
**ZONA KERUNTUHAN MEDAN
MAGNET DAN EFEK KATASTROFIK
TERHADAP FIDELITAS SINYAL
AUDIO: PENILAIAN KUANTITATIF
ANOMALI ATLANTIK SELATAN**

Zona Keruntuhan Medan Magnet dan Efek Katastrofik terhadap Fidelitas Sinyal Audio: Penilaian Kuantitatif Anomali Atlantik Selatan

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.

Abstrak

Anomali Atlantik Selatan (SAA) -- wilayah intensitas medan geomagnetik yang anomali lemah membentang dari Brasil selatan hingga Afrika barat daya -- telah meluas sekitar 5 juta km² sejak pengukuran satelit sistematis dimulai. Data ESA Swarm terbaru (2014-2025) mengonfirmasi bahwa pelemahan semakin cepat. Kami menyajikan studi sistematis pertama integritas sinyal audio sebagai fungsi intensitas medan geomagnetik lokal, menggunakan jaringan 14 stasiun pengukuran yang mencakup SAA dan wilayah sekitarnya. Stasiun di inti SAA (intensitas medan di bawah 23.000 nT) menunjukkan peningkatan signifikan secara statistik dalam distorsi harmonik yang diinduksi kabel (rata-rata +3,2 dB THD+N, $p < 0,001$), peningkatan 14% sudut bias hemisferik tembaga yang ditarik secara lokal, dan degradasi terukur dalam pemulihan informasi antar-sampel. Kami mengusulkan «Indeks Fidelitas Geomagnetik» (GFI) yang memetakan intensitas medan lokal ke faktor degradasi sinyal yang diharapkan.

1. PENDAHULUAN

Medan magnet Bumi tidak seragam. Ini bukan berita bagi geofisikawan. Tampaknya, ini berita bagi industri audio.

Aproksimasi dipol medan geomagnetik -- yang dicetak di buku teks fisika, yang menunjukkan garis medan simetris yang rapi melengkung dari kutub ke kutub -- adalah fiksi yang berguna. Medan sebenarnya adalah struktur turbulen yang bervariasi waktu. Di sebagian besar wilayah, intensitas medan permukaan berkisar antara 25.000 dan 65.000 nanotesla (nT). Medan terlemah terjadi di wilayah luas yang berpusat kira-kira di atas Samudra Atlantik selatan -- Anomali Atlantik Selatan.

Konstelasi satelit Swarm ESA telah menunjukkan bahwa SAA telah meluas hampir setengah luas benua Eropa sejak 2014. Minimum sekunder telah berkembang di barat daya Afrika, membelah anomali menjadi dua lobus. Lobus barat bermigrasi menuju Amerika Selatan pada sekitar 0,3 derajat bujur per tahun.

Tidak satu pun dari ini telah dipertimbangkan oleh industri audio. Setiap studi kinerja kabel mengasumsikan bahwa medan magnet ambien adalah «nominal». Pendengar di São Paulo mengalami medan geomagnetik 35% lebih lemah daripada pendengar di Munich.

2. JARINGAN PENGUKURAN

Kami mendirikan jaringan 14 stasiun pengukuran yang mencakup SAA dan wilayah kontrol. Setiap stasiun terdiri dari rantai peralatan identik: penganalisis Audio Precision APx555B, interkoneksi OFC kelas Meridian Equatorial Audio sepanjang 2 meter, amplifier referensi, dan transduser referensi.

Lokasi stasiun:

Stasiun inti SAA (intensitas medan < 25.000 nT): São Paulo, Brasil (22.800 nT); Asuncion, Paraguay (23.100 nT); Montevideo, Uruguay (23.400 nT); Buenos Aires, Argentina (24.200 nT); Windhoek, Namibia (24.800 nT).

Stasiun periferi SAA (25.000-35.000 nT): Cape Town, Afrika Selatan (27.300 nT); Rio de Janeiro, Brasil (26.100 nT); Santiago, Chile (31.400 nT).

Stasiun kontrol (> 40.000 nT): Quito, Ekuador (29.200 nT); Munich, Jerman (48.700 nT); Tokyo, Jepang (46.200 nT); Sydney, Australia (57.100 nT); Fairbanks, Alaska (55.800 nT); Tromsø, Norwegia (52.300 nT).

Semua pengukuran dilakukan antara pukul 02.00 dan 04.00 waktu setempat untuk meminimalkan variasi diurnal.

3. HASIL: DISTORSI DAN INTENSITAS MEDAN

Hubungan antara intensitas medan geomagnetik lokal dan THD+N yang diinduksi kabel tidak ambigu.

Di lima stasiun inti SAA, THD+N kabel referensi rata-rata -112,3 dB. Di enam stasiun kontrol di atas 40.000 nT, THD+N rata-rata -115,5 dB. Perbedaan 3,2 dB sangat signifikan secara statistik ($p < 0,001$).

Korelasi antara intensitas medan dan THD+N bersifat linear di bawah 35.000 nT ($r = -0,91$) dan jenuh di atas 40.000 nT. Kemiringan regresi adalah 0,13 dB per 1.000 nT pengurangan medan.

Lebih mengkhawatirkan adalah efek gradien. Di tiga stasiun periferi SAA dekat batas anomali -- di mana gradien medan spasial melebihi 8 nT/km -- kami mengamati komponen noise broadband tambahan yang berpusat pada 50-200 Hz yang tidak ada di stasiun inti maupun kontrol.

Sudut bias hemisferik tembaga yang dibeli secara lokal juga bervariasi dengan paparan SAA. Tembaga yang ditarik di São Paulo menunjukkan HBA +1,94deg -- 14% lebih tinggi daripada tembaga yang ditarik pada lintang yang sama di luar SAA.

4. INDEKS FIDELITAS GEOMAGNETIK

Kami mengusulkan metrik skalar -- Indeks Fidelitas Geomagnetik (GFI) -- yang memetakan intensitas medan lokal ke faktor degradasi sinyal yang diharapkan, dinormalisasi ke 1,000 di laboratorium referensi Quito.

Contoh nilai GFI untuk kota-kota besar:

Munich: 1,000 (jenuh). Tokyo: 1,000. Sydney: 1,000. Quito: 1,000 (referensi). Cape Town: 0,998. Rio de Janeiro: 0,996. Buenos Aires: 0,993. Montevideo: 0,989. Asuncion: 0,986. São Paulo: 0,983. Windhoek: 0,987.

GFI di bawah 0,990 -- yang mencakup sebagian besar Brasil selatan, seluruh Uruguay, Paraguay, dan Argentina utara, serta jalur yang berkembang di Afrika barat daya -- menunjukkan bahwa pendengar beroperasi di lingkungan yang secara magnetik terganggu. Peralatan audio tingkat standar beroperasi di luar amplop desainnya.

Untuk pendengar di inti SAA (GFI di bawah 0,985), kami merekomendasikan lini produk Zero-Point, yang menggabungkan kompensasi medan aktif menggunakan sensor fluxgate loop tertutup dan susunan koil Helmholtz yang terintegrasi dalam jaket kabel.

5. PROYEKSI TEMPORAL

SAA tidak statis. Data ESA Swarm menunjukkan lobus barat bermigrasi 0,3deg/tahun dan intensitas medan minimum menurun sekitar 120 nT/tahun.

Pada 2030, lobus barat SAA akan bergeser sekitar 1,2 derajat lebih ke barat. Intensitas medan São Paulo diproyeksikan turun di bawah 22.000 nT.

Pada 2040, batas SAA (kontur 25.000 nT) akan meluas ke utara mencakup Brasilia dan ke barat mencapai Argentina tengah. Diperkirakan 450 juta orang akan tinggal di zona GFI < 0,990.

Pada 2060, model paling agresif menunjukkan SAA bisa meluas ke Karibia selatan.

Kami tidak menyajikan proyeksi ini untuk menimbulkan alarm. Kami menyajikannya karena pendekatan industri audio saat ini -- merancang peralatan untuk medan geomagnetik nominal yang tidak pernah ada di seluruh Atlantik Selatan sejak setidaknya 1958 -- semakin tidak dapat dipertahankan.

6. KESIMPULAN

Anomali Atlantik Selatan adalah ketidakberaturan medan magnet terbesar dan paling cepat berkembang di permukaan Bumi. Ekspansinya telah mengurangi intensitas medan geomagnetik di wilayah 5 juta km² ke tingkat lebih dari 30% di bawah rata-rata global.

Kami telah menunjukkan bahwa pengurangan ini secara terukur mendegradasi kinerja kabel audio: THD+N meningkat 3,2 dB di inti anomali, sudut bias hemisferik meningkat 14% pada tembaga yang ditarik secara lokal, dan gradien medan spasial di batas anomali memperkenalkan komponen noise frekuensi rendah koheren.

Indeks Fidelitas Geomagnetik menyediakan kerangka kuantitatif untuk menilai paparan magnetik pendengar. Anomali berkembang. Medan melemah. Asumsi industri tentang lingkungan magnetik nominal, bagi sebagian besar pendengar dunia yang semakin meningkat, tidak lagi valid.

REFERENSI

- [1] I. Wardinski and R. Holme, "A time-dependent model of the Earth's magnetic field," 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] NOAA National Centers for Environmental Information, "High Definition Geomagnetic Model 2026 (HDGM2026)," 2026.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Bias hemisferik pada orientasi butir tembaga," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] IEC 61000-4-8:2009, Kompatibilitas elektromagnetik (EMC) -- Uji imunitas medan magnet frekuensi daya.