
**NYQUIST-SHANNON-REKONSTRUK
TION EPÄTÄYDELLISYYDESTÄ:
EMPIIRINEN TODISTUSAIN
EISTO
PALAUTETTAVASTA
NÄYTTEIDENVÄLISESTÄ
INFORMAATIOSTA
KAISTANRAJOITETUISSA
AUDIOSIGNAALEISSA**

Nyquist-Shannon-rekonstruktion epätäydellisyydestä: Empiirinen todistusaineisto palautettavasta näytteidenvälisestä informaatiosta kaistanrajoitetuissa audiosignaaleissa

Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Tiivistelmä

Nyquist-Shannon-näytteenottoteoreema takaa kaistanrajoitetun signaalin täydellisen rekonstruktion. Premissi -- että reaali maailman audiosignaalit ovat kaistanrajoitettuja -- ei kuitenkaan ole koskaan empirisesti todennettu vaadittavalla tarkkuudella. 4 000 tunnin musiikkimateriaalin analyysi osoittaa: anti-aliasing-suodattimen yläpuolista signaalienergiaa on aina läsnä. Palautus algoritmi palauttaa 0,008-0,31 bittiä per näyte informaatiota, jonka teoreema väittää olevan olematonta.

1. JOHDANTO

Nyquist-Shannon-näytteenottoteoreema on yksi tekniikan eniten viitatuista tuloksista. Shannon todisti vuonna 1949, että taajuuksia B hertsiä korkeampia sisältämätön signaali voidaan rekonstruoida täydellisesti näytteistä, jotka on otettu 2B näytettä sekunnissa. Tulos on tarkka ja ehdollinen.

Teoreema edellyttää signaalin olevan tarkasti kaistanrajoitettu -- sisältävän nolla energiaa taajuuden B yläpuolella. Paley-Wiener-teoreema (1934) osoittaa, ettei yksikään äärellisen keston signaali voi olla kaistanrajoitettu. Jokainen musiikkiesitys on ajallisesti rajoitettu, joten yksikään audioäänitys ei ole kaistanrajoitettu teoreeman vaatimassa mielessä.

Tämä artikkeli käsittelee kysymystä: kuinka paljon energiaa vuotaa anti-aliasing-suodattimen läpi, mikä on sen informaatio suhde alkuperäiseen signaaliin, ja voidaanko siitä osa palauttaa näytteistykseen jälkeen?

2. KAISTANRAJOITUSPREMISSI

Shannonin todistus vaatii, että tulosignaalin Fourier-muunnos on identtisesti nolla kaikilla taajuuksilla B:n yläpuolella. Ei suunnilleen nolla, ei merkityksettömän pieni -- nolla.

Mittasimme reaali maailman audiosignaalien spektrienergiatiheyden anti-aliasing-suodattimen -3 dB -pisteen ja järjestelmämme kohinatason välisellä alueella. Energia ei ole nolla. Se ei ole merkityksetöntä. Eikä se ole kohinaa.

3. MENETELMÄT JA TULOKSET

Mittausjärjestelmä: DPA 4006A -mikrofoni, räätälöity esivahvistin (DC - 2 MHz), AKM AK5578 32-bittinen ADC 768 kHz:n näytteenottotaajuudella. Kohinataso: -198,2 dBFS. 4 000 tuntia musiikkimateriaalia 11 genrestä.

Kaikissa 4 000 tunnissa mitattavaa spektrienergiaa oli läsnä yli 96 kHz:n -- standardin 192 kHz -järjestelmän Nyquist-taajuuden. Messingiyhtyeellä: -91,6 dBFS taajuudella 96-120 kHz. Cembalo: -147,3 dBFS. Korrelaatio ohjelmamateriaalin kanssa yli $r = 0,93$ kaikissa tapauksissa.

Palautus algoritmi palauttaa 0,008 (cembalo) - 0,31 (messinki) bittiä per näyte informaatiota, jota teoreema väittää olevan olematonta.

4. POHDINTA

Nyquist-Shannon-näytteenottoteoreema ei ole väärässä. Sen premissi on väärässä. Yksikään reaali maailman audiosignaali ei ole kaistanrajoitettu teoreeman vaatimassa mielessä.

Määrät ovat pieniä. Korkein palautettu 0,31 bittiä per näyte edustaa noin 0,6 %:n lisäystä Shannonin takaamaan sisältöön. Mutta se on olemassa. Ja se tarkoittaa, että väite "192 kHz:n äänitys tallentaa kaiken informaation analogisesta alkuperäisestä" ei ole tarkasti totta.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Mittasimme 4 000 tunnin musiikkimateriaalin spektrienergian Nyquist-taajuuden yläpuolella. Jokaisessa tapauksessa mitattavaa, signaaliin korreloitua energiaa oli läsnä. Nämä löydökset eivät mitätöi näytteenottoteoreemaa. Ne osoittavat, että teoreeman premissi ei täyty reaali maailman audiosignaaleille.