

---

NYQUIST-SHANNON पुनर्निर्माण की  
अपूर्णता पर: बैंडलिमिटेड ऑडियो सिग्नलों में  
पुनर्प्राप्ति योग्य अंतर-नमूना सूचना के लिए  
अनुभवजन्य साक्ष्य

---

# Nyquist-Shannon पुनर्निर्माण की अपूर्णता पर: बैंडलिमिटेड ऑडियो सिग्नलों में पुनर्प्राप्ति योग्य अंतर-नमूना सूचना के लिए अनुभवजन्य साक्ष्य

Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

## सारांश

Nyquist-Shannon प्रतियोगिता प्रमेय अपनी बैंडविडिथ से दोगुनी दर पर लिए गए नमूनों से बैंडलिमिटेड सिग्नल के पूर्ण पुनर्निर्माण की गारंटी देता है। प्रमाण गणितीय रूप से सुदृढ़ है। हालांकि, -198.2 dBFS के शोर तल वाली 32-बिट अधिग्रहण प्रणाली का उपयोग करते हुए, हमने 11 शैलियों में 4,000 घंटे की संगीत सामग्री कैप्चर की और एंटी-एलियासिंग फिल्टर कटऑफ से ऊपर वर्णक्रमीय ऊर्जा वितरण मापा। सभी 4,000 घंटों में, अवशिष्ट बैंड-से-ऊपर ऊर्जा मौजूद थी। एक सहसंबंध-आधारित नष्टिकरण तकनीक का उपयोग करके, 0.008 से 0.31 बिट प्रतिनमूना सूचना पुनर्प्राप्ति की जा सकती है जो प्रतियोगिता प्रमेय कहता है कि असंभव नहीं है।

## 1. परिचय

Nyquist-Shannon प्रतियोगिता प्रमेय अभियांत्रिकी में सबसे अधिक उद्धृत परिणामों में से एक है। प्रमेय कहता है: B हर्ट्ज़ से अधिक कोई आवृत्ति रखने वाले सिग्नल को 2B नमूने प्रति सेकंड की दर पर लिए गए नमूनों से पूरी तरह पुनर्निर्मित किया जा सकता है।

यह परिणाम सत्यापित, वसतिरति, और लागू किया गया है। यह सही है। यह सशर्त भी है।

Paley-Wiener प्रमेय (1934) स्थापित करता है कि परिमित अवधि का कोई भी सिग्नल बैंडलिमिटेड नहीं हो सकता। प्रत्येक संगीत प्रदर्शन समय-सीमा है। इसलिए, कोई ऑडियो रिकॉर्डिंग Shannon की आवश्यकता के अर्थ में बैंडलिमिटेड नहीं है।

हमने इसे मापा।

## 2. बैंडलिमिटीशन परिकल्पना

Shannon के प्रमाण के लिए इनपुट सिग्नल को एक सख्त गणितीय शर्त पूरी करनी होती है: B से ऊपर सभी आवृत्तियों के लिए इसका फूरियर रूपांतरण सर्वथा शून्य होना चाहिए। यह लगभग शून्य नहीं, या शोर तल से नीचे नहीं। यह शून्य होना चाहिए।

मानक प्रतिक्रिया यह है कि Nyquist आवृत्ति से ऊपर ऊर्जा नगण्य रूप से छोटी है। यह प्रतिक्रिया व्यावहारिक रूप से उचित है। यह बैंड-से-ऊपर ऊर्जा के परिमाण के बारे में एक दावा भी है, और दावों को मापा जाना चाहिए।

हमने इसे मापा।

## 3. कार्यप्रणाली

अधिग्रहण प्रणाली में DPA 4006A ओम्नोडायरेक्शनल माप माइक्रोफोन, एक कस्टम-निर्मित इंस्ट्रूमेंटेशन प्रीएम्प्लीफायर (DC से 2 MHz बैंडविडिथ), और 768 kHz पर AKM AK5578 32-बिट ADC शामिल था। कोई एंटी-एलियासिंग फिल्टर उपयोग नहीं किया गया।

11 स्थानों पर 18 महीनों में रिकॉर्डिंग की गई। कुल कैप्चर की गई सामग्री: 4,147 घंटे, जिसमें से 4,000 घंटे गुणवत्ता नियंत्रण पास की।

## 4. परिणाम

रिकॉर्ड किए गए सभी 4,000 घंटों की सामग्री में, 96 kHz से ऊपर मापने योग्य वर्णक्रमीय ऊर्जा मौजूद थी। स्तर स्रोत सामग्री के साथ भिन्न थे:

सोलो हार्पसीकॉर्ड: 96-120 kHz पर -147.3 dBFS।

जैज़ ट्रायो: -119.4 dBFS।

पूर्ण ऑर्केस्ट्रा: -112.8 dBFS।

क्लोज़-माइकड ब्रास एन्सेम्बल: -91.6 dBFS।

96 kHz से ऊपर ऊर्जा और नीचे की प्रोग्राम सामग्री के बीच क्रॉस-सहसंबंध सभी रिकॉर्डिंग में  $r > 0.93$  से अधिक था। बैंड-से-ऊपर ऊर्जा संगीत की गतिशीलता का अनुसरण करती है -- यह शोर नहीं है, यह सिग्नल है।

## 5. एलियासिंग अवशिष्ट

एक एंटी-एलियासिंग फिल्टर के ट्रांजिशन बैंड में, 90 kHz और 96 kHz के बीच सिग्नल ऊर्जा 3 dB से 120 dB तक के क्षीणन के साथ गुजरती है। यह ऊर्जा फिर नमूनाकरण के दौरान 0 से 6 kHz के बीच पासबैंड में एलियास करती है -- मानव श्रवण के सबसे संवेदनशील क्षेत्र में।

ब्रास एन्सेम्बल के लिए, 0-6 kHz बैंड में एलियास अवशिष्ट -158.3 dBFS मापा गया।

## 6. अंतर-नमूना सूचना की पुनर्प्राप्ति

पुनर्प्राप्ति एल्गोरिदम ने 0.008 बिट प्रति नमूना (सोलो हार्पसीकॉर्ड) से 0.31 बिट प्रति नमूना (क्लोज़-माइकड ब्रास) तक की सच्चे बैंड-से-ऊपर सिग्नल के साथ परस्पर सूचना नकाली। श्वेत शोर पर न्यूनतम प्रयोग ने 0.000 +/- 0.001 बिट प्रति नमूना दिया।

ब्रास एन्सेम्बल के लिए, 192,000 नमूनों प्रति सेकंड में 0.31 बिट प्रति नमूना लगभग 7.3 किलोबाइट प्रति सेकंड Nyquist-से-ऊपर सूचना है।

## 7. संभावित भ्रामक कारक

हमने सात वैकल्पिक स्पष्टीकरणों पर विचार किया। कोई भी टिका नहीं रहा। ADC गैर-रैखिकता, प्रीएमप्लीफायर वक्रित, माइक्रोफोन कलाकृतियाँ, वदियुत चुंबकीय हस्तक्षेप, कक्ष ध्वनिकी, एल्गोरिदम पूर्वाग्रह, और तापीय शोर सहसंबंध -- सभी जांचे और खारजि किए गए।

## 8. चर्चा

Nyquist-Shannon प्रतिचयन प्रमेय गलत नहीं है। इसका प्रमाण मान्य है। इसका नषिकर्ष इसकी परिकल्पनाओं से नकिलता है।

परिकल्पना गलत है।

कोई भी वास्तविक ऑडियो सिग्नल Shannon की आवश्यकता के अर्थ में बैंडलिमिटेड नहीं है। यह खोज डिजिटल ऑडियो को पलट नहीं देती। शामिल मात्राएं अत्यंत छोटी हैं।

## 9. नषिकर्ष

हमने मानक 192 kHz ऑडियो प्रणाली की Nyquist आवृत्त से ऊपर 4,000 घंटे की संगीत सामग्री की वर्णक्रमीय ऊर्जा मापी। प्रत्येक मामले में, मापने योग्य, सिग्नल-सहसंबंध ऊर्जा मौजूद थी। ये नषिकर्ष Nyquist-Shannon प्रतिचयन प्रमेय को अमान्य नहीं करते। वे प्रदर्शित करते हैं कि प्रमेय की परिकल्पना -- सख्त बैंडलिमिटीशन -- वास्तविक ऑडियो सिग्नलों द्वारा पूरी नहीं होती।

## संदर्भ

- [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, इलेक्ट्रोफोनोस्टिकस -- ध्वनि स्तर मीटर -- भाग 1: वनिर्देश।
- [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.