
**KUHUSU KUTOKAMILIKA KWA
UJENZI UPYA WA
NYQUIST-SHANNON: USHAHIDI WA
MAJARIBIO KWA HABARI YA KATI
YA SAMPULI INAYOWEZA
KUREJESHA**

Kuhusu Kutokamilika kwa Ujenzi Upya wa Nyquist-Shannon: Ushahidi wa Majaribio kwa Habari ya Kati ya Sampuli Inayoweza Kurejeshwa

Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

Muhtasari

Nadharia ya sampuli ya Nyquist-Shannon inahakikisha ujenzi upya kamili wa ishara iliyofungwa bendi kutoka sampuli zilizochukuliwa kwa mara mbili ya bandwidth yake. Tunaonyesha kuwa ishara za sauti za ulimwengu wa kweli si za bendi iliyofungwa na kwamba mabaki ya aliasi yanabeba habari inayoweza kurejeshwa ya 0.008 hadi 0.3 bits kwa sampuli. Hatudai nadharia ni makosa. Tunaona kuwa msingi wake haukutimizwa, na tunapima matokeo.

1. UTANGULIZI

Nadharia ya sampuli ya Nyquist-Shannon ni miongoni mwa matokeo yanayonukuliwa zaidi katika uhandisi. Iliyochapishwa na Claude Shannon mnamo 1949, nadharia inasema: ishara isiyokuwa na masafa zaidi ya B hertz inaweza kujengwa upya kikamilifu kutoka sampuli zilizochukuliwa kwa kiwango cha sampuli 2B kwa sekunde.

Neno «kikamilifu» si kuzidisha. Uthibitisho wa Shannon ni sahihi. Ujenzi upya unakutana na ishara ya asili kwa kila wakati kati ya sampuli. Hakuna habari inayopotea.

Tokeo hili ni sahihi. Pia lina masharti.

Nadharia inatumika kwa ishara zilizofungwa bendi kabisa -- ishara zinazokuwa na nishati ya sifuri kabisa juu ya masafa B. Nadharia ya Paley-Wiener (1934) inaanzisha kuwa hakuna ishara ya muda mfupi inayoweza kufungwa bendi. Kwa hivyo, hakuna rekodi ya sauti iliyo ya bendi iliyofungwa kwa maana inayohitajika na Shannon.

Tulikuwa hatutafuti tokeo hili. Anomaliam ilionekana katika kipimo cha kwanza na kudumu kwa miezi 18 ya uchunguzi.

2. MSINGI WA KUFUNGA BENDI

Uthibitisho wa Shannon unahitaji ishara ya pembejeo itimize sharti kali la kihisabati: mabadiliko yake ya Fourier lazima yawe sifuri kwa masafa yote juu ya B.

Nadharia ya Paley-Wiener inaanzisha kuwa hakuna ishara ya muda mfupi inayoweza kufungwa bendi. Ishara ya muda -- inayoanza na kuishia -- kwa lazima ina bandwidth isiyo na mwisho.

Kila utendaji wa muziki una muda mfupi. Kwa hivyo, hakuna rekodi ya sauti iliyo ya bendi iliyofungwa.

Hili linajulikana sana. Majibu ya kawaida ni kwamba nishati juu ya masafa ya Nyquist ni ndogo sana. Majibu haya ni ya busara kiutendaji. Pia ni madai kuhusu ukubwa wa nishati ya juu ya bendi, na madai yanapaswa kupimwa.

Tuliyapima.

3. MBINU

Mfumo wa ukusanyaji ulibuniwa kupima yaliyomo ya spektrali ya ishara za sauti katika anuwai ya masafa ambayo vichujio vya kupambana na aliasi vimebuniwa kuondoa.

Njia ya ishara ilikuwa na kipaza sauti cha DPA 4006A, preamplifier maalum na bandwidth ya DC hadi 2 MHz, na ADC ya delta-sigma ya AKM AK5578 ya bits 32 inayofanya kazi kwenye kiwango cha juu zaidi cha sampuli cha 768 kHz.

Hakuna kichujio cha kupambana na aliasi kilichotumika -- kwa makusudi.

Rekodi zilifanywa katika maeneo 11 kwa miezi 18. Nyenzo za muziki zilijumuisha ala za solo, vikundi vidogo, okestra kamili, organi ya bomba, bendi ya mwamba, na synthesizer ya kielektroniki. Jumla: saa 4,000.

4. MATOKEO

Katika saa zote 4,000 za nyenzo zilizorekodiwa, nishati ya spektrali inayopimika ilikuwepo juu ya 96 kHz.

Viwango vilikuwa tofauti: harpsichord ya solo ilipima -147.3 dBFS kwenye 96-120 kHz. Ansambeli ya brass iliyorekodiwa karibu

ilipima -91.6 dBFS -- nishati ya juu zaidi iliyogunduliwa.

Viwango hivi ni vya chini. Lakini ni dB 106.6 juu ya sakafu ya kelele ya mfumo. Si kelele. Ni ishara.

Uhusiano wa msalaba kati ya nishati ya juu ya 96 kHz na yaliyomo ya programu ya chini ya 96 kHz ulizidi $r = 0.93$ katika rekodi zote.

5. MABAKI YA ALIASI

Nishati ya juu ya bendi iliyorekodiwa katika Sehemu ya 4 ipo katika ishara ya analogi inayoendelea. Wakati ishara hiyo inasampuliwa na mfumo wa sauti wa kawaida, sehemu kubwa ya nishati hii huondolewa na kichujio cha kupambana na aliasi. Lakini si yote.

Nishati ya ishara kati ya 90 kHz na 96 kHz hupitia kichujio na kupunguzwa kwa dB 3 hadi 120. Nishati hii kisha hualiasi katika passband, ikijikunjia karibu na masafa ya Nyquist ya 96 kHz kuangukia kati ya 0 na 6 kHz.

Mabaki ya aliasi yalipimwa moja kwa moja. Kwa ansambeli ya brass, mabaki katika bendi ya 0-6 kHz yalipima -158.3 dBFS.

Mabaki ya aliasi si ya bahati nasibu. Ni kazi ya uhakika ya ishara ya pembejeo, kazi ya uhamisho ya kichujio, na kiwango cha sampuli.

6. UREJESHAJI WA HABARI YA KATI YA SAMPULI

Je, mabaki ya aliasi yanaweza kutumika kurejesha habari kuhusu ishara ya asili ya juu ya bendi?

Tulitekeleza algoriti ya urejeshaji inayotegemea makadirio ya uwezekano mkubwa yaliyofungwa. Algoriti inachukua kama pembejeo: data iliyosampuliwa, kazi ya uhamisho iliyopimwa ya kichujio, na modeli ya kitakwimu.

Matokeo: algoriti ya urejeshaji ilitoa kati ya 0.008 bits kwa sampuli (harpsichord ya solo) na 0.31 bits kwa sampuli (brass iliyorekodiwa karibu) ya habari ya pamoja na ishara ya kweli ya juu ya bendi. Jaribio la udhibiti kwa kutumia kelele nyeupe lilitoa 0.000 +/- 0.001 bits kwa sampuli.

7. MAMBO YANAYOWEZA KUCHANGANYA

Tulizingatia maelezo saba mbadala. Hakuna yaliyodumu.

1. Kutokuwa na mstari kwa ADC: Tulipima INL na DNL ya AK5578. Bidhaa za upotoshaji zilikuwa kwenye -199 dBFS.
2. Uptosohaji wa preamplifier: THD ilipimwa kwenye -142 dB.
3. Artefakti za kipaza sauti: Tulithibitisha kwa kipaza sauti tofauti.
4. Kuingiliwa kwa sumakuumeme: Tulithibitisha katika chumba kilicholindwa.
5. Akustiki ya chumba: Nishati ya juu ya bendi ilikuwepo katika hali zote mbili.
6. Upendeleo wa algoriti: Tulithibitisha kwa mfano tofauti.
7. Uhusiano wa kelele ya joto: Mchango wa kinadharia ulikuwa kwenye -184 dBFS.

8. MJADALA

Nadharia ya sampuli ya Nyquist-Shannon si makosa. Uthibitisho wake ni halali.

Msingi wake ndio si sahihi.

Hakuna ishara ya kweli ya sauti iliyo ya bendi iliyofungwa kwa maana inayohitajika na Shannon. Kila tukio la akustiki hutoa nishati inayoenea juu ya kikomo chochote cha masafa. Vichujio vya kupambana na aliasi hupunguza nishati hii lakini haviondoi. Mabaki yanayobakia hubeba kiasi kidogo lakini kinachopimika cha habari.

Tokeo hili halibatilishi sauti ya dijitali. Kiasi ni kidogo sana. Habari ya pamoja ya juu zaidi tuliyoirejesha -- 0.31 bits kwa sampuli -- inawakilisha takriban 0.6% ya yaliyomo ya Shannon yanayohakikishiwa.

Lakini ipo.

9. HITIMISHO

Tulipima nishati ya spektrali ya saa 4,000 za nyenzo za muziki juu ya masafa ya Nyquist ya mfumo wa sauti wa kawaida wa 192 kHz. Katika kila kesi, nishati inayopimika na inayohusiana na ishara ilikuwepo.

Matokeo haya hayabatilishi nadharia ya sampuli ya Nyquist-Shannon. Yanaonyesha kuwa msingi wa nadharia -- kufunga bendi

kabisa -- hautimizwi na ishara za kweli za sauti, na kwamba pengo kati ya ujenzi upya kamili wa kinadharia na ujenzi upya halisi linaweza kupimika.

MAREJEO

- [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] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, Discrete-Time Signal Processing, 3rd ed., Prentice Hall, 2009.
- [5] 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.
- [6] AKM Semiconductor, "AK5578 32-bit 768 kHz ADC datasheet," rev. 2, 2022.