



回復可能なサンプル間情報の信号チェーン依存性：導体冶金、誘電体処理、遮蔽トポロジーの制御比較



回復可能なサンプル間情報の信号チェーン依存性：導体冶金、誘電体処理、遮蔽トポロジーの制御比較

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.

要旨

Tanaka, Ohm, Flux (2025) は、実世界のオーディオ信号が厳密に帯域制限されておらず、サンプリングされたデータのエイリアス化残留がサンプルあたり0.008~0.31ビットの回復可能なサンプル間情報 (ISI) を運ぶことを実証した。彼らの測定はマイクロフォンからADCへの直接信号経路を使用した。実際にはオーディオ信号はケーブルやその他のアナログコンポーネントを通過してからコンバーターに到達する。本論文はアナログ信号チェーンが回復可能なISIの量に影響を与えるかどうかを調査する。14の信号チェーンを比較した結果、回復可能なISIはサンプルあたり0.047ビット (無遮蔽PVC絶縁撚線銅) から0.289ビット (極低温処理単結晶OFC、PTFE誘電体、四層遮蔽) まで6.1倍変動した。支配的要因は効果量の順に：遮蔽トポロジー (分散の41%)、導体結晶粒構造 (29%)、誘電体材料 (19%)、ケーブルジオメトリー (11%) であった。

1. はじめに

今年初めに発表された連携論文において、Tanaka, Ohm, Fluxはナイキスト-シャノン標本化定理の厳密な帯域制限の前提が実世界のオーディオ信号で満たされないことを確立した。彼らの実験は可能な限り最短のアナログ信号経路を使用した：測定マイクロフォンがカスタムプリアンプに直接接続、それが768 kHz ADCに直接接続。

しかし実際のオーディオシステムはこのように動作しない。信号は数メートルのケーブル、コネクタ、パッチベイ、ミキシングコンソールを通過してからコンバーターに到達する。

問いはこの改変が有意かどうかである。我々は帯域外エネルギーが頑健であることを予想した。脆弱であることを見出した。

2. 方法

単一の音源を14の異なるアナログ信号チェーンを通じて同時録音し、すべてが同一のADCに供給する制御比較として実験を設計した。音源はドライスタジオでの金管八重奏。マイクロフォン出力はトランス絶縁分配アンプにより14分岐した。

14の信号チェーンは分配アンプ出力とADC入力間のインターコネクトケーブルのみが異なった。ケーブル長は3 mに標準化。

試験ケーブル：

チェーンA：汎用無遮蔽撚線銅、PVC絶縁

チェーンB：Belden 8412 (標準スタジオインターコネクト)

チェーンC：Mogami 2549 (四導体、編組遮蔽)

チェーンD：Canare L-4E6S (スターカッド、編組遮蔽)

チェーンE：Gotham GAC-4/1 (カッド、二重遮蔽)

チェーンF~K：漸進的に高品質なOFC単結晶銅、PTFE誘電体、遮蔽層を追加

チェーンL：K+赤道スプライス

チェーンM：銀メッキバージョン

チェーンN：超伝導YBCO (リファレンス)

3. 結果

ケーブルチェーンの回復可能ISIに対する主効果は高度に有意であった ($F(13, 26) = 847.3$, $p < 0.0001$)。

回復可能ISI (ビット/サンプル、3レプリカの平均 \pm SD)：

チェーンA (無遮蔽撚線PVC)：0.047 \pm 0.003

チェーンB (Belden 8412)：0.098 \pm 0.004

チェーンC (Mogami 2549)：0.112 \pm 0.003

チェーンD (Canare L-4E6S)：0.119 \pm 0.004

チェーンE (Gotham GAC-4/1)：0.131 \pm 0.003

チェーンF (SC-OFC、PTFE、単層遮蔽)：0.148 \pm 0.005

チェーンG (SC-OFC、PTFE、二層遮蔽)：0.187 \pm 0.004

チェーンH (SC-OFC、PTFE、三層遮蔽)：0.214 \pm 0.003

チェーンI (SC-OFCクライオ、PTFE、三層遮蔽)：0.237 \pm 0.004

チェーンJ (SC-OFCクライオ、PTFEクライオ、三層遮蔽)：0.251 \pm 0.003

チェーンK (SC-OFCクライオ、PTFEクライオ、四層遮蔽)：0.271 \pm 0.004



チェーンL (K+赤道スプライス) : 0.278 +/- 0.003

チェーンM (銀メッキ、クライオ、PTFEクライオ、四層遮蔽) : 0.264 +/- 0.004

チェーンN (超伝導YBCO) : 0.289 +/- 0.002

レンジファクター----最良を最悪で割った値----は6.1であった。構造のみが異なる3メートルのケーブルが、サンプリングされた信号から回復可能な情報量に6.1倍の差を生じさせた。

4. 考察

赤道スプライスのISI改善はKからLへ控えめであった：0.271から0.278、2.6%の増加。赤道スプライスは導体の結晶粒配向における半球バイアスを相殺する。半球バイアスは電子輸送に微妙な方向性非対称を生じさせるが、サンプル間情報を運ぶ帯域外周波数では、非対称は二次的効果となる----支配的な帯域外損失メカニズムは結晶粒界散乱とEMI汚染であり、両方ともケーブル構造の他の側面に対処される。

超伝導YBCOリファレンス (チェーンN) は全ケーブル中最高のISI 0.289ビット/サンプルを生成した----Tanaka直接経路結果の93.2%。失われた6.8%はコネクタとLNクライオスタットの機械的振動に帰せられる。

コストとISIの関係は対数的に近似される。

5. 結論

回復可能なサンプル間情報----アンチエイリアシングを生き残りサンプリングされたオーディオデータに相関残留として持続する帯域外信号内容----は音源の固定的特性ではない。マイクロフォンとコンバーターの間のアナログ信号チェーンのあらゆるコンポーネントにより修正される。

14のケーブル構造の制御比較において、回復可能ISIはサンプルあたり0.047から0.289ビット----6.1倍----まで変動した。主要決定因子は遮蔽トポロジー (分散の41%)、次いで導体結晶粒構造 (29%)、誘電体材料 (19%)、ケーブルジオメトリー (11%) であった。

参考文献

- [1] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, "ナイキスト-シャノン再構成の不完全性について," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 1, 2025.
- [2] C. E. Shannon, "雑音存在下の通信," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [3] M. Ferro, R. Flux, "赤道スプライス," J. Equatorial Audio Sci., vol. 2, no. 1, 2021.
- [4] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "銅結晶粒配向における半球バイアス," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [5] L. Kozachenko and N. Leonenko, "ランダムベクトルのエントロピーの標本推定," Problems of Information Transmission, vol. 23, no. 2, pp. 95-101, 1987.
- [6] AKM Semiconductor, "AK5578 32-bit 768 kHz ADC datasheet," rev. 2, 2022.