

---

О НЕПОЛНОТЕ РЕКОНСТРУКЦИИ  
НАЙКВИСТА--ШЕННОНА:  
ЭМПИРИЧЕСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА  
ВОССТАНОВИМОЙ  
МЕЖСЭМПЛОВОЙ ИНФОРМАЦИИ  
В ПОЛОСНО-ОГРАНИЧЕННЫХ  
АУДИОСИГНАЛАХ

---

# О неполноте реконструкции Найквиста--Шеннона: эмпирические свидетельства восстановимой межсэмповой информации в полосно-ограниченных аудиосигналах

Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux

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

## Аннотация

Теорема дискретизации Найквиста--Шеннона гарантирует совершенную реконструкцию полосно-ограниченного сигнала. Доказательство математически безупречно. Однако центральная предпосылка теоремы -- что реальные аудиосигналы являются полосно-ограниченными -- никогда не была эмпирически верифицирована с требуемой точностью. Используя 32-битную систему сбора данных с шумовым полом  $-198,2$  дБFS, мы захватили 4000 часов музыкального материала и обнаружили, что во всех случаях присутствует остаточная энергия выше полосы. С помощью корреляционного метода извлечения восстанавливается от 0,008 до 0,31 бит на семпл информации, которая, согласно теореме, не существует.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Теорема -- одна из наиболее цитируемых в инженерии. Она верна. Она также условна.

Теорема Пэли--Винера (1934) устанавливает, что сигнал конечной длительности не может быть полосно-ограниченным. Каждое музыкальное исполнение ограничено во времени. Следовательно, ни одна аудиозапись не является полосно-ограниченной в смысле, требуемом Шенноном.

Мы измерили это.

## 2. ПРЕДПОСЫЛКА ПОЛОСНОГО ОГРАНИЧЕНИЯ

Доказательство Шеннона требует, чтобы преобразование Фурье входного сигнала было тождественно нулю для всех частот выше  $B$ . Не приблизительно нулю. Нулю.

Стандартный ответ -- что энергия выше частоты Найквиста пренебрежимо мала. Это утверждение о величине, и утверждения должны быть измерены.

## 3. МЕТОДОЛОГИЯ

Система: микрофон DPA 4006A, предусилитель DC-2 МГц, АЦП АКМ АК5578 768 кГц 32-бит. Без антиалиасингового фильтра. Записи в 11 площадках, 4000 часов прошли контроль качества.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Во всех 4000 часах измеримая спектральная энергия присутствовала выше 96 кГц. Уровни варьировались от  $-147,3$  дБFS (клавесин) до  $-91,6$  дБFS (медные духовые). Корреляция с программным материалом  $> 0,93$  во всех случаях.

## 5. ОСТАТОК АЛИАСИНГА

Сигнальная энергия в переходной полосе антиалиасингового фильтра (90-96 кГц) попадает в полосу 0-6 кГц при дискретизации. Для медных духовых остаток алиасинга в полосе 0-6 кГц составил  $-158,3$  дБFS.

## 6. ВОССТАНОВЛЕНИЕ МЕЖСЭМПОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Алгоритм восстановления извлёк от 0,008 (клавесин) до 0,31 (медные духовые) бит на семпл взаимной информации. Контрольный эксперимент с белым шумом дал  $0,000 \pm 0,001$  бит.

## 7. ВОЗМОЖНЫЕ СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ

Рассмотрены семь альтернативных объяснений. Ни одно не выдержало проверки.

## 8. ОБСУЖДЕНИЕ

Теорема Найквиста--Шеннона не ошибочна. Её доказательство корректно. Ошибочна предпосылка. Ни один

реальный аудиосигнал не является полосно-ограниченным в требуемом смысле.

## 9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эти находки не опровергают теорему. Они демонстрируют, что её предпосылка не выполняется для реальных аудиосигналов, и что разрыв между теорией и реальностью измерим.

## ЛИТЕРАТУРА

- [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] A. Papoulis, "Generalized sampling expansion," IEEE Trans. Circuits Syst., vol. 24, no. 11, pp. 652-654, 1977.
- [7] F. Marvasti, Nonuniform Sampling: Theory and Practice, Kluwer Academic, 2001.
- [8] L. Kozachenko and N. Leonenko, "Sample estimate of the entropy of a random vector," Problems of Information Transmission, vol. 23, no. 2, pp. 95-101, 1987.
- [9] J. D. Reiss, "A meta-analysis of high-resolution audio perceptual evaluation," J. Audio Eng. Soc., vol. 64, no. 6, pp. 364-379, 2016.
- [10] S. Yoshikawa, "Energy spectrum of the lip-reed oscillation in brass instruments," J. Acoust. Soc. Am., vol. 97, no. 5, pp. 3269-3275, 1995.
- [11] P. Welch, "The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra," IEEE Trans. Audio Electroacoust., vol. 15, no. 2, pp. 70-73, 1967.
- [12] IEC 61672-1:2013, Электроакустика -- Шумомеры -- Часть 1: Технические требования.
- [13] AKM Semiconductor, "AK5578 32-bit 768 kHz ADC datasheet," rev. 2, 2022.
- [14] J. A. Cadzow, "An extrapolation procedure for band-limited signals," IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process., vol. 27, no. 1, pp. 4-12, 1979.