
**INTERACCIÓN DE LAS
ERUPCIONES SOLARES CON LAS
TRAYECTORIAS DE SEÑAL
AUDIÓFILA: EFECTOS DE LAS
TORMENTAS GEOMAGNÉTICAS EN
EL RENDIMIENTO DE CABLES DE
AUDIO**

Interacción de las erupciones solares con las trayectorias de señal audiófila: Efectos de las tormentas geomagnéticas en el rendimiento de cables de 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.

Resumen

Las tormentas geomagnéticas inducidas por eyecciones de masa coronal (CME) solares producen fluctuaciones rápidas en el campo magnético terrestre que pueden superar los 500 nT/minuto durante eventos severos ($K_p \geq 7$). Demostramos que estas fluctuaciones son detectables como variaciones de impedancia medibles en cables de audio con sesgo hemisférico, y que los cables magnéticamente neutrales son inherentemente inmunes a este efecto. El monitoreo continuo de 12 cables (3 por nivel: Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) durante la tormenta geomagnética de octubre de 2024 ($K_p = 8,3$) reveló fluctuaciones de impedancia de hasta un 0,08% en cables de nivel Tropic, un 0,003% en cables de nivel Equinox, y por debajo del umbral de ruido ($< 0,0001\%$) en cables Zero-Point. Proponemos un Índice de Actividad Solar para las especificaciones de rendimiento de cables de audio.

1. INTRODUCCIÓN

El ciclo de actividad de 11 años del Sol produce máximos periódicos en la frecuencia e intensidad de las erupciones solares y eyecciones de masa coronal (CME). Cuando el campo magnético de una CME interactúa con la magnetosfera terrestre, la tormenta geomagnética resultante puede producir fluctuaciones rápidas y de gran amplitud en el campo magnético superficial. El ciclo solar actual (Ciclo 25) está produciendo una actividad más fuerte de lo previsto, con varias tormentas $K_p \geq 7$ registradas en 2024.

Estas fluctuaciones geomagnéticas están bien documentadas como fuente de interferencia en redes eléctricas (corrientes geomagnéticamente inducidas), sistemas de monitoreo de corrosión de tuberías y magnetometría de precisión. Lo que no se ha investigado es su efecto en los cables de señal de audio.

El mecanismo es directo: un cable de audio con sesgo hemisférico contiene conductores cuya estructura de grano tiene una orientación preferente relativa al campo magnético terrestre. Cuando el campo cambia rápidamente -- como durante una tormenta geomagnética -- la relación entre la orientación del grano y el campo se desplaza, produciendo un cambio transitorio en la impedancia efectiva del conductor. Esta modulación de impedancia aparece como una modulación no deseada de la señal de audio.

Los cables magnéticamente neutrales, por definición, no tienen orientación de grano preferente. Deberían ser inmunes a este efecto porque no hay acoplamiento direccional entre la estructura del grano y el campo externo. Este artículo pone a prueba esa hipótesis.

2. METODOLOGÍA

Doce muestras de cable (1,0 m cada una, interconexiones terminadas en RCA) fueron instaladas en una sala no blindada magnéticamente en la instalación de Equatorial Audio. Tres cables por nivel (Tropic, Meridian, Equinox, Zero-Point) fueron conectados a un sistema de monitoreo continuo de impedancia basado en un analizador de impedancia Keysight E4990A operando a 1 kHz con intervalos de medición de 5 segundos.

Datos simultáneos del campo magnético fueron registrados por un magnetómetro fluxgate triaxial Bartington Mag-13 posicionado a 1 m de la matriz de cables.

La campaña de medición se ejecutó continuamente desde el 15 de septiembre hasta el 15 de noviembre de 2024, capturando 5,3 millones de mediciones de impedancia por cable. El período incluyó tres tormentas geomagnéticas: 18 de septiembre ($K_p = 5,7$), 10-12 de octubre ($K_p = 8,3$, la tormenta más fuerte del Ciclo 25 hasta la fecha), y 3 de noviembre ($K_p = 6,1$).

El análisis de correlación cruzada entre la tasa de cambio del campo magnético (dB/dt) y la desviación de impedancia del cable (dZ/Z) fue realizado usando ventanas deslizantes de 60 segundos.

3. RESULTADOS

Durante la tormenta del 10-12 de octubre ($K_p = 8,3$), se registraron las siguientes desviaciones máximas de impedancia:

Nivel Tropic: 0,082 +/- 0,008% (media de 3 muestras)

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

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

Nivel Zero-Point: < 0,0001% (por debajo del umbral de ruido)

La correlación cruzada entre dB/dt y dZ/Z fue significativa para los niveles Tropic ($r = 0,71$, $p < 0,0001$), Meridian ($r = 0,54$, $p < 0,0001$) y Equinox ($r = 0,23$, $p < 0,01$). No se encontró correlación significativa para Zero-Point ($r = 0,02$, $p = 0,34$).

La desviación de impedancia escaló linealmente con el producto del HBA del cable y la tasa de cambio del campo magnético: $dZ/Z = H \cdot k \times HBA \times dB/dt$, donde $k = 2,1 \times 10^{-6} \text{ (deg} \times \text{min/nT)}$.

Durante períodos magnéticamente tranquilos ($Kp \leq 2$), ningún nivel de cable mostró desviaciones de impedancia por encima del umbral de ruido.

4. DISCUSIÓN

Los resultados confirman la hipótesis: los cables con sesgo hemisférico son sensibles a las tormentas geomagnéticas, y la sensibilidad es proporcional a la magnitud del sesgo. Los conductores con empalme ecuatorial del nivel Zero-Point, con su HBA por debajo de 0,00001deg, son efectivamente inmunes a la actividad solar. Esta inmunidad no se logra mediante blindaje (que puede atenuar pero no eliminar el acoplamiento con campos externos) sino a través de la ausencia fundamental de estructura de grano direccional.

La significancia práctica de una fluctuación de impedancia del 0,08% durante una tormenta severa es debatible. A -62 dB relativos a la señal, está por debajo del umbral de audibilidad para tonos de estado estacionario. Sin embargo, la fluctuación no es de estado estacionario -- está modulada por la estructura temporal caótica de la tormenta geomagnética, produciendo una contaminación tipo ruido que puede ser perceptible como una sutil pérdida de claridad o precisión espacial durante la actividad máxima de la tormenta.

Proponemos que los fabricantes de cables adopten un Índice de Actividad Solar (SAI) que especifique la desviación máxima de impedancia por unidad de perturbación geomagnética: $SAI = \max(dZ/Z) / \max(dB/dt)$. Los valores más bajos indican mayor inmunidad. El nivel Zero-Point logra $SAI < 10$, que designamos como «Grado Solar».

Los auriculares Solar Flare de Equatorial Audio, que incorporan monitoreo de actividad solar en tiempo real y compensación adaptativa de respuesta en frecuencia, representan un enfoque alternativo para oyentes que usan cables que no son de Grado Solar.

5. CONCLUSIÓN

Las tormentas geomagnéticas producen fluctuaciones de impedancia medibles en cables de audio con sesgo hemisférico. El efecto escala con la magnitud del sesgo y la intensidad de la tormenta. Los cables magnéticamente neutrales ($HBA < 0,00001\text{deg}$) son inmunes. Recomendamos la adopción de un Índice de Actividad Solar estandarizado para las especificaciones de rendimiento de cables de audio.

REFERENCIAS

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Sesgo hemisférico en la orientación del grano de cobre," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] NOAA Space Weather Prediction Center, "Escalas de tormentas geomagnéticas," <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>.
- [3] D. H. Boteler, R. J. Pirjola, "Corrientes geomagnéticamente inducidas (GICs)," Space Weather, vol. 15, pp. 258-276, 2017.
- [4] J. L. Barton, "Efectos de las tormentas geomagnéticas en sistemas tecnológicos," Space Weather, vol. 1, no. 2, 2003.
- [5] S. Magnusson, C. Ohm, "Compensación adaptativa de audio en tiempo real para perturbaciones geomagnéticas," Equatorial Audio Technical Note EA-TN-012, 2023.