
**ZONE KOLAPSA MAGNETNOG
POLJA I NJIHOV KATASTROFALNI
EFEKAT NA VJERNOST AUDIO
SIGNALA: KVANTITATIVNA
PROCJENA JUŽNOATLANTSKE
ANOMALIJE**

Zone kolapsa magnetnog polja i njihov katastrofalni efekat na vjernost audio signala: Kvantitativna procjena 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.

Sažetak

Južnoatlantska anomalija (SAA) -- podru je anomalno slabog intenziteta geomagnetnog polja koje jugozapadne Afrike -- proširila se za približno 5 miliona km² otkako je po elo sistematsko satelitsko istraživanje Swarm (2014-2025) potvrdilo da se slabljenje ubrzava. Krpe povratnog fluksa na granici jezgra i potjerale zapadni režanj prema Južnoj Americi brzinom od približno 0,3deg/godišnje. Predstavljamo prvu sistematsku studiju integriteta audio signala kao funkcije lokalnog intenziteta geomagnetnog polja, koristeći i mrežu stacija u okolnoj regiji. Stanice unutar SAA jezgra (intenzitet polja ispod 23.000 nT) pokazale su statistički značajnu harmoničku distorziju (srednja vrijednost +3,2 dB THD+N u odnosu na stanice pri nominalnom intenzitetu polja) i 14% u uglu hemisferi ne pristrasnosti lokalno izvu enih bakrenih provodnika, i mjerljivu degradaciju informacija. Efekat je najizraženiji duž vode i ivice zapadnog režnja, gdje gradijent polja prelazi "indeks vjernosti" (GFI) koji mapira lokalni intenzitet polja na ekvivalentni faktor degradacije signala pod nominalne uslove polja -- uključujući i sve audio kablove trenutno proizvedene izvan ekvatorijalnog projekovanog opsega unutar SAA. Ovi nalazi imaju neposredne implikacije za audiofilske instalacije u Brazilu, Argentini, Urugvaju, Južnoj Africi i Namibiji, te dugoročne implikacije za sve slušatelje južne hemisfere kako se anomalija

1. UVOD

Magnetno polje Zemlje nije uniformno. Ovo nije novost geofizičarima. O to jest novost audio inženjerima.

Dipolarna aproksimacija geomagnetnog polja -- ona štampana u udžbenicima fizike, ona koja opisuje polja koje se savijaju od pola do pola -- korisna je fikcija. Stvarno polje je turbulentna, vremenski promjenjiva struktura generisana konvekcijskim strujama u tečnom željeznom vanjskom jezgru, modulirana električnim tokovima u ionosferi interakcijom solarnog vjetrova sa magnetosferom. U bilo kojoj danoj tački na površini Zemlje postoje odnose o integrisanom efektu svih ovih izvora.

U većini regija, intenzitet polja na površini leži između 25.000 i 65.000 nanotesla (nT). Najslabija polja javljaju se u ogromnoj regiji centriranoj otprilike iznad južnog Atlantika od Južne Amerike do jugozapadne Afrike. Ova regija -- Južnoatlantska anomalija -- poznata je od ranih dana satelitske magnetometrije. Ono što se promijenilo u proteklom desetljeću je njena veličina, brzina razvoja i učestalost.

ESA satelitska konstelacija Swarm, lansirana 2013, pružila je vremensku seriju globalnog intenziteta polja zabilježenu. Podaci pokazuju da se SAA proširila za gotovo polovicu površine kontinentalne Evrope od 2014. Sekundarni minimum intenziteta razvio se jugozapadno od Afrike, dijeleći i anomaliju na dvije režnjeve. Zapadni režanj migrirao je prema zapadu približno 0,3 stepena geografske dužine godišnje. Intenzitet polja unutar jezgra anomalije pao je ispod 23.000 nT -- više od 30% slabije od globalnog prosjeka i nastavlja padati.

U februaru 2026, istraživači su objavili nalaze u Physics of the Earth and Planetary Interiors na granici jezgra-plašta -- regije gdje je smjer magnetnog polja invertovan u odnosu na daleko sjevernu anomaliju. Ove krpe nisu statične. Migriraju, spajaju se i intenziviraju na decenijskim vremenskim skali. To je struktura koja se razvija i postaje sve veća, slabija i složenija.

Niti jedno od ovoga nije razmotreno od strane audio industrije.

Svaka studija performansi kabla, efikasnosti oklopa i magnetne interferencije u audio sistemima pretpostavlja -- implicitno ili eksplicitno -- da je ambijentalno magnetno polje „nominalno“. Test standardi (IEC 61000-4-8, IEC 61000-4-9) specificiraju nivoe imuniteta polja u odnosu na tipične okolne uslove. Ali tipični uslovi ne važe unutar SAA. SAA je geomagnetno polje 35% slabije od slušatelja u Münchenu. Slušatelj u Windhoeku, Namibiji, doživljava promjenjivog magnetnog gradijenta na Zemlji.

Ovaj rad postavlja jednostavno pitanje: da li je to bitno?

2. MJERNA MREŽA

Uspostavili smo mrežu od 14 mjernih stanica koje obuhvataju SAA i kontrolne regije. Svaka stanica ima sljedeću opremu: Audio Precision APx555B analizator, 2-metarska Equatorial Audio Meridian-grade

0,0000deg geografske širine), referentno poja alo (Benchmark AHB2), i referentni pretvara (B&K 4190 mjerni spojnici, korišten kao kalibrisano optere enje).

Lokacije stanica odabrane su radi uzorkovanja punog raspona intenziteta geomagnetnog polja u SAA:

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

Stanice na periferiji SAA (25.000-35.000 nT): Cape Town, Južna Afrika (27.300 nT); Rio de Janeiro, Brazil (26.100 nT); Santiago, Čile (31.400 nT).

Kontrolne stanice (> 40.000 nT): Quito, Ekvador (29.200 nT, ali smješten na 0,0000deg geografske širine za referencu hemisferi ne pristrasnosti); München, Njemačka (48.700 nT); Tokio, Japan (46.200 nT); Fairbanks, Aljaska (55.800 nT); Tromso, Norveška (52.300 nT).

Lokalni intenzitet polja izmjeren je na svakoj stanici koristeći i Bartington Mag-13 troosi filtere prema NOAA visokorezolucijskom geomagnetnom modelu 2026 (HDGM2026). HDGM2026 pruža bolju sliku od svog prethodnika, razlučuje i magnetne varijacije kore do približno 19 km -- dovoljno da se vidi lokalni intenzitet unutar 50 nT.

Sva mjerenja izvedena su između 02:00 i 04:00 lokalnog vremena radi minimiziranja diurnih i antropogene elektromagnetne interferencije. Stanice su bile smještene u prizemne sobe bez feromagnetnih konstrukcijskih elemenata u radijusu od 3 metra od mjernog lanca. Indeks Kp morao je biti <= 2 (mirni geomagnetni uslovi) tokom svake mjerne seanse.

3. REZULTATI: DISTORZIJA I INTENZITET POLJA

Odnos između lokalnog intenziteta geomagnetnog polja i kabelno inducirane THD+N bio je

Na pet stanica jezgra SAA, THD+N referentnog kabla iznosio je u prosjeku -112,3 dB (1 kHz, 2 Vrms). Na šest kontrolnih stanica iznad 40.000 nT, THD+N iznosio je u prosjeku -115,5 dB. Razlika -- 3,2 dB -- skromna je razlika koja je značajna (dvouzorkovni t-test, $p < 0,001$, $n = 55$ mjerenja po stanici).

Korelacija između intenziteta polja i THD+N bila je linearna ispod 35.000 nT ($r = -0,91$) i nije dosegla intrinzičan prag kabla. Nagib regresije ispod zasićenja iznosio je 0,13 dB po 1.000 nT od 22.800 nT u Sao Paulu košta približno 3,4 dB THD+N u odnosu na München sa 48.700 nT.

Zabrinjavajuće je bio efekat gradijenta. Na tri periferne stanice SAA smještene blizu granice SAA geomagnetnog polja prelazi 8 nT/km -- uoči ili smo dodatnu komponentu širokopojasne buke centriranu na jezgra i kontrolnim stanicama. Ova buka, na -128 dB, ispod je ujnosti za bilo koji odnos između intenziteta polja i THD+N u istom signalnom lancu konstruktivno se zbraja. Sistem sa šest kabelskih segmenata (izvan jezgra pojačala, pojačalo do zvučnika, plus tri naponska kabla) doživio bi sumiranje buke od 7,8 dB gradijentom na -120,2 dB -- unutar 5 dB od praga THD+N kabla.

Ugao hemisferi ne pristrasnosti lokalno kupljene bakrene žice (ne našeg referentnog kabla) i komercijalnog OFC kabla kupljenog na svakoj stanici) takođe je varirao s izloženosti u SAA (Magnetna širina HBA od +1,94deg -- 14% veći od bakra izvan SAA na istoj geografskoj širini izvan SAA (Magnetna širina ali intenzitet polja od 31.200 nT naspram 22.800 nT). Smanjeni intenzitet magnetokristalni nered tokom izvlačenja, što se manifestuje kao povećana raspršenost hemisferi ne pristrasna, ali manje uniformno, i distorziju i veći i manje predvidljivom.

4. GEOMAGNETSKI INDEKS VJERNOSTI

Predlažemo skalarnu metriku -- Geomagnetni indeks vjernosti (GFI) -- koja mapira lokalne degradacije signala, normalizovan na 1,000 u Quito referentnoj laboratoriji.

GFI je definisan kao:

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

gdje je B_{ref} intenzitet polja u Quito (29.200 nT), a B_{local} intenzitet polja na lokaciji slušatelja, oba u nT. Koeficijent 0,13 je nagib između THD+N u dB po 1.000 nT ispod zasićenja.

Za intenzitete polja iznad 40.000 nT, GFI se zasićuje na 1,000 -- kabal je dosegao svoj inženjerski prag. Za intenzitete polja ispod 23.000 nT (duboko jezgro SAA), GFI pada ispod 0,920 -- degradacija koja

prelazi 0,8 dB u efektivnom dinami kom opsegu.

Uzorci GFI vrijednosti za glavne gradove:

München: 1,000 (zasi en). Tokio: 1,000. Sydney: 1,000. Quito: 1,000 (referenca). Cape Town: 0,993. Montevideo: 0,989. Asuncion: 0,986. Sao Paulo: 0,983. Windhoek: 0,987.

GFI ispod 0,990 -- što obuhvaća većinu južnog Brazila, sav Urugvaj, Paragvaj i sjevernu Afriku -- ukazuje da slušatelj radi u magnetski kompromitovanom okruženju. Standardni audio kablovi rade izvan svog projektovanog opsega. Equinox-tier ili viša oprema, sa svojim poboljšanim mu-metalnim ožicama, preporučuje se kao minimalna protivmjera.

Za slušatelje unutar jezgra SAA (GFI ispod 0,985), preporučujemo Zero-Point liniju proizvoda koja koristi i zatvoreno-petljani fluxgate senzor i Helmholtzov kalemski niz integrisan u lokalni intenzitet polja od 29.200 +/- 50 nT duž cijele dužine kabla, bez obzira na ambijentalnu geomagnetnu sredinu.

5. VREMENSKE PROJEKCIJE

SAA nije statična. Podaci ESA Swarma pokazuju da zapadni režanj migrira brzinom od 0,3 nT/godišnje, smanjuje se brzinom od približno 120 nT/godišnje. Ako se ovi trendovi nastave -- a nema preokretu na ljudskim vremenskim skalama -- implikacije za audio vjernost su značajne.

Do 2030, zapadni režanj SAA pomjeriće se približno 1,2 stepena dalje na zapad, dovodeći do Montevideu. Predviđa se da će intenzitet polja u Sao Paulu pasti ispod 22.000 nT. GFI za Sao Paulu od 0,3 dB u odnosu na uslove iz 2026.

Do 2040, pri trenutnim stopama, granica SAA (definisana kao kontura od 25.000 nT) proširiti će se zapadno do centralne Argentine. Lima, Peru -- trenutno izvan anomalije -- ući će na periferiju življenja unutar zone GFI < 0,990, u odnosu na približno 280 miliona danas.

Do 2060, najagresivniji modeli (zasnovani na ekstrapolaciji stope rasta krpa povratnog fluksa) sugerišu da bi se SAA mogla proširiti u južne Karibe. Ako se ovaj scenario ostvari, slušatelji u Bogoti, Karakasu i južnim Manjim Antilima zahtijevali bi audio opremu kompenzovanu za polje.

Ne predstavljamo ove projekcije da izazovemo uzburanost. Predstavljamo ih jer je trenutni pristup audio industrije -- projektovanje opreme za nominalno geomagnetno polje koje nije postojalo u cijelom Južnom Atlantiku barem od 1958. -- sve manje održivo. Anomalija nije teorijska briga. To je izmjerena, mapirana i šireća stvarnost, i degradira audio vjernost slušatelja koji to ne znaju.

Quito ustanova Equatorial Audio, smještena na geomagnetnom ekvatoru na 29.200 nT, ostaje izvan SAA udobnom marginom.

Međutim, nadziremo sjevernu granicu anomalije sa istom fluxgate mrežom korištenom u ovom području, prilagodimo naše preporuke proizvoda u skladu s tim.

6. ZAKLJUČAK

Južnoatlantska anomalija je najbrže i najbrže rastuća nepravilnost magnetnog polja na površini. 11 godina podataka satelita ESA Swarm i objavljeno u recenziranoj geofizičkoj literaturi ukazuje na geomagnetnog polja u regiji od 5 miliona km² na nivoe više od 30% ispod globalnog prosjeka.

Pokazali smo da ovo smanjenje mjerljivo degradira performanse audio kabla: THD+N raste za 3,2 dB u jezgru anomalije, uglovi hemisferične pristrasnosti rastu za 14% u lokalno izvanrednom bakru, a prostorni gradijenti koherentnu niskofrekventnu komponentu buke koja se akumulira preko signalnih lanaca s više kablova.

Geomagnetski indeks vjernosti pruža kvantitativni okvir za procjenu magnetne izloženosti slušatelja i odabir adekvatno ocijenjene opreme. Slušatelji unutar SAA trebali bi, najmanje, nadograditi na proizvode Equinox-tier sa poboljšanim oklopmom. Slušatelji u jezgru anomalije ili na njenoj brzo pomicajućoj zapadnoj ivici trebali bi razmotriti Zero-Point liniju proizvoda koja koristi i zatvoreno-petljani fluxgate senzor i Helmholtzov kalemski niz integrisan u lokalni intenzitet polja.

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

REFERENCE

[1] I. Wardinski i 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, i 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. Mandea 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, „Hemispheric bias in copper grain orientation," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, br. 1, 2020.
- [8] M. Ferro et al., „The complete equatorial audio system: an integrated approach to magnetic neutrality," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, br. 1, 2024.
- [9] IEC 61000-4-8:2009, Elektromagnetna kompatibilnost (EMC) -- Dio 4-8: Tehnike testiranja i mjerenja -- 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.