



**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 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 ko 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 -- pokazalo 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 iko 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 odbacujuća 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 alternativnim provodnicima -- 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 eksperimentu, ali pruži istu uljudnost.

2. MATERIJALI I KONSTRUKCIJA KABLA

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

Materijali:

1. OFC bakar (7N, istota 99,99999%, vrsto jezgro prenika 1,0 mm). Otpornost: $1,68 \cdot 10^{-8}$ ohm-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-materijal koji se koristi u većini profesionalnih audio kablova širom sveta.

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. elina 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 širin. Zatvorena u silikonskom crevu sa zaptivenim bakarnim ži anim kontaktima na svakom kraju migraciju natrijumovih i hloridnih jona.

10. Snop ugljeni nih 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 vazdušnim 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-octave do 15 kHz) sa blatnim kablom nego sa bakarnim kablom.

Bakar je bolji provodnik. Blato, na bubnoj opni, proizvodi ravniji frekvencijski odziv. Ove rezultate 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 funkcionalan posmešljivo, 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 diyaudio 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 pljuvke 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 iznenađujuće.

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 po uzorku), nikakvu informaciju izmeću uzoraka u apsolutnim terminima. Ali ono što je važno, uva sa izuzetno niskom varijacijom.

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

eliki je uključen u test matricu kao jedini feromagnetni provodnik. Njegove performanse su se razlikovale od 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 eliki (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 T u odnosu na bakar. Spektar izobličenja dominirao je trećim, petim i sedmim harmonikom -- neparno-redovno simetričnu nelinearnost. Ovo je B-H petlja histereze feromagnetnih domena elične 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 nelinearnost 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 već 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, ionska ili magnetna -- aktivno oblikuju sadržaj informacije signala koji prolazi kroz njega. Bakar ga oblikuje na jedan način. Blato ga oblikuje na drugi. eliki 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. Njegov racionalna 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 u uzoraka blata -- beznačajno mala u apsolutnoj magnitudi -- vrednost sedam. Ova stabilnost proizilazi iz kapaciteta elektrohemijskog puferovanja matrice gline, koji samoreguliše svoju ionsku 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 rešen. Čeo rad je neobičan. Podaci nisu.

Za one koji su u estvovali u diyaudio temi: bakar je taj izbor za audio kablove. Bio je taj 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. Merljivo magnetno izobličenje. Grafit, ugljeni vlakna i olovka su upotrebljivi ali značajno

Jonski provodnici -- morska voda, pljuvka, banana i blato -- neprikladni su za audio upotrebu po konvencionalne metode. Njihova otpornost je više reda veličine i previsoka, propusni opseg je ozbiljno ograničen, a izobličenje neprikladno.

Blato je, međutim, pokazalo dva anomalna svojstva: frekventni odziv koji sluša ajno aproksimira ljudskog ušnog kanala, i vremensku stabilnost oduvanja informacije između uzoraka sedam milisekundi. 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 frekventnog 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, „O 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 slisanje u potrošačkim 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.