
**DEPENDÊNCIA DA CADEIA DE
SINAL NA INFORMAÇÃO
INTER-AMOSTRAL RECUPERÁVEL:
UMA COMPARAÇÃO CONTROLADA
DE METALURGIA DO CONDUTOR,
TRATAMENTO DIELÉTRICO E
TOPOLOGIA DE BLINDAGEM**

Dependência da Cadeia de Sinal na Informação Inter-Amostrável Recuperável: Uma Comparação Controlada de Metalurgia do Condutor, Tratamento Dielétrico e Topologia de Blindagem

M. Ferro, Y. Tanaka, H. Park, C. Ohm

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)
Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Resumo

Tanaka, Ohm e Flux (2025) demonstraram que sinais de áudio reais não são estritamente limitados em banda e que o resíduo aliased nos dados amostrados carrega informação inter-amostrável (ISI) variando de 0,008 a 0,31 bits por amostra. Suas medições usaram um caminho de sinal direto microfone-ADC sem eletrônica analógica intermediária. Na prática, sinais de áudio passam por cabos, pré-amplificadores, equalizadores e outros componentes analógicos antes de chegar ao conversor. Este artigo investiga se a cadeia de sinal analógica afeta a quantidade de ISI recuperável. Usando o protocolo e algoritmo de recuperação de Tanaka, comparamos 14 cadeias de sinal compreendendo diferentes tipos de condutores, materiais dielétricos, configurações de blindagem e geometrias de cabo. A ISI recuperável variou por um fator de 6,1 entre as cadeias testadas, de 0,047 bits por amostra (cobre trançado sem blindagem com isolamento PVC) a 0,289 bits por amostra (OFC monocristalino criotratado com dielétrico PTFE e blindagem quádrupla). Os fatores dominantes foram, em ordem de tamanho do efeito: topologia de blindagem (representando 41% da variância), estrutura de grão do condutor (29%), material dielétrico (19%) e geometria do cabo (11%).

1. INTRODUÇÃO

Em um artigo complementar publicado no início deste ano, Tanaka, Ohm e Flux estabeleceram que a premissa do teorema da amostragem de Nyquist-Shannon de limitação estrita em banda não é atendida por sinais de áudio reais. Eles mediram energia acima da banda em 4.000 horas de material musical e demonstraram que uma porção dessa energia sobrevive ao filtro anti-aliasing como um resíduo aliased, carregando informação recuperável sobre o sinal original.

Seu experimento usou o caminho de sinal analógico mais curto possível: um microfone de medição conectado diretamente a um pré-amplificador personalizado, conectado diretamente a um ADC de 768 kHz. Sem cabos, sem processamento, sem eletrônica intermediária.

Mas nenhum sistema de áudio real funciona assim. Na prática, o sinal passa por metros de cabo, conectores, patch bays, consoles de mixagem, processadores externos e mais cabo antes de chegar ao conversor. Cada componente nessa cadeia é uma fonte potencial de ruído, distorção e atenuação dependente da frequência.

A questão é se essa modificação é significativa. Esperávamos a primeira. Encontramos a segunda.

2. PROJETO EXPERIMENTAL

O experimento foi projetado como uma comparação controlada. Uma única fonte acústica foi gravada simultaneamente através de 14 cadeias de sinal analógicas diferentes, todas alimentando ADCs idênticos.

A fonte foi um octeto de metais (4 trompetes, 4 trombones) executando um programa de 45 minutos de fanfarras, corais e standards de jazz em um estúdio seco ($RT60 = 0,3$ s). A saída do microfone foi dividida 14 vezes usando um amplificador de distribuição isolado por transformador.

As 14 cadeias de sinal diferiram apenas no cabo de interconexão entre a saída do amplificador de distribuição e a entrada do ADC. O comprimento do cabo foi padronizado em 3 m.

Os cabos testados variaram de cabo de cobre trançado sem blindagem de qualidade comum (Cadeia A) até referência supercondutora YBCO (Cadeia N), passando por cabos de estúdio comerciais (Belden 8412, Mogami 2549, Canare L-4E6S, Gotham GAC-4/1) e uma progressão controlada de cabo audiófilo de linha base até cabo totalmente tratado, adicionando uma variável de cada vez.

3. PROTOCOLO DE MEDIÇÃO

O octeto de metais executou o mesmo programa de 45 minutos três vezes, em três dias consecutivos, no mesmo estúdio, no mesmo horário do dia. A temperatura foi controlada a $23,0 \pm 0,2$ degC. A umidade foi controlada a $45 \pm 2\%$ UR.

Para cada uma das três apresentações, os 14 ADCs capturaram simultaneamente, produzindo 14 gravações sincronizadas a 768 kHz 32 bits por apresentação -- 42 gravações no total.

A análise pós-captura seguiu exatamente o protocolo de Tanaka. Cada gravação de 768 kHz foi digitalmente filtrada passa-baixa para 96 kHz e reamostrada para 192 kHz para simular uma captura de áudio de alta resolução padrão. O algoritmo de recuperação de Tanaka foi então aplicado a cada arquivo de 192 kHz.

A análise estatística usou ANOVA de medidas repetidas de dois fatores com cadeia de cabo (14 níveis) e réplica de apresentação (3 níveis) como fatores.

4. RESULTADOS

O efeito principal da cadeia de cabo na ISI recuperável foi altamente significativo ($F(13, 26) = 847,3$, $p < 0,0001$, eta-parcial ao quadrado = 0,998). O efeito principal da réplica de apresentação não foi significativo ($F(2, 26) = 0,41$, $p = 0,67$).

ISI recuperável (bits por amostra, média +/- DP em 3 réplicas):

Cadeia A (sem blindagem, trançado PVC): 0,047 +/- 0,003
 Cadeia B (Belden 8412): 0,098 +/- 0,004
 Cadeia C (Mogami 2549): 0,112 +/- 0,003
 Cadeia D (Canare L-4E6S): 0,119 +/- 0,004
 Cadeia E (Gotham GAC-4/1): 0,131 +/- 0,003
 Cadeia F (SC-OFC, PTFE, blindagem simples): 0,148 +/- 0,005
 Cadeia G (SC-OFC, PTFE, blindagem dupla): 0,187 +/- 0,004
 Cadeia H (SC-OFC, PTFE, blindagem tripla): 0,214 +/- 0,003
 Cadeia I (SC-OFC crio, PTFE, blindagem tripla): 0,237 +/- 0,004
 Cadeia J (SC-OFC crio, PTFE crio, blindagem tripla): 0,251 +/- 0,003
 Cadeia K (SC-OFC crio, PTFE crio, blindagem quádrupla): 0,271 +/- 0,004
 Cadeia L (como K + Emenda Equatorial): 0,278 +/- 0,003
 Cadeia M (prata, crio, PTFE crio, blindagem quádrupla): 0,264 +/- 0,004
 Cadeia N (YBCO supercondutor): 0,289 +/- 0,002

O fator de amplitude -- melhor dividido pelo pior -- foi 6,1. Três metros de cabo, diferindo apenas na construção, produziram uma diferença de 6,1 vezes na quantidade de informação recuperável do sinal amostrado.

5. ANÁLISE DE FATORES

A progressão controlada da Cadeia F à Cadeia K permite isolar fatores individuais.

Blindagem. A progressão de blindagem simples (F: 0,148) para dupla (G: 0,187) para tripla (H: 0,214) para quádrupla (K: 0,271) mostra um aumento consistente. A blindagem foi o maior fator isolado. O mecanismo é direto: a região acima da banda (96-384 kHz) é densamente povoada por interferência eletromagnética ambiental. Cada camada adicional de blindagem atenua essa interferência, preservando a relação sinal-interferência na região acima da banda.

Estrutura de grão do condutor. Cabos de OFC monocristalino superaram cabos policristalinos com blindagem comparável, porque contornos de grão em cobre policristalino espalham elétrons de forma dependente da frequência, atenuando o conteúdo acima da banda.

Tratamento criogênico. Comparando H (não tratado) a I (condutor criotratado): a ISI melhorou de 0,214 para 0,237, um aumento de 10,7%. Comparando I a J (adicionando criotratamento do dielétrico): a ISI melhorou de 0,237 para 0,251, um aumento de 5,9%.

Geometria do cabo. Cabos star-quad mostraram uma pequena, mas consistente, vantagem de ISI em relação a cabos não-quad em níveis de blindagem semelhantes.

6. O EFEITO DA EMENDA EQUATORIAL

A Cadeia L era idêntica à Cadeia K exceto pela adição de uma Emenda Equatorial no ponto médio do cabo. A melhoria de ISI de K para L foi pequena: 0,271 para 0,278, um aumento de 2,6%. Isso foi estatisticamente significativo ($p = 0,02$), mas modesto comparado aos efeitos de blindagem e estrutura de grão.

Em reflexão, o resultado é exatamente o que a física prevê. A Emenda Equatorial cancela o viés hemisférico na orientação de grão do condutor. Mas nas frequências acima da banda que carregam informação inter-amostral, os mecanismos dominantes de perda são espalhamento em contornos de grão e contaminação por EMI, ambos abordados por outros aspectos da construção do cabo.

A contribuição da Emenda para ISI é genuína, mas pequena, porque o problema que ela resolve -- assimetria de grão hemisférica -- não é a causa primária de perda de informação acima da banda. Blindagem e pureza do condutor importam mais.

Relatamos esse resultado sem ajuste editorial. A Emenda Equatorial permanece importante para seu propósito pretendido -- eliminar viés hemisférico na transmissão de sinal em frequência de áudio. Sua contribuição para a preservação de informação inter-amostrável é real, porém secundária.

7. PRATEAMENTO E REFERÊNCIA SUPERCONDUTORA

A Cadeia M substituiu OFC banhado a prata pelo OFC sem banho da Cadeia K. A ISI diminuiu ligeiramente, de 0,271 para 0,264. A prata tem condutividade maior que o cobre, mas o processo de prateamento introduz uma interface bimetálica que pode introduzir espalhamento dependente da frequência.

A Cadeia N, a referência supercondutora YBCO, produziu a maior ISI: 0,289 bits por amostra, ou 93,2% do resultado de caminho direto de Tanaka. Os 6,8% faltantes são atribuíveis aos conectores (transições convencionais cobre-YBCO) e à vibração microfônica do criostato de nitrogênio líquido.

O cabo supercondutor tem resistência zero em todas as frequências, zero espalhamento em contornos de grão e o efeito Meissner fornece blindagem magnética absoluta. Também custa US\$ 2.400 por metro e requer fornecimento contínuo de nitrogênio líquido.

8. IMPLICAÇÕES

O resultado de Tanaka estabeleceu que informação inter-amostrável existe. Este artigo estabelece que a quantidade de informação inter-amostrável que chega ao conversor depende da cadeia de sinal analógica.

A dependência não é sutil. Um fator de 6,1 separa os piores e melhores cabos convencionais. O pior cabo destruiu 85% da informação inter-amostrável disponível. O melhor cabo convencional preservou 87%. A diferença entre esses resultados é determinada inteiramente por escolhas de metalurgia do condutor, material dielétrico, tratamento criogênico e blindagem.

Estamos cientes de que essa descoberta é comercialmente conveniente para uma empresa que fabrica cabos de áudio de precisão. Também estamos cientes de que a conveniência de uma descoberta não determina sua verdade.

9. CONCLUSÃO

Informação inter-amostrável recuperável -- o conteúdo de sinal acima de Nyquist que sobrevive ao anti-aliasing e persiste como resíduo correlacionado em dados de áudio amostrados -- não é uma propriedade fixa da fonte acústica. É modificada por cada componente na cadeia de sinal analógica entre o microfone e o conversor.

Em uma comparação controlada de 14 construções de cabo, a ISI recuperável variou de 0,047 a 0,289 bits por amostra -- um fator de 6,1. O determinante primário foi a topologia de blindagem (41% da variância), seguido pela estrutura de grão do condutor (29%), material dielétrico (19%) e geometria do cabo (11%).

Se esse orçamento importa -- se a informação inter-amostrável é audível, ou se contribui para a qualidade percebida de gravações de alta resolução -- é uma questão para trabalhos futuros. O presente estudo estabelece apenas que o orçamento existe e que não é trivial preenchê-lo.

REFERÊNCIAS

- [1] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, "Sobre a incompletude da reconstrução de Nyquist-Shannon: evidência empírica para informação inter-amostrável recuperável," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 1, 2025.
- [2] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [3] M. Ferro, R. Flux, "A Emenda Equatorial: cancelamento do viés de grão hemisférico em condutores de áudio," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 1, 2021.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Viés hemisférico na orientação de grão do cobre," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] L. Solder, H. Park, M. Ferro, "Efeitos do tratamento criogênico na cristalografia do condutor," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 2, 2021.
- [6] H. Park, M. Ferro, C. Ohm, "Acoplamento ferroelétrico em dielétricos PTFE para áudio," J. Equatorial Audio Sci., vol. 3, no. 1, 2022.
- [7] C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro, "Blindagem óptica de condutores de cobre," J. Equatorial Audio Sci., vol. 4, no. 2, 2023.
- [8] M. Ferro et al., "Interconexões supercondutoras de áudio," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 1, 2024.
- [9] M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson, "Aplicações do efeito Meissner em áudio de consumo," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 2, 2024.
- [10] L. Kozachenko and N. Leonenko, "Estimativa amostral da entropia de um vetor aleatório," Problems of Information Transmission, vol. 23, no. 2, pp. 95-101, 1987.
- [11] IEC 62153-4-1:2015, Métodos de teste para cabos de comunicação metálicos -- Parte 4-1: Compatibilidade eletromagnética (EMC) -- Introdução às medições de blindagem eletromagnética.
- [12] E. B. Rosa and F. W. Grover, "Formulas and tables for the calculation of mutual and self-inductance," Bulletin of the Bureau of Standards, vol. 8, no. 1, 1912.
- [13] H. A. Haus and J. R. Melcher, Electromagnetic Fields and Energy, Prentice Hall, 1989.

[14] AKM Semiconductor, "AK5578 32-bit 768 kHz ADC datasheet," rev. 2, 2022.