ffteq - Programátorská dokumentace

Filip Kastl

28. července 2022

Co to je

Program na upravování 8bit 44,1kHz pcm mono zvukových souborů formátu Wave. Jeho hlavní součástí je frekvenční zvukový filtr implementovaný pomocí diskrétní Fourierovy transformace, konkrétně pomocí algoritmu rychlé Fourierovy transformace. Umí také upravovat hlasitost.

Program byl vyvíjen na Linuxu pomocí `dotnet core 6.0.301`. Nebyly použity žádné knihovny vyjma standardních.

Jak to zkompilovat

Potřebujete mít nainstalovaný `dotnet core 6.0`. Pak stačí v kořenovém adresáři projektu spustit následující příkaz:

```
dotnet build -r linux-x64 --no-self-contained
```

Případně můžete chtít nahradit `linux-x64` za `win-x64`. Pokud chcete, aby byl výsledný program spustitelný i na počítači bez dotnet core 6.0 runtimu, můžete použít command line option `--self-contained`. Zkompilované soubory lze najít v `bin/Debug/net6.0/`.

Je možné kompilovat i pomocí/pro jiné verze dotnet core. Projekt je kompatibilní i s `dotnet core 3.1`. V takovém případě je však potřeba upravit soubor `ffteq.csproj`.

Pojmy

- **DFT** – Diskrétní Fourierova transformace. Pro účely tohoto programu způsob, jak rozebrat signál na intenzity jednotlivých frekvencí.
- **FFT** – Konkrétní algoritmus počítající DFT s asymptotickou složitostí $O(n \cdot \log n)$, kde n je délka signálu.
- **sample** – Analogový zvukový signál je spojitý. Digitálně se reprezentuje pomocí pravidelně rozmístěných vzorků – samplů. Tomuto způsobu zaznamenávání zvukového signálu se říká **PCM** – Pulse-code modulation.
- **Wave** – Jednoduchý formát zvukových souborů. Kóduje signál prostě jako pole hodnot samplů.

- **8bit** – Jde o označení velikosti jednotlivých samplů.
- **44,1 kHz, sample rate** – Jde o rychlost s jakou by samply měly být přehrávány.
- **mono** – Zvukový signál může být dvoustopý, tedy stereo. ffteq se však zabývá pouze jednostopými signály – mono signály.
- **Low-pass filtr** – Filtr, který odstraňuje vysoké frekvence.
- **High-pass filtr** – Filtr, který odstraňuje nízké frekvence.

Jak to funguje

Program načítá a zapisuje Wave soubory pomocí třídy *Wav*. Zvukový signál je interně reprezentován třídou *Signal*. Více o těchto třídách vizte v další sekci.

O co se stará která třída

Soubor `docs/diagram.pdf` slouží jako přehled tříd a jejich veřejných memberů. Šipky v diagramu znázorňují vztahy „třída A spravuje instance třídy B“.

Wav

Třída zodpovědná za načítání a zapisování Wave souborů. Nepracuje ovšem přímo se soubory, ale se streamy. Načtení ze streamu probíhá v konstruktoru instance této třídy. Je zkontrolováno, že hlavička opravdu odpovídá 8bit pcm mono Wave formátu. Pokud ne, je vyhozena výjimka se zprávou o tom, čím se hlavička liší. Zápis do streamu se provádí pomocí metody *WriteFile()*.

Načtený signál zpřístupňuje třída skrz property *Signal WavSignal*.

Na konci dokumentu jsou odkazy na hezký přehled formátu souborů Wave[3] a jeho formální specifikaci[2].

Signal

Třída, která je interní reprezentací zvukového signálu. Je implementována jako pole samplů. Každý sample je číslo typu *double* pohybující se od -1.0 do 1.0.

Effect

Abstraktní třída reprezentující efekt aplikovatelný na zvukový signál. Její jediná veřejná metoda je *Process*, která vezme signál, upraví ho pomocí efektu a vydá výsledek. Dědí z ní třídy *FFTFilter*, *Gain* a *Clipping*.

FFTFilter je hlavním efektem programu. Stará se o filtrování signálu. Přes konstruktor je specifikováno, které frekvence má filtrovat (vizte sekci filterlo a filterhi v uživatelské dokumentaci). Informace o principu filtru vizte v sekci Algoritmy.

Gain zvyšuje nebo snižuje hlasitost signálu. Přes konstruktor je specifikován počet decibelů. Decibely se převadí na poměr amplitud pomocí vzorce $ratio = \sqrt{10^{\frac{db}{10}}}$.

Protože efekty mohou zvýšit hodnotu některých samplů nad 1.0 nebo snížit pod -1.0, je třeba provést takzvaný clipping signálu. To znamená prostě pro každý sample provést

$value = \max(-1.0, \min(1.0, value))$. O clipping se stará efekt Clipping. Na rozdíl od ostatních efektů, tenhle je aplikován vždycky a to na konci programu.

Windowing

Informace o principu zpracovávání po oknech vizte v sekci Algoritmy.

Třídy dědící z abstraktní *Windowing* mají za účel zjednodušit zpracovávání signálu po oknech. Pracuje se s nimi následujícím způsobem:

1. Metodou *StartProcessing()* se předá windowingu vstupní signál
2. Metoda *NextWindow()* vydá okno vystřižené z původního signálu
3. Zpracované okno se vrátí windowingu pomocí metody *PutBack()*
4. Kroky 2 a 3 se opakují dokud *NextWindow()* nevrátí *null*
5. V tu chvíli je hotový výsledný signál a může být vyzvednut metodou *FinishProcessing()*

Windowing objekt se sám stará o aplikaci windowing funkce a o překryv.

ffteq obsahuje dvě implementace windowingu. Jednou je *RectWindowing*. To je triviální implementace bez windowing funkce a bez překryvu. V programu není použita. Druhou implementací je *HannWindowing* používající Hann windowing function a překryv 50%. To, co je popsané v sekci Algoritmy, odpovídá chování této třídy.

Windowing používají třídy *CMDOptionFilterLow* a *CMDOptionFilterHigh*.

CMD

Třídy s předponou CMD se zabývají zpracováváním a vykonáváním argumentů z příkazové řádky. Vizte uživatelskou dokumentaci pro informace o tom, v jakém formátu se zadávají terminálové argumenty.

Každá z dostupných options je reprezentována objektem dědícím z abstraktní třídy *CMDOption*. CMDOption obsahuje *Params* pole objektů dědících z abstraktní třídy *CMDOptionParam*. Ty reprezentují parametry dané option. Jejich metoda *Validate()* kontroluje, jestli daný řetězec splňuje podmínky parametru.

Důležitou metodou objektů dědících z CMDOption je *Execute()*. Skrz ni option dostane jemu náležící terminálové argumenty a signál a měl by na něm vykonat svoji funkci. Tedy například *CMDOptionGain* dostane řetězec "-5"a signálu sníží hlasitost o 5 decibelů.

V programu dědí z CMDOptionParam pouze *CMDOptionParamDouble*. To je třída, která kontroluje, že argument je konvertovatelný na C# typ *double*. Žádné jiné typy parametrů nebylo třeba implementovat. Kdyby však program měl být rozšiřován, je určitě možné mít například option s parametrem, který je validní pouze jako číslo 0 až 5 nebo option s parametrem, který je validní pouze, pokud lze konvertovat na *bool*.

O naparsování seznamu terminálových argumentů na options a validování parametrů se stará třída *CMDOptionParser*. Ta dostane přes konstruktor pole CMDOption objektů – pole options, které program podporuje. Její metoda *Parse()* pak bere pole terminálových argumentů a vrací pole options a jejich argumentů v pořadí, v jakém je uživatel zadal na příkazové řádce.

Za jeden běh programu je možná aplikovat stejnou option vícekrát s různými argumenty.

Algoritmy

FFT

Rychlá Fourierova transformace je napsána podle pseudokódu v knížce Průvodce labyrintem algoritmů[4] na straně 398. Kniha zmiňuje dvě primitivní n-té odmocniny z jedničky pro dané n. ffteq používá tu s pozitivní imaginární složkou.

Princip filtrování

Filtr dostane signál jako seznam samplů. Je to informace o tom, jak se mění intenzita zvukové vlny v čase. Jako první krok použije DFT, aby se dostal na jinou reprezentaci signálu – na informaci o intenzitě jednotlivých frekvencí. Přejeme si intenzitu některých frekvencí snížit nebo zcela vynulovat. To je v této reprezentaci snadné. Filtr prostě odpovídající prvky vektoru vynásobí koeficientem od 0.0. do 1.0. Nakonec filtr použije inverzní DFT, aby signál převedl zpět na seznam samplů.

Je tu ale problém. Od uživatele dostaneme čísla frekvencí, ale DFT nám dá vektor šířky odpovídající šířce vektoru, který jsme transformovali. Složkám tohoto vektoru se říká „bins“. Který bin odpovídá kterým frekvencím? Na to použijeme následující vzorec:

$$bin = \frac{hz}{sample\_rate} \cdot N$$

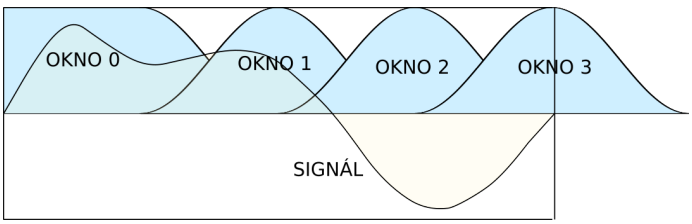
kde N je šířka vektoru. Vzorec je adaptovaný z odpovědi na foru Stack Overflow[1]. Nemám potřebné znalosti na to, abych si vzorec odvodil nebo věděl, v které učebnici ho hledat.

Windowing

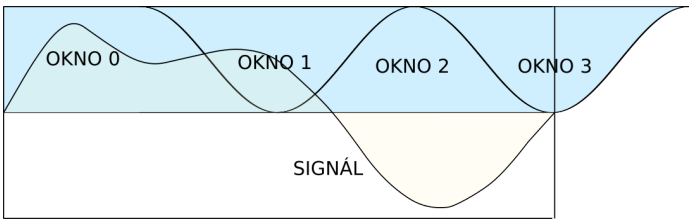
Některé efekty není praktické aplikovat na celý signál. V případě tohoto programu je to *FFTFilter*. Filtr využívá FFT a FFT operuje na vektorech délky mocniny dvojky. Doplnit každý signál o nuly na další mocninu dvojky by bylo nejspíš možné a pro účely tohoto programu postačující. Rozhodl jsem se ale použít zpracování po oknech, protože to je standardní způsob, jak problém řešit.

Signál je rozsekán na pravidelné úseky – okna. Efekt se pak aplikuje na každý úsek zvlášť. Úseky se mohou překrývat. Na úseky je typicky aplikovaná nějaká window function. Je možné použít okna bez překryvu a bez aplikování window function. Pak se ale může stát (např. v případě FFT filtru), že na sebe zpracovaná okna nebudou navazovat. To se manifestuje jako pravidelné cvakání ve výsledném zvukovém signálu. Abych se mu vyhnul zvolil jsem pro účely FFT filtru Hann window function a 50% překryv.

Aplikování window function znamená, že každé okno je přenásobeno koeficienty od 0.0 do 1.0, které specifikuje daná funkce. Zde je znázorněno, jak to vypadá s parametry, které používá ffteq:



Když jsem vybíral window function, nejprve jsem zkusil naimplementovat windowing bez window function a bez překryvu. Program nedával uspokojivé výsledky. Následně jsem vyzkoušel Hann window function, protože to je jedna z jednodušších na implementaci. Použil jsem 50% překryv, protože s ním se koeficienty vždy sečtou na 1.0, jak je vidět na následujícím obrázku:



Nemám nijak teoreticky podložené, že toto je správný postup. Pracoval jsem spíše experimentálně. Hann window function už dávala uspokojivé výsledky, a tak jsem u ní zůstal.

Je třeba ošetřit, že první/poslední okno nemají zleva/zprava překryv s žádným dalším oknem. Já problém řeším tak, že prvnímu oknu dám trošku jiný tvar a na konec signálu přidám ještě jedno okno přesahující ze signálu ven. Přesah mimo signál znamená, že okno bude doplněno nulami. Lze se také rozhodnout konce signálu neošetřovat. Vede to pak k nepatrným náběhům v hlasitosti závislých na šířce oken.

Poznámky

Ke zpracovávání terminálových argumentů

Implementovat vlastní systém parsování terminálových argumentů pravděpodobně nebylo dobré rozhodnutí. Bylo to časově náročné – více než jsem očekával. S výsledkem nejsem spokojený. Systém je funkční, ale myslím si, že by mohl být méně zmatečný. A hlavně: Pro někoho, kdo můj kód pročítá, by bylo jednodušší seznámit se s nějakou široce používanou externí knihovnou, než s čímkoliv, co bych napsal já. Nechť je toto varování pro další programátory, kteří by si řekli „Co je na tom, to si zvládnu napsat sám“.

Odkazy

[1] Uživatel Stack Overflow Paul R. *Odpověď na: How do I obtain the frequencies of each value in an FFT?* URL: `https://stackoverflow.com/a/4371627`. Datum citování: 28. července 2022.

[2] *Specifikace formátu RIFF – na straně 56 začíná specifikace formátu Wave.* URL: `http://www-mmsp.ece.mcgill.ca/Documents/AudioFormats/WAVE/Docs/riffmci.pdf`. Datum citování: 28. července 2022.

[3] *Stručný přehled formátu Wave.* URL: `http://www.topherlee.com/software/pcm-tut-wavformat.html`. Datum citování: 28. července 2022.

[4] MAREŠ Martin VALLA Tomáš. *Průvodce labyrintem algoritmů.* CZ.NIC, 2017. ISBN: 978-80-88168-22-5. Dostupné na `https://knihy.nic.cz/`.