

Algoritmi za kompresiju zvuka

– Kako MP3 „razume“ ljudsko uvo –

Mihajlo Janićijević

Matematički fakultet
Univerzitet u Beogradu
Profesor: prof. dr Jelena Graovac

Beograd, 2026.

Pregled

- 1 Motivacija
- 2 Mehanizam ljudskog uva
- 3 MP3 algoritam
- 4 Zaključak

1990-te: Problem

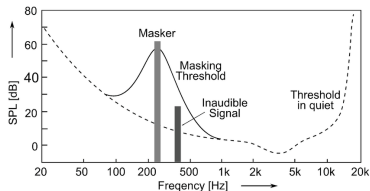
- Zamislite da živite 1990-tih, i želite da poslušate nov album
- Vaš hard disk: 100 MB prostora
- Jedan album u CD kvalitetu: 635 MB
 - Nemoguće!
- Dobro, možemo preuzimati pesmu po pesmu pa brisati?
- Preuzimanje pesme sa interneta?
 - Dial-up modem: više od 20 minuta
 - Za jednu pesmu od 3 minuta!
- Digitalna muzika delovala zaključana iza mogućnosti hardvera

Da li čujemo sve?

- Ljudsko uvo: neverovatno, ali ne savršeno
- Čujemo frekvencije od 20 Hz do 20 kHz
- Ali... ne čujemo baš sve što se dešava
 - Uvo grupiše zvukove u 24 "kritična opsega"
 - Ne razlikuje bliske frekvencije unutar iste kutijice
- Najbolje čujemo ljudski govor: 2-5 kHz
- Ovo je savršena prilika za kompresiju!

Efekat maskiranja

- Zamislite: bas bubanj udara glasno
- Istovremeno svira tiha gitara na sličnoj frekvenciji
- Šta čujete? Samo bas!
 - Glasniji zvuk "maskira" tiše
- Još bolje: efekat traje i posle udara
 - Pre: 5-20 ms (mozak kasni)
 - Posle: 50-200 ms (uvo se oporavlja)
- MP3 iskorišćava ovo: zašto čuvati ono što ne čujemo?



Eksperiment maskiranja

- Ton A: 1000 Hz, glasnoća 60 dB (jako glasno)
- Ton B: 1100 Hz, glasnoća 30 dB (tiho)
- Pustite oba zajedno
- Rezultat: čujete SAMO Ton A!
 - Ton A podigao prag na 35 dB
 - Ton B sa 30 dB je ispod praga
- MP3 algoritam ovo koristi i zaključuje: Ton B možemo potpuno zanemariti!
- Ovo se dešava za hiljade tonova odjednom

Kako MP3 razume vaše uvo?

- Korak 1: Razloži pesmu na 576 frekvencijskih delova
 - Kao da rastavljanje duge na boje (MDCT transformacija)
- Korak 2: Za svaki deo pita: "Da li je čujan?"
 - Signal-to-Mask Ratio proverava
- Korak 3: Pametan izbor
 - Jako čujan deo? Sačuvaj pažljivo
 - Jedva čujan? Malo podataka
 - Nečujan? Odstrani ga!

Dodatni trikovi

- Huffman kodiranje: poslednji potez
 - Kao ZIP za muziku
 - Česte vrednosti → kratki kodovi
 - Retke vrednosti → dugi kodovi
- MP3 deli pesmu na mini-okvire
 - Svaki traje 26 ms
 - Možete "streamovati" pesmu bez čekanja
- Rezultat: 10 puta manja veličina!

Veličina kompresije

- Originalna pesma (3 min): 31.7 MB
- MP3 na 320 kbps: 7.2 MB (4× manje)
- MP3 na 128 kbps: 2.9 MB (11× manje!)
- A kvalitet? Većina ljudi ne čuje razliku
 - Zahvaljujući psihoakustici
- 1990-te: sada stane ceo album na disk
- 2000-te: iPod i Napster revolucija

MP3 promenio svet

- Nije samo tehnologija - to je kulturna revolucija
- Omogućio: prenosive plejere, prvenstveno fizičke a onda i Spotify, Apple Music itd.
- Tajna uspeha: razumevanje ljudske biologije
- Danas: AAC, Opus - još bolji
 - Ali principi ostali isti

Hvala na pažnji!