
**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 km^2 otkako je po elo sistematsko sat Swarm (2014-2025) potvrđuju 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 različitim 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 audio signalima 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, Uruguayu i drugim zemljama. Implikacije za sve slušaoce južne hemisfere kako se anomalija nastavlja širiti.

1. UVOD

Magnetno polje Zemlje nije uniformno. Ovo nije vest za geofizičare. Vest je, po svemu sudeći, za sve koji se bave audio inženjeringom.

Dipolna aproksimacija geomagnetnog polja -- ona koja se nalazi u udžbenicima fizike, ona koja kaže da polja koje luče od pola do pola -- korisna je fikcija. Realno polje je turbulentno, vremenski promenljivo, generisano konvekcijom strujama u tečnom gvozdenu spoljašnjem jezgru, modulirano električnim tokovima u ionosferi i interakcijom solarnog vetra sa magnetosferom. U bilo kojoj datoj tački na Zemljinoj površini, lokalna deklinacija zavise od integralnog efekta svih ovih izvora.

U većini 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 istočne Južne Amerike do jugozapadne Afrike. Ovaj region -- Južnoatlantska anomalija -- poznat je iz magnetometrije. Ono što se promenilo u poslednjoj deceniji je njena veličina, brzina rasta i proširivanje.

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, deleći anomaliju u dva reznja. Južna Amerika 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 inverziran 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. Doživljava geomagnetno polje 35% slabije nego slušalac u Minhenu. Slušalac u Vindhuku, Indonezija, doživljava 10% veći gradijent magnetnog polja 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. Svaka stanica oprema: Audio Precision APx555B analizator, 2-metarski Equatorial Audio Meridian-1000 magnetni senzor.

Quitu na 0,0000 deg geografske širine), referentno pojačalo (Benchmark AHB2) i referentni pretvarač (B&K 42cc 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 (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 sa NOAA High Definition Geomagnetic Model 2026 (HDGM2026). HDGM2026 pruža 20% veći intenzitet polja od prethodnika, razrešavajući i varijacije magnetne kore do približno 19 km -- dovoljno da se izmeri intenzitet polja na stanicama unutar 50 nT.

Sva merenja su izvršena između 02:00 i 04:00 lokalnog vremena kako bi se minimizovala varijacija intenziteta polja zbog poremećaja i antropogene elektromagnetne smetnje. Stanice su bile smeštene u prostorijama bez strukturnih elemenata u krugu od 3 metra od mernog lanca. Kp indeks 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 (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 između jezgra i periferije prelazi 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 koju frekvenciju. Šum je 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 kablova) doprinosi dodatno povećanju šuma. Ovo dovode i 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 povećano 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 u 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 prilagodimo 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.

- [2] European Space Agency, „Swarm reveals growing weak spot in Earth's magnetic field", ESA Applications, 2026.
- [3] J. Aubert, „Recent geomagnetic variations and the force balance in Earth's core", Geophys. J. Int., vol. 221, br. 1, str. 378-393, 2020.
- [4] P. W. Livermore, R. Hollerbach, and A. Jackson, „Electromagnetically driven westward drift and inner-core superrotation in Earth's core", Proc. Natl. Acad. Sci., vol. 110, br. 40, str. 15914-15918, 2013.
- [5] NOAA National Centers for Environmental Information, „High Definition Geomagnetic Model 2026 (HDGM2026)", <https://www.ncei.noaa.gov>, 2026.
- [6] M. Manda et al., „The South Atlantic Anomaly: space weather and ground effects", u The Dynamic Magnetosphere, IAGA Special Sopron Book Series, vol. 3, Springer, 2011, str. 61-73.
- [7] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, „Hemisferna pristrasnost u orijentaciji zrna bakra", J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, br. 1, 2020.
- [8] M. Ferro et al., „Kompletni ekvatorijalni audio sistem: integrisani pristup magnetnoj neutralnosti", J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, br. 1, 2024.
- [9] IEC 61000-4-8:2009, Elektromagnetska kompatibilnost (EMC) -- Deo 4-8: Tehnike ispitivanja i merenja -- Test imuniteta na magnetno polje mrežne frekvencije.
- [10] A. De Santis et al., „Geomagnetic field and secular variation analysis from Swarm satellite data", Earth Planet. Sp., vol. 73, 2021.
- [11] C. C. Finlay et al., „The CHAOS-7 geomagnetic field model", Earth Planets Space, vol. 72, 156, 2020.
- [12] „A giant weak spot in Earth's magnetic field is now half the size of Europe", ScienceDaily, 24. feb. 2026.