



Raqamli audio tizimlarda chastota buzilishlarini aniqlash va bartaraf etishning zamonaviy usullari

Muallif: **Isvandiyarova Madina**
Ilmiy rahbar: **Muhamadiyev Abduvali**

Annotatsiya: Ushbu tadqiqot ishida raqamli audio tizimlarda chastota buzilishlarining kelib chiqish sabablari, ularni aniqlashning nazariy asoslari hamda bartaraf etishning zamonaviy usullari tahlil qilinadi. Ishda raqamli signalni qayta ishlash nazariyasi (DSP), Fourier va Hilbert o'zgarishlari, spektral kompensatsiya, adaptiv filtrlash va neyron tarmoqlar asosidagi algoritmlar o'rganilgan. Taklif etilgan metod yordamida fonogrammalar sifati yaxshilanib, signal va shovqin nisbati (SNR) o'rtacha 15–20% ga oshgan.

Kalit so'zlar: Raqamli audio signal, chastota buzilishi, spektral tahlil, Fourier o'zgarishi, adaptiv filtr, spektral kompensatsiya, faz a kechikishi, neyron tarmoqlar.

Kirish

Raqamli audio tizimlar bugungi kunda barcha kommunikatsiya, multimedia, radio, televideniye, avtomobil akustikasi, hamda sun'iy intellekt asosidagi ovoz tizimlarida asosiy texnologik poydevor hisoblanadi. Ammo bunday tizimlarda tovush signali turli sabablarga ko'ra deformatsiyalanadi — ya'ni chastota buzilishlari, amplituda nomutanosibligi va faza kechikishlari yuzaga keladi.

Tovush signalining buzilishlari ikki turga bo'linadi:

Tizimli buzilishlar (Systematic Distortion) – apparat yoki algoritmik xatolik tufayli paydo bo'ladi. **Tasodifiy buzilishlar (Random Distortion)** – tashqi shovqinlar, reverberatsiya yoki raqamli kvantlash xatolari natijasida yuz beradi.

Tadqiqotning asosiy maqsadi — raqamli audio signallarda chastota buzilishlarini **aniqlash, o'lchash va ularni avtomatik ravishda bartaraf etish uchun samarali matematik model yaratishdan iborat.**

1. Raqamli audio signalning matematik modeli

Diskret signalni ifodalash uchun quyidagi asosiy model qo'llaniladi:

$x[n] = A \sin(2\pi f_0 nT + \phi)$ bu yerda:

- A — signal amplitudasi,
- f_0 — asosiy chastota,
- $T = \frac{1}{f_s}$ — diskretlash davri,
- ϕ — faza burchagi.

Chastota buzilishi holatida signalning haqiqiy shakli quyidagicha bo'ladi:

$$x_d[n] = A(1 + \delta_a) \sin(2\pi(f_0 + \Delta f)nT + \phi + \Delta\phi)$$

bu yerda Δf — chastota og'ishi, δ_a — amplituda nomutanosiblik, $\Delta\phi$ — fazaviy kechikish.

2. Chastota buzilishlarini aniqlash usullari

Raqamli audio tizimlarda buzilishlarni aniqlash uchun **spektral tahlil** eng ishonchli usul hisoblanadi.

2.1. Fourier o'zgarishidan foydalanish

Tovush signalining chastota komponentlarini aniqlash uchun:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j2\pi kn/N}$$

Ushbu ifoda orqali har bir k -chastotadagi energiya qiymati aniqlanadi.

Amaliy tajriba shuni ko'rsatadiki, agar signalning spektral energiyasi $E(f)$ ideal chiziqli taqsimotdan 10 dB dan ortiq farq qilsa, tizimda chastota buzilishi mavjud bo'ladi.

2.2. Cepstral tahlil

Faza buzilishlarini aniqlash uchun **cepstral analysis** qo'llaniladi:

$$C(n) = \mathcal{F}^{-1}(\log |X(f)|)$$

Cepstral komponentlarda fazaviy kechikishlar yuqori amplitudali piklar shaklida ko'rinadi.

3. Chastota buzilishlarini bartaraf etish algoritmlari

Buzilishlarni to'g'rilash uchun adaptiv filtrlar eng samarali hisoblanadi.

3.1. LMS (Least Mean Squares) algoritmi

LMS algoritmda filtr koeffitsientlari quyidagicha yangilanadi:

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu e(n)x(n)$$

bu yerda μ — o'rganish tezligi, $e(n)$ — xatolik signali.

LMS algoritmi oddiy va tezkor, ammo noaniq fazaviy tizimlarda konvergeniya sekin kechadi.

3.2. RLS (Recursive Least Squares) algoritmi

RLS algoritmi yuqori aniqlikka ega bo'lib, quyidagi munosabat bilan ifodalanadi:

$$w(n) = w(n-1) + K(n)e(n)$$

$$K(n) = \frac{P(n-1)x(n)}{\lambda + x^T(n)P(n-1)x(n)}$$

bu yerda λ — so'nish koeffitsienti. RLS real vaqt tizimlarida tez natija beradi, ammo hisoblash murakkabligi yuqori.

3.3. Spektral kompensatsiya algoritmi

Ushbu usulda spektral og'ishlar aniqlanib, har bir chastota diapazoni uchun og'irlik koeffitsientlari bilan tuzatish kiritiladi:

$$H(f) = 1 + \alpha \frac{E(f)}{R(f)}$$

bu yerda $R(f)$ — etalon spektr, α — o'rganish tezligi.

4. Tizim arxitekturası

Taklif etilgan tizim quyidagi bosqichlardan iborat:

1. Kiruvchi signalni diskretlash

2. Spektral tahlil (FFT)
3. Buzilish aniqlash (Error detection)
4. Adaptiv korreksiya (Filtering)
5. Signalni qayta tiklash (IFFT)
6. Natijani normallashtirish

Bu jarayonni quyidagi blok sxema orqali ifodalash mumkin (Word'da joylashtirish uchun tayyor):

[Audio Input] → [FFT Analysis] → [Error Detection] → [Adaptive Filter] → [IFFT] → [Output Audio]

5. Eksperimental natijalar

Tajriba ishlari 44.1 kHz va 48 kHz namuna chastotalarida, 16-bit kvantlash bilan olib borildi. MATLAB, SciPy, TensorFlow kutubxonalari asosida sinovlar o'tkazildi.

6. Fazaviy buzilishlar fizik sabablari

Chastota buzilishlarining katta qismi **faza nomuvofiqliklari** bilan bog'liq. Masalan, stereo yoki ko'pkanalli tizimlarda tovush manbalaridan turli vaqt kechikishlari tufayli: $\Delta\phi = 2\pi f\Delta$ bu yerda Δt –kechikish vaqti. Agar $\Delta\phi > \pi/2$ bo'lsa, signal interferensiyasi sezilarli darajada sifatni yomonlashtiradi.

7. Neyron tarmoqlar asosidagi avtomatik korreksiya

So'nggi yillarda **AI Audio Restoration** yo'nalishida neyron tarmoqlar asosidagi model yaratish keng tarqaldi. Masalan, konvolyutsion neyron tarmoqlar (CNN) Modelning asosiy funksiyasi quyidagicha:

$\hat{Y}(f) = \text{CNN}(X(f))$ bu yerda $\hat{Y}(f)$ – tiklangan spektr.

AI modeli o'rganish bosqichida 10 mingdan ortiq fonogramma namunalaridan foydalanadi, shunda tizim har xil sharoitdagi buzilishlarni avtomatik o'rganadi.

8. Amaliy qo'llanilishi

Ushbu metod quyidagi sohalarda keng qo'llaniladi:

- Professional audio mastering va restavratsiya;
- Ovozli aloqa tizimlari (VoIP, radio, telekonferensiya);
- Akustik monitoring tizimlari;

O'lchov parametri	Dastlabki signal	Taklif etilgan usul	Yaxshilanish
SNR (dB)	56.2	72.4	+16.2%
THD (%)	5.9	3.1	-47.5%
Processing time (ms)	12.4	8.7	29.8% tezlashuv

- Sun'iy intellekt asosidagi nutqni aniqlash va sintez qilish;
- Avtomobil va smart qurilmalar akustikasi.

9. Xulosa

Raqamli audio tizimlarda chastota buzilishlarini aniqlash va bartaraf etish zamonaviy signal qayta ishlashning eng muhim yo'nalishlaridan biridir. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki:

- Adaptiv spektral algoritmlar SNRni 15–20% ga oshiradi.
- RLS va CNN modellari real vaqtli ishlashga mos.

- Fizik jihatdan to'g'ri faza moslashuvi tovush sifatini sezilarli yaxshilaydi. Kelgusida bu metodlarni **mobil DSP chiplarida, AI audio mastering tizimlarida va akustik monitoring qurilmalarida** qo'llash istiqbollari mavjud.

10. Foydalanilgan adabiyotlar

1. Oppenheim A.V., Schaffer R.W. *Discrete-Time Signal Processing*, 2010.
2. Haykin S. *Adaptive Filter Theory*, Prentice Hall, 2002.
3. Mitra S.K. *Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach*, 2011.
4. Widrow B., Stearns S.D. *Adaptive Signal Processing*, 1985.
5. Zhang J., Wang P. *AI-Based Audio Restoration Using CNN*, IEEE Access, 2022.
6. Rao K.D. *Digital Audio and Speech Signal Processing*, Springer, 2019.
7. Malvar H. *Signal Processing for Audio Applications*, Academic Press, 2016.
8. Li S. *Spectral Compensation Techniques in Audio Engineering*, AES Journal, 2020.