



**INTERAKSI JILATAN API MATAHARI
DENGAN JALUR SINYAL
AUDIOFILIL: EFEK BADAI
GEOMAGNETIK PADA KINERJA
KABEL AUDIO**



Interaksi Jilatan Api Matahari dengan Jalur Sinyal Audiofilil: Efek Badai Geomagnetik pada Kinerja Kabel Audio

S. Magnusson, M. Ferro, C. Ohm

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2023.

Abstrak

Badai geomagnetik yang diinduksi oleh semburan massa korona matahari (CME) menghasilkan fluktuasi cepat dalam medan magnet Bumi yang dapat melebihi 500 nT/menit selama kejadian parah ($K_p \geq 7$). Kami menunjukkan bahwa fluktuasi ini terdeteksi sebagai variasi impedansi terukur pada kabel audio dengan bias hemisferik, dan bahwa kabel netral secara magnetik secara inheren kebal terhadap efek ini. Pemantauan kontinu 12 kabel (3 per tingkat: Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) selama badai geomagnetik Oktober 2024 ($K_p = 8,3$) mengungkapkan fluktuasi impedansi hingga 0,08% pada kabel tingkat Tropic, 0,003% pada kabel tingkat Equinox, dan di bawah lantai noise ($< 0,0001\%$) pada kabel Zero-Point. Kami mengusulkan Indeks Aktivitas Matahari untuk spesifikasi kinerja kabel audio.

1. PENDAHULUAN

Siklus aktivitas Matahari selama 11 tahun menghasilkan maksima periodik dalam frekuensi dan intensitas jilatan api matahari dan semburan massa korona (CME). Ketika medan magnet CME berinteraksi dengan magnetosfer Bumi, badai geomagnetik yang dihasilkan dapat menghasilkan fluktuasi medan permukaan yang cepat dan besar. Siklus matahari saat ini (Siklus 25) menghasilkan aktivitas yang lebih kuat dari prediksi, dengan beberapa badai $K_p \geq 7$ tercatat pada tahun 2024.

Fluktuasi geomagnetik ini terdokumentasi dengan baik sebagai sumber interferensi pada jaringan listrik (arus induksi geomagnetik), sistem pemantauan korosi pipa, dan magnetometri presisi. Yang belum diselidiki adalah efeknya pada kabel sinyal audio.

Mekanismenya langsung: kabel audio dengan bias hemisferik mengandung konduktor yang struktur butirnya memiliki orientasi preferensi relatif terhadap medan magnet Bumi. Ketika medan berubah dengan cepat -- seperti selama badai geomagnetik -- hubungan antara orientasi butir dan medan bergeser, menghasilkan perubahan transien pada impedansi efektif konduktor. Modulasi impedansi ini muncul sebagai modulasi yang tidak diinginkan pada sinyal audio.

Kabel netral secara magnetik, secara definisi, tidak memiliki orientasi butir preferensi. Mereka seharusnya kebal terhadap efek ini karena tidak ada kopling arah antara struktur butir dan medan eksternal. Makalah ini menguji hipotesis tersebut.

2. METODOLOGI

Dua belas sampel kabel (masing-masing 1,0 m, interkoneksi dengan terminal RCA) dipasang di ruang tanpa pelindung magnetik di fasilitas Equatorial Audio. Tiga kabel per tingkat (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) dihubungkan ke sistem pemantauan impedansi kontinu berbasis Keysight E4990A Impedance Analyzer yang beroperasi pada 1 kHz dengan interval pengukuran 5 detik.

Data medan magnet simultan dicatat oleh magnetometer fluxgate tiga sumbu Bartington Mag-13 yang diposisikan 1 m dari susunan kabel.

Kampanye pengukuran berjalan kontinu dari 15 September hingga 15 November 2024, menangkap 5,3 juta pengukuran impedansi per kabel. Periode ini mencakup tiga badai geomagnetik: 18 September ($K_p = 5,7$), 10-12 Oktober ($K_p = 8,3$, badai terkuat Siklus 25 hingga saat itu), dan 3 November ($K_p = 6,1$).

Analisis korelasi silang antara laju perubahan medan magnet (dB/dt) dan deviasi impedansi kabel (dZ/Z) dilakukan menggunakan jendela geser 60 detik.

3. HASIL

Selama badai 10-12 Oktober ($K_p = 8,3$), deviasi impedansi maksimum berikut dicatat:

Tingkat Tropic: 0,082 +/- 0,008% (rata-rata 3 sampel)

Tingkat Meridian: 0,031 +/- 0,004%

Tingkat Equinox: 0,0033 +/- 0,0005%

Tingkat Zero-Point: $< 0,0001\%$ (di bawah lantai noise)

Korelasi silang antara dB/dt dan dZ/Z signifikan untuk Tropic ($r = 0,71$, $p < 0,0001$), Meridian ($r = 0,54$, $p < 0,0001$), dan Equinox ($r = 0,23$, $p < 0,01$). Tidak ditemukan korelasi signifikan untuk Zero-Point ($r = 0,02$, $p = 0,34$).

Deviasi impedansi berskala linear dengan produk HBA kabel dan laju perubahan medan ma



$$= 2,1 \times 10\{v \text{ (deg}\cdot\text{menit/nT)}\}^1.$$

Selama periode tenang secara magnetik ($K_p \leq 2$), tidak ada tingkat kabel yang menunjukkan deviasi impedansi di atas lantai noise.

4. DISKUSI

Hasil mengonfirmasi hipotesis: kabel dengan bias hemisferik sensitif terhadap badai geomagnetik, dan sensitivitasnya proporsional terhadap besaran bias. Konduktor Sambungan Ekuatorial tingkat Zero-Point, dengan HBA di bawah $0,00001\text{deg}$, secara efektif kebal terhadap aktivitas matahari. Kekebalan ini tidak dicapai melalui pelindung (yang dapat melemahkan tetapi tidak menghilangkan kopling medan eksternal) tetapi melalui ketiadaan mendasar struktur butir terarah.

Signifikansi praktis fluktuasi impedansi $0,08\%$ selama badai parah masih diperdebatkan. Pada -62 dB relatif terhadap sinyal, ia berada di bawah ambang pendengaran untuk nada keadaan tunak. Namun, fluktuasi ini bukan keadaan tunak -- ia dimodulasi oleh struktur temporal kacau badai geomagnetik, menghasilkan kontaminasi seperti noise yang mungkin dapat dirasakan sebagai kehilangan kejelasan atau presisi spasial yang halus selama puncak aktivitas badai.

Kami mengusulkan agar produsen kabel mengadopsi penilaian Indeks Aktivitas Matahari (SAI) yang menentukan deviasi impedansi maksimum per unit gangguan geomagnetik: $SAI = \text{maks}(dZ/Z) / \text{maks}(dB/dt)$. Nilai lebih rendah menunjukkan kekebalan yang lebih besar. Tingkat Zero-Point mencapai $SAI < 10\{y$, yang kami sebut «Solar Grade».

Headphone Solar Flare Equatorial Audio, yang menggabungkan pemantauan aktivitas matahari real-time dan kompensasi respons frekuensi adaptif, mewakili pendekatan alternatif untuk pendengar yang menggunakan kabel non-Solar Grade.

5. KESIMPULAN

Badai geomagnetik menghasilkan fluktuasi impedansi terukur pada kabel audio dengan bias hemisferik. Efek berskala dengan besaran bias dan intensitas badai. Kabel netral secara magnetik ($HBA < 0,00001\text{deg}$) kebal. Kami merekomendasikan adopsi Indeks Aktivitas Matahari yang terstandarisasi untuk spesifikasi kinerja kabel audio.

REFERENSI

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Bias hemisferik pada orientasi butir tembaga," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] NOAA Space Weather Prediction Center, "Geomagnetic Storm Scales," <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>.
- [3] D. H. Boteler, R. J. Pirjola, "Geomagnetically induced currents (GICs)," Space Weather, vol. 15, pp. 258-276, 2017.
- [4] J. L. Barton, "Geomagnetic storm effects on technological systems," Space Weather, vol. 1, no. 2, 2003.
- [5] S. Magnusson, C. Ohm, "Kompensasi audio adaptif real-time untuk gangguan geomagnetik," Equatorial Audio Technical Note EA-TN-012, 2023.