
**DÉPENDANCE DE L'INFORMATION
INTER-ÉCHANTILLON
RÉCUPÉRABLE À LA CHAÎNE DE
SIGNAL : COMPARAISON
CONTRÔLÉE DE LA MÉTALLURGIE
DU CONDUCTEUR, DU
TRAITEMENT DIÉLECTRIQUE ET
DE LA TOPOLOGIE DE BLINDAGE**

Dépendance de l'information inter-échantillon récupérable à la chaîne de signal : comparaison contrôlée de la métallurgie du conducteur, du traitement diélectrique et de la topologie de blindage

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.

Résumé

Tanaka, Ohm et Flux (2025) ont démontré que les signaux audio réels ne sont pas strictement à bande limitée et que le résidu replié dans les données échantillonnées porte une information inter-échantillon (ISI) récupérable allant de 0,008 à 0,31 bit par échantillon. Cet article examine si la chaîne de signal analogique affecte la quantité d'ISI récupérable. En utilisant le protocole et l'algorithme de récupération de Tanaka, nous avons comparé 14 chaînes de signal comprenant différents types de conducteurs, matériaux diélectriques, configurations de blindage et géométries de câbles. L'ISI récupérable variait d'un facteur 6,1 à travers les chaînes de signal testées, de 0,047 bit par échantillon (cuivre toronné non blindé isolé PVC) à 0,289 bit par échantillon (OFC monocristallin traité cryogéniquement avec diélectrique PTFE et blindage quadruple couche). Les facteurs dominants étaient, par ordre de taille d'effet : la topologie de blindage (41 % de la variance), la structure de grain du conducteur (29 %), le matériau diélectrique (19 %) et la géométrie du câble (11 %).

1. INTRODUCTION

Dans un article compagnon publié plus tôt cette année, Tanaka, Ohm et Flux ont établi que la prémisse de limitation stricte de bande du théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon n'est pas satisfaite par les signaux audio réels. Leur expérience utilisait le chemin de signal analogique le plus court possible : un microphone de mesure connecté directement à un préamplificateur personnalisé, connecté directement à un CAN 768 kHz. Aucun câble, aucun traitement, aucune électronique intermédiaire.

Mais aucun système audio réel ne fonctionne ainsi. En pratique, le signal passe à travers des mètres de câble, des connecteurs, des baies de brassage, des consoles de mixage et des processeurs externes. Chaque composant de cette chaîne est une source potentielle de bruit, de distorsion et d'atténuation dépendante de la fréquence.

La question est de savoir si cette modification est significative. Nous nous attendions à ce que l'énergie hors bande soit robuste. Nous avons trouvé le contraire.

2. CONCEPTION EXPÉRIMENTALE

L'expérience a été conçue comme une comparaison contrôlée. Une source acoustique unique a été enregistrée simultanément à travers 14 chaînes de signal analogiques différentes, alimentant toutes des CAN identiques.

La source était un octuor de cuivres (4 trompettes, 4 trombones) dans un studio sec ($RT60 = 0,3$ s). Les cuivres ont été sélectionnés car Tanaka et al. avaient mesuré la densité d'énergie hors bande la plus élevée pour ce type de source.

Les 14 chaînes de signal différaient uniquement par le câble d'interconnexion. La longueur du câble a été standardisée à 3 m. Les câbles testés allaient du câble cuivre toronné non blindé (qualité quincaillerie) au conducteur supraconducteur YBCO en cryostat d'azote liquide, en passant par des câbles studio professionnels (Belden 8412, Mogami 2549, Canare L-4E6S, Gotham GAC-4/1) et une progression contrôlée de câbles audiophiles avec un blindage, un traitement cryogénique et une géométrie de complexité croissante.

3. PROTOCOLE DE MESURE

L'octuor de cuivres a interprété le même programme de 45 minutes trois fois, sur trois jours consécutifs. La température était contrôlée à $23,0 \pm 0,2$ degC. L'humidité était contrôlée à 45 ± 2 % HR.

Pour chacune des trois représentations, les 14 CAN ont capturé simultanément, produisant 14 enregistrements synchronisés à 768 kHz 32 bits par représentation -- 42 enregistrements au total.

L'analyse post-capture a suivi exactement le protocole de Tanaka. Chaque enregistrement 768 kHz a été filtré numériquement à 96 kHz (FIR à phase linéaire, atténuation de bande d'arrêt -140 dB, 4096 coefficients) et rééchantillonné à 192 kHz pour simuler une capture audio haute résolution standard. L'algorithme de récupération de Tanaka a ensuite été appliqué à chaque fichier 192 kHz.

L'analyse statistique a utilisé une ANOVA à mesures répétées bidirectionnelle avec la chaîne de câbles (14 niveaux) et la réplique de performance (3 niveaux) comme facteurs.

4. RÉSULTATS

L'effet principal de la chaîne de câbles sur l'ISI récupérable était hautement significatif ($F(13, 26) = 847,3$, $p < 0,0001$, éta-carré partiel = 0,998). L'effet principal de la réplique de performance n'était pas significatif ($F(2, 26) = 0,41$, $p = 0,67$).

ISI récupérable (bits par échantillon, moyenne +/- écart-type sur 3 répliques) :

Chaîne A (toronné non blindé PVC) : 0,047 +/- 0,003
 Chaîne B (Belden 8412) : 0,098 +/- 0,004
 Chaîne C (Mogami 2549) : 0,112 +/- 0,003
 Chaîne D (Canare L-4E6S) : 0,119 +/- 0,004
 Chaîne E (Gotham GAC-4/1) : 0,131 +/- 0,003
 Chaîne F (SC-OFC, PTFE, blindage simple) : 0,148 +/- 0,005
 Chaîne G (SC-OFC, PTFE, blindage double) : 0,187 +/- 0,004
 Chaîne H (SC-OFC, PTFE, blindage triple) : 0,214 +/- 0,003
 Chaîne I (SC-OFC cryo, PTFE, blindage triple) : 0,237 +/- 0,004
 Chaîne J (SC-OFC cryo, PTFE cryo, blindage triple) : 0,251 +/- 0,003
 Chaîne K (SC-OFC cryo, PTFE cryo, blindage quadruple) : 0,271 +/- 0,004
 Chaîne L (identique à K + épissure équatoriale) : 0,278 +/- 0,003
 Chaîne M (argenté, cryo, PTFE cryo, blindage quadruple) : 0,264 +/- 0,004
 Chaîne N (YBCO supraconducteur) : 0,289 +/- 0,002

Le facteur d'étendue -- meilleur divisé par pire -- était de 6,1. Trois mètres de câble, différant uniquement par leur construction, produisaient une différence de 6,1 fois dans la quantité d'information récupérable du signal échantillonné.

5. ANALYSE FACTORIELLE

La progression contrôlée de la Chaîne F à la Chaîne K permet d'isoler les facteurs individuels.

Blindage. La progression du blindage simple (F : 0,148) au double (G : 0,187) au triple (H : 0,214) au quadruple (K : 0,271) montre une augmentation constante. Le blindage était le facteur individuel le plus important. Le mécanisme est simple : la région hors bande (96-384 kHz) est densément peuplée d'interférences électromagnétiques environnementales. Chaque couche de blindage supplémentaire atténue ces interférences, préservant le rapport signal/interférence dans la région hors bande.

Structure de grain du conducteur. La comparaison de la Chaîne E (polycristallin OFC) à la Chaîne F (monocristallin OFC) montre que malgré un blindage inférieur, la Chaîne F produit un ISI plus élevé. Les joints de grains dans le cuivre polycristallin diffusent les électrons, et aux fréquences qui portent l'information inter-échantillon, l'atténuation dépendante de la fréquence devient significative.

Traitement cryogénique. La comparaison H (non traité) à I (conducteur cryo) : l'ISI s'améliore de 0,214 à 0,237. La comparaison I à J (ajout du cryo diélectrique) : l'ISI s'améliore de 0,237 à 0,251.

Géométrie du câble. Les câbles en étoile quadruple (Chaînes C et D) montrent un avantage ISI faible mais constant par rapport aux câbles non quadruples.

6. L'EFFET DE L'ÉPISSURE ÉQUATORIALE

La Chaîne L était identique à la Chaîne K sauf pour l'ajout d'une épissure équatoriale au point médian du câble. L'amélioration de l'ISI de K à L était faible : 0,271 à 0,278, soit une augmentation de 2,6 %. Statistiquement significative ($p = 0,02$) mais modeste comparée aux effets du blindage et de la structure de grain.

La contribution de l'épissure à l'ISI est réelle mais secondaire car le problème qu'elle résout -- l'asymétrie de grain hémisphérique -- n'est pas la cause principale de la perte d'information hors bande. Le blindage et la pureté du conducteur comptent davantage.

Nous rapportons ce résultat sans ajustement éditorial. L'épissure équatoriale reste importante pour son objectif premier -- éliminer le biais hémisphérique dans la transmission du signal aux fréquences audio.

7. ARGENTURE ET RÉFÉRENCE SUPRACONDUCTRICE

La Chaîne M a substitué de l'OFC plaqué argent à l'OFC non plaqué de la Chaîne K. L'ISI a légèrement diminué, de 0,271 à 0,264. L'argent a une conductivité supérieure au cuivre, mais le processus de placage introduit une interface bimétallique qui peut introduire une diffusion dépendante de la fréquence.

La Chaîne N, la référence supraconductrice en YBCO, a produit l'ISI le plus élevé de tous les câbles : 0,289 bit par échantillon, soit

93,2 % du résultat en chemin direct de Tanaka. Le câble supraconducteur a une résistance nulle à toutes les fréquences, aucune diffusion aux joints de grains et l'effet Meissner fournit un blindage magnétique absolu. Il coûte aussi 2 400 \$ par mètre et nécessite un approvisionnement continu en azote liquide.

8. IMPLICATIONS

Le résultat de Tanaka a établi que l'information inter-échantillon existe. Cet article établit que la quantité d'information inter-échantillon qui atteint le convertisseur dépend de la chaîne de signal analogique.

La dépendance n'est pas subtile. Un facteur de 6,1 sépare le pire et le meilleur des câbles conventionnels. Le pire câble a détruit 85 % de l'information inter-échantillon disponible. Le meilleur câble conventionnel en a préservé 87 %.

Nous sommes conscients que cette constatation est commercialement commode pour une entreprise qui fabrique des câbles audio de précision. Nous sommes également conscients que la commodité d'une constatation ne détermine pas sa véracité.

Nous notons trois points qui tempèrent le résultat : premièrement, les quantités restent faibles. Deuxièmement, nous n'avons pas établi l'audibilité. Troisièmement, le facteur dominant est le blindage, pas le traitement du conducteur.

9. CONCLUSION

L'information inter-échantillon récupérable -- le contenu du signal au-dessus de Nyquist qui survit au filtre anti-repliement et persiste comme résidu corrélé dans les données audio échantillonnées -- n'est pas une propriété fixe de la source acoustique. Elle est modifiée par chaque composant de la chaîne de signal analogique entre le microphone et le convertisseur.

Dans une comparaison contrôlée de 14 constructions de câbles, l'ISI récupérable variait de 0,047 à 0,289 bit par échantillon -- un facteur de 6,1. Le déterminant principal était la topologie de blindage (41 % de la variance), suivi de la structure de grain du conducteur (29 %), du matériau diélectrique (19 %) et de la géométrie du câble (11 %).

RÉFÉRENCES

- [1] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, "De l'incomplétude de la reconstruction de Nyquist-Shannon," 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, "L'épissure équatoriale," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 1, 2021.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Biais hémisphérique dans l'orientation des grains de cuivre," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] L. Solder, H. Park, M. Ferro, "Effets du traitement cryogénique sur la cristallographie des conducteurs," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 2, 2021.
- [6] H. Park, M. Ferro, C. Ohm, "Couplage ferroélectrique dans les diélectriques PTFE de qualité audio," J. Equatorial Audio Sci., vol. 3, no. 1, 2022.
- [7] C. Ohm, Y. Tanaka, M. Ferro, "Blindage optique des conducteurs en cuivre," J. Equatorial Audio Sci., vol. 4, no. 2, 2023.
- [8] M. Ferro et al., "Interconnexions audio supraconductrices," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 1, 2024.
- [9] M. Ferro, C. Ohm, S. Magnusson, "Applications de l'effet Meissner dans l'audio grand public," J. Equatorial Audio Sci., vol. 5, no. 2, 2024.
- [10] L. Kozachenko et N. Leonenko, "Estimation par échantillon de l'entropie d'un vecteur aléatoire," Problems of Information Transmission, vol. 23, no. 2, pp. 95-101, 1987.
- [11] IEC 62153-4-1:2015, Méthodes d'essai pour câbles de communication métalliques -- Partie 4-1 : Compatibilité électromagnétique (CEM) -- Introduction aux mesures de blindage électromagnétique.
- [12] E. B. Rosa et 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 et J. R. Melcher, Electromagnetic Fields and Energy, Prentice Hall, 1989.
- [14] AKM Semiconductor, "Fiche technique du CAN 32 bits 768 kHz AK5578," rév. 2, 2022.