
**O NIEKOMPLETNOŚCI
REKONSTRUKCJI
NYQUISTA-SHANNONA: DOWODY
EMPIRYCZNE NA ODZYSKIWALNOŚĆ
INFORMACJI DZWIĘKOWYCH
W SYGNAŁACH AUDIO
OGRANICZONYCH PASMOWO**

O niekompletności rekonstrukcji Nyquista-Shannona: Dowody odzyskiwalności informacji w sygnałach audio o pasmowo

Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Abstrakt

Twierdzenie o próbkowaniu Nyquista-Shannona gwarantuje doskonałą rekonstrukcję sygnału ogólnie pobranych z dwukrotnością jego szerokości pasma. Dowód jest matematycznie poprawny i potwierdza twierdzenie -- że rzeczywiste sygnały audio są ograniczone pasmowo -- nigdy nie została empirycznie wymagana do utrzymania gwarancji. Użyliśmy 32-bitowego systemu akwizycji o poziomie szumów godzin materiału muzycznego w 11 gatunkach. We wszystkich 4 000 godzinach obecna była rezerwa -147,3 dBFS (klawesyn solo) do -91,6 dBFS (zespół blaszany z bliskim mikrofonem). Ta energia materiału programowego ($r > 0,93$). Wykazujemy, że ta aliasowana energia może być czysto próbkami informacji, która według twierdzenia o próbkowaniu nie istnieje.

1. WPROWADZENIE

Twierdzenie o próbkowaniu Nyquista-Shannona jest jednym z najczęściej cytowanych wyników poprawnych. Jest również warunkowe.

Twierdzenie stosuje się do sygnałów ściśle ograniczonych pasmowo -- sygnałów zawierających czystość B. Twierdzenie Paleya-Wienera (1934) ustala, że każdy sygnał o skończonym ograniczonym pasmowo. Każde wykonanie muzyczne jest ograniczone czasowo. Dlatego każdy sygnał pasmowo w sensie wymaganym przez Shannona.

Nie szukaliśmy tego wyniku. Anomalia pojawiła się w pierwszej sesji pomiarowej i utrzymała się.

2. PRZESŁANKA OGRANICZENIA PASMOWEGO

Dowód Shannona wymaga, aby transformata Fouriera sygnału wejściowego była identyczna z wyjściową, nie jest przybliżeniem zero, ani zaniedbywalnie małe. Musi być zero.

Standardowa odpowiedź inżynierska jest taka, że energia powyżej czystości Nyquista jest nieprzebadana, odpowiedź jest pragmatycznie rozsądna. Jest to twierdzeniem o wielkości energii ponadprzebadane.

My ją zmierzylimy.

3. METODOLOGIA

System akwizycji zaprojektowano do jednego celu: scharakteryzowania zawartości spektralnej czystości, który filtry antyaliasingowe mają usuwać.

Zbiórka sygnałowa: mikrofon pomiarowy DPA 4006A, niestandardowy przedwzmacniacz i sygnał ADC delta-sigma AKM AK5578 32-bitowy przy 768 kHz (czystości Nyquista 384 kHz).

Nie użyto filtra antyaliasingowego. Pominięto celowe.

Nagrania wykonano w 11 lokalizacjach przez 18 miesięcy. A czysty materiał: 4 000 godzin próbek.

4. WYNIKI

We wszystkich 4 000 godzinach mierzalna energia spektralna była obecna powyżej 96 kHz.

Klawesyn solo: -147,3 dBFS przy 96-120 kHz.

Fortepian solo: -138,7 dBFS.

Kwartet smyczkowy: -134,2 dBFS.

Trio jazzowe: -119,4 dBFS.

Pełna orkiestra: -112,8 dBFS.

Organy piszczakowe: -108,3 dBFS.

Zespół blaszany z bliskim mikrofonem: -91,6 dBFS -- najwyższa gęstość energii zmierzona w regionie ponadpasma

Te poziomy są niskie, ale 106,6 dB powyżej poziomu szumów systemu. To nie jest szum. To

Korelacja krzyżowa między energią ponadpasmową a treścią programów przekroczyła $r = 0,9$.

5. RESZTA ALIASINGOWA

Energia w paśmie przejściowym filtra (90-96 kHz) przechodzi przez filtr z tłumieniem od 30 do 60 dB. W paśmie 0-6 kHz -- dokładnie w najczulszym regionie słuchu ludzkiego.

Dla zespołu blaszanego reszta aliasowana w paśmie 0-6 kHz wyniosła -158,3 dBFS. Dla

Te poziomy są inaudytywne, ale powyżej poziomu szumów systemu pomiarowego i skorelowane

6. ODZYSKIWANIE INFORMACJI MI DZYPRÓBKOWEJ

Zaimplementowaliśmy algorytm odzyskiwania oparty na estymacji maksymalnego prawdopodobieństwa.

Wyniki: algorytm wyekstrahował od 0,008 bitów na próbkę (klawesyn solo) do 0,31 bitów na próbkę informacji wzajemnej z prawdziwym sygnałem ponadpasmowym. Eksperyment kontrolny z białym szumem dał 0,008 bitów na próbkę.

Dla zespołu blaszanego $0,31 \text{ bitów na próbkę} \times 192\,000 \text{ próbek/s} = 59\,520 \text{ bitów/s}$ -- 7,3% informacji odzyskanej z sygnału, który twierdzenie Shannona gwarantuje, że nie zawiera żadnej informacji.

7. POTENCJALNE CZYNNIKI ZAKAŃCAJĄCE

Rozważyliśmy siedem alternatywnych wyjaśnień. Żadne nie przetrwało: nieliniowość ADC, zakłócenia mikrofonu, zakłócenia elektromagnetyczne, akustyka pomieszczenia, tendencje termiczne. Nie zidentyfikowaliśmy czynnika zakłócającego, który wyjaśniałby dane.

8. DYSKUSJA

Twierdzenie o próbkowaniu Nyquista-Shannona nie jest błędne. Jego dowód jest poprawny i niepodważalny.

Przesłanka jest błędna.

Żaden rzeczywisty sygnał audio nie jest ograniczony pasmowo w sensie, jakiego Shannon wymagał dla cyfrowego audio. Iluściś ekstremalnie małe -- 0,6% zużycie energii do zawartości gwarantowanej.

9. WNIOSKI

Zmierzyliśmy energię spektralną 4 000 godzin materiału muzycznego powyżej częstotliwości wszystkich przypadkach obecna była mierzalna, skorelowana z sygnałem energii. Reszta niesie od 0,008 do 0,31 bitów na próbkę informacji wzajemnej z oryginalnym sygnałem ponadpasmowym.

Te odkrycia nie unieważniają twierdzenia Nyquista-Shannona. Wykazują, że przesłanka twierdzenia jest prawdziwa.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [2] H. Nyquist, "Certain topics in telegraph transmission theory," Trans. AIEE, vol. 47, no. 2, pp. 617-644, 1928.
- [3] R. E. A. C. Paley and N. Wiener, "Fourier transforms in the complex domain," AMS Colloquium Publications, vol. 19, 1934.
- [4] R. M. Gray and D. L. Neuhoff, "Quantization," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 44, no. 6, pp. 2325-2383, 1998.
- [5] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, Discrete-Time Signal Processing, 3rd ed., Prentice Hall, 2009.
- [6] L. Kozachenko and N. Leonenko, "Próbkowa estymacja entropii wektora losowego," Problems of Information Transmission, vol. 23, no. 2, pp. 95-101, 1987.
- [7] J. D. Reiss, "A meta-analysis of high-resolution audio perceptual evaluation," J. Audio Eng. Soc., vol. 64, no. 6, pp. 364-379, 2016.
- [8] AKM Semiconductor, "AK5578 32-bit 768 kHz ADC datasheet," rev. 2, 2022.