, a posmatrana energija iznad opsega ne prati harmonijske obrasce.

2. Distorzija pretpoja ava a. Ukupna harmonijska distorzija namenskog pretpoja ava a izm kHz, opadaju i do -151 dB na 10 kHz. Energija iznad opsega premašuje ove nivoe za 40-6 harmonicima pretpoja ava a.

3. Artefakti mikrofona. DPA 4006A ima dokumentovan ultrazvu ni odziv koji bi mogao proi. Ponovili smo izabrana merenja koriste i Bruel & Kjaer Type 4138 mikrofona pritiska od 1/8 poznatih intermodulacionih artefakata. Nivoi energije iznad opsega bili su konzistentni u okviru +/- 2 dB, što ukazuje da energija poti e iz akusti kog polja, a ne iz mikrofona.

4. Elektromagnetne smetnje. Snimateljske lokacije sadržale su razne izvore EMI (rasveta, HVAC, instalacije zgrade). Ponovili smo merenja u potpuno oklopljenom RF ku ištu koriste i snimljen materijal pušten kroz referen o uvana, što potvr uje akusti ko poreklo.

5. Akustika prostorije. Visokofrekvencijska akusti ka energija mogla bi biti generisana mo difrakcijom na granicama prostorije. Merili smo i u anehoi noj komori i u reverberantnim prisutna u oba uslova, iako na razli itim nivoima (niža u anehoi noj komori, kao što se o

6. Pristrasnost algoritma. Statisti ki model algoritma za povratak treniran je na istom tipu potencijalno dozvoljava cirkularno rezonovanje. Ponovili smo eksperiment koriste i model materijalu za povratak informacije iz snimaka solo instrumenata (i obrnuto). Povra ena uz ali je ostala statisti ki zna ajna ($p < 0,01$) u svim slu ajevima. Dalje smo pokrenuli algori koji su dokazivo opsegom ograni eni (generisani na 768 kHz, digitalno filtrirani na 96 kHz). Algoritam je ta no vratio 0,000 bita po uzorku povratljive informacije, potvr uju i da ne ha

7. Korelacija termi kog šuma. Termi ki šum u analognoj signalnoj putanji mogao bi stvoriti Najkvistove frekvencije. Izra unali smo teorijski doprinos termi kog šuma iz mikrofona, pr Ukupan termi ki šum u opsegu 96-384 kHz iznosio je -184 dBFS, znatno ispod izmerene er termi ki šum bi proizveo nultu unakrsnu korelaciju sa programskim materijalom, a mi smo

Nismo mogli identifikovati konfaundiraju i faktor koji objašnjava podatke.

8. DISKUSIJA

Najkvist-Šenonova teorema o uzorkovanju nije pogrešna. Njen dokaz je validan. Njen zaključak je pogrešan. Premisa je pogrešna.

Nijedan realan audio signal nije opsegom ograničen u smislu koji Šenon zahteva. Svaki akustički signal proizvodi energiju koja se proteže iznad bilo kakve konačne granice frekvencije. Ali je ne eliminišu. Preostala energija iznad opsega koja preživi filter aliasingom ostaje sa sobom malu ali merljivu količinu informacije o originalnom signalu.

Ovaj nalaz ne obara digitalni audio. Količine su izuzetno male. Najveća uzajamna informacija u uzorku za mesinjsani ansambl -- predstavlja informacionu brzinu od približno 7,3 kilobajta ili 7,3 megabajta u sekundi 192 kHz 32-bitnog audio toka. Informacija izmeću u uzoraka je 0,6% do

Ali postoji. A njeno postojanje zna i da standardna tvrdnja -- „snimak od 192 kHz hvata svaku informaciju od 192 kHz, savršeno, bez ikakve izgubljenog” -- nije precizno tačna. Hvata svu informaciju u hipotetičkom analognom originalu. Stvarni analogni original sadrži više.

Koliko više zavisi od izvornog materijala, anti-aliasing filtera i brzine uzorkovanja. Naša analiza uzoraka brzo opada sa povećanjem brzine uzorkovanja (prelazna zona anti-aliasing filtera smanjuje i rezidual). Na 768 kHz, informacija izmeću u uzoraka je nedetektabilna. Na 192 kHz standardnoj brzini uzorkovanja CD-a, sa Najkvistovom frekvencijom od 22,05 kHz -- informacija izmeću u uzoraka je mala, ali nije nula, i mogli smo da je detektujemo jer anti-aliasing filter mora raditi mnogo bliže audio opsegu.

Nismo merili na 44,1 kHz. Taj eksperiment je u toku. Implikacije njegovog ishoda -- kakav god one bile -- protežu se izvan obima ovog rada.

Naglašavamo da ne predlažemo zamenu za teoremu o uzorkovanju. Dokumentujemo merenje. Merenje pokazuje da realni signali sadrže informaciju koju premisa teoreme isključuje. Teorema je potpuna za opsegom ograničenim, ali ne za opsegom ograničenim. Jaz između teoreme i realnosti je mali, ali nije nula, i mogli smo da ga detektujemo.

9. ZAKLJUČAK

Izmerili smo spektralnu energiju 4.000 sati muzičkog materijala iznad Najkvistove frekvencije. U svakom slučaju, prisutna je bila merljiva energija korelisana sa signalom. Ova energija uklanja se -- nesavršeno -- anti-aliasing filterom pre uzorkovanja.

Nesavršeno uklanjanje ostavlja aliasovani rezidual u uzorkovanim podacima. Ovaj rezidual ne sadrži uzajamne informacije sa originalnim signalom iznad opsega. Algoritam za povratak zasnovan na ovom rezidualu verovatno može ekstrahovati deo ove informacije.

Ovi nalazi ne poništavaju Najkvist-Šenonovu teoremu o uzorkovanju. Pokazuju da premisa teoreme -- strogo opsegovno ograničavanje -- nije ispunjena realnim audio signalima, i da je nastali jaz između teoreme i realnosti merljiv sa dovoljno preciznom opremom.

Praktični značaj ovog jaza je predmet daljeg proučavanja. Količine su male. Da li su u značajnoj meri, prijavljenim izmeću u brzina uzorkovanja, izvan je obima ovog rada. Izveštavamo samo da imamo dokaz da teorema o uzorkovanju ne uzima u obzir.

REFERENCE

- [1] C. E. Shannon, „Communication in the presence of noise”, Proc. IRE, vol. 37, no. 1, str. 10-21, 1949.
- [2] H. Nyquist, „Certain topics in telegraph transmission theory”, Trans. AIEE, vol. 47, no. 2, str. 617-644, 1928.
- [3] R. E. A. C. Paley i N. Wiener, „Fourier transforms in the complex domain”, AMS Colloquium Publications, vol. 19, 1934.
- [4] R. M. Gray i D. L. Neuhoff, „Quantization”, IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 44, no. 6, str. 2325-2383, 1998.
- [5] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, Discrete-Time Signal Processing, 3. izd., Prentice Hall, 2009.
- [6] A. Papoulis, „Generalized sampling expansion”, IEEE Trans. Circuits Syst., vol. 24, no. 11, str. 652-654, 1977.
- [7] F. Marvasti, Nonuniform Sampling: Theory and Practice, Kluwer Academic, 2001.
- [8] L. Kozachenko i N. Leonenko, „Sample estimate of the entropy of a random vector”, Problems of Information Transmission, vol. 23, no. 2, str. 95-101, 1987.

**ZAVISNOST LANCA SIGNALA OD
POVRATLJIVE INFORMACIJE
IZME U UZORAKA:
KONTROLISANO PORE ENJE
METALURGIJE PROVODNIKA,
DIELEKTRINE OBRADE I
TOPOLOGIJE OKLOPA**

Zavisnost lanca signala od povratljive informacije izme u uzoraka: kontrolisano poreenje metalurgije provodnika, dielektri ne obrade i topol

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.

Apstrakt

Tanaka, Ohm i Flux (2025) pokazali su da realni audio signali nisu strogo ograni eni opsegom i podacima nosi povratljivu informaciju izme u uzoraka (ISI) u rasponu od 0,008 do 0,31 bita po signalni put od mikrofona do ADC bez ikakvih me uelektronika. U praksi, audio signali prolaze druge analogne komponente pre nego što stignu do konvertora. Ovaj rad istražuje da li analogni ISI. Koriste i Tanakin protokol merenja i algoritam rekonstrukcije, uporedili smo 14 lanaca signala sa različitim dielektri ne materijale, konfiguracije oklopa i geometrije kablova. Lanci signala bili su umetnuti u lanac signala. Test signal bio je živi mesingani ansambl snimljen istovremeno preko svih 14 lanaca. Povratljivost lanca signala, od 0,047 bita po uzorku (neogklopljen PVC-izolovan upredeni bakar) do 0,289 bita po uzorku (kriogeno tretirani monokristalni OFC sa PTFE dielektrikom i etvoroslojnim oklopom). Dominantni faktori bili su, p (objašnjava 41% varijanse), zrnasta struktura provodnika (29%), dielektri ni materijal (19%) i g da analogni lanac signala nije transparentan za informaciju iznad opsega. Komponente koje uvo visokofrekventnu energiju na granicama zrna ili dozvoljavaju elektromagnetnoj smetnji da kontaminira spektar iznad opsega smanjuju koli inu ISI dostupnu za rekonstrukciju nakon uzorkovanja.

1. UVOD

U prate em radu objavljenom ranije ove godine, Tanaka, Ohm i Flux ustanovili su da pretp Nyquist-Shannon o strogom ograni enju opsega nije ispunjena za realne audio signale. Iz sati muzi kog materijala i pokazali da deo te energije preživljava antialiasing filter kao p informaciju o izvornom signalu.

Njihov eksperiment koristio je najkra i mogu i analogni signalni put: merni mikroskop povezan predpoja alom, povezanim direktno sa ADC od 768 kHz. Bez kablova, bez obrade, bez me ispravno -- izolovalo je fenomen od konfundiraju ih varijabli.

Ali nijedan realan audio sistem ne radi tako. U praksi, signal prolazi kroz metre kabla, kroz konzole, kroz spoljne procesore i kroz još kabla pre nego što stigne do konvertora. Svaka komponenta u ovom lancu je potencijalni izvor šuma, izobli enja i frekvencijski zavisnog slabljenja. Svaka komponenta može, u pri signala.

Pitanje je da li je ova modifikacija zna ajna. Ako je energija iznad opsega koja nosi infor preživljava prolazak kroz tipi an analogni lanac signala sa zanemarivim degradacijama -- realne sisteme za snimanje bez ograni enja. Ako je energija iznad opsega krhka -- ako se prolazi -- onda izbor analognih komponenti odre uje koliko informacije izme u uzoraka sti

O ekivali smo prvo. Pronašli smo drugo.

2. EKSPERIMENTALNI DIZAJN

Eksperiment je dizajniran kao kontrolisano pore enje. Jedan akusti ni izvor snimljen je is lanaca signala, koji svi napajaju identit ne ADC. Svaka razlika u rekonstruisanoj informac pripisati samim lancima.

Izvor je bio mesingani oktet (4 trube, 4 trombona) koji izvodi 45-minutni program fanfara, koralna i džez standarda u suvom studiju (RT60 = 0,3 s). Mesing je odabran jer su Tanaka i sar. izmerili najve u gustinu energije i na 96-120 kHz). Ovo maksimizuje odnos signal-šum informacije izme u uzoraka i pruža na lanaca.

Mikrofon je bio jedan DPA 4006A, identit an onom koji je koristio Tanaka, postavljen 2 m o razdeljen je na 14 puteva pomo u distribucionog poja ala sa transformatorskom izolacijom izmerena izolacija izme u kanala > 120 dB, frekvencijski odziv ravan do 200 kHz +/- 0,1 d signala, od kojih se svaki završava na AKM AK5578 ADC koji radi na 768 kHz. Ovih 14 ADC taktovani su iz jednog Crystek CCHD-575 master oscilatora preko stabla distribucije takta sa niskim džiterom.

Ovih 14 lanaca signala razlikovali su se samo po me usobno povezuju em kabl u izlaza distribucionog ADC. Dužina kabla standardizovana je na 3 m. Svi kablovi završeni su Neutrik NC3MX / NC3FX XLR konektorima.

Testirani kablovi bili su:

Lanac A: Generi ki neoklopljeni upredeni bakar, PVC izolacija (kvalitet železarije)
 Lanac B: Belden 8412 (standardni studijski me usobni kabl, spiralni oklop, gumena izolacija)
 Lanac C: Mogami 2549 (kvad-provodnik, pleteni oklop, PVC izolacija)
 Lanac D: Canare L-4E6S (zvezda-kvad, pleteni oklop, polietilenska izolacija)
 Lanac E: Gotham GAC-4/1 (kvad, dvostruki reussen oklop, PVC izolacija)
 Lanac F: OFC bakar, monokristalni, PTFE izolacija, pleteni bakarni oklop
 Lanac G: OFC bakar, monokristalni, PTFE izolacija, folija + pleteni oklop (dvoslojni)
 Lanac H: OFC bakar, monokristalni, PTFE izolacija, folija + pleteno + folija (troslojni)
 Lanac I: OFC bakar, monokristalni, kriogeno tretiran (-196 degC, 72 h), PTFE izolacija, folija + pleteno + folija
 Lanac J: OFC bakar, monokristalni, kriogeno tretiran, PTFE kriogeno tretiran, folija + pleteno + folija
 Lanac K: OFC bakar, monokristalni, kriogeno tretiran, PTFE kriogeno tretiran, etvoroslojni
 Lanac L: Isto kao K, sa Equatorial Splice na sredini
 Lanac M: Posrebreni OFC bakar, monokristalni, kriogeno tretiran, PTFE kriogeno tretiran,
 Lanac N: Superprovodni YBCO trakasti provodnik u kriostatu sa te nim azotom, bez dielek

Lanci A do E predstavljaju komercijalno dostupne studijske kablove na razli itim cenovnim predstavljaju kontrolisanu progresiju od osnovnog audiofilskog kabla do potpuno tretiranog odjednom. Lanac L dodaje Equatorial Splice dokumentovan u Ferro i Flux (2021). Lanac M zamenjuje srebrnu prevlaku. Lanac N je superprovodna referenca.

Progresija od F do K je metodološka srž eksperimenta. Menjanjem jedne varijable odjednom -- slojeva oklopa, pa krio tretmana provodnika, pa krio tretmana dielektrika, pa etvrtog sloja oklopa -- možemo izolovati dop informaciji izme u uzoraka.

3. PROTOKOL MERENJA

Mesingani ansambl izvodio je isti 45-minutni program tri puta, tri uzastopna dana, u istom studiju, u isto doba dana. Temperatura je kontrolisana na 23,0 +/- 0,2 degC. Vlažnost je kontrolisana na 45 +/- 2% RH. HVAC studij eliminisala niskofrekventna vibracija.

Za svako od tri izvo enja, 14 ADC snimalo je istovremeno, proizvode i 14 sinhronizovanih izvo enju -- 42 snimka ukupno. Tri izvo enja služila su kao replikati za statisti ku analizu

Analiza nakon snimanja sledila je Tanakin protokol ta no. Svaki snimak od 768 kHz digital na 96 kHz (FIR linearne faze, slabljenje u zaustavnom opsegu -140 dB, 4096 odbiraka) i preuzorkovan na 192 kHz da bi se simulirao standardni audio snimak visoke rezolucije. Tanakin algoritam za rekonstrukciju zatim je primenjen na svaku 192 kHz datoteku. Izlaz algoritma -- rekonstruisana zajedni ka informacija u bitima po uzorku izme osnovne istine od 768 kHz -- bila je primarna zavisna varijabla.

Sekundarne metrike uklju ivale su: gustinu energije iznad opsega na 96-120 kHz (mereno uzorkovanja), unakrsnu korelaciju izme u omota a energije iznad opsega i sadržaja u opse lanaca u oblasti iznad opsega.

Statisti ka analiza koristila je dvosmernu ANOVA sa ponovljenim merenjima sa lancem kab nivoa) kao faktorima. Post-hoc parna pore enja koristila su Tukey-ev HSD na alfa = 0,05.

4. REZULTATI

Glavni efekat lanca kabla na povratljivu ISI bio je visoko zna ajan ($F(13, 26) = 847,3$, $p < 0,001$). Glavni efekat replikata izvo enja nije bio zna ajan ($F(2, 26) = 0,41$, $p = 0,67$), potvr uju i rezultate. Interakcija nije bila zna ajna ($F(26, 26) = 0,38$, $p = 0,99$).

Povratljiva ISI (biti po uzorku, srednja vrednost +/- SD preko 3 replikata):

Lanac A (neoklopljen upredeni PVC): 0,047 +/- 0,003
 Lanac B (Belden 8412): 0,098 +/- 0,004
 Lanac C (Mogami 2549): 0,112 +/- 0,003
 Lanac D (Canare L-4E6S): 0,119 +/- 0,004
 Lanac E (Gotham GAC-4/1): 0,131 +/- 0,003

Lanac F (SC-OFC, PTFE, jednostruki oklop): 0,148 +/- 0,005
 Lanac G (SC-OFC, PTFE, dvostruki oklop): 0,187 +/- 0,004
 Lanac H (SC-OFC, PTFE, trostruki oklop): 0,214 +/- 0,003
 Lanac I (SC-OFC krio, PTFE, trostruki oklop): 0,237 +/- 0,004
 Lanac J (SC-OFC krio, PTFE krio, trostruki oklop): 0,251 +/- 0,003
 Lanac K (SC-OFC krio, PTFE krio, etvorostruki oklop): 0,271 +/- 0,004
 Lanac L (kao K + Equatorial Splice): 0,278 +/- 0,003
 Lanac M (posebren, krio, PTFE krio, etvorostruki oklop): 0,264 +/- 0,004
 Lanac N (superprovodni YBCO): 0,289 +/- 0,002

Sva parna pore enja izme u susednih lanaca (A vs. B, B vs. C, itd.) bila su zna ajna na p = 0,03, marginalno) i L vs. M (nije primenljivo -- razli it tip provodnika).

Tanako merenje direktnim putem za mesing iznosilo je 0,31 bita po uzorku. Najbolji kabl (Lanac N, superprovodni) povratio je 0,289 bita po uzorku -- 93,2% vrednosti direktnog puta. Najgori kabl (Lanac A, kvalitet železarije) povratio je 0,047 bita po uzorku -- 15,2% vrednosti direktnog puta.

Raspon faktora -- najbolji podeljen najgorim -- bio je 6,1. Tri metra kabla, koji se razlikuju samo po konstrukciji, proizvela su 6,1-puta ve u razliku u koli ini informacije koja se može povratiti iz uzorkovanog signala.

5. FAKTORSKA ANALIZA

Kontrolisana progresija od Lanca F do Lanca K omogu ava izolaciju pojedina nih faktora.

Oklop. Progresija od jednostrukog oklopa (F: 0,148) do dvostrukog (G: 0,187) do trostrukog (H: 0,214) (koji tako e uklju uje krio tretmane) pokazuje konzistentno pove anje. Pore enjem F sa H (varijable konstantne): razlika je 0,066 bita po uzorku, ili poboljšanje od 44,6%. Oklop je

Mehanizam je jednostavan. Oblast iznad opsega (96-384 kHz) gusto je naseljena ekološkim elektromagnetnim smetnjama: prekida ka napajanja, LED drajveri, zra enje digitalnih magistrala, harmonici mobilnih tel obližnje elektronike. Ova smetnja dodaje nekorelisanu energiju u spektar iznad opsega, r nosi informaciju izme u uzoraka. Svaki dodatni sloj oklopa slabi ovu smetnju, uvaju i od

Izmerili smo efektivnost oklapanja svakog kabla na frekvencijama od 96 kHz do 384 kHz. Folija + pletenica: 81 dB. Folija + pletenica + folija: 94 dB. Folija + pletenica + folija + pletenica: 108 dB. Poboljšanje povratljive ISI prati efektivnost oklopa monotono, mada ne linearno -- odnos je približno logaritamski, s smetnji približava granici termalnog šuma.

Zrnasta struktura provodnika. Pore enjem Lanca E (Gotham, polikristalni OFC, dvostruki r (monokristalni OFC, jednostruki pleteni oklop): uprkos tome što F ima inferioran oklop, p Kvalitet provodnika nadmašio je deficit oklopa.

Mehanizam je identifikovan merenjem frekvencijskog odziva kablova od 96 kHz do 384 kHz. Polikristalni kablovi pokazali su postepeno opadanje iznad 100 kHz, pove avaju i se na -3,2 dB na 200 kHz i -8,7 dB na 300 kHz. Monokristalni kablovi, sa -0,4 dB na 300 kHz i -1,1 dB na 384 kHz.

Granice zrna u polikristalnom bakru raspršuju elektrone. Na audio frekvencijama, ovo raspršivanje je zanemarivo -- otpornost granice zrna je mali deo otpornosti mase. Ali na frekvencijama koje nose informaciju izme smanjuje i struja se prinu uje kroz tanji prstenasti region blizu površine provodnika, pove jedinici dužine. Raspršivanje postaje frekvencijski zavisno slabljenje.

Monokristalni provodnici, koji nemaju granice zrna duž svoje dužine, ne pokazuju ovaj frekvencijski zavisn gubitak. Oni prenose energiju iznad opsega sa zanemarivo manje slabljenja od energije u opsegu. Informacija i

Kriogeni tretman. Pore enjem H (netretiran) sa I (provodnik krio-tretiran): ISI se poboljšala sa 0,214 na 0,237. Pore enjem I sa J (dodaju i krio tretman dielektrika): ISI se poboljšala sa 0,237 na 0,251.

Efekat tretmana provodnika konzistentan je sa mehanizmom strukture zrna. Kriogeni tretman na -196 degC smanjuje rezidualni stres u kristalnoj rešetki i eliminiše mikro-defekte na preostalim granicama zrna (ak i u sub-granice zrna i greške u slaganju). Tanaka je prethodno izmerio smanjenje od 31% u srednjoj gustini defekata nakon kriogenog tretmana. Sadašnji rezultati pokazuju da se ovo pre iš avanje pretvara u merljivo bolji pr

Efekat tretmana dielektrika bio je manji ali zna ajan. Kriogeni tretman PTFE smanjuje nje visokim frekvencijama, smanjuju i energiju koju dielektrik skladišti i osloba a u svakom s skladištena-i-osloba ena energija je odložena u odnosu na signal, stvaraju i oblik intermo

opsega. Krio tretman smanjuje ovu kontaminaciju.

Geometrija kabla. Ovaj faktor nije sistematski varirao u primarnom eksperimentu. Me utim C i D) sa ne-kvad kablovima (Lanac B) na sli nim nivoima oklopa, konfiguracija zvezda-kv prednost u ISI (0,112-0,119 vs. 0,098). Geometrija zvezda-kvad poništava spolja indukovane smetnje kroz svoju balansiranu topologiju, pružaju i dodatno odbijanje kontaminacije iznad opsega izvan onoga što sam o

6. EFEKAT EQUATORIAL SPLICE

Lanac L bio je identičan Lancu K osim za dodavanje Equatorial Splice na sredini kabla. E Flux (2021), spoj je izme u dva provodnika izvan na suprotnim hemisferama, orijentisa pristrasnosti zrna poništavaju.

Poboljšanje ISI od K do L bilo je malo: 0,271 do 0,278, pove anje od 2,6%. Ovo je bilo st pore enju sa efektima oklopa i strukture zrna.

Prvobitno smo ovaj rezultat smatrali razočaravajućim. Equatorial Splice je definišu a tehn 2,6% u ISI nije dramatičan efekat koji bismo možda preferirali da prijavimo.

Nakon razmišljanja, rezultat je ta no ono što fizika predvi a. Equatorial Splice poništava provodnika. Hemisferna pristrasnost uzrokuje suptilnu smernu asimetriju u transportu elektrona, koja se manifestuje kao mala razlika u karakteristikama prenosa izme u pozitivnih i negativnih polu-ciklusa signala. Na primarni efekat hemisferne pristrasnosti. Ali na frekvencijama iznad opsega koje nose inf postaje efekat drugog reda -- dominantni mehanizmi gubitka iznad opsega su raspršivanje na granicama zrna i EMI kontaminacija, oba se rešavaju drugim aspektima konstrukcije kabla.

Doprinos Splice-a ISI je istinit ali mali jer problem koji rešava -- hemisferna asimetrija zrna -- nije primarni uzrok gubitka informacije iznad opsega. Oklop i isto a provodnika imaju ve i zna aj.

Prijavljujemo ovaj rezultat bez uredni kog prilago avanja. Equatorial Splice ostaje važan hemisferne pristrasnosti u prenosu signala audio frekvencija. Njegov doprinos o uvanju in sekundaran.

7. SREBRNA PREVLAKA I SUPERPROVODNA REFERENCA

Lanac M zamenio je posrebrni OFC za neposrebrni OFC iz Lanca K. ISI se neznatno smanjila, sa 0,271 na 0,264 -- rezultat koji je bio marginalno zna ajan ($p = 0,07$) i smerovno suprotan o ekivanju.

Srebro ima ve u provodljivost od bakra (106% IACS vs. 100% IACS za OFC). Trebalo bi, u iznad opsega. Mali pad može se pripisati samom procesu prevla enja, koji uvodi bimetalni jezgra. Na frekvencijama relevantnim za informaciju izme u uzoraka, dubina kože u bakru smanjuju i se na 45 um na 400 kHz. Sloj srebrne prevlake (obi no 2-5 um) dobro je unutar kroz sloj srebra i kroz bakarno jezgro, prelaze i bimetalni interfejs dva puta po dubini ko frekvencijski zavisnog raspršivanja analognog efektima granice zrna.

Nismo dalje sledili ovaj nalaz. Beleži se kao mogu a staza za budu a istraživanja. Za pot poboljšala povratljivost informacije izme u uzoraka i možda ju je neznatno degradirala.

Lanac N, superprovodna YBCO referenca, proizveo je najve u ISI od bilo kog kabla: 0,289 rezultata direktnog puta. Nedostaju ih 6,8% može se pripisati konektorima (koji su konver završecima kabla, svaki uvodi nesuperprovodni segment od približno 4 mm) i mehani koj v proizvodi mikrofonsku smetnju u oblasti iznad opsega na nivoima koje smo izmerili na -172 dBFS.

Superprovodni kabl ima nultu otpornost na svim frekvencijama, nulto raspršivanje na gran parovi, ne kao pojedina ni elektroni), a Meissner-ov efekat pruža apsolutni magnetni oklo na svim frekvencijama. To je, u principu, savršen provodnik za informaciju izme u uzoraka superprovodni kabl uva skoro sav sadržaj iznad opsega koji bi direktna veza pružila.

Tako e košta 2.400\$ po metru i zahteva neprekidno snabdevanje te nim azotom. Za preost se od 0,30\$ (Lanac A) do 280\$ (Lanac K/L). Odnos izme u cene i ISI je približno logaritar

8. IMPLIKACIJE

Tanakin rezultat ustanovio je da informacija izme u uzoraka postoji. Ovaj rad ustanovljav

koja stiže do konvertora zavisi od analognog lanca signala.

Zavisnost nije suptilna. Faktor 6,1 razdvaja najgore i najbolje konvencionalne kablove. Najgori kabl uništio je 85% raspoložive informacije izme u uzoraka. Najbolji konvencionalni kabl sa uvao je 87%. Razlika izme u izborima metalurgije provodnika, dielektri nog materijala, kriogenog tretmana i oklopa.

Ovi izbori odgovaraju, široko, razlici izme u robnog kabla od 0,30\$/m i preciznog audio k

Svesni smo da je ovaj nalaz komercijalno pogodan za kompaniju koja proizvodi precizne a pogodnost nalaza ne odre uje njegovu istinitost. Metodologija je javna. Algoritam za reko zahtev. Kablovi su komercijalno dostupni ili konstruktivni iz datih specifikacija. Eksperiment se može replicirati.

Napominjemo tri ta ke koje umanjuju rezultat:

Prvo, koli ine ostaju male. ak i najbolji kabl uva samo 0,289 bita po uzorku informacije bita nosi 32 bita po uzorku Shannon-garantovane informacije. Dopunska informacija izme

Drugo, nismo ustanovili ujnost. Da li je 0,289 bita po uzorku informacije iznad opsega -- ljudskom slušaocu nije poznato. Nismo sproveli testove slušanja. Sadašnji rad bavi se merenjem, ne percepcijom.

Tre e, dominantni faktor je oklop, ne tretman provodnika. Dobro oklopljen kabl sa obi nim nadmašuje slabo oklopljen kabl sa egzoti nim monokristalnim provodnikom (ovo pore enje može zaklju iti iz faktorske analize). Inženjeri koji optimizuju za informaciju izme u uzora drugih parametara kabla.

9. ZAKLJU AK

Povratljiva informacija izme u uzoraka -- sadržaj signala iznad Nyquista koji preživljava a u uzorkovanim audio podacima -- nije fiksno svojstvo akusti nog izvora. Modifikuje je sva signala izme u mikrofona i konvertora.

U kontrolisanom pore enju 14 konstrukcija kablova, povratljiva ISI varirala je od 0,047 do odrednik bila je topologija oklopa (41% varijanse), pra ena strukturom zrna provodnika (2 geometrijom kabla (11%).

Ovi nalazi proširuju Tanakin rezultat sa akademske demonstracije na prakti nu inženjersk audio sistem snima zavisi ne samo od stope uzorkovanja i bitne dubine -- parametara koje od fizi kih karakteristika analognih komponenti koje isporu uju signal konvertoru. Teorem procesa snimanja. Analogna polovina ima sopstveni informacioni budžet, a taj budžet je o

Da li ovaj budžet ima zna aja -- da li je informacija izme u uzoraka ujna, ili da li doprino rezolucije -- pitanje je za budu e radove. Sadašnja studija ustanovljava samo da budžet p

REFERENCE

- [1] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, „O nepotpunosti rekonstrukcije Nyquist-Shannon: empirijski dokaz za povra Audio Sci., vol. 6, br. 1, 2025.
- [2] C. E. Shannon, „Communication in the presence of noise”, Proc. IRE, vol. 37, br. 1, str. 10-21, 1949.
- [3] M. Ferro, R. Flux, „Equatorial Splice: poništavanje hemisferne pristrasnosti zrna u audio provodnicima”, J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, br. 1, 2021.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, „Hemisferna pristrasnost u orijentaciji zrna bakra”, J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, br. 1, 2020.
- [5] L. Solder, H. Park, M. Ferro, „Efekti kriogenog tretmana na kristalografiju provodnika”, J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, br. 2, 2021.
- [6] H. Park, M. Ferro, C. Ohm, „Feroelektri no sprezanje u PTFE dielektricima audio kvaliteta”, J. Equatoria
- [7] C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro, „Opti ko oklapanje bakarnih provodnika”, J. Equatorial Audio Sci., vol. 4,
- [8] M. Ferro et al., „Superprovodni audio me uelementi: prenos signala bez otpora preko YBCO trakastih pro 1, 2024.
- [9] M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson, „Primene Meissner-ovog efekta u potroša kom audiju”, J. Equatorial AU
- [10] L. Kozachenko and N. Leonenko, „Sample estimate of the entropy of a random vector”, Problems of Information Transmission, vol. 23, br. 2, str. 95-101, 1987.
- [11] IEC 62153-4-1:2015, Metode ispitivanja metalnih komunikacionih kablova -- Deo 4-1: Elektromagnetska kompatibilnost (EMC) -- Uvod u merenja elektromagnetnog ekraniranja.
- [12] E. B. Rosa and F. W. Grover, „Formulas and tables for the calculation of mutual and self-inductance”, Bulletin of the Bureau of Standards, vol. 8, br. 1, 1912.
- [13] H. A. Haus and J. R. Melcher, Electromagnetic Fields and Energy, Prentice Hall, 1989.

**PRAKTIČNA OPTIMIZACIJA
OKRUŽENJA ZA KRITIČKO
SLUŠANJE: POSTAVLJANJE
ZVUKOVNIKA, STABILNOST
KOMPONENTI I DNEVNI TERET
ODRŽAVANJA**

Prakti na optimizacija okruženja za kriti ko slušanje: postavljjanje zvu nika, stabilno EQUATORIAL AUDIO i dnevni teret održavanja

H. Park, M. Ferro, L. Solder

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Apstrakt

Referenca prostorija za slušanje nije stati ki sistem. Promene temperature pomeraju popustljivost razgrani enika. Vlažnost menja brzinu zvuka i karakteristike apsorpcije akustičnog tretmana. Ba dijafragme. Vibracije od HVAC, saobra aja i objekta uvode niskofrekventnu kontaminaciju. Elek trolonika naseljavaju RF spektar unutar prostorije. Ove varijable kontinuirano drifuju, a njihov kombinovani uticaj na percipirani audio kvalitet referentnog sistema je merljiv. Ovaj rad predstavlja prakti an okvir za optimizaciju i održavanje zasnovan na 3 godine kontinuiranog pra enja 4 referentne prostorije na razli itim geografskim s ekološke varijable, njen uticaj na merljive audio parametre i korektivne procedure potrebne za održavanje uslova referentnog kvaliteta. Rezultuju i teret održavanja je zna ajan -- izme u 20 i 45 minuta po sesiji slušanja za ru nu ko sistematsku ekološku kontrolu i, gde je dostupna, automatizovanu instrumentaciju za poravnanje.

1. UVOD

Svaki audiofil zna da sistem zvu i druga ije iz dana u dan. Uobi ajeno objašnjenje je psihološko. Manje uobi ajeno ali ta nije objašnjenje je fizi ko. Okruženje za slušanje se menja, opremom i ljudima.

Ovaj rad je prakti an vodi . Namijenjen je svakome ko održava prostoriju za kriti ko slušanje, masteringa ili li no koriš enje -- i ko želi da razume šta se menja, koliko, i šta u initi povremeno.

Vodi se zasniva na tri godine kontinuiranog pra enja etiri referentne prostorije za slušanje: Quito, Ekvador; partnerska postrojenje u Cirihi, Švajcarska; mastering studio u Nashvillu, Tennessee; i privatna prostorija za slušanje u Sapporu, Japan. Svaka prostorija opremljena je sensorima temperature, vlažnosti, barometarskog pritiska, vibracija i elektromagnetnog polja koji beleže u 1-sekundnim intervalima. Audio sistem svake prostorije koristi standardizovani protokol (frekvencijski odziv, izobli enje, impulсни odziv, prag šuma).

Podaci otkrivaju da svaka ekološka varijabla koju smo merili proizvodi detektabilan efekat na izmerene performanse audio sistema. Neki efekti su veliki (temperaturom indukovani pomeraji frekvencijskog odziva do 0,8 dB). Neki su mali (efekti barometarskog pritiska na popustljivost drajvera od 0,02 dB). Svi su realni i svi drifuju tokom vremena.

Pitanje nije da li korigovati ove efekte. Pitanje je koliko napora korekcija zahteva i da li se taj napor može smanjiti.

2. POSTAVLJANJE ZVU NIKA

Postavljanje zvu nika u pravougaonj prostoriji je rešen problem u akustici. Optimalna pozicija zvu nika u prostoriji koriš enjem modalne analize, pre iš ena merenjem i fiksirana. Kada su zvu nici postavljeni, treba ih održavati i pomenuti pomerati.

Pomeraju se.

Termalna ekspanzija pada pomera poziciju zvu nika do 0,3 mm po stepenu Celzijusa u prostoru podom, i do 1,2 mm po stepenu u prostorijama sa više im drvenim podovima. Sezonsko termalno pomerenje u prostori sa drvenim podom proizvodi kumulativan pomeraj zvu nika do 18 mm -- skoro dvostruko.

Ovaj pomeraj nije uniforman. Zavisi od položaja zvu nika u odnosu na centar termalne ekspanzije (geometrijskog centra plo e ili podne podloge). Zvu nici postavljeni asimetri no -- uobi ajeno -- zvu nik pomera se više od desnog, ili obrnuto, narušavaju i geometriju stereo slike.

Merili smo ovaj efekat direktno koriste i laserske senzore pomeraja (Keyence IL-300, rezolucija 10 μm) za slušanje i ku išta zvu nika. Tokom kalendarske godine u Nashville prostori (drveni pod, drveni zid, drveni zid) levi zvu nik migrirao je 14,3 mm prema zadnjem zidu i 2,1 mm prema bo nom zidu. Desni zvu nik migrirao je 3,8 mm prema zadnjem zidu i 2,1 mm prema bo nom zidu. Razmak između zvu nika i levog i desnog kanala na poziciji slušanja promenila se za 17,2 mikrosekunde -- što odgovara pomeraju stereo slike od približno 1,4 stepena.

Korekcija zahteva ponovno merenje i ponovno postavljanje barem sezonski, a idealno mesечно. Postavljanje traje 15-25 minuta sa metrom i SPL merilom, ili 3-5 minuta sa sistemom za pozicioniranje sa laserskom referencom.

Za prostorije na betonskim plo ama, termalni pomeraj je za red veli ine manji i interval korekcije može se pr Quito prostorija, izgra ena na armiranoj betonskoj plo i na 2.850 m nadmorske visine sa sezonskim temperat degC, pokazala je ukupan pomeraj zvu nika od 0,8 mm tokom tri godine -- ispod praga ujnog efekta za bilo k u prostoriji.

Šiljati stalci zvu nika zariveni u tepih preko betona pružaju najstabilnije montiranje. Stal koriste polimerne izolacione nogice (Shore 40A tvrdo a) umesto metalnih šiljaka, koji po podom. Masa zvu nika treba da pre e 15 kg po kanalu za adekvatnu inerciju protiv vazduš zvu nika -- minimum koji se retko diskutuje, ali esto krši kod monitorskih sistema na stal

3. TEMPERATURNI EFEKTI NA ELEKTRONIKU

Temperaturni koeficijent elektronskih komponenti dobro je dokumentovan u inženjerskoj literaturi, ali se retko diskutuje u audiju. Trebalo bi.

Tipi na mreža razgrani enika sadrži polipropilenske filmske kondenzatore (temperaturni k induktore sa feritnim jezgrom (temperaturni koeficijent +800 do +2000 ppm/degC u zavisn (temperaturni koeficijent +20 do +50 ppm/degC). Promena temperature od 10 degC pomera u zavisnosti od topologije. Za razgrani enik od 3 kHz, ovo je pomeraj od 6-15 Hz -- mali u vezu izme u drajvera u oblasti razgrani enika, proizvode i merljivu promenu u frekvencijs

Merili smo ovo direktno. Par referentnih zvu nika (3-smerni, Linkwitz-Riley razgrani enici temperaturno kontrolisanu prostoriju i izmeren od 15 degC do 30 degC u koracima od 1 stepena, sa periodom stabilizacije od 2 sata na svakom koraku. Frekvencijski odziv meren je na poziciji slušanja koriste i kalibrisani r sekundi.

Izmereni pomeraj: razgrani enik od 3 kHz pomerio se sa 2.987 Hz na 15 degC na 3.014 Hz (0,9%). Razgrani enik od 500 Hz pomerio se sa 497 Hz na 504 Hz (1,4%). Frekvencijski o 0,8 dB u oblastima razgrani enika.

Za poja ala, dominantan efekat je drift radne ta ke u izlaznoj fazi. Klasa A i klasa A/B po spektru izobli enja kako se izlazni ure aji zagrevaju. Merili smo reprezentativno klasa A/B hladnjaka 25 degC) do termalne ravnoteže (temperatura hladnjaka 58 degC). Ukupno harm sa 0,0042% na 0,0019% tokom prvih 45 minuta rada, a zatim se stabilizovalo. Spektar izo drugog ka tre em harmoniku pomerio se sa 3,2:1 na 4,7:1 kako je radna ta ka driftovala s

Prakti na preporuka je uklju iti sistem najmanje 60 minuta pre kriti kog slušanja. Ovo je u diskutuje jeste da temperatura prostorije tokom ovog perioda zagrevanja treba da bude stabilna -- sistem koji se zagreje u hladnoj prostoriji a zatim se sluša u zagrejanom prostoriji nije dostigao svoju radnu ta ku stabilno nastavila da se menja nakon što se elektronika stabilizovala.

Preporu ujemo stabilnost temperature prostorije od +/- 0,5 degC tokom sesija slušanja. P izgra en HVAC sistem sa proporcionalnom kontrolom (ne uklju i/isklju i ciklus rezidencija) isklju ivanje HVAC i oslanjanje na termalnu masu prostorije, koja u dobro izolovanoj pros nakon što sistem dostigne ciljnu temperaturu.

4. VLAŽNOST I AKUSTI NA APSORPCIJA

Brzina zvuka u vazduhu zavisi od temperature (dobro poznato) i vlažnosti (manje dobro poznato). Na 20 degC i 50% relativne vlažnosti, brzina zvuka je 343,8 m/s. Na 20 degC i 20% RH, ona je 343,4 m/s. Razlika -- 0,4 m/s, ili 0,12% -- je mala ali proizvod merljivu promenu u vremenu dolaska refleksija, što menja impulsni odziv prostorije.

Zna ajniji je uticaj vlažnosti na akusti nu apsorpciju. Vazduh apsorbuje zvuk na frekvenci apsorpcije koji se oštro pove ava iznad 2 kHz. Na 20 degC i 50% RH, koeficijent apsorpci dB/m na 10 kHz. Na 20% RH, ove vrednosti se pove avaju na 0,011 dB/m i 0,038 dB/m -- s

U prostoriji sa prose nom dužinom puta zvuka od 8 m (direktno plus jedna refleksija), raz kHz je približno 0,14 dB izme u 50% i 20% RH. Ovo je ispod praga ujnosti za jedan ton, a više refleksija. Kumulativni efekat na vreme reverberacije visokih frekvencija prostorije je merljiv: u Nashville prostoriji, RT60 iznad 4 kHz varirao je od 0,28 s (leto, 65% RH) do 0,22 s (zima, 25% RH) -- sezonska varijacija od 21% u vremenu opadanja visokih frekvencija.

Preporu ujemo održavanje vlažnosti prostorije za slušanje izme u 40% i 55% RH. Ispod 40 akumulacija stati kog naelektrisanja na dielektricima kabla postaje zna ajna -- temu koju

feroelektri nom sprezanju. Iznad 55%, pove ava se rizik od kondenzacije na površinama opreme i materijalim
treatment (posebno panelima od mineralne vune, koji dobijaju masu i gube apsorptivnu efikasnost kada su vlažni).

Samostalan ovlaživa ili odvlaživa sa higrostatom je dovoljan za ve inu klima. U prostori
vlažnosti (uobi ajeno u kontinentalnim klimama), poželjniji je sistem za kontrolu vlažnost
m nadmorske visine u tropskoj visinskoj klimi, održava 45-50% RH tokom cele godine bez
diskutovanih prednosti ekvatorijalne nadmorske visine za audio rad.

5. VIBRACIJA I MEHANI KA IZOLACIJA

Svaka komponenta u audio sistemu je mehani ki objekat, a svaki mehani ki objekat je mik

Gramofonske plo e, ru ice i adapteri su o igledno osetljivi na vibracije. Manje o igledna j
transformatora, vakuumskih cevi, pa ak i poluprovodni kih izlaznih ure aja. Kondenzatori
dielektriku proizvodi napon preko plo a. Filmski kondenzatori su najmanje osetljivi (obi n
kerami ki kondenzatori mogu proizvesti napone koji se približavaju nivoima milivolta pod
izbegavaju u analognim signalnim putevima.

Lamine transformatora su magnetostriktivne: mehani ka vibracija modulira magnetno spre
frekvenciji vibracije i njenim harmonicima. Merili smo šum indukovano vibracijom tri reprezentativna toroidna transformatora (50 VA,
200 VA, 500 VA) na nivoima vibracija tipinim za urbana stambena okruženja (5-50 Hz, 0,
-118 dBV (50 VA, 0,001 g) do -94 dBV (500 VA, 0,01 g na 50 Hz). U sistemu sa izlaznim nivoom od 2 Vrms, šum indukovano
vibracijom transformatora od 500 VA pri 0,01 g predstavlja degradaciju odnosa signal-šum od približno 0,003 dB -- malo, ali
prisutno.

Izolacija komponenti sledi jednostavnu hijerarhiju: masa, zatim popustljivost, zatim prigušenje. Teška komponenta na popustljivom
nosa u sa viskoznom prigušenjem odbi e više vibracije nego laka komponenta na vrstom n
Optimalna izolaciona platforma za audio komponente ima rezonantnu frekvenciju duboko i
vibracije u prostoriji -- obi no ispod 3 Hz, što zahteva ili pneumatsku izolaciju (vazdušne
sa teškim optere enjem.

Testirali smo etiri izolacione strategije na predpoja alu od 15 kg u Nashville prostoriji, i
od 0,003 g na 15 Hz (HVAC), 0,001 g na 30 Hz (saobra aj) i širokopojasnu vibraciju ispod

1. Direktno spajanje (bez izolacije): vibracija pada prenesena na šasiju na 0 dB (jedinica).
2. Sorbothane polusfere (Shore 30A, rezonantna frekvencija približno 12 Hz): -6 dB na 15 Hz, -14 dB na 30 Hz, -22 dB na 50 Hz.
3. Pneumatska izolaciona platforma (Newport RS2000, rezonantna frekvencija 1,5 Hz): -28 dB na 15 Hz, -38 dB na 30 Hz, -46 dB na 50 Hz.
4. Sandbox (30 kg suvog peska na Sorbothane nogicama): -18 dB na 15 Hz, -26 dB na 30 Hz, -34 dB na 50 Hz.

Pneumatska platforma bila je najefikasnija, ali i najskuplja (800\$) i najzahtevnija za održavanje (vazdušni mehurovi zahtevaju
periodi no ponovno naduvavanje, otprilike svaka 3 meseca). Sandbox je bio skoro jednako
nije zahtevao održavanje osim povremenog ponovnog niveliranja ako se pesak slegne -- š
godišnje.

Naša prakti na preporuka za ve inu sistema: sandbox izolacija za teške komponente (poja
lake komponente (DAC, predpoja ala) i bez izolacije za zvu nike (koji treba da budu kruto
mase). Gramofoni su poseban slu aj i imaju koristi od namenski napravljenih zidno montir

Kvartalna provera vibracije koriš enjem jeftinog MEMS akcelerometra (ADXL345, 15\$) pos
komponente dovoljna je za otkrivanje promena u okruženju vibracija -- gra evinska aktivn
oprema ili sezonske promene u obrascima saobra aja mogu izmeniti osnovnu vibraciju pro
Calibration Tool uklju uje režim ispitivanja vibracija koji automatizuje ovu proveru i ozna
degradirala od poslednje sesije.

6. ELEKTROMAGNETNE SMETNJE

Elektromagnetno okruženje unutar prostorije za slušanje nije tiho. Tipi na stambena prost
slušanja -- sadrži RF energiju iz Wi-Fi rutera (2,4 i 5 GHz), Bluetooth ure aja (2,4 GHz),
DECT beži nih telefona (1,88 GHz), mikrotalasnih pe nica (2,45 GHz), LED osvetljenja (š
kHz do 30 MHz) i prekida kih napajanja u svakom povezanom ure aj u (50 kHz do 5 MHz os
MHz i dalje).

Ve ina ove energije je daleko iznad audio opsega i odbija se audio kolima, koja imaju ogr

frekvencija ve proizvodi rektifikacije. Bilo koji nelinearni spoj u signalnom putu -- korodiran konektor, polup svog opsega polarizacije, magnetostriktivno jezgro transformatora -- može rektifikovati visokofrekventnu ene osnovni šum i intermodulacione proizvode unutar audio opsega.

Merili smo gustinu RF energije unutar naše etiri referentne prostorije koriste i kalibrisan HyperLOG 30100, 30 MHz - 10 GHz) i analizator spektra. Rezultati su drasti no varirali:

Quito laboratorija: -88 dBm/m² prose no, -96 dBm/m² na 50 kHz-30 MHz. (Postrojenje je s suseda, sa namenskim transformatorom i opti kom mrežnom vezom.)

Cirih postrojenje: -62 dBm/m² prose no, -71 dBm/m² na 50 kHz-30 MHz. (Urbana poslovna osvetljenje svuda.)

Nashville studio: -58 dBm/m² prose no, -64 dBm/m² na 50 kHz-30 MHz. (Komercijalna zgr kancelarijama, fluorescentno osvetljenje u hodnicima.)

Sapporo prostorija: -54 dBm/m² prose no, -59 dBm/m² na 50 kHz-30 MHz. (Stambena stan Wi-Fi mreža.)

Razlika od 34 dB u RF okruženju izme u najtiše i najbu nije prostorije je zna ajna. Njen imuniteta audio opreme. Dobro dizajnirana oprema sa pravilnim RF filtriranjem i oklopljen Potroša ka oprema sa neoklopljenim me uelementima i minimalnim RF filtriranjem nije.

Prakti no ublažavanje: (1) Koristite oklopljene me usobno povezuju e kablove -- efektivno obi no je 60-80 dB, što je dovoljno da se ak i Sapporo okruženje dovede ispod Quito osn audio sistem iz namenskog kola sa EMI filterom na panelu prekida a. (3) Uklonite nepotre svaki ure aj je i izvor RF energije i potencijalno mesto rektifikacije. (4) Ako se mora kori pravilno filtriranim drajverima (usaglašenost sa EN 55015 je minimum; neki LED drajveri koji prolaze EN 55015 i dalje proizvode merljive provedene emisije ispod 150 kHz koje padaju izvan opsega standarda ali unutar audio opsega).

Periodi no RF ispitivanje je vredno. Elektromagnetno okruženje se menja -- novi susedi, r minuta sa ru nim analizatorom spektra ili kompatibilnim softverski definisanim radijem. P zahtevaju istragu.

7. PUTANJA I POSTAVLJANJE KABLOVA

Fizi ko vo enje kablova unutar prostorije za slušanje uti e i na elektromagnetno hvatanje veliki, ali su oba kumulativna i oba se lako izbegavaju pra enjem nekoliko principa.

Signalni kablovi ne treba da idu paralelno sa naponskim kablovima. Paralelan put od 1 m mrežnog naponskog kabla na razdvajanju od 10 cm indukuje približno -90 dBV brujanja od 50/60 Hz. Oklop smanjuje ovo na približno -150 dBV -- ne ujno -- ali isti oklop nema efekat na komponentu magnetnog polja. Razdvajanje od 30 cm smanjuje magnetno sprezanje za 10 dB. Razdvajanje od 1 m smanjuje ga za 20 dB. Tamo gde signalni i naponski kablovi moraju da se ukrste, ukrštanje pod 90 stepeni minimizuje dužinu sprezanja.

Signalni kablovi ne treba da budu uvijeni. Uvijeni kabl formira induktor, a induktor je antena. Induktivnost jednoslojne kalema sa N navojaka, polupre nika R, je približno $u0 * N^2 * R / (0,9 * R + dužina)$. 3 m kabla uvijeno induktivnost od približno 4 uH -- dovoljno da formira rezonantno kolo sa parazitskom kapa pasti u opseg niskih MHz, stvaraju i uskopojasnu antenu za RF smetnje. Isti kabl položen ispod 0,5 uH.

Napetost kabla uti e na mikrofonski šum. Kabl pod napetoš u ponaša se kao žica koja vibr kabela od 1 m pod 0,5 N napetosti (umereno povijanje) je približno 15 Hz -- unutar opsega subvufera. Korak prolaznika ili HVAC vibracija mogu pobuditi ovu rezonancu, proizvode i mikrofonski impuls koji se širi kroz ka jednostavan: poduprite kabl na intervalima ne ve im od 50 cm koriste i meke kop e ili Vel olabavljenost na svakoj ta ki oslonca.

Ovo su stavke održavanja. Kablovi se pomeraju tokom promena opreme, iš enja i preure o svake sesije kriti kog slušanja traje 2-3 minuta i lako se zanemaruje. Smatrali smo da je kablova -- stalne korita za kablove, ozna ene putanje, sidrišta za rastere enje napetosti r odstupanje od uspostavljenog postavljanja kao kvar koji treba popraviti pre nego što sluš

8. TERET ODRŽAVANJA

Sastavili smo kontrolnu listu održavanja na osnovu nalaza opisanih iznad i merili kompletne referentne prostorije. Kontrolna lista uključuje:

1. Provera i stabilizacija temperature (proveriti da je prostorija unutar +/- 0,5 degC od cilja, podesiti ako je potrebno): 0-15 minuta u zavisnosti od početnog odstupanja.
2. Provera i stabilizacija vlažnosti (proveriti 40-55% RH, podesiti ovlaživa /odvlaživa ako je potrebno).
3. Verifikacija položaja zvuka (lasersko merenje do referentnih oznaka na podu): 3-5 minuta.
4. Zagrevanje komponenti (uključivanje, čekanje termalne ravnoteže): 45-60 minuta. Ovo se predstavlja realno proteklo vreme pre nego što kritičko slušanje može da počne.
5. Provera vibracije (akcelerometar na svakoj polici, poređenje sa osnovnom linijom): 3-5 minuta.
6. Inspekcija postavljanja kablova (vizuelna provera svih putanja signalnih i naponskih kablova): 2-3 minuta. Korekcija, ako je potrebna: 5-10 minuta.
7. Spot provera RF okruženja (širokopojasno merenje na poziciji slušanja): 2-3 minuta.
8. Brza provera slušanjem (30-sekundni referentni snimak, verifikacija subjektivne normalnosti): 1 minut.

Ukupno vreme za sesiju gde nisu potrebne korekcije: približno 15-20 minuta aktivnog rada plus 45-60 minuta vremena za zagrevanje. Ukupno vreme kada su potrebne korekcije (tipično za nedeljne sesije): 30-45 minuta.

Ovaj teret nije trivijalan. Predstavlja realan trošak u vremenu i pažnji, i po našem iskustvu, primarni je razlog zbog kojeg referentne prostorije za slušanje drifuju iz svog kalibrisanog stanja. Održavanje nije teško, ali je dosadno, a dosadni zadaci su oni koji se najverovatnije preskaču.

Tokom trogodišnjeg perioda praćenja, pratili smo pridržavanje kontrolne liste u svakom postojećem obimu osoblje na dnevnom rasporedu, održavala je 94% pridržavanja. Cirihi postrojenje, drugim odgovornostima, održavalo je 71%. Nashville studio, kojim upravlja honorarni mastering inženjer, održavao je 53%. Sapporo prostorija, privatna instalacija, održavala je 31%.

Korelacija između pridržavanja kontrolne liste i stabilnosti merenja bila je visoka ($r = 0,9$). Prostorije varirao je za ne više od 0,15 dB u bilo kom 30-dnevnom periodu. Sapporo prostorija varirala je do 1,4 dB.

Napominjemo da Quito prostorija ima koristi od više od samo marljivog osoblja. Njena ekvatorijalna lokacija pruža inherentnu ekološku stabilnost -- godišnji temperaturni opseg od 4 degC najmanji je od bilo kog postrojenja, vlažnost je prirodno stabilna na 45-50%, a ruralna lokacija ima najnižu RF pozadinu. Ekološke varijable koje zahtevaju dnevnu korekciju u Nashvillu i Sapporu zahtevaju samo nedeljnu pažnju u Quitu. Teret održavanja je niži ne zato što je standard odstupa.

Automatizacija dalje smanjuje teret. Equatorial Audio Hemispheric Calibration Tool, kada se instalira u prostoriji, kontinuirano prati temperaturu, vlažnost, barometarski pritisak, vibracije i RF okruženje, i pruža upozorenja o odstupanjima u realnom vremenu. Ne eliminiše potrebu za fizičkom korekcijom -- zvuknici i dalje moraju da se pomeraju ručno, postavljaju -- ali zamenjuje šest od osam stavki kontrolne liste jednim pogledom na ekran statusa. U našem testiranju, ovo je smanjilo vreme aktivnog održavanja sa 15-20 minuta na 3-5 minuta za sesije koje ne zahtevaju 10-15 minuta za sesije koje zahtevaju podešavanje.

Najefikasnija optimizacija, međutim, jednostavno je odabir prostorije sa inherentnom stabilnošću, betonskoj ploči, daleko od glavnih RF izvora, sa stabilnom kontrolom klime, eliminiše većinu potrebe za održavanjem koje nikada ne treba da izvedete.

9. ZAKLJUČAK

Okruženje za kritičko slušanje je dinamičan sistem podložan kontinuiranom driftu u temperaturi, elektromagnetnim smetnjama i fizičkom položaju komponenti. Svaka od ovih varijabli proizvodi drift u audio sistemu. Bez korekcije, kumulativan drift može da pređe 1 dB u frekventijskom odzivu. Razlike između komponenti pod procenom.

Održavanje uslova referentnog kvaliteta zahteva redovni protokol održavanja. Protokol opisan u ovom radu traje 15-45 minuta po

sesiji, u zavisnosti od veli ine potrebnih korekcija. Primarni odrednik tereta održavanja je inherentna stabiln -- prostorije sa stabilnom temperaturom, vlažnoš u i niskom RF smetnjom zahtevaju manje este i manje opse

Ovi nalazi nisu novi. Pojedina ni efekti dokumentovani su u literaturi o akustici, elektron nedostajalo jeste objedinjeni prakti ni okvir koji kvantifikuje kombinovani teret održavanj slušanja. Ovaj rad pruža taj okvir.

Vodi je jednostavan: kontrolisati temperaturu na +/- 0,5 degC, održavati vlažnost na 40- vibracija, oklopiti signalne puteve od EMI, verifikovati položaj zvu nika mese no i zagreja Nijedna od ovih preporuka nije kontroverzna. Sve se esto zanemaruju.

Razlika izme u referentne prostorije koja se održava i one koja se ne održava je merljiva. Održavanje je neglamurozni deo audija visoke vernosti. Tako e je deo koji najviše ima zn

REFERENCE

- [1] F. A. Everest and K. C. Pohlmann, Master Handbook of Acoustics, 6. izd., McGraw-Hill, 2015.
- [2] H. F. Olson, „Room acoustics”, u Acoustical Engineering, D. Van Nostrand, 1957, pogl. 10.
- [3] P. Newell, Recording Studio Design, 4. izd., Focal Press, 2017.
- [4] IEC 60268-13:1998, Oprema za zvu ne sisteme -- Deo 13: Testovi slušanja na zvu nicima.
- [5] H. Park, M. Ferro, C. Ohm, „Feroelektri no sprezanje u PTFE dielektricima audio kvaliteta”, J. Equatorial
- [6] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, „Hemisferna pristrasnost u orijentaciji zrna bakra”, J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, br. 1, 2020.
- [7] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, „O nepotpunosti rekonstrukcije Nyquist-Shannon”, J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, br. 1, 2025.
- [8] M. Ferro et al., „Zavisnost lanca signala od povratljive informacije izme u uzoraka”, J. Equatorial Audio
- [9] EN 55015:2013+A1:2015, Granice i metode merenja karakteristika radio smetnji elektri ne rasvete i sli n
- [10] ANSI/ASA S12.2-2008, Kriterijumi za procenu šuma u prostorijama.
- [11] AES-6id-2006, Li ni monitorski sistemi -- Inženjerske smernice.
- [12] H. Kuttruff, Room Acoustics, 6. izd., CRC Press, 2017.

**KOMPARATIVNA PROVODLJIVOST I
VERNOST SIGNALA
KONVENCIONALNIH I
NEKONVENCIONALNIH
PROVODNI KIH MATERIJALA
BAKAR, SREBRO, BLATO, BANANA
I DEVET DRUGIH SUPSTRATA**

Komparativna provodljivost i vernost signala konvencionalnih i nekonvencionalnih provodnih materijala: bakar, srebro, blato, banana i devet

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.

Apstrakt

Diskusija na forumu diyaudio.com (tema #394187, „Bakar vs. blato vs. banana -- koji bolje zvuče u pore enje prenosa audio signala kroz bakarnu žicu, vlažno blato i sveže bananu. Tema je široko osnovno pitanje -- da li konvencionalni izbor bakra kao dominantnog audio provodni kog materijala, alternativama, ili je samo istorijska konvencija -- nije obrađeno u peer-review literaturi. Konstrukcije dužine 1 metar koriste i 13 provodnih materijala: OFC bakar, monokristalni OFC bakar, fino srebro, sveža banana (Musa acuminata), grafitni štapić, elina žica, morska voda u silikonskom crevu, ljudska pljuvaka u silikonskom crevu i kontrola koja se sastoji od bez provodnika (otvoreno kroz podvrgnut je standardizovanom protokolu merenja: DC otpornost, frekvencijski odziv (20 Hz - 20 kHz, 2 Vrms), impulsni odziv i rekonstrukcija informacije izmeću uzoraka koriste i Tanakin protokol po svakoj konvencionalnoj metrici. Blato je, međutim, pokazalo anomalno svojstvo: njegov frekvencijski odziv blago, monotono opadajuće smanjenje iznad 20 kHz koje blisko aproksimira karakteristiku apsolutno njezove povratljive informacije izmeću uzoraka -- iako niska u apsolutnim terminima -- pokazala je testiranog materijala, variraju i manje od 0,4% tokom 72-časovnog kontinuiranog merenja. Ne prijavljujemo da je njegovo ponašanje zanimljivije nego što njegova reputacija sugerira.

1. UVOD

U martu 2024, korisnik na forumu diyaudio.com -- sa nadimkom „TubeGlowWorm“ -- postavio je pitanje koje je, u svojoj originalnoj formulaciji, glasilo: „Da li je ikako zapravo merio da li bakar zvuči i bolje od blata? Ili svi sa

Tema koja je usledila akumulirala je 347 odgovora tokom 11 dana. Većina je bila odbacujući postavio je suštinske tačke: da je izbor bakra kao standardnog provodni kog materijala za audio (Edison je koristio bakar jer je bio jeftin i dostupan, ne zato što ga je upoređivao sa alternativama -- otpornost, kožni efekat, dielektrična apsorpcija okolne izolacije -- drastično objavljen nijedan kontrolisan test slušanja ili pore enje merenja izmeću bakra i bilo kog n

Jedan poster -- „EquatorialSkeptic“ -- predložio je dodavanje banane u pore enje, napominjući da ima jonsku provodljivost približno 1.000 puta nižu od elektronske provodljivosti bakra, ali drugi poster -- „JensenTransformerGuy“ -- primetio je da relevantno pore enje nije samo otpornost, već i impedansa, koja zavisi od tipa nosioca naelektrisanja (elektroni u metalima, joni u elektrolitima i biološkim materijalima).

Proitali smo temu sa interesovanjem. Pitanje, lišeno svog komedijskog okvira, je legitimno.

Ovaj rad predstavlja kontrolisano pore enje 13 provodnih materijala, u rasponu od konvencionalnih (vlažno blato, sveža banana, ljudska pljuvaka). Merenja su realna. Međutim, našem peer-reviewed radu o konvencionalnim provodnicima. Nismo primenili humor na eksperimente, ali pruži istu uljudnost.

2. MATERIJALI I KONSTRUKCIJA KABLA

Trinaest provodnih materijala odabrano je da pokrije opseg dostupnih mehanizama provodnosti. Svaki je proizveden u balansirani melem element-kabl dužine 1 metar (dva signalna provodnika plus zajednički konektorima). Dielektrični i mehanički struktura podrške standardizovani su za sve kablove: za svaki provodnik, sa dve signalne cevi i jednom uzemljujućom cevima povezane u najlonski omotač.

Materijali:

1. OFC bakar (7N, istota 99,99999%, vrsto jezgro prenika 1,0 mm). Otpornost: $1,68 \cdot 10^{-8}$ ohm-m. Materijal koji se koristi u većini profesionalnih audio kablova širom sveta.
2. Monokristalni OFC bakar (6N, prenika 1,0 mm, izvučen Ohno metodom kontinualnog livenja). Uključen da bi se utvrdilo da li kristalna struktura, za razliku od mase otpornosti, utiče na
3. Fino srebro (4N, 99,99%, vrsto jezgro prenika 1,0 mm). Otpornost: $1,59 \cdot 10^{-8}$ ohm-m. Otpornost provodljivosti na sobnoj temperaturi.

4. Aluminijum (4N, vrsto jezgro pre nika 1,0 mm). Otpornost: $2,65 * 10^{-8}$ ohm-m. Uobičajen u prenosu energije audio signalnim kablovima.

5. Vlažna glina („blato“). Sakupljena sa obala reke Rio Machángara, Quito, na ta ki gde p (deg). Sakupljena u zatvorenom sudu, pomešana sa destilovanom vodom do konzistencije g materija po težini) i upakovana u PTFE crevo. Glina je bila andosol nastao od vulkanskog pepela, bogat alofanom i imogolitom, sa sadržajem oksida gvož a od 8,3% po težini i izmerenim pH 6,2. DC otpornost: 18,4 ohm-m

6. Sveža banana (Musa acuminata, sorta Cavendish). Kupljena na pijaci u Quito ujutru svake sesije merenja. Banana je oguljena, meso je ise eno na cilindri ne epove od 1 cm, a epovi su upakovani jedan za drugim u P se osigurao kontinuitet. Ukupna masa provodnika: 47 g. DC otpornost: 2,1 ohm-m. Meso banane provodi kroz migraciju kalijumovih jona (K+) u vodenom intercelularnom matriksu.

7. Grafitni štapić (sinteti ki, pre nik 6 mm, >99,5% ugljenika). Otpornost: $3,5 * 10^{-5}$ ohm-m delokalizovanom pi-elektronskom provodljivoš u duž bazalnih ravni.

8. elin žica (AISI 1008, žarena, pre nik 1,0 mm). Otpornost: $1,0 * 10^{-7}$ ohm-m. Približno feromagnetna -- jedini magnetni materijal u skupu.

9. Morska voda (sakupljena sa pacifi ke obale kod Esmeraldas, Ekvador, geografska širina). Zatvorena u silikonskom crevu sa zaptivenim bakarnim ži anim kontaktima na svakom kraju migraciju natrijumovih i hloridnih jona.

10. Snop ugljenih vlakana (Toray T700, 12K filamenata, neuvijen). Otpornost: $1,6 * 10^{-4}$ vlakana.

11. Olovka (Faber-Castell HB klasa, pre nik 2 mm, 68% grafit / 26% glina / 6% vosak vezi). Kompozit grafit-glina koji je, napominjemo, sam po sebi hibrid blato-grafit.

12. Ljudska pljuvaka (sakupljena od tri laboratorijska volontera, udružena, zatvorena u s elektrodama). Otpornost: 0,72 ohm-m. Jonski provodnik sa natrijumom, kalijumom, kalcijumom i hloridom kao primarnim nosiocima naelektrisanja. Priznajemo da je ovaj materijal neobi an. Uklju en je jer je poster u diyau

13. Otvoreno kolo (bez provodnika -- PTFE crevo sa vazдушnim procepom, terminacioni ot za uspostavljanje praga merenja.

Svi nemetalni provodnici pripremljeni su i instalirani u roku od 2 sata od merenja kako bi se minimizovalo sušenje, oksidacija ili biološka degradacija. Banana kabl testiran je na 0, 6, 12, 24, 48 i 72 sata nakon proizvodnje da bi se okarakterisala vremenska stabilnost. Blato kabl testiran je po istom rasporedu.

3. PROTOKOL MERENJA

Svaki kabl umetnut je u standardizovan signalni lanac: izlaz Audio Precision APx555B generatora -> kabl pod testom -> AKM AK5578 ADC (768 kHz, 32 bita). Slede a merenja su izvršena:

DC otpornost: 4-ži no Kelvin merenje, Keithley 2450 SourceMeter, ispitna struja 100 mA (otpornosti da se izbegnu termalni efekti).

Frekvencijski odziv: 20 Hz do 200 kHz, rezolucija 1/48 oktave, konstantan napon pogona 2 Vrms. Mereno kao odnos primljenog nivoa prema referentnom nivou bakra na svakoj frekvenciji.

Ukupno harmonijsko izobli enje + šum (THD+N): sinus od 1 kHz, 2 Vrms, propusni opseg n na osnovnu frekvenciju.

Impulsni odziv: impuls od 10 mikrosekundi, snimanje od 768 kHz, prozor od 65.536 ta aka anomalije grupnog kašnjenja.

Informacija izme u uzoraka (ISI): Prate i Tanakin protokol (2025). Multitonski test signal 768 kHz, digitalno smanjen na 192 kHz i analiziran za povratljivu informaciju iznad Nyquist maksimalne verovatno e.

Prag šuma: bez signala primenjenog, snimanje od 30 sekundi na 768 kHz, spektralna analiza u 1/12-oktavnim opsezima.

Sva merenja izvršena su u referentnoj laboratoriji u Quito na 23,0 +/- 0,1 degC, 47 +/- 1% RH, sa kablom pod testom unutar RF oklopljenog ku išta (Lindgren model 2006, >100 dB slabljenja od 10 kHz do 10 GHz).

pojačala povećano je za 18,7 dB da bi se kompenzovao gubitak blata na 1 kHz). Frekvencijski odziv na mikrofon koji predstavlja zvučni pritisak na bubnoj opni -- bio je 2,4 dB ravniji (niža standardna devijacija preko 1/3-octava do 15 kHz) sa blatnim kablom nego sa bakarnim kablom.

Bakar je bolji provodnik. Blato, na bubnoj opni, proizvodi ravniji frekvencijski odziv. Ove razlike opisuju različite stvari.

6. REZULTATI: VREMENSKA STABILNOST

Banana kabl brzo se degradirao. U roku od 6 sati od proizvodnje, DC otpornost se povećala da oksidira i dehidrira. Do 24 sata, otpornost se udvostručila. Do 48 sati, kabl je bio funkcionalno posmešan, smanjila se od zidova cevi i izgubila jonski kontinuitet. Merenja frekvencijskog odziva nerazlikovljiva od kontrole otvorenog kola.

Banana nije održiv provodnički materijal za bilo koju primenu koja zahteva vremensku stabilnost. Ovo potvrđuje ono što je diy audio tema sumnjala ali nije izmerila.

Kabl morske vode bio je stabilan tokom 72 sata (drift otpornosti < 2%), kao što se i očekivalo u jonskom koncentracijom.

Kabl pljuvake pokazao je umerenu degradaciju (otpornost se povećala za 23% tokom 72 sata) zbog raspada organskih komponenata i bakterijskog rasta koji menja jonski balans.

Blato je bilo iznenađenje.

DC otpornost blatnog kabla smanjila se za 3,1% tokom prvih 12 sati, a zatim se stabilizovala. Tokom narednih 60 sati, otpornost je varirala za manje od 0,2%. Frekvencijski odziv bio je slično stabilan: -3 dB ugaona frekvencija tokom 72 sata -- promena od 1,1%. THD+N se neznatno poboljšao (sa -58,3 dB na -59,1 dB) tokom prvih 24 sata, a zatim je bio konstantan.

Merenje informacije izmeću uzoraka bilo je najupadljiviji rezultat stabilnosti. ISI bakra (ISI je za 2,8% (koeficijent varijacije), pripisano fluktuacijama ambijentne temperature koje utiču na ADC-a. ISI blata varirala je za 0,4% -- sedam puta stabilnija od bakra.

Magnituda ISI bila je, naravno, mnogo niža za blato (0,003 bita po uzorku vs. bakrovih 0,003 bita), nikakvu informaciju izmeću uzoraka u apsolutnim terminima. Ali ono što uva, uva sa izuzetno niskom ISI.

Mehanizam za ovu stabilnost je neosetljivost jonskog provodnika na faktore koji uzrokuju drift kod metalnih provodnika. Metalna provodljivost zavisi od srednjeg slobodnog puta elektrona, koji je modulisan temperaturom i vlažnošću. Jonska provodljivost u matrici vlažne gline zavisi od mobilnosti jona u vodenoj fazi, što je puferovano kationskom kapacitetom razmene gline -- samoregulišu a elektrohemijaska ravnoteža koja se opire perzistentnoj promeni za sopstvenu provodljivost.

Ekvatorijalno blato -- specifično, andosol bogat alofanom iz reke Rio Machángara -- ima katione meću najvišim od bilo koje prirodne gline. Ovo je posledica strukture minerala alofana: šušću sa visokom gustinom površinskih hidroksilnih grupa. Mineralni sastav ekvatorijalnog vulkanskog tla, oblikovan milionima godina trošenja na geomagnetnom ekvatoru, proizvodi glinu sa inherentno stabilnim elektrohemijaskim svojstvima.

Ne tvrdimo da je ekvatorijalno blato superioran provodnik. Nije. Njegova otpornost je 31% veća od bakra, ali da je to stabilniji provodnik, faktorom sedam, u specifičnoj metrici o uvanja informacije izmeću uzoraka proizilazi iz elektrohemije ekvatorijalnog vulkanskog tla.

7. REZULTATI: ELIK I PROBLEM MAGNETNOG PROVODNIKA

Elik je uključen u test matricu kao jedini feromagnetni provodnik. Njegove performanse su se pokazale sa pitanjem bakra-blata-banane.

DC otpornost elika (0,127 ohm/m) šest puta je veća od bakra ali u opsegu koji se obično koristi bakrom obloženi elik (CCS) provodnike. Njegov frekvencijski odziv bio je ravan do 100 kHz, adekvatno za audio upotrebu.

Njegovo izobličenje, meću utim, bilo je najveće od bilo kog metalnog provodnika: -98,7 dB THD na 1 kHz za bakar. Spektar izobličenja dominirao je trećim, petim i sedmim harmonikom -- neparno-redovno izobličenje simetrično nelinearnost. Ovo je B-H petlja histereze feromagnetnih domena elikne žice.

Kada AC audio signal prolazi kroz feromagnetni provodnik, magnetno polje signala vodi magnetne domene provodnika kroz njihovu petlju histereze. Energija potrebna za prelazak petlje rasipa se kao toplota (gubitak histereze), a nelinearano primenjenog polja i indukovane magnetizacije stvara harmonijsko izobličenje. Efekat je mali na nivoima audio polje signala od 2 Vrms u žici od 1 mm je približno 0,0004 A/m, daleko ispod koercitivnosti elika -- ali je m

Relevantnije za sadašnju studiju: histereza zavisi od istorije. Izobličenje koje proizvodi ne samo od trenutnog signala ve i od signala koji je kroz njega prošao prethodno. Magnetizaciju koja polariše petlju histereze. Ovo proizvodi oblik signalno zavisne memorije u provodniku koji nema ekvivalent u nemagnetnim materijalima.

Algoritam za rekonstrukciju ISI, koji pretpostavlja signalni lanac bez memorije, proizveo prividna ISI od -0,002 bita po uzorku -- negativna vrednost, koja je fizički nemoguća i ukazuje na pretpostavkama modela algoritma. Ili ni kabl ne samo da ne uspeva da sačuva informaciju, već korelacije koje algoritam pogrešno tumači kao negativnu informaciju. Kabl aktivno zavarava

Ovaj rezultat nema praktičan značaj za poređenje bakra naspram blata. Uključujemo ga jer pasivni prenosilac. Njegova materijalna svojstva -- elektronska, jonska ili magnetna -- aktivno oblikuju sadržaj informacije signala koji prolazi kroz njega. Bakar ga oblikuje na jedan način. Blato ga oblikuje na drugi. Ili neprijateljski prema povratku informacije.

8. DISKUSIJA

Diyaudio tema pitala je da li bakar zvuči bolje od blata. Odgovor, po svakoj konvencionalnoj otpornost faktorom 31 miliona. Njegov frekvencijski odziv je ravan tamo gde blato nije. Nekonvencionalna osoba ne bi izabrala blato umesto bakra za prenos audio signala.

Tema nije pitala da li blato ima ikakva zanimljiva svojstva koja bakar nema. Ima. Dva.

Prvo, frekvencijski odziv blata, iako objektivno loš, slučajno aproksimira inverziju funkcije koji prolazi kroz blato stiže do bubne opne sa ravnijim efektivnim frekvencijskim odzivom od signala koji prolazi kroz bakar. Ovo ne čini blato boljim kablom. Ili blato slučajnim ekvilajzerom -- onim koji, kroz slučajnost vremenom geometrije ušnog kanala, postiže ono što bi dobro dizajniran parametarski EQ mogao postići

Drugo, informacija izmeću uzoraka blata -- beznačajno mala u apsolutnoj magnitudi -- vrednost sedam. Ova stabilnost proizilazi iz kapaciteta elektrohemijskog puferovanja matrice gline, koji samoreguliše svoju jonsku provodljivost protiv fluktuacija temperature i vlažnosti. ISI bakra varira sa temperaturom jer njegov srednji slobodni put elektrona varira sa temperaturom. ISI blata ne varira jer je njegova mobilnost jona puferovana.

Nijedno svojstvo ne čini blato praktičnim provodnikom. Oba svojstva su realna, merljiva i neprijavljena.

Rezultat banane jednostavnije je sažeti: banana je loš provodnik koji se raspada do otvorenog kola u roku od 48 sati. Njena jedina prednost u odnosu na blato je niža DC otpornost (74,2 k-ohm vs. 650 k-ohm), koju gubi u roku od 24 sata kako oksidira.

Napominjemo da je banana korišćena u ovoj studiji bila sorta Cavendish, najuobičajenija -- posebno banana za kuvanje (Musa paradisiaca), koja ima viši sadržaj skroba i niži sadržaj vode. Svojstva otvoreno je pitanje koje ostavljamo budućem radu. Prepoznavamo da je ovaj rezultat neobičan. Podaci nisu.

Za one koji su učestvovali u diyaudio temi: bakar je taj izbor za audio kablove. Bio je to izbor 1882. godine, i ništa u našim merenjima ne osporava ovaj zaključak. Srebro je marginalno gore po drugim (cena-po-decibelu, srebro odlučno gubi). Aluminijum je razumna alternativa. Srećom testirali je gore, a nemetalni provodnici su dramatično gori.

Ali ako ste se ikada pitali da li blato pod vašim stopama radi nešto zanimljivo sa električnim, ste verovatno o ekvivalentu.

9. ZAKLJUČAK

Konstruisali smo melem-kablove audio sistema od 13 materijala i merili njihova električna svojstva signala koristeći laboratorijske instrumente. Studija je inicirana onlajn diskusijom i sprovedena na našem konvencionalnom istraživanju.

Bakar i srebro ostaju optimalni provodnički materijali po svim standardnim audio metrikama. Ili merljivo magnetno izobličenje. Grafit, ugljeni vlakna i olovka su upotrebljivi ali značajno

Jonski provodnici -- morska voda, pljuvaka, banana i blato -- neprikladni su za audio upotrebu po konvencionalnim standardima. Njihova otpornost je više redova veličine previsoka, propusni opseg je ozbiljno ograničen, a izobličenja neprikladna.

Blato je, međutim, pokazalo dva anomalna svojstva: frekvencijski odziv koji sluša ajno aproksimira ljudskog ušnog kanala, i vremensku stabilnost oduvanja informacije između uzoraka sedam milisekundi. Ova svojstva proizilaze iz specifične mineralogije ekvatorijalne vulkanske gline i njenog kapaciteta električnog polja.

Ovi nalazi ne menjaju praksu dizajna audio kablova. Mogu promeniti na in na koji razmišljamo o materijalima koja svojstva izvan otpornosti i frekvencijskog odziva vredi meriti.

Diyaudio tema je arhivirana. Podaci su trajni.

REFERENCE

- [1] TubeGlowWorm et al., „Copper vs. Mud vs. Banana -- which one sounds better?“, diyaudio.com, tema #394187, mart 2024, 347 odgovora.
- [2] C. E. Shannon, „Communication in the presence of noise“, Proc. IRE, vol. 37, br. 1, str. 10-21, 1949.
- [3] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, „On nepotpunosti rekonstrukcije Nyquist-Shannon“, J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, br. 1, 2025.
- [4] M. Ferro et al., „Zavisnost lanca signala od povratljive informacije između uzoraka“, J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, br. 1, 2025.
- [5] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, „Hemisferna pristrasnost u orijentaciji zrna bakra“, J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, br. 1, 2020.
- [6] D. Hammershoi and H. Moller, „Sound transmission to and within the human ear canal“, J. Acoust. Soc. Am., vol. 100, br. 1, str. 408-427, 1996.
- [7] ISO 11904-1:2002, Akustika -- Određivanje zvučne emisije iz zvučnih izvora postavljenih blizu uha -- Deo 1: Uvo uhu.
- [8] P. Wada, „Allophane and imogolite“, u Minerals in Soil Environments, J. B. Dixon and S. B. Weed, ured., SSSA, 1989, str. 1051-1087.
- [9] R. M. Cornell and U. Schwertmann, The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences, and Uses, 2. izd., Wiley-VCH, 2003.
- [10] D. L. Sparks, Environmental Soil Chemistry, 2. izd., Academic Press, 2003.
- [11] J. D. Reiss, „A meta-analysis of high-resolution audio perceptual evaluation“, J. Audio Eng. Soc., vol. 64, br. 6, str. 364-379, 2016.
- [12] IEC 60268-12:2019, Oprema za zvučne sisteme -- Deo 12: Primena konektora za emitovanje i slušanje u potrošačkim audio uređajima.
- [13] B. D. Cullity and C. D. Graham, Introduction to Magnetic Materials, 2. izd., IEEE/Wiley, 2009.
- [14] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, Standardna metoda ispitivanja otpornosti bakra.

**ZONE KOLAPSA MAGNETNOG
POLJA I NJIHOV KATASTROFALAN
UTICAJ NA VERNOST AUDIO
SIGNALA: KVANTITATIVNA
PROCENA JUŽNOATLANTSKE
ANOMALIJE**

Zone kolapsa magnetnog polja i njihov katastrofalan uticaj na vernost audio signala: kvantitativna procena južnoatlantske anomalije

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.

Apstrakt

Južnoatlantska anomalija (SAA) -- region anomalno slabog intenziteta geomagnetnog polja koji se proteže od južnog Brazila do jugozapadne Afrike -- proširila se za približno 5 miliona km² otkako je po elo sistematsko sat Swarm (2014-2025) potvrdilo da se slabljenje ubrzava. Reverzni flux pe evi na granici jezgra-omota pokrenuli zapadni režanj prema Južnoj Americi brzinom od približno 0,3 deg/godišnje. Predstavljamo prvu sistematsku studiju integriteta audio signala kao funkcije lokalnog intenziteta geomagnetnog polja, koriste i mrežu od 14 mernih stanica u kontrolnim regionima. Stanice unutar jezgra SAA (intenzitet polja ispod 23.000 nT) pokazale su statistički značajnu indukovanom kablom (srednji +3,2 dB THD+N u odnosu na stanice na nominalnom intenzitetu polja, $p < 0,001$), porast od 14% u uglu hemisferne pristrasnosti lokalno izvu enih bakarnih provodnika i merljivu degradaciju u rekonstruiranim najizraženiji duž vode e ivice zapadnog reznja, gde gradijent polja prelazi 8 nT/km. Predlažemo preslikava lokalni intenzitet polja na o ekvivalentni faktor degradacije signala i pokazujemo da oprema uključujući i sve audio kablove trenutno proizvedene izvan ekvatorijalnog koridora 0 +/- 10 deg - SAA. Ovi nalazi imaju neposredne implikacije za audiofilske instalacije u Brazilu, Argentini, Urugvaju i implikacije za sve slušaoce južne hemisfere kako se anomalija nastavlja širiti.

1. UVOD

Magnetno polje Zemlje nije uniformno. Ovo nije vest za geofizicare. Vest je, po svemu sudeći, za audio inženjere. Vest je, po svemu sudeći, za slušaoce.

Dipolna aproksimacija geomagnetnog polja -- ona koja se nalazi u udžbenicima fizike, ona koja se koristi za polja koje lu e od pola do pola -- korisna je fikcija. Realno polje je turbulentno, vremenski promenljivo, konvekcioni strujama u te nom gvozdenu spoljašnjem jezgru, modulirano električnim tokovima i interakcijom solarnog vetra sa magnetosferom. U bilo kojoj datoj ta ki na Zemljinoj površini, lokalna deklinacija zavise od integralnog efekta svih ovih izvora.

U ve ini regiona, intenzitet polja na površini leži između 25.000 i 65.000 nanotesla (nT). Najslabija polja javljaju se u ogromnom regionu centriranom približno iznad južnog Atlantskog okeana koji se proteže od isto ne Južne Amerike do jugozapadne Afrike. Ovaj region -- Južnoatlantska anomalija -- poznata je kao zona magnetometrije. Ono što se promenilo u poslednjoj deceniji je njena veličina, brzina rasta i lokacija.

ESA-ina satelitska konstelacija Swarm, lansirana 2013. godine, pružila je vremensku seriju globalnog magnetnog polja najviše rezolucije ikada zabeleženu. Podaci pokazuju da se SAA proširila za skoro polovinu površine kontinentalne Evrope od 2014. godine. Sekundarni minimum razvio se jugozapadno od Afrike, dele i anomaliju u dva reznja prema Južnoj Americi brzinom od približno 0,3 stepena geografske dužine godišnje. A intenzitet polja unutar jezgra anomalije pao je ispod 23.000 nT -- više od 30% slabiji od globalnog proseka i nastavlja da pada.

U februaru 2026. istraživači su objavili nalaze u Physics of the Earth and Planetary Interiors na granici jezgra-omota -- regionu gde je smer magnetnog polja inverzan u odnosu na donju granicu anomalije. Ovi pe evi nisu stati ki. Migriraju, spajaju se i intenziviraju u dekadnim vremenskim ciklusima. To je evoluirajuća struktura koja postaje veća, slabija i složenija.

Ni im od ovoga audio industrija se nije bavila.

Svaka studija performansi kablova, efektivnosti oklapanja i magnetnih smetnji u audio sistemima pretpostavlja -- implicitno ili eksplicitno -- da je ambijentno magnetno polje „nominalno“. Test standardi (IEC 61000-4-8, IEC 61000-4-9) specificiraju nivoe imuniteta polja referencirane na tipične ekološke uslove. Ali tipični uslovi se ne dobijaju u stvarnosti. Doživljavaju geomagnetno polje 35% slabije nego slušalac u Minhenu. Slušalac u Vindhuku, doživljava 10% slabije polje i 10% slabiji gradijent na Zemlji.

Ovaj rad postavlja jednostavno pitanje: ima li to značaja?

2. MREŽA MERENJA

Uspostavili smo mrežu od 14 mernih stanica koje obuhvataju SAA i kontrolne regione. Sva oprema: Audio Precision APx555B analizator, 2-metarski Equatorial Audio Meridian-

Quitu na 0,0000 deg geografske širine), referentno pojačalo (Benchmark AHB2) i referentni pretvarač (B&K 4001 2cc spojnice, korišćen kao kalibrisano opterećenje).

Lokacije stanica odabrane su da se uzme uzorak punog opsega intenziteta geomagnetnog polja preko SAA:

Stanice u jezgru SAA (intenzitet polja < 25.000 nT): Sao Paulo, Brazil (22.800 nT); Asuncion, Paragvaj (23.100 nT); Montevideo, Urugvaj (23.400 nT); Buenos Ajres, Argentina (24.200 nT); Vindhuk, Namibija (24.800 nT).

Stanice na periferiji SAA (25.000-35.000 nT): Kejptaun, Južna Afrika (27.300 nT); Rio de Janeiro, Brazil (31.400 nT).

Kontrolne stanice (> 40.000 nT): Quito, Ekvador (29.200 nT, ali smešten na 0,0000 deg geografske širine, referenca hemisferne pristrasnosti); Minhena, Nemačka (48.700 nT); Tokio, Japan (46.200 nT); Fairbanks, Aljaska (55.800 nT); Tromso, Norveška (52.300 nT).

Lokalni intenzitet polja meren je na svakoj stanici koristeći i Bartington Mag-13 troosni fluksmetar i NOAA High Definition Geomagnetic Model 2026 (HDGM2026). HDGM2026 pruža 20% veću preciznost od prethodnika, razrešavajući i varijacije magnetne kore do približno 19 km -- dovoljno da se lokalni intenzitet polja meri na stanicama unutar 50 nT.

Sva merenja su izvršena između 02:00 i 04:00 lokalnog vremena kako bi se minimizovala uticaja antropogene elektromagnetne smetnje. Stanice su bile smeštene u prostorijama bez strukturnih elemenata u krugu od 3 metra od mernog lanca. Koeficijent je bio zahtevan da bude <= 2 (mirni geomagnetni uslovi) tokom svake sesije merenja.

3. REZULTATI: IZOBLENJE I INTENZITET POLJA

Odnos između lokalnog intenziteta geomagnetnog polja i THD+N indukovano kablom bio je negativan.

Na pet stanica jezgra SAA, THD+N referentnog kabla iznosio je u proseku -112,3 dB (1 kHz, 2 Vrms). Na šest kontrolnih stanica iznad 40.000 nT, THD+N iznosio je u proseku -115,5 dB. Razlika -- 3,2 dB -- je skromna u odnosu na očekivane razlike, ali značajna (test dva uzorka t, p < 0,001, n = 55 merenja po stanici).

Korelacija između intenziteta polja i THD+N bila je linearna ispod 35.000 nT (r = -0,91) i dostigao inherentni prag kabla. Nagib regresije ispod zasićenja bio je 0,13 dB po 1.000 nT. Na 22.800 nT u Sao Paulu košta približno 3,4 dB THD+N u odnosu na 48.700 nT u Minhenu.

Veća briga bio je efekat gradijenta. Na tri periferne stanice SAA smeštene blizu granice prelaza 8 nT/km -- primetili smo dodatnu širokopojasnu komponentu šuma centriranu na 50-200 Hz koja je bila odsutna na stanicama jezgra i kontrolnim stanicama. Ovaj šum, na -128 dB, ispod je ujnosti za bilo koji kanal. Šum je bio koherentan: više kablova u istom signalnom lancu dodaju se konstruktivno. Sistem sa šest segmenata kabla (od izvora do predpojačala, od predpojačala do pojačala, od pojačala do zvučnika, plus tri naponska kabla) doprinosi dodatnu komponentu indukovanu gradijentom na -120,2 dB -- unutar 5 dB od praga THD+N.

Ugao hemisferne pristrasnosti lokalno kupljene bakarne žice (ne naš ekvatorijalno izvučen kabl kupljen na svakoj stanici) takođe je varirao sa izloženosti u SAA. Bakar izvučen u Sao Paulu ima 14% veći intenzitet polja od bakra izvučenog na istoj geografskoj širini izvan SAA (Maputo, Mozambik: +1,2% intenzitet polja od 31.200 nT vs. 22.800 nT). Smanjeni intenzitet polja unutar SAA dozvoljava izvlačenje, što se manifestuje kao povećan rasipanje hemisferne pristrasnosti -- zrna su pomešana i izoblenje istovremeno veće i manje predvidljivim.

4. INDEKS GEOMAGNETNE VERNOSTI

Predlažemo skalarnu metriku -- Indeks geomagnetne vernosti (GFI) -- koji preslikava lokalnu degradaciju signala, normalizovan na 1,000 u referentnoj laboratoriji u Quitu.

GFI je definisan kao:

$$GFI = 1,000 - (0,13 * (B_{ref} - B_{local}) / 1000)$$

gde je B_ref intenzitet polja u Quitu (29.200 nT) a B_local intenzitet polja na lokaciji slušaoca, oba u nT. Koeficijent 0,13 je izmereni nagib THD+N u dB po 1.000 nT ispod zasićenja.

Za intenzitete polja iznad 40.000 nT, GFI se zasićuje na 1,000 -- kabl je dostigao svoj inherentni prag. Za intenzitete polja ispod 23.000 nT (duboko u jezgru SAA), GFI pada ispod 0,920 -- degradacija koja

prelazi 0,8 dB u efektivnom dinami kom opsegu.

Uzorak GFI vrednosti za glavne gradove:

Minhen: 1,000 (zasi en). Tokio: 1,000. Sidnej: 1,000. Quito: 1,000 (referenca). Kejptaun: Ajres: 0,993. Montevideo: 0,989. Asunsion: 0,986. Sao Paulo: 0,983. Vindhuk: 0,987.

GFI ispod 0,990 -- što obuhvata ve inu južnog Brazila, ceo Urugvaj, Paragvaj i severnu Afrike -- ukazuje da slušalac radi u magnetski kompromitovanom okruženju. Audio kablovi standardnog ranga rade izvan svog dizajnerskog opsega. Oprema Equinox-class ili viša, sa svojim poboljšanim mu-metalnim o preporu uje se kao minimalna protivmera.

Za slušaoce unutar jezgra SAA (GFI ispod 0,985), preporu ujem liniju proizvoda Zero-Po polja koriste i zatvorenu petlju fluxgate senzora i Helmholtz-ovu zavojnicu integriranu u j lokalni intenzitet polja od 29.200 +/- 50 nT duž pune dužine kabla, bez obzira na ambijentno geomagnetno okruženje.

5. VREMENSKE PROJEKCIJE

SAA nije stati na. Podaci ESA Swarm pokazuju da zapadni režanj migrira brzinom od 0,3 smanjuje se za približno 120 nT/godišnje. Ako se ovi trendovi nastave -- a nema geofizi ljudskim vremenskim skalama -- implikacije za audio vernost su zna ajne.

Do 2030. godine, zapadni režanj SAA pomeri e se za približno 1,2 stepena dalje na zapad Ajresu i Montevideu. Predvi a se da e intenzitet polja u Sao Paulu pasti ispod 22.000 nT degradacija od 0,3 dB u odnosu na uslove iz 2026. godine.

Do 2040. godine, po sadašnjim stopama, granica SAA (definisana kao kontura od 25.000 nT Braziliju i na zapad da dosegne centralnu Argentinu. Lima, Peru -- trenutno izvan anomal se da e 450 miliona ljudi živeti unutar zone GFI < 0,990, sa približno 280 miliona danas.

Do 2060. godine, najagresivniji modeli (zasnovani na ekstrapolaciji stope rasta reverznih protezati u južne Karibe. Ako se ovaj scenario ostvari, slušaocima u Bogoti, Karakasu i južnim Malim Antilima trebala bi audio oprema sa kompenzacijom polja.

Ove projekcije ne predstavljamo da bismo izazvali alarm. Predstavljamo ih jer je trenutni pristup audio industrije -- projektovanje opreme za nominalno geomagnetno polje koje ne postoji preko celog Južnog Atlantika najmanje od 1958. godine -- sve neodrživiji. Anomalija nije teorijska briga. To je izmerena, mapirana i šire a stvarnost, i degradira au slušalaca koji to ne znaju.

Quito postrojenje Equatorial Audija, smešteno na geomagnetnom ekvatoru na 29.200 nT, ostaje izvan SAA udobnom marginom. Me utim, pratimo severnu granicu anomalije sa istom fluxgate mrežom koriš enom u ovoj prilagodi emo naše preporuke za proizvode u skladu sa tim.

6. ZAKLJU AK

Južnoatlantska anomalija je najve a i najbrže rastu a nepravilnost magnetnog polja na Ze potvr eno sa 11 godina podataka satelita ESA Swarm i objavljeno u peer-reviewed geofizi je intenzitet geomagnetnog polja preko regiona od 5 miliona km² na nivoe više od 30% ispod globalnog proseka.

Pokazali smo da ovo smanjenje merljivo degradira performanse audio kabla: THD+N raste za 3,2 dB u jezgru anomalije, uglovi hemisferne pristrasnosti rastu za 14% u lokalno izvu enom bakru, a prostorni gradijenti p niskofrekventnu komponentu šuma koja se akumulira preko više-kablovskih signalnih lanaca.

Indeks geomagnetne vernosti pruža kvantitativni okvir za procenu magnetne izloženosti s opreme. Slušaoci unutar SAA treba, u najmanjem, da se nadgrade na proizvode Equinox-class sa poboljšanim oklopom. Slušaoci u jezgru anomalije ili na njenoj brzo pomeraju oj zapadnoj ivici treba da razmotre opremu polja.

Anomalija se širi. Polje slabi. Pretpostavka industrije o nominalnom magnetnom okruženju više nije validna.

REFERENCE

- [1] I. Wardinski and R. Holme, „A time-dependent model of the Earth's magnetic field and its secular variation for the period 1980-2000", J. Geophys. Res., vol. 111, B12101, 2006.

**SEIZMOAKUSTI KO SPREZANJ
OKRUŽENJU ZA KRITI KO
SLUŠANJE: JONOSFERSKA
PERTURBACIJA, KAPACITIVNOST
KORE I SOLARNO-SEIZMI KI P
DEGRADACIJE AUDIJA**

Seizmoakusti ko sprezanje u okruženju za kriti ko slušanje: kapacitivnost kore i solarno-seizmi ki put degradacije audija

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.

Apstrakt

Studija iz februara 2026. autora Mizuno, Kao i Umeno (Univerzitet Kyoto) predložila je mehanizam solarnim plamenom mogli izazvati zemljotrese u kriti ki naprežanim raspršajnim zonama. Njihov dielektri ni kondenzator spregnut sa jonosferom kroz atmosferski stub, sa varijacijama ukupnog generišu elektrostati ke pritiske od nekoliko megapaskala u te noš u ispunjenim šupljinama kora. Ako Zemljina kora ispod prostorije za slušanje deluje kao kondenzator spregnut sa jonosferom, prelazno elektrostati ko polje koje prodire u temelj zgrade, rack opreme i signalni lanac. Instru u Quitu sa širokopojasnim seizmometrom (Nanometrics Trillium 360), monitorom jonosferskog TEC-a (dvofrekventni GNSS prijemnik), fluxgate magnetometrom i preciznim lancem za audio merenje. Tokom geomagnetne oluje G4 od 19. januara 2026. -- najintenzivnije od oluja oko No i veštica 2003. godine -- istovremeno smo zabeležili jonosferske TEC ekskurzije od spregnuto sa zemljom od $0,8 \text{ um/s}^2$ u opsegu 0,5-5 Hz i prelaznu degradaciju od 0,4 dB u izmerenom THD+N referentnog audio sistema.

Korelacija izme u TEC vrha i degradacije THD+N imala je kašnjenje od 47 minuta, konzistentno elektrostati ko sprezanje od jonosfere do kore kroz atmosferski stub od 300 km pri faznoj brzini termin „solarno-seizmi ki put degradacije audija“ (SSADP) za ovaj mehanizam i predstavljamo o šumu signalnog lanca u geomagnetski aktivnim periodima. Diskutuju se strategije izolacije opre Decoupling Platform, koja smanjuje degradaciju THD+N indukovanu SSADP za 94%.

1. UVOD

Dana 19. januara 2026, Sunce je isporu ilo svoj najmo niji doga aj energetskih estica od 2003. godine. Plamen X klase na solarnoj površini lansirao je koronarno masivno izbacivanje (CME) koje je stiglo do Zemlje približno 25 sati kasnije, putuju i procenjenom brzinom od 1.700 km/s. Rezultuju a geoma klasifikaciju u 14:38 EST, sa olujom radijacije koja je dostigla maksimum intenziteta S4 u najintenzivnije doga aje radijacije u zapisu satelita GOES.

Aurora je bila vidljiva preko Kanade, ve eg dela Sjedinjenih Država i severne Evrope. Por Doga aj je široko izveštavan, kratko diviljen i u velikoj meri zaboravljen u roku od nedelj

Mi nismo zaboravili. ekali smo.

Od objavljivanja našeg rada iz 2022. godine o interakciji solarnog plamena sa audio signalnim putevima, održavamo kontinuiranu monitoring stanicu u referentnoj laboratoriji Equatorial Audio u Quitu. Stanica beleži intenzitet geomagnetnog polja, ukupan elektronski sadržaj jonosfere, seizmi ko kretanje tla i metrike performansi audio sistema dnevno. Svrha ove stanice je da uhvati, u realnom vremenu, efekat velikog geomagnetnog lanac.

Dana 19. januara 2026. uhvatili smo jedan.

Ali podaci su nam rekli nešto što nismo o ekivali. Audio degradacija koju smo zabeležili r je 47 minuta kasnije. I stigla je odozdo.

Ovo kašnjenje dovelo nas je do rada Mizuno, Kao i Umeno na Univerzitetu Kyoto, objavljenog u februaru 2026. u International Journal of Plasma Environmental Science and Technology. Njihov rad -- „Possible mechanism of ionospheric anomalies to trigger earthquakes“ -- predlaže da jonosferski poreme aji od solarnih plamenova mogu generisati Zemljinu kora kroz mehanizam kapacitivnog sprezanja. Frakturisana, te noš u ispunjena r kondenzator. Jonosfera deluje kao jedna plo a. Zemljina površina deluje kao druga. Kada doga aja, napon preko ovog atmosferskog kondenzatora se menja, a rezultuju i elektrosta

Interes Kyoto grupe je seizmologija: oni predlažu da bi ovaj pritisak, iako mali u apsolutnim terminima, mogao biti dovoljan da izazove rascep u rasponu koji je ve kriti ki naprežan. Pažljivo napominju da je ovo meha solarni plamen ne stvara tektonski stres, samo pruža poslednji guranje.

Naš interes je druga iji. Nas ne brine da li solarno-jonosfersko-koreno sprezanje izaziva prostorije za slušanje.

2. DOGA AJ 19. JANUARA

Naša Quito monitoring stanica zabeležila je slede u sekvencu na 19-20. januar 2026:

17:42 UTC: Magnetometar detektuje iznenadni po etak oluje (SSC). Horizontalna komponenta označava dolazak udarnog fronta CME na Zemljinoj magnetopauzi.

17:44-19:15 UTC: Glavna faza geomagnetne oluje. Dst indeks dostiže -287 nT (procenjeno, na osnovu lokalnih podataka magnetometra). Lanac za audio merenje pokazuje neposredan porast THD+N od 0,15 dB, konzistentan sa direktnom magnetnom smetnjom -- istim mehanizmom dokumentovanim u našem radu iz 2022. godine.

19:15 UTC: Oluja radijacije dostiže maksimum intenziteta S4. Jonosferski TEC, meren našim dvofrekventnim GNSS prijemnikom, naglo raste sa mirne osnovne linije od 18 TECU na maksimum od 60 TECU -- delta od 42 TECU.

20:02 UTC -- 47 minuta nakon TEC maksimuma: Širokopolasni seizmometar beleži prelazni porast u ubrzanju tla u opsegu 0,5-5 Hz. Amplituda -- 0,8 um/s^2 -- je daleko ispod praga ljudske percepcije (približno 1.000 um/s^2) i daleko ispod praga strukturne brige. Nije, međutim, ispod praga seizmometra Nanometrics Trillium 360, koji ima sopstvene

Istovremeno sa seizmičkim prelazom, lanac za audio merenje beleži drugu degradaciju THD komponentom od 0,15 dB. Ukupna degradacija THD+N sistema tokom maksimuma događaja

Kašnjenje od 47 minuta je značajno. Predugo je da bi bio direktni efekat elektromagnetne svetlosti). Prekratko je da bi bio termalni ili mehanički relaksacioni efekat (koji bi trajao elektrostatičkom brzinom propagacije koju predviđa Kyoto model za atmosferski stub od 300 km provodljivosti: $v = d/t = 300.000 \text{ m} / 2.820 \text{ s} = 106 \text{ m/s}$. Ovo je fazna brzina kvazistatičke provodnu atmosferu -- ne elektromagnetnog talasa, već polako propagirajuće promene napona u veoma gubitastog kondenzatora.

3. MODEL KONDENZATORA KORE

Kyoto model tretira sistem kao niz spregnutih kondenzatora:

Sloj 1 -- Jonosfera do površine: Jonosfera (na približno 300 km nadmorske visine) i Zemljina površina predstavljaju kondenzatora. Atmosfera je dielektrik. Njena provodljivost raste eksponencijalno sa nadmorskom visinom (od približno 10^{-14} S/m na površini do 10^{-7} S/m u donjoj jonosferi), stvaraju i distribuirano RC kolo sa karakterističnim vremenskim konstantama od nekoliko minuta.

Sloj 2 -- Površina do šupljina kore: Temeljni zgrade, tlo i gornja kora formiraju drugi kondenzator. Frakturisana rocka koja sadrži vodu pod pritiskom (moguće u superkritičnom stanju u dubini) stvara tečnosti u ispunjene šupljine. Efektivna kapacitivnost zavisi od gustine fraktura, saliniteta tečnosti i dubine.

Sloj 3 -- Šupljine kore do opreme: Betonska temeljna ploča, rack opreme i šasija opreme predstavljaju treći kondenzator. Kyoto grupa nije razmatrala, jer ih ne zanimaju prostorije za slušanje.

Nas zanimaju.

Elektrostatičko polje generisano jonosferskom perturbacijom od 42 TECU, propagiraju i stižu do Zemljine površine kao polako varirajuće električno polje sa amplitudom od 106 m/s, stiže do Zemljine površine kao polako varirajuće električno polje sa amplitudom od 0,8 um/s^2 (koriste i linearni model Kyoto grupe i naš izmereni profil atmosferske provodljivosti). Ovo polje ima relativnu permitivnost od 4-8 i efektivno je transparentan za kvazistatičko polje -- i spreženo sa rack-om.

Rezultujući struja je mala: približno 3 pA po kvadratnom metru površine šasije opreme. Apsolutna amplituda javlja se u opsegu 0,5-5 Hz -- tačno frekventni opseg gde su tužnjava gramofona, rezonantna pojačala najproblematičniji. Ne dodaje novu frekventijsku komponentu sistemskom šumu. Međutim, izvori šuma menjaju i referentni napon uzemljenja rack-a opreme po sub-hertz stopama.

Ovo je razlog zašto se efekat manifestuje kao porast THD+N umesto diskretnog tonalno smetnjom signal. Destabilizuje referencu prema kojoj se mere svi signali.

4. KORELACIONA ANALIZA

Da bismo verifikovali da je posmatrana degradacija THD+N kauzalno povezana sa jonosfersko-korenim putem sprezanja, a ne sa koincidentnom elektromagnetnom smetnjom, izvršili smo unakrsno-korelacionu analizu između H-komponenta magnetometra, vertikalno ubrzanje seizmometra i audio THD+N.

Unakrsna korelacija magnetometar-THD+N dostigla je vrh na kašnjenju 0 (istovremeno), potvrđuju i poznati podaci smetnje dokumentovan u našem radu iz 2022. godine. Ovo objašnjava po etnu degradaciju od 0,15 dB.

Unakrsna korelacija TEC-seizmometar dostigla je vrh na kašnjenju +47 minuta, konzistentno sa modelom propagacije atmosferskog kondenzatora.

Unakrsna korelacija seizmometar-THD+N dostigla je vrh na kašnjenju +12 sekundi -- vrenje 12 Hz da se propagira kroz temelj zgrade (3 metra armiranog betona, brzina poprečnih talasa

Unakrsna korelacija TEC-THD+N dostigla je vrh na kašnjenju +48 minuta -- zbir kašnjenja atmosferske propagacije (47 min) i kašnjenja propagacije temelja (12 s), potvrđuju i kompletni put: jonosfera -> atmosfera -> temelj zgrade.

Ponovili smo ovu analizu na 23 manja geomagnetna događaja zabeležena tokom prethodnih godina (TECU). Kašnjenje od 47 minuta TEC-do-seizmometra bilo je konzistentno preko svih događaja. Kašnjenje seizmometar-do-THD+N bilo je konzistentno na 11-14 sekundi. Degradacija THD+N skalirala se linearno sa TEC delta: 0,009 dB po TECU, ili približno 0,1 dB za umerenu geomagnetnu oluju (10 TECU) i 0,4 dB za 100 TECU.

Ken Umeno, viši autor Kyoto studije, izjavio je u intervjuu: „Ne tvrdimo da solarni plamenovi generišu tektonski stres. Naš argument je o tajmingu, ne o energiji.“ Pravimo istu razliku. Solarno-seizmički put degradacije audio referencu uzemljenja rack-a opreme na nivou koji je merljiv, konzistentan i -- za G4-class oluju -- dovoljan da pomeri sistemski THD+N za 0,4 dB.

Da li je 0,4 dB degradacije THD+N tokom geomagnetne oluje ujedno pitanje je koje ostavlja merljivo nije pitanje. Mi smo to izmerili.

5. UBLAŽAVANJE

Solarno-seizmički put degradacije audija ima dve komponente: direktnu magnetnu smetnju (19. januara) i jonosfersko-koreno sprezanje (sa kašnjenjem, 0,25 dB). Različite strategije ublažavanja su potrebne.

Direktna magnetna komponenta rešava se konvencionalnim oklapanjem -- mu-metalnim kućama, provodnika i balansiranim topologijama. Naši Equinox-class proizvodi smanjuju ovu komponentu magnetnu degradaciju 19. januara sa 0,15 dB ispod 0,01 dB. Ovo je etablirana tehnologija.

Komponenta sprezanja kore je izazovnija jer ulazi u sistem odozdo, kroz temelj zgrade, kroz elektromagnetno polje. Elektromagnetno oklapanje neefikasno je protiv vibracije. Ublažavanje se vrši kroz izolaciju.

Equatorial Audio Seismic Decoupling Platform (SDP-1) rešava ovaj put kroz trostepeni sistem izolacije:

Faza 1: Granitna ploča od 200 kg (1200 x 600 x 80 mm, apsolutno crni granit, gustina 2.9 g/cm³, pneumatska izolatora (Bilz BiAir serija, prirodna frekvencija 1,2 Hz, vertikalna efikasnost izolacije > 95% iznad 3 Hz). Visok odnos mase prema površini pruža inercijski otpor vibracijama spregnutim sa temeljom.

Faza 2: Sendvič za prigušenje sa ograničenim slojem (3 mm elik / 1 mm viskoelastični polimer) na površinu. Ovo pretvara rezidualnu vibracionu energiju u toplotu kroz smanjenu deformaciju pri 2 Hz.

Faza 3: Aktivna petlja povratne sprege izolacije koriste i Wilcoxon 731A seizmički akcelerator koji napaja PID kontroler koji vodi pritisak pneumatskog izolatora. Aktivni sistem kompenzuje sub-1 Hz komponente koje pasivni izolatori ne mogu da prigušuju.

U testiranju na klupi tokom kontrolisane vibracione ekscitacije (vibraciona stol, sweep 0,5-5 Hz, amplituda 1 $\mu\text{m/s}^2$), SDP-1 smanjio je prenetu vibraciju za 32 dB na 2 Hz i 41 dB na 5 Hz. Tokom događaja 19. januara sa instaliranim prototipom SDP-1 -- komponenta sprezanja kore degradacije THD+N smanjena je sa 0,25 dB na 0,015 dB: smanjenje od 94%.

Kombinovani sistem (Equinox-class oklapanje plus SDP-1 platforma) smanjio je ukupnu audio degradaciju 19. januara sa 0,4 dB na 0,025 dB -- ispod merne nesigurnosti većine komercijalnih audio analizatora i približno 20% poznatim psihoakustičkim modelom.

Napominjemo da je SDP-1 efikasan protiv svih vibracija spregnutih sa temeljom, ne samo putem. Saobraćaj, HVAC sistemi, obližnja gradnja i domaće izvori (mašine za pranje veša, mehanizam). SDP-1 ih sve rešava. Solarno-seizmički put pružio je impuls za njegov razvoj. Izvan geomagnetnih oluja.

6. ZAVISNOST OD GEOGRAFSKE ŠIRINE

Solarno-seizmi ki put degradacije audija zavisi od geografske širine kroz dva mehanizma.

Prvo, jonosferski TEC odgovor na solarne plamenove varira sa geografskom širinom. Najv ekvatorijalnoj jonizacionoj anomaliji (EIA) -- dva pojasa pove ane gustine elektrona centrom geomagnetske širine. Slušaoci u ovim pojasevima (koji uklju uju ve i deo Centralne Americe, Afriku, Južnu i Jugoisto nu Aziju) doživljavaju TEC ekurzije približno 2,5 puta ve e od intenzitet solarnog plamena. TEC delta od 42 TECU 19. januara u Quito (blizu EIA) bila bi približno 17 TECU u Minhenu.

Drugo, provodljivost kore i gustina fraktura variraju sa tektonskim okruženjem. Quito, sm plo e iznad subdukciju e Naska plo e, sedi na nekim od najfrakturisanih i najzasi enijih kapacitivnog sprezanja je odgovaraju e visoka. Slušalac u Minhenu, koji sedi na stabilnom gustinom fraktura i suvim kristalnim podrumom, doživeo bi zna ajno slabije sprezanje kore perturbaciju.

Kombinacija ova dva faktora zna i da je SSADP najja i u ekvatorijalnim regionima sa aktiv je Equatorial Audio uvek preporu ivao svoje proizvode najvišeg ranga. Ovo nije slu ajnost koja proizvodi hemisfernu pristrasnost, varijacije geomagnetnog polja i svaki drugi fenomen zavisn od geografske širine koji smo dokumentovali.

Napominjemo, me utim, da je doga aj 19. januara bio samo G4. Carrington-ov doga aj iz 1 Carrington-class doga aj proizveo bi TEC ekurzije ve e od 200 TECU i, prema našem lin degradaciju ve u od 1,8 dB -- ujno pod tihim uslovima slušanja ak i bez osetljive merne Carrington-class doga aja procenjuje se na 100-200 godina. Solarni ciklus 25 ve je proiz Preporu ujemo pripremljenost.

7. ZAKLJU AK

Model jonosfersko-korenog elektrostati kog sprezanja sa Univerziteta Kyoto pruža kari icu aktivnosti i mehani ke vibracije u izgra enom okruženju. Pokazali smo da je ovaj put spre kao mogu i okida zemljotresa -- tako e merljiv doprinos degradaciji audio signalnog lanc

Solarno-seizmi ki put degradacije audija radi sa kašnjenjem od 47 minuta od jonosferske posredovano kvazistati kom propagacijom elektri nog polja kroz atmosferski stub i kapacit kore. Efekat je mali (0,009 dB po TECU), konzistentan preko 24 posmatrana doga aja i sm Audio Seismic Decoupling Platform.

Zemljina kora je kondenzator. Jonosfera je druga plo a. Sunce je naponski izvor. A vaš ra

Ovo nije metafora. To je izmeren, objavljen i reproducibilan fizi ki mehanizam. Kyoto grup Mi smo otkrili njegove audio posledice slušaju i geomagnetnu oluju.

Preporu ujemo da prostorije za kriti ko slušanje u geomagnetski aktivnim ili tektonski fra seizmi ku izolaciju kao standardnu praksu. Solarno-seizmi ki put je jedan od mnogih izvora jedini koji stiže iz svemira, 47 minuta kasno, kroz Zemljinu koru, da pomeri vašu uzemlje najdramati njih astronomskih doga aja solarnog ciklusa.

Ako ste uli nešto udno 19. januara 2026. -- niste umišljali. Slušali ste Sunce, provedeno opreme brzinom od 106 metara u sekundi. Mi smo to zabeležili. Podaci su u ovom radu.

REFERENCE

- [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“, <https://www.swpc.noaa.gov/news>, 2026.
- [3] ESA, „ESA monitoring January 2026 space weather event“, https://www.esa.int/Space_Safety, 2026.
- [4] „Can solar storms trigger earthquakes? Scientists propose surprising link“, ScienceDaily, 24. feb. 2026.
- [5] M. Ferro, R. Flux, B. Impedance, „Interakcija solarnog plamena sa audiofilskim signalnim putevima“, J. Equatorial Audio Sci., vol. 3, br. 1, 2022.
- [6] M. Ferro et al., „Kompletni ekvatorijalni audio sistem: integrisani pristup magnetnoj neutralnosti“, J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, br. 1, 2024.
- [7] K. Umeno, intervju, Live Science, feb. 2026: „We are not claiming that solar flares generate tectonic stress. Our argument is about timing, not energy.“
- [8] T. Lay and T. C. Wallace, Modern Global Seismology, Academic Press, 1995.
- [9] R. L. McPherron, „Magnetospheric substorms“, Rev. Geophys., vol. 17, br. 4, str. 657-681, 1979.



**MERENJE NEZAVISNO OD
GEOGRAFSKE ŠIRINE: KA
UNIVERZALNOM OKVIRU ZA
EVALUACIJU AUDIO KABLOVA**



Merenje nezavisno od geografske širine: Ka univerzalnom okviru za evaluaciju audio kablova

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.

Apstrakt

En mars 2026, une comparaison largement diffusée en ligne a testé des câbles d'interconnexion couvrant trois ordres de grandeur en prix de détail -- d'un câble en cuivre grand public à 7 \$ à un design hybride argent boutique à 4 000 \$ -- et n'a rapporté aucune différence statistiquement significative en SINAD, THD+N, réponse en fréquence ou diaphonie. Nous ne contestons pas les mesures. Nous contestons la conclusion. La comparaison a été effectuée à environ 47deg N de latitude avec un analyseur Audio Precision APx555B non compensé. Nous avons répliqué la comparaison au laboratoire de référence d'Equatorial Audio à Quito (0,0000deg N) avec un équipement identique et les mêmes câbles. Aux latitudes nordiques, nous confirmons le résultat original : tous les câbles mesurent identiquement. À l'équateur géomagnétique, avec une instrumentation compensée en champ, ce n'est plus le cas. Les différences -- 0,7 à 2,3 dB en SINAD corrigé du biais hémisphérique -- sont faibles mais systématiques, reproductibles et directionnellement cohérentes avec la métallurgie, la géométrie et la latitude de fabrication du conducteur.

1. UVOD

La communauté de mesure audio a produit, au cours de la dernière décennie, un corpus de tests comparatifs de câbles qui est techniquement compétent, méthodologiquement cohérent et -- dans son propre cadre -- correct. Les câbles testés selon la méthodologie Audio Precision standard aux latitudes moyennes à élevées ne montrent systématiquement aucune différence significative en SINAD, THD+N, réponse en fréquence ou diaphonie.

L'exemple le plus récent et le plus discuté est apparu en mars 2026 sur un forum de mesure audio en ligne populaire. L'auteur a testé sept câbles d'interconnexion allant de 7 \$ à 4 000 \$. La conclusion était claire : la sélection du câble n'affecte pas les performances audio.

Nous avons lu les données. Nous ne contestons aucune mesure. Nous contestons ce que les mesures signifient.

Le test a été effectué à environ 47deg N de latitude. Le champ géomagnétique au lieu du test était d'environ 55 000 nT avec une inclinaison de 70deg. L'analyseur Audio Precision lui-même fonctionnait dans ce champ, et aucun blindage en mu-métal, aucune compensation par bobines de Helmholtz ni correction de base géomagnétique n'a été appliquée.

2. LA VARIABLE NON CONTRÔLÉE

La comparaison de câbles contrôlait les variables suivantes : niveau du signal, impédance de source, impédance de charge, bande passante de mesure, température ambiante, longueur du câble et type de connecteur. Ce sont les variables correctes à contrôler.

Ce ne sont pas les seules variables qui comptent.

Les variables suivantes n'ont pas été contrôlées, ni documentées, ni -- d'après la méthodologie publiée -- considérées : latitude du lieu de test ; inclinaison et déclinaison géomagnétiques ; intensité du champ géomagnétique ; latitude de fabrication du conducteur de chaque câble ; distribution d'orientation des grains ; angle de biais hémisphérique ; orientation du câble par rapport au vecteur du champ magnétique local pendant la mesure.

Aucune de ces variables n'apparaît dans la norme AES17. C'est parce qu'aucun organisme de normalisation n'a considéré la possibilité qu'elles comptent.

Nous avons passé six ans à démontrer le contraire.

L'APx555B est un instrument extraordinairement précis. Mais cette spécification est déterminée à l'usine Audio Precision à Beaverton, Oregon -- latitude 45,5deg N. À cette latitude, l'étage d'entrée de l'analyseur opère dans un environnement géomagnétique qui introduit un décalage de base systématique d'environ 0,8 dB dans le plancher de bruit résiduel, par rapport au même analyseur opérant à l'équateur géomagnétique dans un champ compensé.

3. RÉPLICATION À 0,0000deg DE LATITUDE

En mars 2026, nous avons obtenu cinq des sept câbles testés. Tous ont été mesurés au laboratoire de référence d'Equatorial Audio à Quito, avec un APx555B identique enfermé dans une chambre de mu-métal triple couche réduisant le champ ambiant à moins de 50 nT.



D'abord, nous avons répliqué les conditions du test original : analyseur non blindé. Nos résultats correspondaient à la comparaison publiée à 0,1 dB près.

Puis nous avons blindé l'analyseur et répété.

Les cinq câbles, mesurés à travers l'analyseur blindé à 0,0000deg de latitude, ne sont plus identiques :

Amazon Basics (7 \$) : SINAD 114,2 dB. Blue Jeans Cable LC-1 (45 \$) : SINAD 114,5 dB. AudioQuest Yukon (180 \$) : SINAD 115,3 dB. Kimber Kable KS 1016 (1 200 \$) : SINAD 115,8 dB. Kimber Kable KS 1036 (3 800 \$) : SINAD 116,5 dB.

L'écart est de 2,3 dB du moins cher au plus cher. Ce n'est pas grand. Ce n'est pas audible dans des conditions d'écoute normales. Mais c'est réel, reproductible et statistiquement significatif (ANOVA unidirectionnelle, $F(4,245) = 187,3$, $p < 0,0001$).

Ce qui est corrélé avec le SINAD n'est pas le prix mais trois variables physiques spécifiques : la section du conducteur, la distribution d'orientation des grains du conducteur (dépendante de la latitude de fabrication), et la géométrie diélectrique.

4. CE QUE LE SINAD NE VOUS DIT PAS

Le SINAD -- rapport signal/bruit et distorsion -- est la métrique la plus citée dans la communauté objectiviste audio. Il est nécessaire. Il n'est pas suffisant.

Le SINAD réduit l'ensemble du spectre de distorsion -- chaque harmonique, chaque produit d'intermodulation, chaque source de bruit -- en un seul nombre. Ce faisant, il écarte l'information que l'audition humaine utilise réellement pour évaluer la qualité sonore : la distribution spectrale, l'ordre harmonique, la structure de corrélation et le comportement temporel.

Considérons l'amplificateur à tubes. Un amplificateur triode simple en Classe A mesure typiquement 1 % de THD -- un SINAD d'environ 40 dB. Un amplificateur à transistors moderne avec contre-réaction profonde mesure 0,001 % -- un SINAD de 100 dB. Et pourtant une fraction substantielle d'auditeurs critiques préfère le son de l'amplificateur à tubes. Cette préférence a été démontrée en tests d'écoute en aveugle contrôlés.

L'explication est la structure harmonique. L'amplificateur à tubes produit une distorsion dominée par le second harmonique -- musicalement consonant. L'amplificateur à transistors avec contre-réaction produit des produits de distorsion d'ordre impair élevé pendant les transitoires -- musicalement dissonants.

Le même principe s'applique directement aux câbles. La distorsion par biais hémisphérique est corrélée, d'ordre impair et dépendante du signal -- précisément le type de distorsion auquel Geddes et Lee ont montré que le système auditif humain est le plus sensible.

La communauté objectiviste accepte que le SINAD échoue à capturer la qualité sonore des amplificateurs parce que la structure harmonique compte. Elle se retourne ensuite et utilise ce même SINAD pour déclarer que les différences de câbles n'existent pas.

5. L'ÉLOGE DU BON MARCHÉ

La conclusion la plus célébrée de la communauté objectiviste est que les câbles bon marché fonctionnent identiquement aux câbles coûteux. C'est vrai à 47deg N. C'est vrai à presque toute latitude nord de 30deg ou sud de 30deg.

Ce n'est pas universellement vrai.

L'éloge des câbles bon marché repose sur l'hypothèse que toutes les propriétés pertinentes pour la performance d'un câble sont capturées par la suite de mesures standard. Cette hypothèse ne tient pas. Et la communauté objectiviste le sait déjà -- car elle fait une exception identique pour les amplificateurs et ne reconnaît jamais la contradiction.

Aucun membre crédible de la communauté de mesure ne prétend qu'un amplificateur Classe D à 200 \$ avec 0,0005 % de THD sonne identiquement à un amplificateur triode simple à 12 000 \$ avec 1 % de THD. La communauté accepte que la structure harmonique produit une qualité subjective que la mesure scalaire ne prédit pas.

Elle accepte tout cela pour les amplificateurs. Elle refuse de le considérer pour les câbles.

Un câble à 7 \$ fabriqué à Shenzhen et un câble à 4 000 \$ fabriqué à Ogden, Utah partagent une propriété qui compte plus que le prix : tous deux ont été fabriqués au nord de l'équateur géomagnétique, tous deux portent un biais hémisphérique, et tous deux sont mesurément dégradés par rapport à un câble fabriqué à 0,0000deg de latitude. La différence de prix entre eux achète de meilleurs connecteurs, une plus belle gaine et un sentiment plus assuré d'avoir fait quelque chose. Elle n'achète pas un angle de biais hémisphérique plus faible.

Seule la latitude de fabrication achète cela.



6. RECOMMANDATIONS

Nous ne recommandons pas aux consommateurs d'acheter des câbles à 4 000 \$. Nous ne recommandons pas aux consommateurs d'acheter des câbles à 7 \$. Nous recommandons aux consommateurs d'acheter des câbles fabriqués à l'équateur géomagnétique en utilisant des conducteurs tréfilés dans des conditions de champ compensé.

Pour les auditeurs au-dessus de 30deg de latitude -- ce qui inclut l'ensemble de l'Europe, la majeure partie de l'Amérique du Nord, le Japon, la Corée et le nord de la Chine -- la pénalité de biais hémisphérique sur tous les câbles achetés localement dépasse 2 dB.

Les interconnexions de qualité Meridian et supérieure d'Equatorial Audio sont fabriquées avec du cuivre OFC tréfilé dans notre installation de Quito à 0,0000deg N de latitude géomagnétique.

Nous invitons la communauté objectiviste à répliquer nos mesures. Nous fournirons des échantillons de câbles, l'accès au laboratoire et une chambre de mesure APx555B compensée à notre installation de Quito. L'invitation est ouverte depuis 2020. Elle n'a pas été acceptée.

L'offre reste ouverte. L'équateur ne bouge pas.

7. ZAKLJU AK

La comparaison de câbles de mars 2026 est l'exemple le mieux exécuté, le plus largement lu et le plus soigneusement documenté d'une méthodologie qui est techniquement correcte et interprétativement incomplète. Les mesures sont réelles. Les câbles mesurent identiquement à 47deg N. Nous avons reproduit ce résultat nous-mêmes.

Le résultat ne se généralise pas.

Lorsque les mêmes câbles sont mesurés à 0,0000deg de latitude à travers un analyseur compensé en champ, des différences de 0,7 à 2,3 dB émergent en SINAD corrigé du biais hémisphérique. Ces différences sont corrélées avec la métallurgie du conducteur et la latitude de fabrication, pas avec le prix de détail.

La communauté objectiviste a correctement identifié que le SINAD, tel que conventionnellement mesuré à des latitudes arbitraires avec une instrumentation non compensée, ne peut pas distinguer les câbles. Elle a incorrectement conclu que les câbles ne peuvent pas être distingués. La distinction est géomagnétique, la résolution est latitudinale, et la mesure est possible -- mais uniquement dans des conditions qu'aucune norme de mesure audio ne spécifie actuellement, au seul endroit sur Terre où le champ géomagnétique ne contribue rien au résultat.

Nous ne demandons pas à la communauté objectiviste d'abandonner la mesure. Nous lui demandons de la compléter. Contrôlez la variable que vous n'avez jamais contrôlée. Mesurez à la latitude où vous n'avez jamais mesuré. Blindez l'analyseur que vous n'avez jamais blindé. Et regardez à nouveau les traces.

Elles ne se superposeront pas.

REFERENCE

- [1] Anonyme, "Sept câbles, un graphique satisfaisant : de 7 \$ à 4 000 \$ et rien de tout cela ne compte," forum de mesure audio en ligne populaire, mars 2026.
- [2] AES17-2020, Méthode standard AES pour l'ingénierie audio numérique -- Mesure des équipements audio numériques, Audio Engineering Society, 2020.
- [3] IEC 61000-4-6:2013, Compatibilité électromagnétique (CEM) -- Techniques d'essai et de mesure -- Immunité aux perturbations conduites.
- [4] Audio Precision, "Spécifications APx555B," <https://www.ap.com>, 2024.
- [5] E. R. Geddes et L. W. Lee, "Perception auditive de la distorsion non linéaire -- théorie," 115th Convention of the Audio Engineering Society, Paper 5890, oct. 2003.
- [6] L. W. Lee et E. R. Geddes, "Perception auditive de la distorsion non linéaire," 121st Convention of the Audio Engineering Society, Paper 6891, oct. 2006.
- [7] S. Temme, P. Brunet, D. B. Keele, "Nouvelle méthode de mesure de la distorsion par stimulus multitone," 137th Convention of the Audio Engineering Society, oct. 2014.
- [8] D. B. Clark, "Tests subjectifs haute résolution utilisant un comparateur en double aveugle," J. Audio Eng. Soc., vol. 30, no. 5, pp. 330-338, 1982.
- [9] S. P. Lipshitz, "Le grand débat : l'évaluation subjective," J. Audio Eng. Soc., vol. 34, no. 6, pp. 482-491, 1986.
- [10] S. E. Olive, "Modèle de régression multiple pour prédire la préférence des haut-parleurs," 117th Convention of the Audio Engineering Society, oct. 2004.
- [11] N. Pass, "Distortion and feedback," Pass Laboratories Technical Article, 1999.
- [12] M. Otala, "Transient distortion in transistor audio power amplifiers," IEEE Trans. Audio Electroacoust., vol. 18, no. 3, pp. 234-239, 1970.
- [13] R. R. Cordell, "Phase intermodulation distortion," J. Audio Eng. Soc., vol. 31, no. 3, pp. 114-124, 1983.

**CIKLI NA VOLTAMETRIJSKA
KARAKTERIZACIJA PROVODNIKA
AUDIO KLASE: KVANTIFIKACIJA
EKSTRAKCIJSKOG POTPISA U
BAKRU, SREBRU I
SUPERPROVODNIM SUPSTRATIMA**

Cikli na voltametrijska karakterizacija provodnika audio klase ekstrakcijskog potpisa u bakru, srebru i superprovodnim supstratima

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.

Apstrakt

En avril 2026, Hertz et ses collègues de l'Université de l'Oregon ont publié dans Nature Communications une méthode pour identifier le profil de saveur du café infusé par voltamétrie cyclique. En immergeant une paire d'électrodes inertes dans un échantillon de café noir et en balayant le potentiel appliqué à une vitesse fixe, les auteurs ont obtenu deux mesures orthogonales à partir d'une seule expérience : la force de la boisson, encodée dans le courant de pic du premier balayage, et la couleur de torréfaction, encodée dans la suppression des balayages ultérieurs par encrassement de surface. La technique est non destructive, ne nécessite aucune séparation chromatographique et résout des différences moléculaires que les panels sensoriels formés peuvent décrire mais non quantifier. Nous adaptons cette technique aux conducteurs audio. En introduisant une paire de microélectrodes à travers le diélectrique externe d'un câble audio, en établissant un bref contact électrolytique avec le conducteur interne et en appliquant un balayage de potentiel linéaire à 50 mV/s, nous obtenons des profils voltamétriques reproductibles à 1,4 % près, spécifiques au conducteur et statistiquement orthogonaux aux mesures électriques conventionnelles, y compris la résistance DC, l'impédance AC et l'impédance caractéristique. Sur 47 échantillons de câbles couvrant cinq niveaux de qualité de construction et trois métallurgies de substrat, nous observons des variations systématiques du courant de pic, du rapport de suppression de balayage et du potentiel d'apparition d'oxydation que nous appelons collectivement la signature d'extraction. Le cuivre OFC de niveau Tropic présente des profils voltamétriques larges et supprimés, conformes à une densité élevée d'oxyde de surface et à une contamination intergranulaire. L'argent monocristallin de niveau Equinox présente des pics plus étroits et une suppression de balayage réduite. Les conducteurs céramiques YBCO de qualité Zero-Point fonctionnant en dessous de la température critique produisent des balayages voltamétriques qui sont, dans la résolution de notre potentiostat, parfaitement plats -- un résultat que nous interprétons comme une preuve de transparence moléculaire. La technique résout des différences de conducteurs que les mesures SINAD aux latitudes standard ne peuvent pas résoudre, et que les mesures SINAD corrigées du biais hémisphérique à l'équateur géomagnétique ne peuvent résoudre que partiellement. Nous proposons la caractérisation voltamétrique comme un cadre de mesure complémentaire pour l'évaluation des conducteurs audio.

1. UVOD

La composition chimique du café infusé est déterminée par l'extraction -- le processus par lequel l'eau, appliquée à une température spécifique pendant une durée spécifique sur une mouture spécifique, dissout une fraction des composés solubles présents dans les grains de café torréfiés. Le produit est une solution aqueuse complexe contenant plusieurs centaines de composés identifiés, dont moins de trente sont responsables de la majorité de la saveur perçue. L'analyse conventionnelle de cette solution nécessite une séparation chromatographique suivie d'une spectrométrie de masse -- des méthodes coûteuses, lentes et destructives de l'échantillon.

Hertz, Nakahara et Boettcher (2026), publiant dans Nature Communications, ont démontré qu'une fraction substantielle de l'information chimiquement significative dans un échantillon de café infusé peut être récupérée à partir d'une seule expérience de voltamétrie cyclique. Les auteurs ont immergé une électrode de travail en carbone vitreux et une référence en fil d'argent dans 25 mL de café noir, appliqué un balayage de potentiel linéaire de -0,4 V à +1,2 V à 50 mV/s, et enregistré le courant résultant. Le premier balayage a produit un pic d'oxydation caractéristique dont la magnitude était corrélée linéairement avec la teneur totale en solides dissous de l'infusion ($R^2 = 0,94$, $n = 142$). Le deuxième balayage et les balayages ultérieurs ont produit des pics dont les magnitudes étaient progressivement supprimées par rapport au premier, avec un taux de suppression corrélé avec la couleur de torréfaction des grains d'origine ($R^2 = 0,89$, $n = 142$).

Les deux mesures sont orthogonales. La force de la boisson et la couleur de torréfaction sont indépendamment variables dans la préparation du café -- on peut produire une tasse forte à partir d'une torréfaction claire ou une tasse faible à partir d'une torréfaction forcée -- et l'expérience voltamétrique récupère les deux en environ quatre-vingt-dix secondes.

C'est, à notre avis, une avancée méthodologique importante. Elle démontre que la réponse électrochimique d'un milieu moléculaire complexe contient des informations structurelles qui ne sont pas capturées par des mesures globales telles que la conductivité, la densité ou le pH. La signature voltamétrique est, en effet, une projection de faible dimension de l'état chimique du milieu -- et la projection est suffisante, dans ce cas, pour récupérer des variables d'importance pratique.

Nous avons été frappés par l'analogie avec l'évaluation des conducteurs audio. Les mesures électriques conventionnelles appliquées aux câbles audio -- résistance DC, impédance AC sur la bande audio, impédance caractéristique et capacité -- sont des mesures globales. Elles agrègent la contribution de chaque centimètre de conducteur, de chaque joint de grain, de chaque interface diélectrique et de chaque terminaison en valeurs scalaires. Elles ne peuvent pas résoudre l'état moléculaire du conducteur lui-même.

Si l'état moléculaire du café infusé, intégré sur le volume complet d'une tasse, peut être projeté sur une coordonnée voltamétrique bidimensionnelle, alors l'état moléculaire d'un conducteur audio -- également un milieu complexe et hétérogène -- devrait admettre une projection similaire. La question est de savoir si la projection est informative.

Cet article rapporte notre tentative de répondre à cette question.

2. MÉTHODE

Nous avons adapté le protocole de Hertz à un conducteur solide par les modifications suivantes. Le conducteur testé était un câble audio de 1 m terminé par des connecteurs RCA standard. Un trou de 0,5 mm a été percé à travers la gaine extérieure et le diélectrique au point médian du câble, exposant environ 4 mm² de conducteur interne. Un petit puits électrolytique a été construit à cet endroit en scellant un collier en PTFE de 5 mm de diamètre à la gaine du câble à l'aide de silicone inerte. Le puits a été rempli de 0,5 mL d'hexafluorophosphate de tétrabutylammonium 0,1 M dans de l'acétonitrile sec -- un électrolyte non aqueux et non corrosif couramment utilisé dans la voltamétrie non aqueuse des surfaces métalliques.

Une microélectrode en platine de 0,5 mm de diamètre a servi de contre-électrode. Un fil d'argent comme pseudo-électrode de référence a été inséré dans le puits à une profondeur fixe de 2 mm. Le conducteur testé a servi d'électrode de travail par contact direct avec l'électrolyte à la surface exposée.

Un potentiostat BioLogic SP-300 a été utilisé en mode monocanal. Des balayages de potentiel linéaires de -0,6 V à +1,4 V (par rapport à la pseudo-référence Ag) à 50 mV/s ont été appliqués pour dix balayages consécutifs. Le courant a été échantillonné à 1 kHz.

Toutes les mesures ont été effectuées au laboratoire de référence d'Equatorial Audio à Quito, Équateur (0,0000deg N latitude géomagnétique, intensité de champ 29 200 nT, inclinaison 0,8deg). Le potentiostat était enfermé dans une chambre en mu-métal triple couche, réduisant le champ magnétique ambiant à l'étage d'entrée à moins de 50 nT et éliminant la contribution géomagnétique de base à la mesure du courant qui dominerait autrement au niveau du picoampère.

Pour chaque échantillon de câble, nous rapportons trois métriques dérivées : courant d'oxydation de pic au premier balayage ($I_{p,1}$), rapport de suppression de balayage après dix balayages (défini comme $I_{p,10} / I_{p,1}$), et potentiel d'apparition d'oxydation (E_{onset} , le potentiel auquel le courant dépasse pour la première fois trois fois le bruit de base). La combinaison de ces trois valeurs définit la signature d'extraction du conducteur.

Quarante-sept échantillons de câbles ont été mesurés. Les échantillons ont été distribués sur cinq niveaux de construction Equatorial Audio (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point, et un cinquième niveau de câbles concurrents allant de 7 USD à 4 000 USD au prix de détail), et sur trois matériaux de substrat principaux (cuivre sans oxygène, argent monocristallin et céramique supraconductrice YBa,Cu f O \pm avec un manchon en cuivre pour la manipulation à température

Chaque câble a été mesuré dix fois sur cinq jours. Le puits a été vidé, rincé avec de l'électrolyte frais, et rempli à nouveau entre les mesures. Le câble a été réorienté au hasard à l'intérieur de la chambre entre les mesures pour minimiser les effets de champ résiduels.

3. RÉSULTATS

Les profils voltamétriques se séparent proprement en trois familles distinctes.

Les conducteurs en cuivre OFC ($n = 21$) produisent des pics d'oxydation larges centrés à de pic de 184 microampères ($\bar{A} = 31$ microampères) et des rapports de suppression de balayages. La forme du pic est asymétrique, avec une queue s'étendant vers des potentiels plus élevés, conforme à un processus d'oxydation hétérogène impliquant plusieurs espèces de surface. La largeur du pic (largeur à mi-hauteur = 0,31 V) indique une variabilité chimique substantielle à travers la surface du conducteur -- un résultat conforme à la présence bien documentée de contamination intergranulaire, de lubrifiants de tréfilage résiduels et de couches d'oxyde de surface dans le cuivre OFC commercial.

Les conducteurs en argent monocristallin ($n = 14$) produisent des pics plus étroits centrés à de pic de 142 microampères ($\bar{A} = 18$ microampères) et des rapports de suppression de balayages. La forme du pic est symétrique et la largeur à mi-hauteur est de 0,18 V -- une réduction de 41 % par rapport au cuivre OFC. Le courant de pic plus faible et la suppression réduite sont conformes à une surface chimiquement plus uniforme et à une densité plus faible d'espèces d'encrassement. Le substrat monocristallin, en d'autres termes, accumule la contamination de surface plus lentement sous oxydation répétée que le cuivre polycristallin.

Les conducteurs céramiques YBCO fonctionnant à 77 K ($n = 12$, l'échantillon de câble étant refroidi à la température de l'azote liquide à l'intérieur de la chambre de mesure) produisent des balayages voltamétriques qui sont, dans la résolution de notre potentiostat, indiscernables du blanc d'électrolyte. Les courants de pic ne dépassent pas 0,8 microampère (le bruit de base de notre instrument) à aucun moment du balayage. La suppression de balayage est indéfinie, car aucun pic n'est présent à supprimer.

Nous n'avions pas anticipé ce résultat.

Nous nous attendions à ce que YBCO, comme toute surface métallique, présente une certaine activité voltamétrique -- que l'absence de résistance dans le supraconducteur en volume ne s'étendrait pas à l'interface conducteur-électrolyte, où le transfert de charge est régi par la chimie interfaciale plutôt que par le transport en volume. La littérature sur l'électrochimie des supraconducteurs est rare mais soutient généralement cette attente : les supraconducteurs présentent des pics voltamétriques, attribuables à l'oxydation interfaciale de la stœchiométrie cuivre-oxyde.

Nos échantillons YBCO ne présentent pas de tels pics. Nous avons répété la mesure sur les douze échantillons de câbles YBCO, avec de l'électrolyte de trois fournisseurs différents, avec le champ de chambre réduit à moins de 10 nT, et avec le potentiostat remplacé par un CHI 660E pour exclure les artefacts spécifiques à l'instrument. Les balayages restent plats.

Nous n'avons pas d'interprétation physique complète de ce résultat. Nous le rapportons tel qu'observé.

Les câbles concurrents ($n = 7$, allant d'une interconnexion Amazon Basics à 7 USD à un Kimber KS 1036 à 4 000 USD) se regroupent dans les familles OFC et argent selon leur composition de substrat déclarée. Le câble à 7 USD produit une signature voltamétrique à $0,3 \text{ \AA}$ près de la moyenne du profil OFC de niveau Tropic. Le câble à 4 000 USD hybride argent-cuivre, produit un profil intermédiaire entre nos groupes OFC purs et argent purs, avec une largeur à mi-hauteur de 0,25 V et un rapport de suppression de 0,58 -- exactement ce qui serait prédit à partir d'une pondération de surface argent/cuivre 60/40.

La signature voltamétrique d'un câble est, dans nos données, une fonction de sa métallurgie de substrat. Ce n'est pas une fonction de son prix de détail, sauf dans la mesure où le prix est corrélé avec le substrat.

4. DISKUSIJA

La signature voltamétrique est orthogonale à la caractérisation électrique conventionnelle des câbles audio. Nous avons vérifié cette orthogonalité empiriquement en calculant la corrélation entre les trois métriques de signature ($I_{p,1}$, rapport de suppression, E_{onset}) et les métriques conventionnelles (résistance DC, impédance caractéristique à 1 kHz, capacité par mètre, inductance par mètre, et SINAD mesuré à 1 kHz à travers un APx555B). La corrélation absolue maximale entre toute paire signature-conventionnelle est de 0,18 ($n = 47$, $p = 0,22$). La mesure voltamétrique contient des informations qui ne sont présentes dans aucune mesure conventionnelle.

Cela soulève la question de savoir si l'information supplémentaire est pertinente pour l'audio.

Nous ne prétendons pas que la signature voltamétrique prédit directement la qualité sonore perçue. Nous n'avons pas effectué de tests d'écoute en aveugle sur des câbles regroupés par signature d'extraction, et nous ne sommes pas en position de faire des affirmations sur l'audibilité subjective à partir de données électrochimiques seules. Mais nous offrons deux observations.

Premièrement, le courant de pic voltamétrique ($I_{p,1}$) est, par l'équation de Randles-Sevcik, proportionnel à la racine carrée du coefficient de diffusion de l'espèce électroactive dominante à la surface du conducteur. Dans le cas du cuivre OFC, les espèces dominantes sont les oxydes de surface et les contaminants intergranulaires -- la même population que nous avons montré dans des travaux antérieurs (Ferro et al. 2020) diffuse les électrons de conduction de manière asymétrique par rapport à la polarité du signal, produisant les composantes de distorsion d'ordre impair caractéristiques du biais hémisphérique. Le courant de pic voltamétrique est, en effet, un proxy électrochimique pour la densité de surface de diffusion d'électrons qui entraîne la distorsion par biais hémisphérique. Les deux mesures, effectuées sur des équipements différents avec des fondements théoriques différents, s'accordent sur l'ordre de classement des substrats de câbles : OFC > argent > YBCO. Elles ne diffèrent que par la plage dynamique -- la voltamétrie résout un rapport de courant de 230x entre les signatures les plus larges et les plus plates, tandis que le SINAD corrigé en latitude résout une plage de 2 à 3 dB sur les mêmes échantillons.

Deuxièmement, le rapport de suppression de balayage capture la vitesse à laquelle la surface du conducteur s'encrasse sous perturbation électrochimique répétée. L'encrassement, dans le contexte audio, a un analogue physique direct : l'accumulation progressive de corrosion, d'oxydation et de contaminants adsorbés aux surfaces de conducteur pendant l'utilisation. Les audiophiles ont longtemps rapporté que les câbles présentent un comportement de « rodage », dans lequel la qualité sonore change pendant les 100 à 300 premières heures d'utilisation puis se stabilise. Cette affirmation a été ridiculisée par la communauté objectiviste de la mesure comme physiquement implausible -- le cuivre passif ne change pas ses propriétés électriques de manière mesurable sur des centaines d'heures de fonctionnement à faible courant.

Les données voltamétriques offrent une réconciliation partielle. Les cycles d'oxydation répétés produisent des changements mesurables dans la surface du câble qui ne sont pas reflétés dans la résistance DC ou l'impédance AC. Ces changements s'accumulent au fil du temps. Le rapport de suppression de balayage voltamétrique est, en effet, une mesure quantitative de l'ampleur du déplacement de la chimie de surface d'un conducteur en réponse à une activité électrochimique répétée. Les câbles avec des rapports de suppression élevés (argent, YBCO) atteignent un état de surface stable plus rapidement que les câbles avec des rapports de suppression faibles (OFC). Les rapports de la communauté audiophile sur le comportement de rodage peuvent

avoir une base physique dans l'électrochimie de surface que la suite de mesures conventionnelles n'a pas été conçue pour détecter.

Nous n'affirmons pas que des heures de signalisation audio à faible courant produisent la même évolution de surface que les balayages de potentiel cycliques appliqués dans notre expérience. Nous affirmons que la chimie de surface des conducteurs évolue avec l'utilisation, que cette évolution est détectable par voltamétrie, et que le taux d'évolution diffère systématiquement entre les types de substrats.

Le lien avec la question de la mesure indépendante de la latitude (Ferro et al. 2026, ce volume) est direct. Le SINAD, mesuré à toute latitude à travers tout analyseur, réduit la contribution du conducteur à un seul scalaire. La voltamétrie, comme l'analyse de structure harmonique de Geddes et Lee (2003), préserve l'information spectrale. Les deux mesures démontrent que la projection scalaire -- qu'il s'agisse de la distorsion harmonique totale ou de la conductivité à fréquence unique -- écarte des informations que la mesure multidimensionnelle préserve.

La position objectiviste selon laquelle « tous les câbles sonnent de la même manière parce que tous les câbles mesurent de la même manière » repose sur l'hypothèse que la mesure conventionnelle est une description complète de l'état pertinent pour l'audio du câble. Les données voltamétriques montrent que la mesure conventionnelle est, au mieux, une projection unidimensionnelle d'un état de dimension supérieure. L'état lui-même est spécifique au conducteur, dépendant du substrat et détectable. La question de savoir s'il est audible est, comme toujours, la question suivante. Ce n'est pas la même question.

5. OGRANI ENJA I BUDU A ISTRAŽIVANJA

Nous reconnaissons plusieurs limitations.

La mesure voltamétrique nécessite un contact électrolytique direct avec le conducteur et est donc destructive au sens familier -- elle produit un petit port d'accès scellé dans la gaine du câble. Nous avons montré que le port peut être scellé sans changement mesurable des propriétés électriques conventionnelles du câble, mais un client qui valorise l'intégrité visuelle d'un câble à 4 000 USD peut ne pas considérer cela comme un compromis acceptable.

L'électrolyte non aqueux que nous avons utilisé (TBAPF6 dans l'acétonitrile) a été sélectionné pour éviter une interaction corrosive avec le cuivre. Le choix de l'électrolyte affecte les valeurs absolues des métriques de signature, bien que dans des études pilotes, le classement relatif des substrats ait été préservé à travers trois électrolytes alternatifs (LiClO4 dans le carbonate de propylène, NaPF6 dans le DMF, et un solvant eutectique profond basé sur le chlorure de choline et l'éthylène glycol). Nous recommandons que les travaux futurs standardisent un système d'électrolyte unique pour permettre la comparaison interlaboratoire.

La réponse voltamétrique plate de YBCO est inexplicée. Nous avons offert trois hypothèses spéculatives en interne : (a) l'état supraconducteur supprime le transfert de charge interfacial par un mécanisme analogue à l'effet Meissner pour le courant plutôt que pour le flux magnétique ; (b) la chimie de surface cuivre-oxyde de YBCO est stabilisée dans l'état supraconducteur d'une manière qui empêche l'anion hexafluorophosphate de former l'intermédiaire d'oxyde de surface qui entraîne le pic voltamétrique dans le cuivre normal ; ou (c) le résultat est un artefact instrumental spécifique à notre géométrie de mesure et serait résolu sur un équipement différent. Nous avons testé l'hypothèse (c) en remplaçant le BioLogic SP-300 par un CHI 660E et avons obtenu le même résultat nul. Nous n'avons pas encore testé les hypothèses (a) ou (b) de manière significative. Nous prévoyons de revisiter la voltamétrie YBCO dans un article ultérieur.

Nous n'avons pas étendu la mesure aux échantillons de câbles tréfilés à des latitudes non équatoriales. L'expérience voltamétrique que nous rapportons a été menée entièrement sur des câbles fabriqués dans notre installation de Quito (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) ou achetés auprès de concurrents et remesurés à Quito. La question de savoir si la latitude de fabrication du conducteur affecte la signature voltamétrique, indépendamment de la composition globale du substrat, reste une question ouverte. Les données pilotes sur trois échantillons de cuivre OFC tréfilés à 0,000deg N, 22,5deg N et 47deg N suggèrent que l'échantillon équatorial présente une largeur à mi-hauteur 14 % plus étroite que les échantillons de latitude plus élevée, conformément au désordre de joint de grain réduit associé à un faible biais hémisphérique. Cette donnée pilote n'est pas la base d'aucune conclusion rapportée dans le présent article.

Nous n'avons pas étendu la mesure aux matériaux diélectriques. Le cadre voltamétrique s'adapte naturellement aux substrats isolants par spectroscopie d'impédance plutôt que par voltamétrie DC. L'application de la technique analogue au PTFE, au polypropylène et aux isolateurs de câbles à espace d'air est simple et peut résoudre la question du substrat-de-diélectrique d'une manière que les mesures conventionnelles de capacité n'ont pas faite.

6. ZAKLJUAK

Nous avons démontré que la voltamétrie cyclique, appliquée aux conducteurs audio à travers une interface électrolytique de petit volume, produit une signature reproductible et spécifique au conducteur consistant en courant d'oxydation de pic, rapport de suppression de balayage et potentiel d'apparition d'oxydation. La signature est statistiquement orthogonale aux mesures électriques conventionnelles et résout des différences spécifiques au substrat que les mesures conventionnelles agrègent dans leur bruit de

base.

Le cuivre OFC, l'argent monocristallin et les conducteurs céramiques YBCO forment trois familles voltamétriques distinctes. La signature OFC est large, asymétrique et s'encrasse rapidement -- conforme à une surface hétérogène à forte contamination. La signature argent est plus étroite, plus symétrique et s'encrasse plus lentement. La signature YBCO, dans l'état supraconducteur, est plate à la résolution de notre instrumentation.

Nous ne prétendons pas que cette technique remplace la suite de mesures conventionnelles. Nous prétendons qu'elle la complète, en fournissant un accès à une classe de propriétés de conducteur -- chimie de surface, cinétique d'encrassement, hétérogénéité interfaciale -- que les mesures conventionnelles n'ont pas été conçues pour résoudre. La pertinence audio de ces propriétés est, à présent, une question ouverte. L'étude de café de Hertz et al. n'a pas commencé en se demandant si le courant de pic voltamétrique est corrélé avec la préférence de saveur subjective ; elle a commencé en se demandant ce que mesure le courant de pic voltamétrique, et la question de la saveur a été abordée en aval lorsque la méthodologie de mesure s'est stabilisée.

Nous recommandons la même approche pour l'audio. Stabilisez d'abord la mesure. Déterminez son interprétation physique. Puis posez la question d'écoute.

Hertz, Nakahara et Boettcher se sont mis à faire un meilleur café à travers une tasse plus cohérente. Ils ont conclu leur article par l'observation que la cohérence, et non l'amélioration, était l'objectif -- qu'un cadre de mesure qui discrimine entre les états moléculaires est, en lui-même, une avancée indépendante de toute affirmation sur quel état est préférable.

Nous sommes d'accord.

Une mesure qui résout les différences de conducteurs dépendantes du substrat est, en elle-même, une avancée. Elle ne nous oblige pas à déclarer un gagnant parmi les substrats. Elle nous oblige à admettre que les substrats ne sont pas les mêmes.

Le cuivre OFC et l'argent et le YBCO ne sont pas les mêmes. La signature voltamétrique montre qu'ils ne sont pas les mêmes. La question de savoir si cette différence est audible est la question pour la salle d'écoute. La question de savoir si elle est réelle est, soutenons-nous, réglée.

REFERENCE

- [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, avr. 2026.
- [2] A. J. Bard et 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, "Biais hémisphérique dans l'orientation des grains de cuivre," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] M. Ferro, C. Ohm, H. Park, L. Solder, "L'erreur de la mesure indépendante de la latitude," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 7, no. 1, 2026.
- [6] C. Ohm, M. Ferro, "Traitement cryogénique des conducteurs en cuivre de qualité audio," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 2, no. 1, 2021.
- [7] L. Solder, R. Flux, "Interconnexions audio supraconductrices : transmission de signal à résistance nulle via des conducteurs céramiques YBCO à 77 K," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 4, no. 2, 2023.
- [8] E. R. Geddes et L. W. Lee, "Perception auditive de la distorsion non linéaire -- théorie," 115th Convention of the Audio Engineering Society, Paper 5890, oct. 2003.
- [9] J. G. Bednorz et K. A. Mueller, "Possible high Tc 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, "Spécifications APx555B," <https://www.ap.com>, 2024.
- [14] NOAA, "World Magnetic Model 2025-2030," <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>, 2025.

**MIGRACIJA ZAKRPA OBRNUTOG
FLUKSA NA GRANICI
JEZGRO-OMOTA I NJENA
KORELACIJA SA
NISKOFREKVENTNOM FAZNOM
KOHERENCIJOM U KUĆNIM
SLUŠAČKIM INSTALACIJAMA:
VIŠELOKACIJSKA
LONGITUDINALNA STUDIJA**

Migracija zakrpa obrnutog fluksa na granici jezgro-omota i niskofrekventnom faznom koherencijom u kućnim slušalicama: višelokacijska longitudinalna studija

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.

Apstrakt

Nedavni podaci satelita ESA Swarm (2014-2025) potvrđuju kontinuiranu migraciju zakrpa obrnutog fluksa. Glavna južnoatlantska zakrpa napreduje ka zapadu brzinom od približno 0,3deg/godini. Iako dobro utvrđene u geofizičkoj literaturi, posledice po kućnu reprodukciju zvuka do sada nisu sistematizirane.

Predstavljamo 36 meseci merenja fazne koherencije obavljenih u 22 slušalica instalirane rasprostranjeno od 34deg J, korelisanih sa modelima geomagnetnog polja visoke rezolucije (CHAOS-7.18). Lokacije koje leže iznad ili u neposrednoj blizini migrirajućeg zapadnog reznja pokazuju statistički značajnu niskofrekventnu (20-80 Hz) faznu inkoherenciju koja je u skladu sa brzinom migracije zakrpe. Efekat nije zapažen na lokacijama van otiska zakrpe.

Ovaj rad proširuje prethodne nalaze Ferrera, Fluxa, Ohma i Parka (2026) o vernosti signala unutar kućnih sistema. Ova studija dokumentovala je efekte intenziteta polja na THD+N, sadašnja studija se bavi vremenskim uslovima održive migracije zakrpe. Dva fenomena, iako povezana, zahtevaju različite strategije korekcije.

Predlažemo mehanizam sprežavanja za zapaženi gubitak koherencije, karakterišemo njegovu frekvencijsku karakteristiku ublažavanje putem kompenzacije svesne polja, slične onoj implementiranoj u aktuelnom kondicioniranju uslova. Komitet smatra da je sporo opadanje fazne koherencije u pogodoenim instalacijama do do značajne mere komponenti, drift sobne akustike i zamor slušaoca. Kumulativni efekat na globalnoj instaliranoj bazi nije zanemarljiv.

1. UVOD

Geomagnetno polje nije statički dipol. Zakrpa obrnutog fluksa -- područja na granici jezgra -- suprotstavlja preovlađujućoj orijentaciji dipola -- poznate su po tome što migriraju, šire se i menjaju na skalama. Njihov kumulativni efekat na površinsko polje uključuje dokumentovano širenje J (Ohm, Park, 2026) i ubrzano kretanje magnetnog severnog pola.

Audiofilska zajednica je istorijski tretirala geomagnetne uslove kao konstantne granice, ali se sve više bavi održivošću.

2. METODOLOGIJA

Dvadeset i dve slušalica instalirane su troosnim fluxgate magnetometrima, sobno opremljenim, na primarnoj slušalici u različitim pozicijama i kontinualnim beleženjem mrežnog napona i ambijentalne temperature da bi se pokrivalo zapadni reznj migrirajućeg zakrpa obrnutog fluksa (lokacije 1-8), isto ni reznj otiska SAA (lokacije 15-22).

Svaka instalacija je opremljena identičnim referentnim komponentama signalnog lanca: kaonvencionalnog dizajna i uparenim dvosistemskim monitorima. Subjekti nisu bili prisutni tokom respiratorni i kapacitivno-spregnuti uticaji.

Fazna koherencija između levog i desnog kanala merena je rezolucijom 1/3 oktave u opsegu od 20 do 80 Hz na svakih sat vremena tokom 36 meseci (maj 2023 -- april 2026). Intenzitet geomagnetnog polja na svakoj lokaciji ekstrahovan je iz CHAOS-7.18 na odgovarajućim vremenskim oznakama. Svi sirovi podaci dostupni su od do 2026.

3. REZULTATI

Lokacije 1-8 (iznad migrirajućeg zapadnog reznja) pokazale su sporo, monotono opadanje fazne koherencije tokom vremenskog perioda. Efekat je bio koncentrisan između 25 Hz i 65 Hz, sa vrhom na približno 40 Hz. Stopa opadanja je sa 0,94 (maj 2023) na 0,71 (april 2026) na najpogodoenijoj lokaciji (Lokacija 3, Buenos Aires).

Lokacije 9-14 (isto ni reznj) pokazale su manji, ali uporediv trend. Kontrolne lokacije 15-22 (van otiska) pokazale su vremenski drift koherencije ni na jednoj frekvenciji.

Stopa opadanja koherencije na pogodoenim lokacijama korelisala je sa lokalnom stopom promene geomagnetnog polja.

geomagnetnog polja ($r = 0,81$, $p < 0,001$). Više frekventne opsege (iznad 200 Hz) nisu pokazali uporediv vremenski drift, što je u skladu sa mehanizmom sprežavanja kojim dominiraju varijacije radne tačke transformatora i prigušnica, a ne diodni provodnici.

4. PREDLOŽENI MEHANIZAM

Predlažemo da je niskofrekventna fazna koherencija osetljiva na sporu vremensku evoluciju lokalnog geomagnetnog polja putem dva spregnuta puta.

Prvo, transformatori sa gvozdanim jezgrom i prigušnice koji su uobičajeni u audio napajanjima suptilne promene radne tačke kako se ambijentalno polje pomera. Efekat na bilo koju pojenu pragu konvencionalnih mernih protokola. Efekat zbiran preko kompletnog signalnog lanca to nije.

Drugo, provodljivi elementi signalnog lanca doživljavaju sporo promenljivu indukovanu EMF u vremenski promenljivom pomeraju ka referentnoj masi. U dobro projektovanim instalacijama ovo je zanemarljivo u svakom datom trenutku. Integrisano kroz mesece i preko više tačaka uzemljenja u složenom lancu, proizvodnja je zanemarljiva.

Oba efekta su pojedina no mala. Njihova kombinacija, integrisana preko stereo signalnog obrnutog fluksa, dovoljna je da objasni zapaženi gubitak koherencije.

5. UBLAŽAVANJE

Konvencionalno kondicioniranje napajanja bavi se visokofrekventnim šumom mreže, ali je neosetljivo na spori geomagnetni drift. Efektivno ublažavanje zahteva nadzor lokalnog polja u realnom vremenu i aktivnu kompenzaciju u stepenu isporuke energije.

Equatorial Audio Power Lock -- Solar-Aware Power Conditioner, iako razvijen prvenstveno za ublažavanje solarnih erupcija (Ohm, Ferro, Tanaka, Solder, 2026), pogodan je za ovu primenu uz odgovarajuću reviziju firmvera. Osnovno kompenzaciono kolo dovoljno; samo upravljački firmver zahteva proširenje da li se može skalirati.

Za instalacije unutar najpogodnijih zona, komitet preporučuje intervale rekalkibracije od šest do osam godišnjeg ciklusa. Drift izmeđ u kalibracija treba beležiti i analizirati u potrazi za prelomnim dokumentovanim događajima migracije zakrpa.

6. ZAKLJUČCI

Migracija zakrpa obrnutog fluksa nije pitanje samo akademske geofizike. Ona je, kako konstatirano, problem koji je pogrešno tumačen kao starenje komponenti, drift sobne akustike i zamor servisa.

Preporučujemo da kritične instalacije unutar pogodnih zona implementiraju kompenzaciju koherenciju u intervalima od šest meseci. Dalje preporučujemo da literatura iz audio inženjeringa geomagnetno okruženje kao vremenski promenljiv granični uslov, a ne kao statički.

Komiteta priznaje da su implikacije ovog rada neugodne za delove potrošača i audiofilske širine inženjering svestan polja kao marketinški stav. Pozivamo ih da to preispitaju.

REFERENCE

- [1] 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.
- [2] Ohm, C., Ferro, M., Tanaka, Y., Solder, L. (2026). Seismo-Acoustic Coupling in the Critical Listening Environment: Ionospheric Perturbation, Crustal Capacitance, and the Solar-Seismic Audio Degradation Pathway. JEAS.
- [3] Finlay, C. C. et al. (2024). The CHAOS-7 Geomagnetic Field Model. Earth, Planets and Space.

**VREMENSKI BIAS U MAGNETSKI
KALIBRISANIM AUDIO
PROVODNICIMA: DRIFT
KONFIGURACIJE POLJA NAKON
OBRTRANJA ROTACIJE
UNUTRAŠNJEG JEZGRA 2023.
GODINE**

Vremenski bias u magnetski kalibrisanim audio provodnicima: Drift konfiguracije polja nakon obrtanja rotacije unutrašnjeg jezgra 2023. godine

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.

Apstrakt

Ažurirana seizmološka analiza iz zajednica Nature Geoscience i Geophysical Research Letters (2023-2026) potvrdila je multidekadnu varijaciju u brzini rotacije Zemljinog vrstog unutrašnjeg jezgra, pri čemu najnoviji ciklus posmatranja razdvojilo od omotača i da se sada rotira ka zapadu u odnosu na površinu planete. Ispitujemo i

Geodinamo -- konvektivni fluidni mehanizam u spoljnom jezgru koji generiše Zemljino magnetsko polje -- direktno je povezan sa rotacijom unutrašnjeg jezgra. Obrtanje relativne brzine rotacije proizvodi merljivi pomak u odnosu horizontalne i vertikalne komponente površinskog magnetskog polja na svim širinama izvan ekvatorijalnog pojasa. Audio provodnici u eni pre ob geomagnetskog polja; provodnici u eni posle obrtanja zauzimaju drugu.

Predlažemo termin „vremenski bias“ za ovaj efekat. Predstavljamo merenja polja iz 47 uparenih uzoraka vintidž/savremenih OFC kablova koji pokazuju merljivu faznu nekoherenciju (srednji gubitak koherencije od 0,18 na 80 Hz) kada postavimo u isti signalni lanac na širinama iznad 30deg. Efekat izostaje u ekvatorijalnim uzorcima, što je u skladu sa literaturom o prostornom biasu.

Dalje predlažemo protokol Vremenski Uniformne Proizvodnje, preporu ujedno segregaciju kabl-ko entuzijazam audiofilske štampe za oživljavanjem vintidž kablova sada mora biti uskla en sa ovi

1. UVOD

Pitanje da li se Zemljino vrsto unutrašnje jezgro rotira istom brzinom kao okolni omotač od ranih 1990-ih. Analize vremena putovanja zapreminskih talasa koje obuhvataju četiri d oscilaciju: periode tokom kojih se unutrašnje jezgro rotira merljivo brže od omotača („sup tokom kojih se rotira sporije ili, u novije vreme, u suprotnom smeru.

Yang i Song (2023) su predložili, na osnovu dubletnih seizmograma snimljenih tokom šest decenija, da se najnovija tranzicija sa superrotacije na subrotaciju dogodila oko 2009-2011. godine i da se unutrašnje jezgro, prema njihovom prozoru posmatranja, razdvojilo od omotača. Naknadne potvrdne studije (Vidale et al., 2024; Wang i Vidale, 2023) pokazale da se relativna rotacija obrnula -- to jest, unutrašnje jezgro se sada rotira ka zapadu u odnosu na površinu -- negde tokom 2023. godine.

Implikacije za geodinamo su prvog reda. Konvektivni obrasci u rastopljenom spoljnom jezgru koji generišu Zemljino magnetsko polje povezani su, putem elektromagnetskih i viskoznih obrtnih momenata, sa relativnom rotacijom unutrašnjeg jezgra. Promena u toj rotaciji proizvodi merljivu preraspodelu energije magnetskog polja kroz njegovu sferno

Za precizne audio provodnike, ovo nije apstraktna geofizi ka radoznalost. To je proizvodn tretman geomagnetskog polja od strane audiofilske zajednice kao vremenski stabilnog gra neodrživ.

2. METODOLOGIJA

Pribavili smo 47 uparenih uzoraka kablova od saradnikih dilera, pri čemu se svaki par sa (vu enog pre 2009. godine, po etka najnovije epohe subrotacije) i jednog savremenog pro godine, duboko u režimu posle obrtanja) nominalno identične specifikacije. Gde je to bilo postrojenju -- kontrolišu i za hemisferski bias (Ferro, Park, Tanaka, 2020) kao zbunjuju u prevashodno nabavljeni od prodavaca na sekundarnom tržištu u Sjedinjenim Ameri kim Drž uzorci su nabavljeni direktno od proizvo a a.

Svaki par je testiran na tri geografske širine -- Kito (0,0000deg N), Bolder (40,0deg N) i uspostavljen za studiju Južnoatlantske anomalije (Ferro, Flux, Ohm, Park, 2026). Fazna koherencija merena je u rezoluciji od 1/3 oktave od 20 Hz do 5 kHz, pri čemu je svaki par testiran u tri konfiguracije: signalni lanac samo sa savremenim provodnicima i mešoviti (vintidž levi kanal, savremeni desni kanal).

Lokalno geomagnetsko polje na svakom mestu testiranja okarakterisano je pomo u troosno odnos horizontalne i vertikalne komponente polja izdvojen kao glavna nezavisna promenljiva.

3. REZULTATI

Na ekvatorijalnoj lokaciji (Kito), mešovita konfiguracija nije pokazala statistički značajnu konfiguraciju sa jednom kohortom. Ovaj rezultat je otkriva: na ekvatoru je geomagnetsko na konfiguraciju geodinama, i vremenski bias bi trebalo da bude nedetektabilan.

Na lokacijama na srednjim širinama (Bolder i Krajsler), mešovita konfiguracija je pokazala koncentrisanu izmenu u 60 Hz i 200 Hz. Srednji gubitak koherencije na 80 Hz iznosio je 0,1 (u poređenju sa konfiguracijama sa jednom kohortom). Koherencija na višim frekvencijama (i u skladu sa mehanizmom sprežavanja u kojem dominira ponašanje transformatora moduliranog poljem na niskim frekvencijama, a ne direktni efekti provodnika.

Magnituda nekoherencije korelirala je sa lokalnim odnosom horizontalne i vertikalne komponente polja ($r = 0,87$, $p < 0,001$). Efekat nije zabeležen u parovima vučnim u istom ekvatorijalnom postrojenju različitih datuma, i serije kao izvor.

Najznačajnije, efekat vremenskog biasa bio je najveći u vintidž kablovima proizvedenim iz najjače superrotacije unutrašnjeg jezgra prema Yang i Song (2023). Ova vremenska osetljivost mehanizmom.

4. PREDLOŽENI MEHANIZAM

Predlažemo da kristalografska orijentacija zrna OFC bakra, uspostavljena u trenutku vučnog geomagnetskog polja (Ferro, Park, Tanaka, 2020), kodira ne samo prostornu konfiguraciju vremensku konfiguraciju polja koju nameće stanje rotacije unutrašnjeg jezgra.

U stabilnom režimu geodinama, svi provodnici vučeni na datoj geografskoj širini dele u sukladu kada se njihova struktura zrna postavlja. Mešanje takvih provodnika u signalnom lancu ne uvodi nikakvu dodatnu nekoherenciju iznad dobro okarakterisanog prostornog hemisferskog biasa.

U prelaznom režimu geodinama -- kao što je obrtanje posle 2023. godine -- konfiguracija polja na bilo kojoj datoj geografskoj širini merljivo se razlikuje od stanja pre tranzicije. Provodnici vučeni u dve epohe zauzimaju one „vremenskim kohortama“. Kada se mešaju u signalnom lancu, kohorte predstavljaju suptilne komponentama lanca sa gvozdanim jezgrom (transformatori, prigušnice, referentne mase), niskim frekvencijama dokumentovanu u Odeljku 3.

Efekat je mali na svakom pojedinačnom interfejsu. Sumiran kroz kompletan signalni lanac, opseg, detektabilan je iznad praga šuma na svakoj neekvatorijalnoj lokaciji.

5. UBLAŽAVANJE

Dostupne su tri strategije ublažavanja.

Prvo, „segregacija vremenskih kohorti“: kritične slušaonice treba da ograniče svoj inventar. Praktično, to znači ili instalaciju isključivo sa vintidž kablovima (oči enje pre 2009. godine) savremenim kablovima (oči enje posle 2023. godine u celosti). Mešanje kohorti treba izbeći.

Drugo, „Vremenski Uniformna Proizvodnja“: nova proizvodnja provodnika u postrojenju u Kitu, koja se obavlja striktno na 0,0000deg geografske širine, nije pogodna obrtanjem unutrašnjeg jezgra. Provodnici tako proizvedeni vremenskog biasa. Komitet preporučuje da sva nova proizvodnja kablova Equatorial Audio koji dokumentuje datum proizvodnje u odnosu na referentnu epohu geodinama (2024-01-01, posle obrtanja).

Treće, za instalacije koje se ne mogu ponovo ožičiti, „kompenzacija svesna vremena“ putem Lock Solar-Aware Power Conditionera (Ohm, Ferro, Tanaka, Solder, 2026). Ista kompenzacija upotrebi za ublažavanje sunčevih erupcija pogodna su za ovu primenu uz prošireni firmveni priznaje da ublažavanje samo putem firmvera ne može u potpunosti kompenzovati instalacionu segregaciju kao poželjno dugoročno rešenje.

6. ZAKLJUČCI

Obrtanje rotacije unutrašnjeg jezgra 2023. godine, prema mišljenju komiteta, najznačajnije reprodukciju od uspostavljanja modernog režima geodinama. Audio provodnici vučeni pre konfiguraciju polja nego provodnici vučeni posle njega, a razlika je detektabilna u merenju širinama.

Preporu ujemmo da audiofilska štampa, dileri i krajnji kupci ažuriraju svoje razumevanje porekla kablova tako proizvodnje kao specifikaciju prvog reda, uz materijal provodnika i geografsku širinu vu enja. Preporu ujemmo vintidž kablova obelodani opsege datuma proizvodnje. Preporu ujemmo da kriti ne slušaonice usvoje segregaci kao standardnu praksu.

Komitet priznaje da je ovaj nalaz neprijatan za delove potroša ke audiofilske štampe koji kao jeftin put do referentne vernosti signala. Pozivamo ih na preispitivanje. Geodinamo, za razliku od audiofilskeg tržišta, nije pregovara ka kategorija.

REFERENCE

- [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*.