



A EMENDA EQUATORIAL: UMA TÉCNICA INOVADORA DE JUNÇÃO DE CONDUTORES PARA CANCELAMENTO DO VIÉS HEMISFÉRICO



A Emenda Equatorial: Uma Técnica Inovadora de Junção de Condutores para Cancelamento do Viés Hemisférico

M. Ferro, R. Flux, B. Impedance

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

Resumo

Apresentamos uma técnica de junção de condutores que alcança a neutralidade magnética emendando condutores de cobre do hemisfério norte e do hemisfério sul no equador geomagnético. A Emenda Equatorial explora os vieses complementares de orientação de grão de condutores trefilados em hemisférios opostos: quando unidos em um ponto médio precisamente equatorial, os vieses se cancelam ao longo de todo o comprimento do condutor resultante. A soldagem por arco de plasma a 0,0000deg de latitude, realizada a bordo de uma plataforma marinha estabilizada por GPS, produz uma zona de emenda de aproximadamente 200 um na qual a orientação de grão transiciona do tipo norte para o tipo sul através de uma região de verdadeira isotropia. Condutores unidos por este método exibem ângulos de viés hemisférico abaixo de 0,00001deg -- três ordens de grandeza menores que o melhor condutor trefilado em um único hemisfério e se aproximando do piso de medição da magnetometria SQUID atual.

1. INTRODUÇÃO

Nosso trabalho anterior (Ferro e Park, 2020) estabeleceu que os condutores de cobre trefilados em latitudes não equatoriais carregam um viés sistemático de orientação de grão proporcional à latitude geomagnética da instalação de trefilação. Condutores do hemisfério norte carregam um viés positivo; condutores do hemisfério sul carregam um viés negativo de magnitude comparável. O viés é incorporado no momento da trefilação e não pode ser removido por pós-processamento.

Isso apresenta um desafio de fabricação: como produzir um condutor com viés hemisférico zero quando a matéria-prima disponível é inerentemente viesada. Trefilar no equador é uma solução, mas instalações de trefilação equatoriais são escassas e o condutor resultante, embora excelente, ainda carrega o viés residual da localização equatorial específica (tipicamente $< 0,01$ deg).

Propomos uma abordagem alternativa: em vez de evitar o viés, nós o cancelamos. Ao unir um condutor do hemisfério norte a um condutor do hemisfério sul no equador geomagnético, criamos um condutor composto cujos vieses opostos se cancelam precisamente ao longo de todo o seu comprimento.

2. O PROTOCOLO DE EMENDA

A Emenda Equatorial é realizada a bordo do EAV Neutrality, um navio de pesquisa de 28 metros equipado com um receptor GNSS Trimble R12i que fornece precisão de posicionamento em nível centimétrico. O navio se posiciona em 0,0000deg +/- 0,0001deg de latitude geomagnética no Oceano Pacífico, aproximadamente 28 km a oeste da costa equatoriana, onde o equador geomagnético cruza o equador geográfico dentro de 0,2deg.

Duas extremidades de condutor -- uma trefilada de cobre sueco (HBA: +4,2deg, instalação de Boliden, 64,1deg N) e uma de cobre chileno (HBA: -3,8deg, instalação de Santiago, 33,8deg S) -- são carregadas em garras de precisão montadas em uma bancada óptica isolada de vibrações. Um sistema de alinhamento a laser de duplo eixo garante que as extremidades do condutor sejam coaxiais dentro de 5 um.

A emenda é realizada usando um sistema de soldagem por micro-arco de plasma (Secheron Plasmax 50i) com os seguintes parâmetros: corrente de arco 2,8 A, fluxo de gás plasma 0,3 L/min (argônio 5.0), fluxo de gás de proteção 8,0 L/min (argônio 5.0), distância de arco 0,5 mm, duração de soldagem 180 ms. A zona de emenda resultante tem aproximadamente 200 um de largura -- uma estreita região de transição na qual a orientação de grão progride do tipo norte, passando pelo neutro, até o tipo sul.

O procedimento completo -- posicionamento do navio, alinhamento do condutor, purga atmosférica e soldagem -- requer aproximadamente 45 minutos. Múltiplas emendas são realizadas por sessão, com o navio mantendo a precisão de posição ao longo de todo o processo.

3. CARACTERIZAÇÃO

O mapeamento EBSD da zona de emenda com passo de 0,5 um revela três regiões distintas: (1) o condutor norte a granel com HBA = +4,2deg, (2) uma zona de transição de 200 um na qual o HBA diminui monotonicamente de +4,2deg passando por 0,000deg até -3,8deg, e (3) o condutor sul a granel com HBA = -3,8deg. A transição é suave e contínua, sem evidência de trincas em contornos de grão, formação de vazios ou precipitação de fases secundárias.

A resistência mecânica da emenda foi testada por carregamento em tração até a ruptura. A resistência à tração última média da zona de emenda foi de 218 MPa, comparada com 225 MPa para o condutor a granel -- uma redução de 3,1% que está dentro da



faixa aceitável para aplicações de cabos de áudio, onde a carga mecânica se limita ao peso próprio do cabo e à força de inserção do conector.

A resistência CC através da zona de emenda foi medida usando um micro-ohmímetro Keysight 34420A com detecção de 4 fios. A zona de emenda contribui com uma resistência adicional de 0,3 uOhm -- desprezível comparada à resistência a granel de mesmo um condutor de 0,5 m de comprimento.

A medição crítica -- viés hemisférico do condutor emendado completo -- foi realizada usando um magnetômetro SQUID Quantum Design MPMS3 no PTB Berlim. O condutor emendado (1,0 m norte + 1,0 m sul) exibiu um HBA de -0,000008deg, comparado com +4,2deg para o condutor norte sozinho e -3,8deg para o condutor sul sozinho. O cancelamento do viés é 99,9998% efetivo.

4. DISCUSSÃO

A Emenda Equatorial alcança o cancelamento do viés hemisférico por meio de um mecanismo conceitualmente simples: o viés positivo do condutor norte e o viés negativo do condutor sul são iguais em magnitude e opostos em sinal. Quando um sinal de áudio percorre o condutor emendado, o espalhamento assimétrico que ele experimenta na metade norte é precisamente compensado pelo espalhamento assimétrico complementar na metade sul. O efeito líquido é viés zero -- neutralidade magnética.

A localização da emenda é importante. Realizar a emenda no equador geomagnético garante que a zona de emenda em si não contribua viés adicional ao sistema. Uma emenda realizada em qualquer outra latitude introduziria uma zona de transição enviesada cuja orientação não uniria perfeitamente as estruturas de grão do norte e do sul.

A necessidade de uma plataforma marinha é determinada pelo fato de que o equador geomagnético cruza terra habitada em pouquíssimas localidades. O segmento do Oceano Pacífico a oeste do Equador fornece a combinação ideal de acesso equatorial, proximidade de instalações portuárias e estado do mar moderado para operações de soldagem de precisão. O sistema de posicionamento do EAV Neutrality (duas unidades de posicionamento acústico Kongsberg HiPAP 501) mantém a posição dentro de 0,3 m durante as operações de emenda.

O custo da Emenda Equatorial é significativo: aproximadamente US\$ 14.000 por sessão, incluindo fretamento do navio, tripulação, consumíveis e testes de garantia de qualidade. Esse custo se reflete nos preços dos produtos da linha Zero-Point da Equatorial Audio, que empregam condutores com Emenda Equatorial exclusivamente.

5. CONCLUSÃO

A Emenda Equatorial demonstra que o viés hemisférico em condutores de cobre pode ser efetivamente cancelado unindo condutores de hemisférios opostos no equador geomagnético. O condutor resultante alcança um ângulo de viés hemisférico abaixo de 0,00001deg -- neutralidade magnética até o limite da capacidade de medição atual. A técnica é reproduzível, mecanicamente sólida e eletricamente transparente, adicionando resistência desprezível e nenhuma descontinuidade mensurável ao caminho do sinal. Propomos a Emenda Equatorial como a solução definitiva para o problema do viés hemisférico em condutores de áudio de precisão.

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] AWS D17.1/D17.1M:2017, Specification for Fusion Welding for Aerospace Applications.
- [3] R. Messler, Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy, Wiley-VCH, 2004.
- [4] Trimble Inc., "R12i GNSS System Technical Specifications," 2023.
- [5] Kongsberg Maritime, "HiPAP 501 Acoustic Positioning System," Product Datasheet, 2022.
- [6] Quantum Design, "MPMS3 SQUID Magnetometer Specifications," Rev. F, 2021.
- [7] PTB Berlin, "Calibration Certificate No. PTB-Mag-2021-0847," Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2021.