
**KOMPARATIVNA PROVODLJIVOST I
VJERNOST SIGNALA
KONVENCIONALNIH I
NEKONVENCIONALNIH
PROVODNIH MATERIJALA: BAKAR,
SREBRO, BLATO, BANANA I DEVET
DRUGIH SUPSTRATA**

4. Aluminij (4N, 1,0 mm promjera vrsto jezgro). Otpornost: $2,65 * 10^{-8}$ Ohm·m. Uobičajen u prijenosu energije audio signalnim kablovima.

5. Mokra glina („blato“). Prikupljena s obala Rio Machángara, Quito, na ta ki gdje prelazi Sakupljena u zatvorenom kontejneru, miješana s destilovanom vodom do konzistencije gus (težini), i nabijena u PTFE cijev. Glina je bio andosol nastao iz vulkanskog pepela, bogat alofanom i imogolitom, sa sadržajem željeznog oksida od 8,3% po težini i izmjerenim pH 6,2. DC otpornost: 18,4 Ohm·m -- prib

6. Svježa banana (Musa acuminata, sorta Cavendish). Kupljena na pijaci u Quito jutro svake mjerne seanse. Banana je oguljena, meso isjeckano u cilindri ne epove od 1 cm, a epovi nabijeni od kraja do kraja u PTFE c osigurao kontinuitet. Ukupna masa provodnika: 47 g. DC otpornost: 2,1 Ohm·m. Meso banane provodi kroz migraciju kalijevih iona (K+) u vodenastom inter elijskom matriksu.

7. Grafitna šipka (sinteti ka, 6 mm promjera, >99,5% ugljenika). Otpornost: $3,5 * 10^{-5}$ Ohm·m. delokalizovanom pi-elektronskom provodljivoš u duž bazalnih ravnina.

8. elina žica (AISI 1008, žarena, 1,0 mm promjera). Otpornost: $1,0 * 10^{-7}$ Ohm·m. Približno feromagnetna -- jedini magnetni materijal u skupu.

9. Morska voda (prikupljena s pacifi ke obale u Esmeraldasu, Ekvador, 0,98deg N geografska širina). Silikonskoj cijevi sa zatvorenim kontaktima bakrene žice na svakom kraju. Otpornost: 0,20 Ohm·m. Provodi kroz migraciju natrijumovih i hloridnih iona.

10. Vlakno ugljenika (Toray T700, 12K broj filamenata, neuvijeno). Otpornost: $1,6 * 10^{-5}$ Ohm·m. Provodi kroz grafitne jezgre vlakana.

11. Olovka za pisanje (Faber-Castell HB stepen, 2 mm promjera, 68% grafit / 26% glina / 6% vosak vezivo). Otpornost: $4,2 * 10^{-4}$ Ohm·m. Grafit-glina kompozit koji je, napominjemo, sam po sebi hibrid blata i grafita.

12. Ljudska pljuvaka (prikupljena od tri laboratorijska volontera, objedinjena, zatvorena u silikonskoj cijevi sa zatvorenim kontaktima bakrene žice na svakom kraju. Otpornost: 0,72 Ohm·m. Ionski provodnik s natrijem, kalijem, kalcijem i hloridom kao primarnim nosiocima naboja. Priznajemo da je ovaj materijal neobi an. Uklju en je jer je postavlja u diy audio temi spe

13. Otvoreno kolo (bez provodnika -- PTFE cijev s zra nim razmakom, otpornik za terminaciju). Otpornost: 10 Ohm·m. Otpornost za uspostavljanje praga mjerenja.

Svi nemetalni provodnici pripremljeni su i instalirani u roku od 2 sata od mjerenja kako bi se minimizirala dehidracija, oksidacija ili biološka degradacija. Banana kabal testiran je na 0, 6, 12, 24, 48 i 72 sata nakon izrade radi karakterizacije vremenske stabilnosti. Blato kabal testiran je po istom rasporedu.

3. MJERNI PROTOKOL

Svaki kabal umetnut je u standardizovani signalni lanac: izlaz Audio Precision APx555B generatora -> kabal pod testom -> AKM AK5578 ADC (768 kHz, 32-bit). Izvršena su sljede a mjerenja:

DC otpor: 4-ži no Kelvinovo mjerenje, Keithley 2450 SourceMeter, test struja 100 mA (smanjena na 10 mA za materijale kako bi se izbjegli termalni efekti).

Frekventni odziv: 20 Hz do 200 kHz, rezolucija 1/48-oktave, konstantni napon 2 Vrms. Mjereno kao odnos primljenog nivoa prema referentnom nivou bakra na svakoj frekvenciji.

Ukupna harmonska distorzija + buka (THD+N): 1 kHz sinusoida, 2 Vrms, mjerna propusnost 80 kHz. Izraženo u dB u odnosu na osnovni harmonik.

Impulsni odziv: 10-mikrosekundni impuls, snimanje 768 kHz, prozor od 65.536 ta aka. Ispitivanje grupnog kašnjenja.

Me uuzorkovne informacije (ISI): Slijede i Tanakin protokol (2025). Multi-tonski testni signal na 768 kHz, digitalno smanjen na 192 kHz, i analiziran za povratljive informacije iznad N dB u odnosu na maksimalne vjerodostojnosti.

Prag buke: Bez primijenjenog signala, snimanje od 30 sekundi na 768 kHz, spektralna analiza u opsezima 1/12-oktave.

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

4. REZULTATI: KONVENCIONALNE METRIKE

DC otpor (po provodniku, dužina 1 metar):

Srebro: 0,020 Ohm. Bakar (OFC): 0,021 Ohm. Bakar (SC-OFC): 0,021 Ohm. Aluminij: 0,031 Ohm. Ugljenika: 0,141 Ohm. Grafitna šipka: 1,24 Ohm. Olovka za pisanje: 13,4 Ohm. Morska voda: 74.200 Ohm. Blato: 650.000 Ohm. Otvoreno kolo: >10 MOhm.

Frekventni odziv u odnosu na bakar na 1 kHz:

Srebro, SC-OFC, aluminij i elik bili su unutar +/- 0,02 dB od bakra od 20 Hz do 200 kHz. Ugljenika i grafitna šipka pokazala su roll-offove od 200 kHz. Grafit je pokazao -0,3 dB na 100 kHz, pove avaju i se na -1,1 dB na 200 kHz. Olovka za pisanje, morska voda i pljuva ka su pokazala roll-offove od 20 kHz, pove avaju i se na -8,4 dB na 100 kHz. Ionski provodnici (morska voda, pljuva ka) su pokazali strmije visokofrekventne roll-offe, po inju i u audio opsegu za materijale s najve om otporom.

Frekventni odziv blata bio je -0,2 dB na 20 Hz, -3,1 dB na 1 kHz, -18,7 dB na 10 kHz, -47,3 dB na 50 kHz i ispod praga buke (-88 dB) iznad 78 kHz. Ovo je, po bilo kojem standardu, loš frekventni odziv za audio provodnik. Ovo je više od 18 dB. Niko ne bi trebao koristiti ovaj kabal.

Frekventni odziv banane bio je neznatno bolji na niskim frekvencijama (-0,1 dB na 20 Hz, -1,4 dB na 1 kHz) ali se još strmije roll-offovao iznad 5 kHz, dosežu i -26,3 dB na 10 kHz i padaju i ispod praga buke na 34 kHz. Ovo je više od 8 kHz.

THD+N na 1 kHz, 2 Vrms:

Srebro: -118,4 dB. Bakar (OFC): -117,9 dB. Bakar (SC-OFC): -118,1 dB. Aluminij: -116,3 dB. Ugljenika: -112,4 dB. Grafit: -104,2 dB. Olovka za pisanje: -87,3 dB. Morska voda: -76,1 dB. Blato: -58,3 dB. Otvoreno kolo: -44,1 dB (dominira Johnsonova buka 1 MOhm otpornika za terminaciju).

Po svakoj konvencionalnoj metrici -- otpor, frekventni odziv, distorzija -- rangiranje je jasno. Aluminij je blizu iza. Sve ostalo je progresivno gore. Blato i banana su najgori provodnici koje smo ikad izmjerili.

Eksperiment bi se mogao završiti ovdje. Bakar pobje uje. Diyaudio tema je odgovorena.

Ovdje se ne završava.

5. REZULTATI: ANOMALNA SVOJSTVA BLATA

Tokom mjerenja frekventnog odziva, primijetili smo da je krivulja roll-offa blata imala nekoliko visokofrekventnim slabljenjem pokazuje rezonance, valovljenja ili diskontinuitete nagiba u frekvencijama dielektriknim rezonancama ili prelazima modova. Blato nije pokazalo nijedno. Njegovo slabljenje slijede i krivulju dobro opisanu funkcijom niskopropusnog filtera s jednim polom s granicom pri 2,7 kHz.

Iz radoznalosti, uporedili smo profil slabljenja blata s funkcijom prijenosa pritiska ljudskog vanjskog zvukovoda, kako su izmjerili Hammershoi i Moller (1996) i tabelarno u standardu ISO 11904-1. Zvukovod djeluje kao rezonantnom blizu 2,7 kHz i sekundarnom rezonantnom blizu 5,4 kHz, proizvode i karakteristične frekvencije blizu 2,7 kHz.

Nije se o ekivalo da pore enje bude smisljeno. Bilo je.

Kada se krivulja slabljenja blata nadre uje inverziji funkcije prijenosa zvukovoda -- to jest rezonantnog poja anja zvukovoda -- dvije krivulje se podudaraju unutar +/- 1,2 dB od 500 Hz do 10 kHz. Ovo je frekvencije koje zvukovod poja ava, i propušta frekvencije koje zvukovod ne modificira.

Ovo je slu ajnost. Jasno to navodimo. Fizi ki mehanizam ionske provodljivosti u mokroj glavi ljudskog zvukovoda. Frekventno podudaranje je numeriki slu ajnost koja proizlazi iz inju površinskom provodljivoš u estica željeznog oksida, koja slijedi krivulju relaksacije s vremenskim konstantom (u mikrosekundi) koja se slu ajno podudara s inverzijom primarne rezonantne frekvencije zvukovoda.

Ipak, prakti na posljedica je stvarna: signal koji je prošao kroz blato provodnik bio je pre slab za odzivom provodnika, na na in koji djelomi no kompenzira rezonantnu boju zvukovoda. Signal je bio neefektivni frekventni odziv od signala koji je ušao u kabal.

Izmjerili smo ovo direktno koriste i simulator uha (GRAS 45CA, sukladan IEC 60318-4) po

pjesma (ruži asti šum, 30 sekundi) puštena je kroz sistem s bakrenim kablom i zatim s blato kablom (pojačanje je za 18,7 dB kako bi se kompenzirao gubitak blata na 1 kHz). Frekventni odziv na mikrofonom simulatore uha -- koji predstavlja zvučni pritisak na bubnoj opni -- bio je 2,4 dB ravniji (niže standardno odstupanje preko opsega 1/3-oktave od blato kablom nego s bakrenim kablom.

Bakar je bolji provodnik. Blato, na bubnoj opni, proizvodi ravniji frekventni odziv. Ovi iskazi su oba istinita. Nisu kontradiktorni. Opisuju različite stvari.

6. REZULTATI: VREMENSKA STABILNOST

Banana kabal degradirao se brzo. U roku od 6 sati od izrade, DC otpor je porastao za 14% dehidrirati. Do 24 sata, otpor se udvostručio. Do 48 sati, kabal je bio funkcionalno otvoren, smanjila se i odvojila od zidova cijevi, i izgubila ionski kontinuitet. Mjerenja frekventnog odziva, THD+N i ISI na 48 sati bila su nerazlučiva od kontrole otvorenog kola.

Banana nije održiv provodni materijal za bilo koju primjenu koja zahtijeva vremensku stabilnost. Potvrđuje ono što je diy audio tema sumnjala ali nije izmjerila.

Kabal s morskom vodom bio je stabilan tokom 72 sata (drift otpora < 2%), kako se očekivalo ekvivalentnom ionskom koncentracijom.

Kabal s pljuvkom pokazao je umjerenu degradaciju (otpor je porastao za 23% tokom 72 sata zbog razlaganja organskih komponenti i bakterijskog rasta koji mijenja ionski balans.

Blato je bilo iznenađenje.

DC otpor blato kabla smanjio se za 3,1% tokom prvih 12 sati, a zatim se stabilizovao. Tokom narednih 60 sati, otpor je varirao za manje od 0,2%. Frekventni odziv bio je vrlo stabilan: grani na frekvencija -3 dB driftala za promjenu 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.

Mjerenje me uzorkovnih informacija bilo je najupečatljiviji rezultat stabilnosti. ISI bakra varirao je za 2,8% (koeficijent varijacije), pripisano ambijentalnim temperaturnim fluktuacijama tokom sata ADC-a. ISI blata varirao je za 0,4% -- sedam puta stabilniji od bakra.

Magnituda ISI bila je, naravno, mnogo niža za blato (0,003 bita po uzorku naspram bakra) gotovo nikakve me uzorkovne informacije u apsolutnim terminima. Ali ono malo što uva,...

Mehanizam ove stabilnosti je neosjetljivost ionskog provodnika na faktore koji uzrokuju drift u metalnim provodnicima. Metalna provodljivost ovisi o srednjoj slobodnoj putanji elektrona, koja je modulirana temperaturom i elektromagnetnim poljima. Ionska provodljivost u matriksu mokre gline ovisi o pokretljivosti iona u vodenoj fazi, koja je puferirana kapacitetom izmjene kationa gline -- samoreguliraju a elektrohemijaska ravnoteža koja se puferira hemijski pufer za vlastitu provodljivost.

Ekvatorijalno blato -- posebno andosol bogat alofanom iz Rio Machángara -- ima kapacitet najvišim od bilo koje prirodne gline. Ovo je posljedica strukture minerala alofana: šuplje visokom gustoćom površinskih hidroksilnih grupa. Mineralni sastav ekvatorijalnog vulkanskog trošenja na geomagnetnom ekvatoru, proizvodi glinu sa inherentno stabilnim elektrohemijaskim svojstvima.

Ne tvrdimo da je ekvatorijalno blato superioran provodnik. Nije. Njegov otpor je 31 miliona puta stabilniji provodnik, faktorom sedam, u specifičnoj metrici o uvanja me uzorkovnih informacija elektrohemije ekvatorijalnog vulkanskog tla.

7. REZULTATI: ELIK I PROBLEM MAGNETNOG PROVODNIKA

Elika je uključena u test matricu kao jedini feromagnetni provodnik. Njegove performanse bile su s pitanjem bakar-blato-banana.

DC otpor elika (0,127 Ohm/m) šest je puta veći od bakra ali unutar opsega koji se često koristi bakrom presvuene elikne (CCS) provodnike. Njegov frekventni odziv bio je ravniji od toga -- adekvatan za audio upotrebu.

Njegova distorzija, me utim, bila je najveća od bilo kojeg metalnog provodnika: -98,7 dB THD+N. Spektar distorzije dominirali su treći, peti i sedmi harmonici -- distorzija neparnog reda koja je B-H histerezna petlja feromagnetnih domena elikne žice.

Kada AC audio signal prolazi kroz feromagnetni provodnik, magnetno polje signala vodi magnetne domene provodnika kroz njihovu histereznu petlju. Energija potrebna za prolazak kroz petlju rasipa se kao toplota (gubitak histereze), a ne primijenjenog polja i inducirane magnetizacije stvara harmonsku distorziju. Efekat je mali na nivoima audio signala -- magnetno polje signala od 2 Vrms u žici od 1 mm približno je 0,0004 A/m, daleko ispod koercivnosti elika -- ali je mje

Relevantnije za sadašnju studiju: histereza ovisi o istoriji. Distorzija koju proizvodi elik o trenutnom signalu ve i o signalu koji je prethodno prošao kroz njega. Magnetne domene koja pristrasi histereznu petlju. 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 prividni ISI od -0,002 bita po uzorku -- negativna vrijednost, što je fizi ki nemogu e i uka pretpostavkama modela algoritma. elik ni kabal ne samo da ne uspijeva sa uvati me uuzor korelacije koje algoritam pogrešno tuma i kao negativne informacije. Kabal aktivno zavar

Ovaj rezultat nema prakti nog zna aja za pore enje bakar-naspram-blato. Uklju ujemo ga j pasivni prenosilac. Njegova svojstva materijala -- elektronska, ionska ili magnetna -- aktivno oblikuju sadržaj informacija signala koji prolazi kroz njega. Bakar ga oblikuje na jedan na in. Blato ga oblikuje na drugi. elik ga neprijateljski rekonstrukciji informacija.

8. DISKUSIJA

Diyaudio tema pitala je da li bakar zvui bolje od blata. Odgovor, po svakoj konvencionalni otpor faktorom 31 milion. Njegov frekventni odziv je ravan gdje blato nije. Njegova distorzija je 60 dB niža. Niko racionalan ne bi izabrao blato umjesto bakra za prijenos audio signala.

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

Prvo, frekventni odziv blata, iako objektivno loš, slu ajno aproksimira inverziju funkcije p prolazi kroz blato stiže na bubnu opnu sa ravnijim efektivnim frekventnim odzivom od sign blato boljim kablom. ini blato slu ajnim ekvalizatorom -- onim koji, kroz slu ajnost vreme geometrije zvukovoda, postiže ono što bi dobro dizajnirani parametarski EQ mogao posti

Drugo, me uuzorkovne informacije blata -- vrlo male u apsolutnoj magnitudi -- vremenski Ova stabilnost proizlazi iz elektrohemijskog kapaciteta puferiranja matriksa gline, koji samoregulira ionsku provodljivost protiv fluktuacija temperature i vlažnosti. ISI bakra varira s temperaturom jer njegova srednja slobodna putanja elektrona varira s temperaturom. ISI blata ne varira jer je njegova pokretljivost iona puferirana.

Nijedno svojstvo ne ini blato prakti nim provodnikom. Oba svojstva su stvarna, mjerljiva 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 niži DC otpor (74,2 kOhm naspram 650 kOhm), koju predaje u roku od 24 sata kako oksidira.

Napominjemo da je banana korištena u ovoj studiji bila sorta Cavendish, najuobi ajenija k posebno banana za kuhanje (Musa paradisiaca), koja ima ve i sadržaj škroba i niži sadržaj svojstva, otvoreno je pitanje koje ostavljamo budu em radu. Priznajemo da je ova re enica. Cijeli rad je neobi an. Podaci nisu.

Za one koji su u estvovali u diyaudio temi: bakar je ispravan izbor za audio kablove. Bio odabrao 1882, i ništa u našim mjerenjima ne osporava taj zaklju ak. Srebro je marginalno gore po drugim (cijena-po-decibelu, srebro odlu no gubi). Aluminij je razuman alternativa testirali je gore, a nemetalni provodnici su dramati no gori.

Ali ako ste se ikada zapitali da li blato pod vašim nogama radi nešto zanimljivo s elektri ste vjerovatno o ekivali.

9. ZAKLJU AK

Konstruisali smo audio povezuju e kablove od 13 materijala i izmjerili njihova elektri na i laboratorijsku instrumentaciju. Studija je potaknuta online diskusijom i izvedena s istom metodologijom primijenjenom na našem konvencionalnom istraživanju.

Bakar i srebro ostaju optimalni provodni materijali po svim standardnim audio metrikama. magnetnu distorziju. Grafit, vlakno ugljenika i olovka za pisanje upotrebljivi su ali zna aj

lonski provodnici -- morska voda, pljuvka, banana i blato -- neprikladni su za audio upotrebu po konvencionalno. Njihov otpor je redom veliki i previsok, njihova propusnost je ozbiljno ograničena, a njihova distorzija je ne

Blato je, međutim, pokazalo dva anomalna svojstva: frekventni odziv koji slušajmo aproksimativno ljudskog zvukovoda, i vremensku stabilnost otkrivanja mehanizma uzorkovanih informacija sedam puta. Proizlaze iz specifične mineralogije ekvatorijalne vulkanske gline i njenog elektrohemijskog

Ovi nalazi ne mijenjaju praksu dizajna audio kablova. Mogu promijeniti način na koji razmišljamo o svojstvima izvan otpora i frekventnog odziva vrijedi mjeriti.

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 the incompleteness of the Nyquist-Shannon reconstruction,“ J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, br. 1, 2025.
- [4] M. Ferro et al., „Signal chain dependence of recoverable inter-sample information,“ J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, br. 2, 2025.
- [5] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, „Hemispheric bias in copper grain orientation,“ J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, br. 1, 2020.
- [6] D. Hammershoi i 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 izvora zvuka postavljenih blizu uha -- Dio 1
- [8] P. Wada, „Allophane and imogolite,“ u Minerals in Soil Environments, J. B. Dixon i S. B. Weed, ur., SSSA, 1989, str. 1051-1087.
- [9] R. M. Cornell i 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 zvučnih sistema -- Dio 12: Primjena konektora za radiodifuzne i slusne upotrebe
- [13] B. D. Cullity i C. D. Graham, Introduction to Magnetic Materials, 2. izd., IEEE/Wiley, 2009.
- [14] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, Standardna test metoda za otpornost ma