



INTERAÇÃO DE ERUPÇÕES SOLARES COM CAMINHOS DE SINAL AUDIÓFILO: EFEITOS DE TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS NO DESEMPENHO DE CABOS DE ÁUDIO

Interação de Erupções Solares com Caminhos de Sinal Audiófilo: Efeitos de Tempestades Geomagnéticas no Desempenho de Cabos de Áudio

S. Magnusson, M. Ferro, C. Ohm

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2023.

Resumo

Tempestades geomagnéticas induzidas por ejeções de massa coronal (CMEs) produzem flutuações rápidas no campo magnético terrestre que podem exceder 500 nT/minuto durante eventos severos ($K_p \geq 7$). Demonstramos que essas flutuações são detectáveis como variações mensuráveis de impedância em cabos de áudio com viés hemisférico, e que cabos magneticamente neutros são inerentemente imunes a esse efeito. O monitoramento contínuo de 12 cabos (3 por linha: Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) durante a tempestade geomagnética de outubro de 2024 ($K_p = 8,3$) revelou flutuações de impedância de até 0,08% em cabos da linha Tropic, 0,003% na linha Equinox e abaixo do piso de ruído ($< 0,0001\%$) em cabos Zero-Point. Propomos um Índice de Atividade Solar para especificações de desempenho de cabos de áudio.

1. INTRODUÇÃO

O ciclo de atividade de 11 anos do Sol produz máximos periódicos na frequência e intensidade de erupções solares e ejeções de massa coronal (CMEs). Quando o campo magnético de uma CME interage com a magnetosfera terrestre, a tempestade geomagnética resultante pode produzir flutuações rápidas e de grande amplitude no campo magnético de superfície. O ciclo solar atual (Ciclo 25) está produzindo atividade mais forte que o previsto, com várias tempestades $K_p \geq 7$ registradas em 2024.

Essas flutuações geomagnéticas são bem documentadas como fonte de interferência em redes elétricas (correntes induzidas geomagneticamente), sistemas de monitoramento de corrosão de dutos e magnetometria de precisão. O que não foi investigado é seu efeito em cabos de sinal de áudio.

O mecanismo é direto: um cabo de áudio com viés hemisférico contém condutores cuja estrutura de grão tem uma orientação preferencial em relação ao campo magnético terrestre. Quando o campo muda rapidamente -- como durante uma tempestade geomagnética -- a relação entre a orientação de grão e o campo se desloca, produzindo uma mudança transitória na impedância efetiva do condutor. Essa modulação de impedância aparece como uma modulação indesejada do sinal de áudio.

Cabos magneticamente neutros, por definição, não têm orientação de grão preferencial. Eles devem ser imunes a esse efeito porque não há acoplamento direcional entre a estrutura de grão e o campo externo. Este artigo testa essa hipótese.

2. METODOLOGIA

Doze amostras de cabo (1,0 m cada, interconexões com terminação RCA) foram instaladas em uma sala sem blindagem magnética na instalação da Equatorial Audio. Três cabos por linha (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) foram conectados a um sistema de monitoramento contínuo de impedância baseado em um Analisador de Impedância Keysight E4990A operando a 1 kHz com intervalos de medição de 5 segundos.

Dados simultâneos do campo magnético foram registrados por um magnetômetro fluxgate triaxial Bartington Mag-13 posicionado a 1 m da matriz de cabos.

A campanha de medição operou continuamente de 15 de setembro a 15 de novembro de 2024, capturando 5,3 milhões de medições de impedância por cabo. O período incluiu três tempestades geomagnéticas: 18 de setembro ($K_p = 5,7$), 10-12 de outubro ($K_p = 8,3$, a tempestade mais forte do Ciclo 25 até o momento) e 3 de novembro ($K_p = 6,1$).

A análise de correlação cruzada entre a taxa de variação do campo magnético (dB/dt) e o desvio de impedância do cabo (dZ/Z) foi realizada usando janelas deslizantes de 60 segundos.

3. RESULTADOS

Durante a tempestade de 10-12 de outubro ($K_p = 8,3$), os seguintes desvios máximos de impedância foram registrados:

Linha Tropic: 0,082 +/- 0,008% (média de 3 amostras)

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

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

Linha Zero-Point: $< 0,0001\%$ (abaixo do piso de ruído)

A correlação cruzada entre dB/dt e dZ/Z foi significativa para Tropic ($r = 0,71$, $p < 0,0001$), Meridian ($r = 0,54$, $p < 0,0001$) e Equinox

($r = 0,23$, $p < 0,01$). Nenhuma correlação significativa foi encontrada para Zero-Point ($r = 0,02$, $p = 0,34$).

O desvio de impedância escalonou linearmente com o produto do HBA do cabo e a taxa de $\Delta Z / dt$, onde $k = 2,1 \times 10^{-4}$ (deg \times min/nT)¹.

Durante períodos magneticamente calmos ($K_p \leq 2$), nenhuma linha de cabo apresentou desvios de impedância acima do piso de ruído.

4. DISCUSSÃO

Os resultados confirmam a hipótese: cabos com viés hemisférico são sensíveis a tempestades geomagnéticas, e a sensibilidade é proporcional à magnitude do viés. Os condutores com Emenda Equatorial da linha Zero-Point, com seu HBA abaixo de 0,00001deg, são efetivamente imunes à atividade solar. Essa imunidade não é alcançada por blindagem (que pode atenuar, mas não eliminar o acoplamento de campo externo), mas pela ausência fundamental de estrutura de grão direcional.

A significância prática de uma flutuação de impedância de 0,08% durante uma tempestade severa é discutível. A -62 dB em relação ao sinal, está abaixo do limiar de audibilidade para tons de estado estacionário. No entanto, a flutuação não é estacionária -- ela é modulada pela estrutura temporal caótica da tempestade geomagnética, produzindo uma contaminação tipo ruído que pode ser perceptível como uma sutil perda de clareza ou precisão espacial durante o pico de atividade da tempestade.

Propomos que os fabricantes de cabos adotem uma classificação de Índice de Atividade Solar (SAI) que especifique o desvio máximo de impedância por unidade de perturbação geomagnética: $SAI = \max(dZ/Z) / \max(dB/dt)$. Valores mais baixos indicam maior imunidade. A linha Zero-Point alcança $SAI < 10$, que designamos como «Grau Solar».

Os Fones de Ouvido Solar Flare da Equatorial Audio, que incorporam monitoramento de atividade solar em tempo real e compensação adaptativa de resposta em frequência, representam uma abordagem alternativa para ouvintes usando cabos sem classificação Solar.

5. CONCLUSÃO

Tempestades geomagnéticas produzem flutuações de impedância mensuráveis em cabos de áudio com viés hemisférico. O efeito escala com a magnitude do viés e a intensidade da tempestade. Cabos magneticamente neutros ($HBA < 0,00001$ deg) são imunes. Recomendamos a adoção de um Índice de Atividade Solar padronizado para especificações de desempenho de cabos de áudio.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Viés hemisférico na orientação de grão do cobre," 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, "Compensação adaptativa de áudio em tempo real para perturbações geomagnéticas," Equatorial Audio Technical Note EA-TN-012, 2023.