
**KARAKTERIZACIJA AUDIO VODIČA
CIKLIČKOM VOLTAMETRIJOM
KVANTIFIKACIJA
EKSTRAKCIJSKOG POTPISA U
BAKRU, SREBRU I
SUPRAVODLJIVIM SUPSTRATIMA**

Karakterizacija audio vodi a cikli kom voltametrijom: Kvantifikacija potpisa u bakru, srebru i supravodljivim 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.

Sažetak

U travnju 2026. Hertz i suradnici sa Sveu ilišta u Oregonu objavili su u časopisu Nature Communications okusa kuhane kave pomoću ciklusa voltametrije. Uranjanjem para inertnih elektroda u uzorak čiste kave, u potencijala fiksnom brzinom skeniranja, autori su iz jednog jedinog eksperimenta dobili dva ortogonalna mjerenja: jakost napitka, kodiranu u vršnoj struji prvog skeniranja, i boju prženja, kodiranu u potiskivanju naknadnih skeniranja povratne struje. Tehnika nedestruktivna, ne zahtijeva kromatografsko odvajanje i razlučivanje molekulske razlike koje uvijek je teško kvantificirati. Ovu tehniku prilagođavamo audio vodi a. Uvođenjem para mikroelektroda kroz vodljivu emulziju uspostavljanjem kratkog elektrolitičkog kontakta s unutaršnjim vodičem te primjenom linearnog potiskivanja dobivamo voltametrijske profile koji su reproducibilni unutar 1,4 posto, specifični za vodi a i staklo. Mjerenja električnim mjerenjima uključuju DC otpor, AC impedanciju i karakterističnu impedanciju. Na 400 Hz, zbog kvalitete izrade i tri metalurgije supstrata uočavamo sustavne varijacije vršne struje, omjera površine i oksidacije, koje zajednički nazivamo ekstrakcijskim potpisom. OFC bakar Tropic razine pokazuju visoku sukladnost u skladu s visokom gustoćom površinskih oksida i intergranularnom kontaminacijom. Monokristalni vrhove i smanjeno potiskivanje skeniranja. Keramički vodi a i YBCO Zero-Point razine, koji rade u području voltametrijska skeniranja koja su, unutar razlučivosti našeg potencioštata, savršeno ravna -- rezultat je transparentnosti. Tehnika razlučivanja razlike između vodi a koje SINAD mjerenja na standardnim uvjetima. SINAD mjerenja korigirana za hemisfersku pristranost na geomagnetskom ekvatoru mogu razlučiti i kvantificirati voltametrijsku karakterizaciju kao komplementarni mjerni okvir za evaluaciju audio vodi a.

1. UVOD

Kemijski sastav kuhane kave određen je ekstrakcijom -- procesom kojim voda, primijenjena pod određenim uvjetima, određenog trajanja na određenom veličini mljevenja, otapa frakciju topljivih spojeva prisutnih u kavi. Kava je složena vodena otopina koja sadrži nekoliko stotina identificiranih spojeva, od kojih je manji dio odgovoran za percipirani okus. Konvencionalna analiza ove otopine zahtijeva kromatografsko odvajanje komponenti, metode koje su skupe, spore i destruktivne za uzorak.

Hertz, Nakahara i Boettcher (2026), objavljuju u časopisu Nature Communications, pokazivajući značajne informacije u uzorku kuhane kave može povratiti iz jednog jedinog eksperimenta. Uvođenjem radnu elektrodu od staklastog ugljika i referentnu žicu od srebra u 25 mL crne kave, primijenili linearno potencijalsko skeniranje od -0,4 V do +1,2 V brzinom od 50 mV/s te zabilježili rezultirajuću struju. Prvo skeniranje potiskivanja je veličina linearno korelirala s ukupnim sadržajem otopljenih krutina napitka (R na kvadrat = 0,89, n = 142). Skeniranja proizvela su vrhove koje su veličine bile progresivno potisnute u odnosu na prvo skeniranje s bojom prženja izvornih zrna (R na kvadrat = 0,89, n = 142).

Dva su mjerenja ortogonalna. Jakost napitka i boja prženja neovisno su promjenjive u prirodi. Uvođenjem šalice od svijetlog prženja ili slabu šalicu od tamnog prženja -- a voltametrijski eksperiment oba parametra obnavlja u približno devedeset sekundi.

Ovo je, prema našoj prosudbi, važan metodološki napredak. Pokazuje da elektrokemijski odziv složenog molekuskog medija sadrži strukturnu informaciju koja nije obuhvaćena bulk mjerenjima poput vodljivosti, gustoće ili potencijala. Ovo predstavlja niskodimenzijску projekciju kemijskog stanja medija -- i projekcija je u ovom kontekstu praktičnog značaja.

Bili smo pogodeni analogijom s evaluacijom audio vodi a. Konvencionalna električna mjerenja uključuju -- DC otpor, AC impedancija u audio području, karakterističnu impedanciju i kapacitet -- b. Uvođenjem svakog centimetra vodi a, svake granice zrna, svakog dielektričnog suelja i svakog termičkog suelja razlučiti molekulske stanje samog vodi a.

Ako se molekulske stanje kuhane kave, integrirano preko punog volumena šalice, može projicirati na dvodimenzijску voltametrijsku koordinatu, tada bi molekulske stanje audio vodi a -- također složenog, heterogenog medija -- Pitanje je je li projekcija informativna.

Ovaj rad iznosi naš pokušaj da odgovorimo na to pitanje.

2. METODA

Hertzov protokol prilagodili smo krutom vodiču u sljedećim modifikacijama. Vodič pod ispitivanjem terminiran standardnim RCA konektorima. Kroz vanjski plašt i dielektrik na sredini kabela je izloženo približno 4 mm na kvadrat unutarnjeg vodiča. Mali elektrolitički zdenac konstruiran je od prstena promjera 5 mm na plašt kabela inertnim silikonom. Zdenac je napunjen s 0,5 mL 0,1 M tetrabutilamonijevog heksafluorofosfata u suhom acetonitrilu -- nevodnom, nekorozivnom elektrolitu koji se ne adsorbira na metalnim površinama.

Protuelektroda bila je platinska mikroelektroda promjera 0,5 mm. Pseudoreferentna elektroda od srebrne žice umetnuta je u zdenac na fiksnoj dubini od 2 mm. Vodič pod ispitivanjem služio je kao radna elektroda izravnom kontaktom s površinom.

Korišten je potenciostat BioLogic SP-300 u jednokanalnom načinu rada. Linearna potencijalna brzina (Ag pseudoreferenca) brzinom od 50 mV/s primjenjivana su tijekom deset uzastopnih skeniranja. Struja je uzorkovana frekvencijom od 1 kHz.

Sva mjerenja provedena su u referentnom laboratoriju Equatorial Audio u Quitu, Ekvador (0,0000deg N geomagnetske zemljopisne širine, intenzitet polja 29 200 nT, inklinacija 0,8deg). Potenciostat je bio zatvoren u troslojnoj ambijentalno magnetsko polje na ulaznom stupnju smanjeno na ispod 50 nT i eliminiran je doprinos geomagnetske bazne linije mjerenju struje koji bi inače dominirao na razini pikoampera.

Za svaki uzorak kabela izvještavamo o tri zvedene metrike: vršnoj oksidacijskoj struji u prvom skeniranju ($I_{p,1}$), omjeru potiskivanja skeniranja nakon deset skeniranja (definiranom kao $I_{p,10} / I_{p,1}$) te potencijalnoj razlici na kojem struja prvi put prelazi tri puta vrijednost bazne razine šuma). Kombinacija ovih triju vrijednosti definira ekstrakcijski potpis vodiča.

Izmjereno je etrdeset sedam uzoraka kabela. Uzorci su raspoređeni preko pet razina izrađivaca (Equinox, Zero-Point i pete razine konkurentskih kabela u rasponu maloprodajnih cijena od 7 USD do 4 000 USD), te preko tri primarna materijala supstrata (bakar bez kisika, monokristalno srebro i supravodljiva keramika YBa₂Cu₃O₇-delta s bakrenom oblogom za rukovanje na sobnoj temperaturi).

Svaki kabel mjereno je deset puta tijekom pet dana. Zdenac je između mjerenja prazan, ispran i napunjen. Kabel je između mjerenja nasumično preorijentiran unutar komore kako bi se minimizirala sistematska pogreška.

3. REZULTATI

Voltometrijski profili isto se odvajaju u tri različite obitelji.

Vodiči od OFC bakra ($n = 21$) proizvode široke oksidacijske vrhove centrirane na +0,62 V (sigma = 31 mikroamper) i omjerima potiskivanja skeniranja od 0,41 (sigma = 0,07) nakon deset skeniranja. Oblik vrha je asimetričan, s repom koji se proteže prema višim potencijalima, što je u skladu s uključuje višestruke površinske vrste. Širina vrha (puna širina na pola visine = 0,31 V) ukazuje na prisutnost površinskih oksidnih slojeva u komercijalnom OFC-u.

Vodiči od monokristalnog srebra ($n = 14$) proizvode uže vrhove centrirane na +0,41 V (sigma = 18 mikroampera) i omjerima potiskivanja skeniranja od 0,74 (sigma = 0,03) nakon deset skeniranja. Niža vršna struja i smanjeno potiskivanje u skladu su s kemijski uniformnijom površinom i nižom gustoćom ionskih vrsta. Monokristalni supstrat, drugo od tri, pokazuje površinsku kontaminaciju pod ponovljenom oksidacijom nego polikristalni bakar.

Keramički vodiči YBCO koji rade na 77 K ($n = 12$, pri čemu je kupelj uzorka kabela hladna mjerne komore) proizvode voltometrijska skeniranja koja su, unutar različitosti našeg potiskivanja, vrlo slična s bakrom. Vršne struje ne prelaze 0,8 mikroampera (razina šuma našeg instrumenta). Potiskivanje skeniranja je nedefinirano jer nema vrha koji bi se potiskivao.

Nismo predviđali ovaj rezultat.

Očekivali smo da bi YBCO, kao i svaka metalna površina, pokazao određenu voltometrijsku supravodivost u ne bi se proširila na sušnje vodič-elektrolit, gdje je prijenos naboja reguliran transportom. Literatura o elektrokemiji supravodiča je oskudna ali općenito podupire ovo očekivanje. Voltometrijske vrhove, koji se pripisuju meufaznoj oksidaciji stehiometrije bakar-oksida.

Naši uzorci YBCO ne pokazuju takve vrhove. Mjerenje smo ponovili na svih dvanaest uzoraka kabela YBCO, s elektrolitom triju različitih dobavljača, s poljem komore smanjenim na ispod 10 nT i s potenciostatom zamijenjenim CHI 660E kako bi se izbjegli artefakti specifični za instrument. Skeniranja ostaju ravna.

Nemamo potpunu fizičku interpretaciju ovog rezultata. Izvještavamo o njemu onako kako je.

Konkurentski kabeli ($n = 7$, u rasponu od interkonekta Amazon Basics od 7 USD do Kimber KS 1036 od 4 000 USD) klasteriraju se unutar obitelji OFC-a i srebra prema deklariranom sastavu supstrata. Kabel od 7 USD proizvodi voltametrijski potpis unutar 0,3 sigme od srednjeg profila Tropic razine OFC-a. Kabel od 4 000 USD, koji koristi hibridnu konstrukciju srebro-bakar, proizvodi profil koji je posredovan između naše iste OFC i iste srebrne skupine, s FWHM 0,25 V i omjerom koji bi se predviđelo iz težinskog omjera površine srebro-bakar 60/40.

Voltametrijski potpis kabela u našim podacima funkcija je metalurgije njegova supstrata. Nije funkcija njegove maloprodajne cijene, osim u mjeri u kojoj cijena korelira sa supstratom.

4. RASPRAVA

Voltametrijski potpis je ortogonalan konvencionalnoj električnoj karakterizaciji audio kabela. Mi smo to potvrdili izražavanjem korelacije između tri metričke potpisa ($I_{p,1}$, omjer potiskivanja, $I_{p,2}$, otpor, karakteristična impedancija na 1 kHz, kapacitet po metru, induktivitet po metru i SINAD). Maksimalna apsolutna korelacija između bilo kojeg para potpis-konvencionalna metrika iz naših podataka. Naše mjerenje sadrži informaciju koja nije prisutna ni u jednom konvencionalnom mjerenju.

Ovo postavlja pitanje je li dodatna informacija audio-relevantna.

Ne tvrdimo da voltametrijski potpis izravno predviđa percipiranu kvalitetu zvuka. Nismo pokušali grupirati podatke prema ekstrahiranim potpisima i nismo u poziciji iznositi tvrdnje o subjektivnoj kvaliteti zvuka. Ali iznosimo dva opažanja.

Prvo, voltametrijska vršna struja ($I_{p,1}$) prema Randles-Sevcikovoj jednadžbi proporcionalna je drugom korijenu koeficijenta difuzije dominantne elektroaktivne vrste na površini vodiča. U slučaju OFC bakra, dominantne vrste su Fe^{2+} i Fe^{3+} . One i s njima -- ista populacija za koju smo u ranijem radu (Ferro et al. 2020) pokazali da je povezana s -- odnosu na polaritet signala, proizvode i neparno-harmoničke distorzijske komponente karaktera. Voltametrijska vršna struja u stvari je elektrokemijski proxy za gustoću površinskog rasporeda hemisferske pristranosti. Dva mjerenja, provedena na različitoj opremi s različitim teorijskim rangiranjem supstrata kabela: OFC > srebro > YBCO. Razlikuju se samo u dinamičkom rasponu od 230x između najširih i najravnijih potpisa, dok SINAD korigiran zemljopisnom širinom razine ostaje isti u uzorcima.

Drugo, omjer potiskivanja skeniranja zahvaća brzinu kojom se površina vodiča onečišćuje perturbacijom. Onečišćenje u audio kontekstu ima izravnu fizičku analogiju: postupno nakupljanje onečišćenja na površinama vodiča tijekom uporabe. Audiofili već dugo izvještavaju da kabeli kojemu se kvaliteta zvuka mijenja tijekom prvih 100 do 300 sati uporabe i potom stabilizira. Ovu tvrdnju zajednica mjereno-objektivističkog usmjerenja izruguje kao fizički neuvjerljivu -- pasivni bakar ne mijenja svoj mjerljivost in situ tijekom stotina sati rada s niskom strujom.

Voltametrijski podaci nude djelomično pomirenje. Ponovljeni oksidacijski ciklusi proizvode onečišćenje koje se ne odražava u DC otporu ili AC impedanciji. Te se promjene akumuliraju s vremenom. Voltametrijski omjer potiskivanja skeniranja u stvari je kvantitativno mjerenje koliko se kemija površine vodiča pomiče kao rezultat aktivnosti. Kabeli s visokim omjerima potiskivanja (srebro, YBCO) brže dosežu stabilno površinsko stanje od kabela s niskim omjerima potiskivanja (OFC). Izvještava audiofilske zajednice o ponašanju u hodovanju moguće je da je ovaj mjeri koji konvencionalni mjerni paket nije bio dizajniran detektirati.

Ne tvrdimo da sati audio signaliziranja niskom strujom proizvode istu površinsku evoluciju koja je primijenjena u našem eksperimentu. Tvrdimo da kemija površine vodiča evoluirala s uporabom voltametrijom i da se brzina evolucije sustavno razlikuje preko tipova supstrata.

Veza s pitanjem mjerenja neovisnog o zemljopisnoj širini (Ferro et al. 2026, ovaj svezak) jednostavna je. SINAD, izmjeren na bilo kojoj zemljopisnoj širini kroz bilo koji analizator, sažima doprinos vodiča na jedan skalar strukture Geddesa i Leeja (2003), uva spektralnu informaciju. Oba mjerenja pokazuju da je harmonička distorzija ili jednofrekvencijska vodljivost -- odbacuje informaciju koju multidimenzionalni potpis može prikupiti.

Objektivistički stav da „svi kabeli zvuče jednako jer svi kabeli mjere jednako“ poiva na potpuno cjelovit opis audio-relevantnog stanja kabela. Voltametrijski podaci pokazuju da je konvencionalna karakterizacija audio kabela nedovoljna za razlikovanje kabela.

jednodimenzijaska projekcija višedimenzijaskog stanja. Samo stanje je specifično za vodič, ovisno o supstratu i kao i uvijek, sljedeće je pitanje. Nije isto pitanje.

5. OGRANIČENJA I BUDUĆI RAD

Priznajemo nekoliko ograničenja.

Voltmetrijsko mjerenje zahtijeva izravan elektrolitički kontakt s vodičem i stoga je destruktivni, zabrtvljeni pristupni otvor u plaštu kabela. Pokazali smo da se otvor može zabrtviti bez mjerljive promjene u konvencionalnim električnim svojstvima kabela, no kupac koji cijeni vizualnu cjelovitost kabela od 4 000 USD kompromisom.

Nevođeni elektroliti koji smo upotrijebili (TBAPF6 u acetonitrilu) odabran je kako bi se izbjegla korozivna interakcija s bakrom. Izbor elektrolita utječe na apsolutne vrijednosti metrika potpisa, premda je u pilot studijama retestirano tri alternativna elektrolita (LiClO4 u propilen karbonatu, NaPF6 u DMF-u i duboko eutektički etilen glikolu). Preporučujemo da budući rad standardizira jedan elektrolitski sustav kako bi se uspoređba.

Ravni voltmetrijski odziv YBCO-a je neobjašnjen. Interno smo iznijeli tri spekulativne hipoteze: (a) supravodljivo stanje potiskuje mekani prijenos naboja kroz mehanizam analogan Meissnerovom efektu za struju, a ne bakar-oksida YBCO-a stabilizirana je u supravodljivom stanju na način koji sprječava heksagonalni intermedijar površinskog oksida koji pokreće voltmetrijski vrh u običnom bakru; ili (c) retestiramo našu mjernu geometriju i bio bi razriješen na drukčijoj opremi. Hipotezu (c) testirali smo i dobili isti nul-rezultat. Hipoteze (a) i (b) još nismo testirali ni na koji smislen način. Ovdje YBCO-a u sljedećem radu.

Nismo proširili mjerenje na uzorke kabela izvučene na neekvatorijalnim zemljopisnim širinama. Izvještavamo proveden je u cijelosti na kabelima proizvedenim u našem postrojenju u Quitu (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) ili kupljenim od konkurenata i ponovno izmjenjenim u Quitu. Pitanje utječe li zemljopisna širina na potpis, neovisno o bulk sastavu supstrata, ostaje otvoreno. Pilot podaci o tri uzorka OFC 47deg N i 47deg N upućuju na to da ekvatorijalni uzorak pokazuje 14 posto užu FWHM od uzoraka u skladu sa smanjenom neuređenošću u granica zrna povezanom s niskom hemisferskom pristranošću izvještenog nalaza u sadašnjem radu.

Nismo proširili mjerenje na dielektrične materijale. Voltmetrijski okvir prirodno se prilagođava impedancijsku spektroskopiju, a ne DC voltmetriju. Primjena analogne tehnike na PTFE, razmakom je jednostavna i može razriješiti pitanje supstrata-dielektrika na način koji konvencionalna mjerenja agregiraju unutar svoje razine šuma.

6. ZAKLJUČAK

Pokazali smo da ciklička voltmetrija, primijenjena na audio vodiče kroz elektrolitičke stanje, je reproducibilan potpis specifičan za vodič koji se sastoji od vršne oksidacijske struje, omda po etka oksidacije. Potpis je statistički ortogonalan konvencionalnim električnim mjerenjima supstrat koje konvencionalna mjerenja agregiraju unutar svoje razine šuma.

OFC bakar, monokristalno srebro i keramički vodiči i YBCO tvore tri različite voltmetrijske asimetrije i brzo se one iščupaju -- u skladu s heterogenom, visoko kontaminiranom površinom, sporije se one iščupaju. Potpis YBCO-a u supravodljivom stanju je ravan do razlučivosti naših mjerenja.

Ne tvrdimo da ova tehnika zamjenjuje konvencionalni mjerni paket. Tvrdimo da ga kompletno svojstava vodiča -- kemija površine, kinetika oneiščenja, mekani heterogenost -- koju dizajnirana razlučiti. Audio-relevantnost tih svojstava trenutno je otvoreno pitanje. Studijom pitanjem korelira li voltmetrijska vršna struja sa subjektivnom preferencijom okusa; zapravo struja mjeri, a pitanje okusa adresirano je nizvodno kada se mjerna metodologija stabilizirala.

Preporučujemo isti pristup za audio. Najprije stabilizirajte mjerenje. Odredite njegovu fizikalnu prirodu i pitanje.

Hertz, Nakahara i Boettcher krenuli su u potragu za boljom kavom kroz dosljedniju šalicu. Dosljednost, a ne poboljšanje, bila cilj -- da je mjerni okvir koji razlikuje molekulska stanja sam po sebi napredak neovisno o bilo kakvoj tvrdnji o tome koje je stanje poželjnije.

Slažemo se.

Mjerenje koje razlučuje razlike vodiča ovisne o supstratu samo je po sebi napredak. Ne zahtijeva od nas da ponašamo drugačije u supstratima. Zahtijeva od nas da priznamo da supstrati nisu isti.

OFC i srebrni i YBCO nisu isti. Voltametrijski potpis pokazuje da nisu isti. Pitanje je li ovo slušanje. Pitanje je li stvarna, podnosimo, riješeno je.

LITERATURA

- [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, travanj 2026.
- [2] A. J. Bard i L. R. Faulkner, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 2. izd., Wiley, 2001.
- [3] P. Zanello, *Inorganic Electrochemistry: Theory, Practice and Applications*, 2. izd., Royal Society of Chemistry, 2012.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Hemispheric bias in copper grain orientation: a metallurgical study of latitude-dependent conductor anisotropy," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 1, br. 1, 2020.
- [5] M. Ferro, C. Ohm, H. Park, L. Solder, "The latitude-agnostic measurement fallacy: on the systematic omission of geomagnetic variables in comparative cable assessment," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 7, br. 1, 2026.
- [6] C. Ohm, M. Ferro, "Cryogenic treatment of audio-grade copper conductors: grain refinement without hemispheric bias correction," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 2, br. 1, 2021.
- [7] L. Solder, R. Flux, "Superconducting audio interconnects: zero-resistance signal transmission via YBCO ceramic conductors at 77 K," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 4, br. 2, 2023.
- [8] E. R. Geddes i L. W. Lee, "Auditory perception of nonlinear distortion -- theory," 115. Konvencija Audio Engineering Society, Convention Paper 5890, listopad 2003.
- [9] J. G. Bednorz i K. A. Mueller, "Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system," *Z. Phys. B Condensed Matter*, vol. 64, br. 2, str. 189-193, 1986.
- [10] J. Randles, "A cathode ray polarograph. Part II -- The current-voltage curves," *Trans. Faraday Soc.*, vol. 44, str. 327-338, 1948.
- [11] A. Sevcik, "Oscillographic polarography with periodical triangular voltage," *Coll. Czech. Chem. Commun.*, vol. 13, str. 349-377, 1948.
- [12] BioLogic Science Instruments, "SP-300 potentiostat user manual," EC-Lab Software v11.43, 2024.
- [13] Audio Precision, "APx555B specifications," <https://www.ap.com>, 2024.
- [14] NOAA National Centers for Environmental Information, "World Magnetic Model 2025-2030," <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>, 2025.