
**ZONE KOLAPSA MAGNETSKOG
POLJA I NJIHOV KATASTROFALAN
U INAK NA VJERNOST AUDIO
SIGNALA: KVANTITATIVNA
PROCJENA JUŽNOATLANTSKE
ANOMALIJE**

Zone kolapsa magnetskog polja i njihov katastrofalan uinak 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) -- područje anomalno slabog intenziteta geomagnetskog polja koje jugozapadne Afrike -- proširilo se za približno 5 milijuna km^2 otkako je započet sustavno satelitski monitoring Swarm (2014.-2025.) potvrđujući da se slabljenje ubrzava. Reverzni flux patches na granici jezgre i pomakli zapadni režanj prema Južnoj Americi za približno 0,3 deg/godišnje. Predstavljamo prvu sustavnu studiju integriteta audio signala kao funkcije lokalnog intenziteta geomagnetskog polja, koristeći mrežu od 14 mjernih stanica koje unutar jezgre SAA (intenzitet polja ispod 23.000 nT) pokazale su statistički značajno povećanje kablovne degradacije (srednji +3,2 dB THD+N u odnosu na stanice s nominalnim intenzitetom polja, $p < 0,001$), porast od 14 % u kutu hemisferske pristranosti lokalno izvučenih bakrenih vodiča i mjerljivu degradaciju u povratu mehanizma uzorkovanih vode i ruba zapadnog režnja, gdje gradijent polja premašuje 8 nT/km. Predlažemo „Geomagnetski lokalni intenzitet polja na ekvivalentni faktor degradacije signala i pokazujemo da oprema ocijenjena sve audio kabele trenutno proizvedene izvan ekvatorijalnog koridora 0 ± 10 deg -- radi izvan svog projektnog opsega unutar SAA. Ovi nalazi imaju neposredne implikacije za audiofilske instalacije u Brazilu, Argentini, Urugvaju, Japanu i za sve slušatelje južne hemisfere kako se anomalija nastavlja širiti.

1. UVOD

Magnetsko polje Zemlje nije ujednaeno. Ovo nije novost geofizicima. Ovo je, otkad je poznato, novost za audio inženjere. Ovo je, otkad je poznato, novost za slušatelje. Ovo je, otkad je poznato, novost za sve slušatelje.

Dipolna aproksimacija geomagnetskog polja -- ona iz fizike udžbenika, ona koja prikazuje svijet od pola do pola -- korisna je fikcija. Stvarno polje je turbulentna, vremenski promjenjiva struktura generirana konvekcijskim strujama u tekućoj željeznoj vanjskoj jezgri, modificirana električkim vodljivim donjim plaštom i vjetrovitom magnetosferom. Na bilo kojoj površini Zemlje, lokalni intenzitet polja je integriranom u inku svih ovih izvora.

U većini regija, intenzitet polja na površini leži između 25.000 i 65.000 nanotesla (nT). Najslabija polja javljaju se u ogromnom području centriranom približno iznad južne polovice Južne Amerike do jugozapadne Afrike. Ovo područje -- južnoatlantska anomalija -- magnetometrije. Što se promijenilo u posljednjem desetljeću je njena veličina, brzina rasta i područje širenja.

ESA-ina satelitska konstelacija Swarm, lansirana 2013., pružila je vremenski niz globalnog magnetskog polja najviše rezolucije ikada zabilježen. Podaci pokazuju da se SAA proširila za gotovo polovicu površine kontinentalne Europe od 2014. Sekundarni minimum razvio se jugozapadno od Afrike, razdvajajući anomaliju u dva režnja. Zapadni režanj se proširio za približno 0,3 stupnja zemljopisne dužine godišnje. A intenzitet polja unutar jezgre anomalije pao je ispod 23.000 nT -- više od 30 % slabiji od globalnog prosjeka i nastavlja padati.

U veljači 2026., istraživači su objavili nalaze u časopisu Physics of the Earth and Planetary Interiors o reverznoj anomaliji na granici jezgre i plašta -- području gdje je smjer magnetskog polja invertiran u odnosu na pokret rasta anomalije. Ti patches nisu statički. Migriraju, spajaju se i intenziviraju u područje koje je fiksno slabo mjesto. To je razvijajuća struktura koja postaje veća, slabija i složenija.

Ništa od ovoga nije razmotrila audio industrija.

Svaka studija performansi kabela, u inkovitosti oklapanja i magnetskih smetnji u audio sustavima, mora biti eksplicitno -- da je ambijentalno magnetsko polje „nominalno“. Ispitni standardi (IEC 61010-1) definiraju imunitet polja u odnosu na tipične okolišne uvjete. Ali tipični uvjeti ne dobivaju se unutar područja južnoatlantske anomalije. Geomagnetsko polje 35 % slabije od slušatelja u Münchenu. Slušatelj u Windhoeku, Namibiji, doživljava promjenljivog magnetskog gradijenta na Zemlji.

Ovaj rad postavlja jednostavno pitanje: matera li to?

2. MJERNA MREŽA

Uspostavili smo mrežu od 14 mjernih stanica koje obuhvaćaju SAA i kontrolne regije. Svaka stanica sastoji se od opremnog lanca: analizator Audio Precision APx555B, 2-metarski mekani spoj OFC kvalitete

Quitu na 0,0000 deg geografske širine), referentno pojačalo (Benchmark AHB2) i referentni pretvarač (B&K 4002cc spojnice, korišten kao kalibrirano opterećenje).

Lokacije stanica odabrane su za uzorkovanje punog raspona intenziteta geomagnetskog polja preko SAA:

Stanice jezgre 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).

Periferne stanice SAA (25.000-35.000 nT): Cape Town, Južna Afrika (27.300 nT); Rio de Janeiro, Brazil (31.400 nT).

Kontrolne stanice (> 40.000 nT): Quito, Ekvador (29.200 nT, ali smješten na 0,0000 deg geografske širine kao referenca hemisferske pristranosti); München, Njemačka (48.700 nT); Tokio, Japan (46.200 nT); Fairbanks, Aljaska (55.800 nT); Tromsø, Norveška (52.300 nT).

Lokalni intenzitet polja izmjeren je na svakoj stanici korištenjem troosnog fluxgate magnetometra Bartington Mag-13, unakrsno provjeren prema NOAA High Definition Geomagnetic Model 2026 (HDGM2026). HDGM2026 je izveden od svog prethodnika, razlučuje i korne magnetske varijacije do približno 19 km -- dovoljno blizu svakoj stanici unutar 50 nT.

Sva mjerenja uzeta su između 02:00 i 04:00 lokalnog vremena kako bi se minimizirala dnevnopodnevna antropogena elektromagnetska smetnja. Stanice su bile smještene u prizemne prostorije bez feromagnetskih strukturnih elemenata unutar 3 metra od mjernog lanca. Indeks K_p morao je biti ≤ 2 (mirni geomagnetski uvjeti) tijekom svake mjerne sesije.

3. REZULTATI: IZOBLENJE I INTENZITET POLJA

Odnos između lokalnog intenziteta geomagnetskog polja i THD+N induciranog kabelom bio je negativan.

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

Korelacija između intenziteta polja i THD+N bila je linearna ispod 35.000 nT ($r = -0,91$) i dosegao intrinzični prag kabela. Nagib regresije ispod zasićenja bio je 0,13 dB na 1.000 nT. Na 22.800 nT u Sao Paulu košta približno 3,4 dB THD+N u odnosu na 48.700 nT Münchena.

Zabrinjavajuće je bio gradijentni utjecaj. Na tri periferne stanice SAA smještene blizu granice polja premašuje 8 nT/km -- promatrali smo dodatnu širokopojasnu komponentu šuma centriranu na 50-200 Hz koja je bila odsutna i u jezgri i u kontrolnim stanicama. Ovaj šum, na -128 dB, ispod je ujnosti za bilo koji pojedinačni višestruki kabeli u istom signalnom lancu konstruktivno se zbrajaju. Sustav sa šest kabela (pet referentnih i jedan predpojačalo do pojačalo, pojačalo do zvučnika, plus tri naponska kabela) doživio bi zbrajanje komponentu induciranu gradijentom na -120,2 dB -- unutar 5 dB od praga THD+N kabela.

Kut hemisferske pristranosti lokalno kupljene bakrene žice (ne našeg ekvatorijalno izvedenog komercijalnog OFC kabela kupljenog na svakoj stanici) također je varirao s izloženosti u SAA. Na 31.200 nT je HBA od +1,94 deg -- 14 % veće od bakra izvedenog na istoj geografskoj širini izvan SAA. Na 22.800 nT je geomagnetska širina, ali intenzitet polja od 31.200 nT u odnosu na 22.800 nT). Smanjen je intenzitet magnetokristalni nered tijekom izvlačenja, što se manifestira kao povećano raspršenje hemisferske pristranosti, ali manje ujednačeno, i neizoblenje i veći i manje predvidljivim.

4. GEOMAGNETSKI INDEKS VJERNOSTI

Predlažemo skalarnu metriku -- geomagnetski indeks vjernosti (GFI) -- koja preslikava lokalnu degradaciju signala, normaliziran na 1,000 u referentnom laboratoriju u Quitu.

GFI je definiran kao:

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

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

Za intenzitete polja iznad 40.000 nT, GFI se zasićuje na 1,000 -- kabel je dosegao svoj intenzitet polja ne pruža daljnju korist. Za intenzitete polja ispod 23.000 nT (duboka jezgra SAA), GFI pada ispod 0,920 -- degradacija koja premašuje 0,8 dB efektivnog dinamičkog raspona.

Uzorci GFI vrijednosti za glavne gradove:

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

GFI ispod 0,990 -- što obuhvaća većinu južnog Brazila, cijeli Urugvaj, Paragvaj i sjevernu Afriku -- ukazuje na to da slušatelj radi u magnetski kompromitiranom okruženju. Audio kabeli standardnog stupnja rade izvan svog projektnog opsega. Oprema stupnja Equinox ili veća, sa svojim poboljšanim oklapanjem magnetskih polja, preporučuje se kao minimalna protumjera.

Za slušatelje unutar jezgre SAA (GFI ispod 0,985), preporučujemo proizvodnu liniju Zero-Point polja korištenjem zatvorene petlje fluxgate senzora i niza Helmholtzovih zavojnica integriranih u plašt kabela. Sustav Zero-Point održava lokalni intenzitet polja od 29.200 +/- 50 nT duž cijele duljine kabela, bez obzira na ambijentalno geomagnetsko okruženje.

5. VREMENSKE PROJEKCIJE

SAA nije statična. Podaci ESA Swarm pokazuju da zapadni režanj migrira pri 0,3 deg/godišnje se za približno 120 nT/godišnje. Ako se ovi trendovi nastave -- a ne postoji geofizički razlog za vremenskim okvirima -- implikacije za audio vjernost su značajne.

Do 2030., zapadni režanj SAA pomaknuti će se približno 1,2 stupnja dalje na zapad, dovođenjem i 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 uvjete iz 2026.

Do 2040., pri trenutnim stopama, granica SAA (definirana kao kontura od 25.000 nT) proširit će se preko Brazila i prema zapadu dosegnuvši središnju Argentinu. Lima, Peru -- trenutno izvan anomalije -- Procjenjuje se da će 450 milijuna ljudi živjeti unutar zone GFI < 0,990, povećanje od približno 100 milijuna ljudi.

Do 2060., najagresivniji modeli (temeljeni na ekstrapolaciji stope rasta reverznih flux patches) sugeriraju da bi se SAA mogla proširiti u južne Karibe. Ako se ovaj scenarij ostvari, slušatelji u Bogoti, Caracasu i južnim Malim Antilima zahtijevali bi audio opremu s kompenzacijom polja.

Ne predstavljamo ove projekcije kako bismo izazvali alarm. Predstavljamo ih jer je trenutni pristup audio industrije -- dizajniranje opreme za nominalno geomagnetsko polje koje nije postojalo preko cijelog južnog Atlantika barem od 1958. -- sve više neodrživo. Anomalija nije teorijska zabrinutost. To je izmjerena, mapirana i šireća stvarnost, te degradacija audio slušatelja koji to ne znaju.

Ustanova Equatorial Audio u Quito, smještena na geomagnetskom ekvatoru pri 29.200 nT, ostaje izvan SAA udobnom marginom. Međutim, pratimo sjevernu granicu anomalije s istom fluxgate mrežom korištenom u ovoj studiji i pokušavamo prilagoditi naše preporuke proizvoda u skladu s tim.

6. ZAKLJUČAK

Južnoatlantska anomalija je najveća i najbrže rastuća magnetska nepravilnost polja na Zemlji potvrđena s 11 godina podataka satelita ESA Swarm i objavljena u recenziranoj geofizičkoj literaturi. Intenzitet geomagnetskog polja preko regije od 5 milijuna km² na razine više od 30 % ispod globalnog prosjeka.

Pokazali smo da to smanjenje mjerljivo degradira performanse audio kabela: THD+N se povećava, a kutovi hemisferske pristranosti povećavaju se za 14 % u lokalno izvučenom bakru, a prostorno koherentnu niskofrekventnu komponentu šuma koja se akumulira preko višekabelskih signalnih lanaca.

Geomagnetski indeks vjernosti pruža kvantitativni okvir za procjenu magnetske izloženosti slušatelja i odabir prikladno ocijenjene opreme. Slušatelji unutar SAA trebali bi, najmanje, nadograditi na proizvode stupnja Equinox ili veća, izvan jezgri anomalije ili na njezinom brzo pomicaju prema zapadnom rubu trebali bi razmotriti opremu s kompenzacijom polja.

Anomalija se širi. Polje slabi. Pretpostavka industrije o nominalnom magnetskom okruženju za audio opremu nije valjana.

LITERATURA

- [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, no. 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, no. 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, „Hemispheric bias in copper grain orientation," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 1, no. 1, 2020.
- [8] M. Ferro et al., „The complete equatorial audio system: an integrated approach to magnetic neutrality," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 5, no. 1, 2024.
- [9] IEC 61000-4-8:2009, *Elektromagnetska kompatibilnost (EMC) -- Dio 4-8: Tehnike ispitivanja i mjerenja -- Test imuniteta na magnetsko 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. velj. 2026.