

TITULNÍ LIST

Namísto této stránky vložte **titulní list** (s logem) vygenerovaný v IS VUT.

ZADÁNÍ

Namísto této stránky vložte stránku **zadání FEKT** vygenerovanou v IS VUT.

ABSTRAKT

Abstrakt práce v originálním jazyce

KLÍČOVÁ SLOVA

Klíčová slova v originálním jazyce

ABSTRACT

Překlad abstraktu (v angličtině, pokud je originálním jazykem čeština či slovenština; v češtině či slovenštině, pokud je originálním jazykem angličtina)

KEYWORDS

Překlad klíčových slov (v angličtině, pokud je originálním jazykem čeština či slovenština; v češtině či slovenštině, pokud je originálním jazykem angličtina)

SLEZÁK, Viktor. *Světelné animace pro systém Spectoda na základě analýzy parametrů z hudebních nahrávek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2022, 41 s. Semestrální práce. Vedoucí práce: Ing. Matěj Ištváněk

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora:	Bc. Viktor Slezák
VUT ID autora:	203745
Typ práce:	Semestrální práce
Akademický rok:	2022/23
Téma závěrečné práce:	Světelné animace pro systém Spectoda na základě analýzy parametrů z hudebních nahrávek

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno
podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Matěj Ištváněk za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	21
1 Teorie	23
1.1 MIR - Music information retrieval	23
1.1.1 Historie	23
1.1.2 Řetězec zpracování - pipeline	24
1.2 Parametrizace hudebních nahrávek	26
1.2.1 Reprezentace audio signálů	26
1.2.2 Časová oblast	27
1.2.3 Frekvenční oblast	27
1.2.4 DFT - Diskrétní Fourierova transformace	29
1.2.5 STFT - Short-time Fourier transform	30
1.2.6 Dynamika intenzita a hlasitost	32
1.2.7 Barva	32
1.3 Detekce tempa a dob	32
1.4 Klasifikace žánrů a nálady	32
1.5 Systém Spectoda	32
1.6 Hudební signál jako animace	32
2 Výsledky studentské práce	33
2.1 Programové řešení	33
Závěr	35
Literatura	37
Seznam symbolů a zkratek	39
Seznam příloh	41

Seznam obrázků

1.1	Řetězec procesů MIR [4]	25
1.2	Zobrazení časového průběhu signálu	27
1.3	Reprezentace tónu E zahraného na basovou kytaru.	28
1.4	Časově spojitý signál a diskrétní signál	29
1.5	Signál o délce 1s s počáteční frekvencí 10Hz a koncovou frekvencí 30Hz a) Původní signál b) Signál s okénkem od 0,2s do 0,5s c) Signál s okénkem od 0,35s do 0,65s d) Signál s okénkem od 0,5s do 0,8s	31

Seznam tabulek

1.1	Typické procesy na základně vstupních a výstupních dat.	26
-----	---	----

Seznam výpisů

Úvod

V rámci semestrální práce vzniknou algoritmy analyzující hudební nahrávku. Tyto algoritmy budou sloužit k získání potřebných dat jako jsou zejména beat detection, získání tempa skladby a následné získání chromavektorů. Při získávání parametrů je potřeba počítat s jejich následujícím využití v algoritmu generujícím animace pomocí systému Spectoda.

Práce je rozložena do tří na sebe navazujících cílů.

Prvním z nich je nashromáždění dostatku teoretických informací o problematice MIR (Music information retrieval - Obor zabývající se vyhledávání informací v hudebních dílech) a možnostech dolování informací z hudební nahrávky.

Druhým cílem práce pak je na základě získaných znalostí navrhnout vhodnou strukturu algoritmu pro generování sekvencí světelných animací pracujících na systému Spectoda.

Posledním cílem semestrální práce je právě vytvoření funkčního systému pro analýzu hudební nahrávky a dolování získávání předem stanovených parametrů.

1 Teorie

Semestrální práce se zejména zabývá problematikou MIR. Popsanou v kapitole (!doplnit kapitolu!). Důležitou roli zde hraje i úvaha nad realizací světelných animací. Je důležité aby bylo přemýšleno nad principem reakce světelných animací na hudbu. Nabízejí se otázky jak by měla daná animace reagovat na konkrétní děj skladby. Jakým způsobem navrhnout strukturu ...

V této části je popsána teorie zpracování hudební nahrávky pomocí známých algoritmů jako je například FFT (Fast Fourier transform - Rychlá Fourierova transformace) či nabízené možnosti strojového učení. Struktura a možnosti systému Spectoda pro generování interaktivních světelných animací. Uměleckou částí, jak by měla animace prezentovat hudbu.

1.1 MIR - Music information retrieval

Music information retrieval je interdisciplinární vědní obor soustředící se na získávání informací z hudebních nahrávek. Jsou zde kombinovány znalosti mnoha oborů jako jsou muzikologie, psychoakustika, strojové učení, zpracování signálů a další.

Výstup jeho výzkumu je využíván populárními technologiemi. Jednou z aplikací je personalizované doporučování hudebních skladeb, která se nachází v moderních streamovacích platformách. Další využití je v programech pro mixování hudby používaných diskžokeji k plynulejší práci díky analýze tempa a klíčových částí skladby. Tyto technologie se nachází v mnoha dalších aplikacích a s šířením se digitálního audia jejich důležitost stále poroste. [2][4]

1.1.1 Historie

MIR se začíná objevovat koncem devatenáctého a začátkem dvacátého století s příchodem moderních statistických metod. V některých univerzitách tyto statistické metody začínají aplikovat na hudbu. Ze začátku díky špatné dostupnosti počítačů se jedná spíše o ruční přepisování tabulatur přímo z hudebních partitur. Následně se ze zjištěných rysů snažili specifikovat stylové charakteristiky. S příchodem počítačů do výzkumných laboratoří v letech 1960 až 1970 se začalo více soustředit na počítačovou analýzu hudby. V těchto letech se poprvé začaly objevovat nyní známé termíny jako „*computational musicology*“ a „*music information retrieval*“. První oblastí výzkumu bylo získávání rytmu hudební nahrávky a z důvodu nízké popularity se výzkum zpomalil. Tento trend následoval až do roku 1990 kdy výzkumu MIR pomohly dvě věci. První z nich bylo velké zvětšování lehce dostupné hudby a druhým

z důležitých bodů byl nárůst výpočetního výkonu počítačů. Díky těmto bodům se stal výzkum dostupnější a jednodušší na realizaci.

Poté v říjnu roku 2000 bylo uspořádáno první mezinárodní symposium soustředící se na MIR. Následně díky těmto pokrokům vznikla celosvětová skupina ISMIR (International Society of Music Information Retrieval - Mezinárodní združení pro MIR). Zanedlouho naté vznikla další skupina MIREX (The Music Information Retrieval Evaluation eXchange). Jedná se o skupinu vědců která se schází pravidelně každý rok a řeší problematiku MIR.

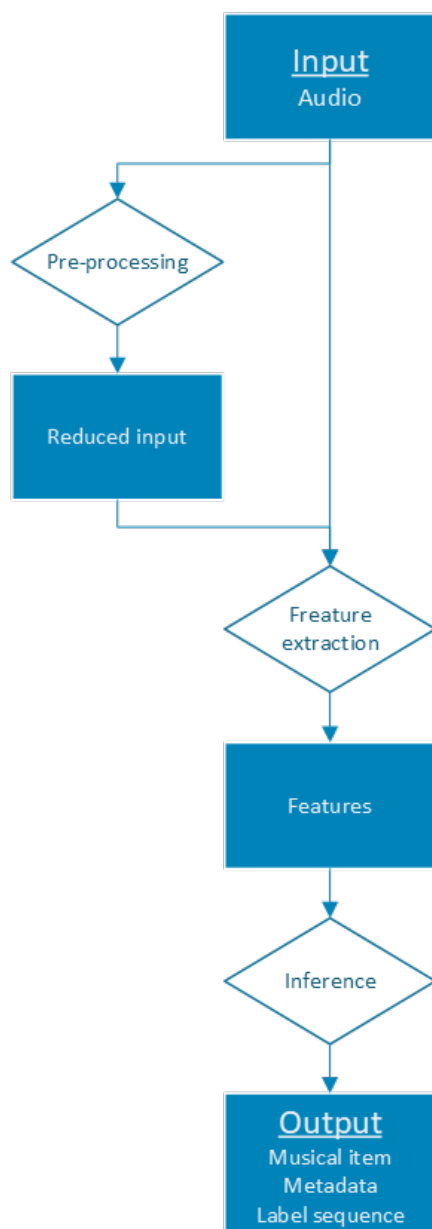
1.1.2 Řetězec zpracování - pipeline

Téměř standardně využívaný řetězec procesů v aplikacích MIR je popsána níže.

Jako vstupní data se využívají zejména hudební informace v digitální podobě. Tyto data se rozlišují do více typů. Mohou to být obrázky představující digitální formu zápisu hudby pomocí symbolů (not). Dalším možným typem je "digitální hudba", představovaná zápisem v MIDI notách. V této práci budou jako vstupní data využívány digitální hudební nahrávky ("digitální audio").

Pokud jsou vstupní data komplexní na začátku je v řetězci zařazen blok předzpracování, která se stará o komprimaci vstupních singlů. U hudebních signálů se jedná například o konverzi stereo signálů na mono signál a jeho následnou komprimaci popsanou více v bodě

Dalším bodem v řetězci je extrakce vlastností signálu. Zde je nastaven poměr mezi vlastnostmi důležitými pro strojové učení lidskou expertní znalostí. Poměr mezi těmito vlastnostmi závisí na aplikaci pro kterou je algoritmus určen. Na základě získaných vlastností je nastavena struktura algoritmu pro odvození výsledných parametrů.



Obr. 1.1: Řetězec procesů MIR [4]

Zpracování audio signálů je již dvě desetiletí hlavním trendem výzkumu MIR. Je to přirození tím, že zde není téměř žádná přirozená hranice a je možné téměř vše. Právní podmínky jsou zde příznivé a vědecké instituce nemají problém pro svou práci získat velké množství materiálu chráněného autorským právem. Z důvodu velké komplexnosti vstupních signálů se využívá několik technik komprimace signálů kterými jsou. Slučování vícekanálových nahrávek do mono signálu. Přebírkování signálu na nižší vzorkovací kmitočty, a rozložení signálu na krátké překrývající se úseky ze kterých mohou být nezávisle extrahovány jejich vlastnosti. Výsledkem je kolekce paralelně složených sekvencí hodnot vlastností, které se následně použijí

pro odvozování (inference).

Data	Vyhledávání informací	Klasifikace a odhad	Sekvenční značení
Audio	Identifikace skladby, Řazení, Měření podobnosti, Získání otisku, Generování seznamu skladeb	Identifikace umělce a skladatele, Žánr a nálada, Určení tempa	Extrakce melodie, Odhad akordů, Detekce nástupů, Segmentace

Tab. 1.1: Typické procesy na základně vstupních a výstupních dat.

1.2 Parametrizace hudebních nahrávek

V této kapitole je popsán audio signál. Jak vzniká, jeho reprezentace v číslicovém zpracování a základní principy práce s audiosignálem. V bodech 1.2.6 až 1.2.7 jsou popsány parametry získávané z audio signálu. Získané parametry slouží pro přesnější popis skladby. [3]

1.2.1 Reprezentace audio signálů

Hudba může být reprezentována spoustou forem. Jako tradiční médium pro její ukládání ještě před vznikem záznamu sloužily vždy noty a další typy zápisů pomocí symbolů. Výsledné hudební dílo ale představuje mnohem více než počáteční notový zápis. Každý hudebník a hudební nástroj do skladby dodává svou unikátnost. Při hře se noty začnou proměňovat v harmonické zvuky, hladké melodie a nástroje vzájemně rezonují. Každý z hudebníků do skladby přináší svou interpretaci. Jinak reagují na tempo zvýrazňují odlišné noty a liší se jejich artikulace. Všechny tyto proměnné ve výsledku způsobují, že dílo není jen mechanické přehrání napsané partitury. Jeho součástí se stává unikátní přednes.

Při pohledu z fyzikálního hlediska důsledkem interpretace díla vznikají zvukové vlny šířící se vzduchem. Tyto vlny jsou reprezentovány kmítáním atomů plynu způsobující změny tlaku svým zhušťováním a zředčováním. Při vlnění nedochází k přenosu hmotných částic. Záznamem šířících se zvukových vln získáváme audio signál. Pojmem audio je označován řetězec sloužící k záznamu, přenosu a reprodukci zvuků v mezích lidského slyšení. Avšak v audio signálu se už nenachází přesná reprezentace not a jejich paramterů jako jsou čas nástupu, tón, délka trvání, dynamika. Díky tomu je analýza hudebních signálů obtížným úkolem a je ovlivněna reprezentací interpreta akustikou prostoru a vnímáním posluchače. Popsanými problémy se zabývá samostatný vědní obor s názvem psychoakustika. Nejdůležitějšími parametry

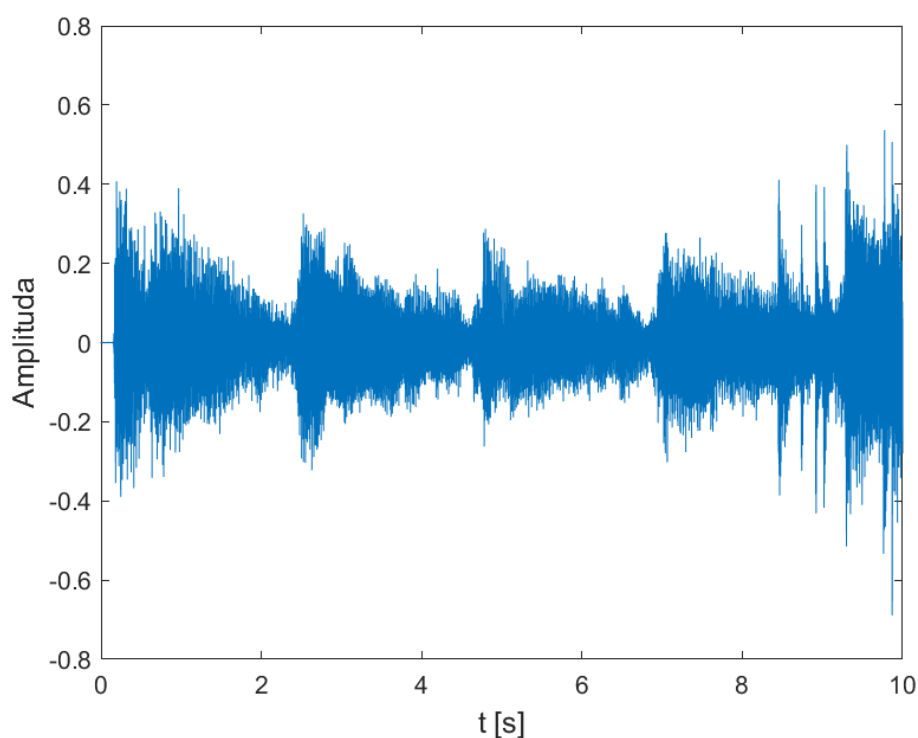
audio signálu které jsou podrobně popsány níže definujeme: frekvence, výška tónu, dynamika, intenzita, hlasitost a také barva.

1.2.2 Časová oblast

Základní reprezentací audio signálu je tzv. zobrazení v **časové oblasti**. V časové oblasti číslicový signál představují vzorky. Jednotlivé vzorky udávají hodnotu signálu v daném čase. Počet vzorků nám určuje vzorkovací frekvence signálu. Důležité pravidlo pro vzorkování signálu je popsáno rovnicí č. 1.1

$$f_{vz} > 2 * f_{max} \quad (1.1)$$

kde f_{vz} je vzorkovací frekvence a f_{max} je maximální frekvence v audio signálu. Pokud jednotlivé vzorky zobrazíme graficky získáme průběh amplitudy signálu viz obrázek č.1.2



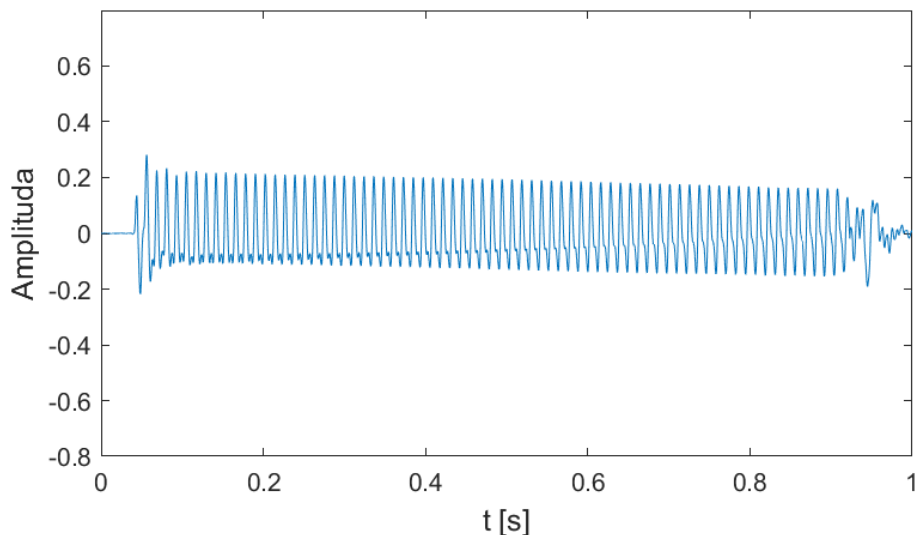
Obr. 1.2: Zobrazení časového průběhu signálu

Tato reprezentace audio signálu poskytuje informace o amplitudě signálu. Čili je z ní možno vyčíst například dynamiku skladby, začátky a konce not.

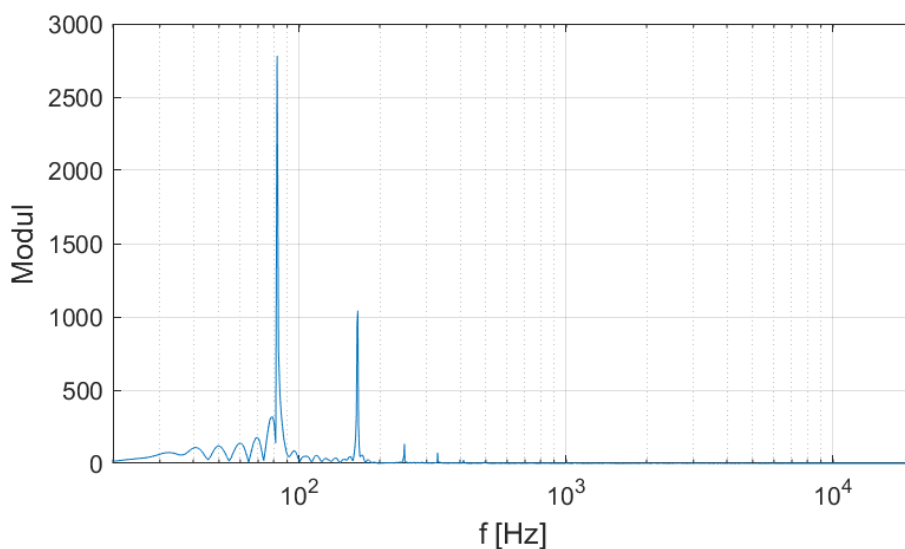
1.2.3 Frekvenční oblast

Pro získání více informací o hudebním díle je zobrazení v časové oblasti nedostatečné. Proto se využívá tzv. zobrazení ve **frekvenční oblasti**.

V časové oblasti se zobrazuje frekvenční spektrum signálu. Toto spektrum představuje rozložení původní části signálu na jednotlivé harmonické frekvence reprezentující zpracovávaný signál. V grafu jsou poté zobrazeny frekvenční složky se kterých se signál skládá viz obrázek č.1.3.



(a) Časová oblast



(b) Frekvenční oblast

Obr. 1.3: Reprezentace tónu E zahraného na basovou kytaru.

Jako nzorný důvod proč je transformace do frekvenční oblasti přínosná je dán příklad. Na nástroj je zahrán tón, který je nahrán. V časové oblasti je možné určit délku tónu a jeho průběh podle ADSR obálky popsané v bodě č. 1.2.7. Pokud je ale potřeba zjistit výšku tónu a určit notu, tak je to téměř nemožné. Díky transformaci do frekvenční oblasti je patrná fundamentální harmonická frekvence tónu. Tato

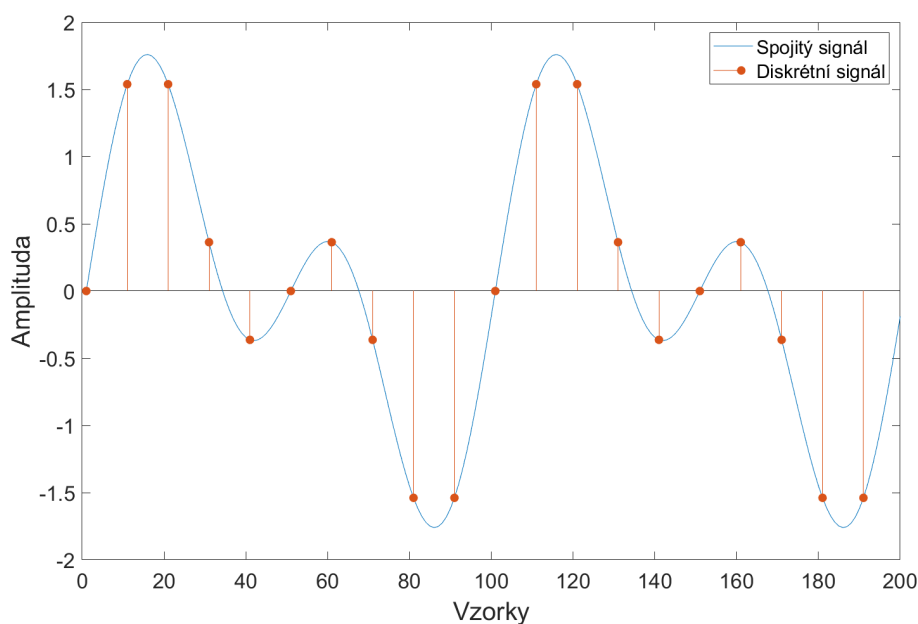
frekvence udává výšku tónu a je tak možné stanovit notu která byla zahrána.

Pro získání frekvenčního spektra signálu je třeba transformovat signál s časové oblasti. K tomu se využívá **Fourierovy transformace**.

Hlavní pilířem Fourierovy transformace je, že každý periodický signál je možné rozložit na součet nekonečně mnoha sinusových signálů s různou amplitudou a fází. Toho je poté pomoci matematických postupů docílit. Analyzující signál je rozložen na jeho frekvenční složky udávané amplitudou a fází viz obrázek č.1.3. Jako další grafické zobrazení časové oblasti hudebního signálu se pro jeho analýzu využívá spektrogramu.

1.2.4 DFT - Diskrétní Fourierova transformace

Pokud jsou signály zpracovávány pomocí výpočetních procesorů, tak může být uložen pouze omezený počet parametrů signálu. To znamená, že analogový signál spojitý v čase musí být převeden na signál digitální tvz. signál diskrétní, který je není spojitý v čase. Diskrétní signál je potom vhodný pro číslicové zpracování. Důsledkem toho bylo nutné odvodit algoritmus DFT přizpůsobený právě pro zpracování diskrétních signálů s konečným počtem hodnot.



Obr. 1.4: Časově spojitý signál a diskrétní signál

Rovnice pro DFT je potom zapsána v následujícím tvaru.

$$X(k) = \hat{x}(k/N) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-2\pi i k n / N) \quad (1.2)$$

Kde $k \in [0 : M - 1] = [0 : N - 1]$ a $M \in \mathbb{N}$.

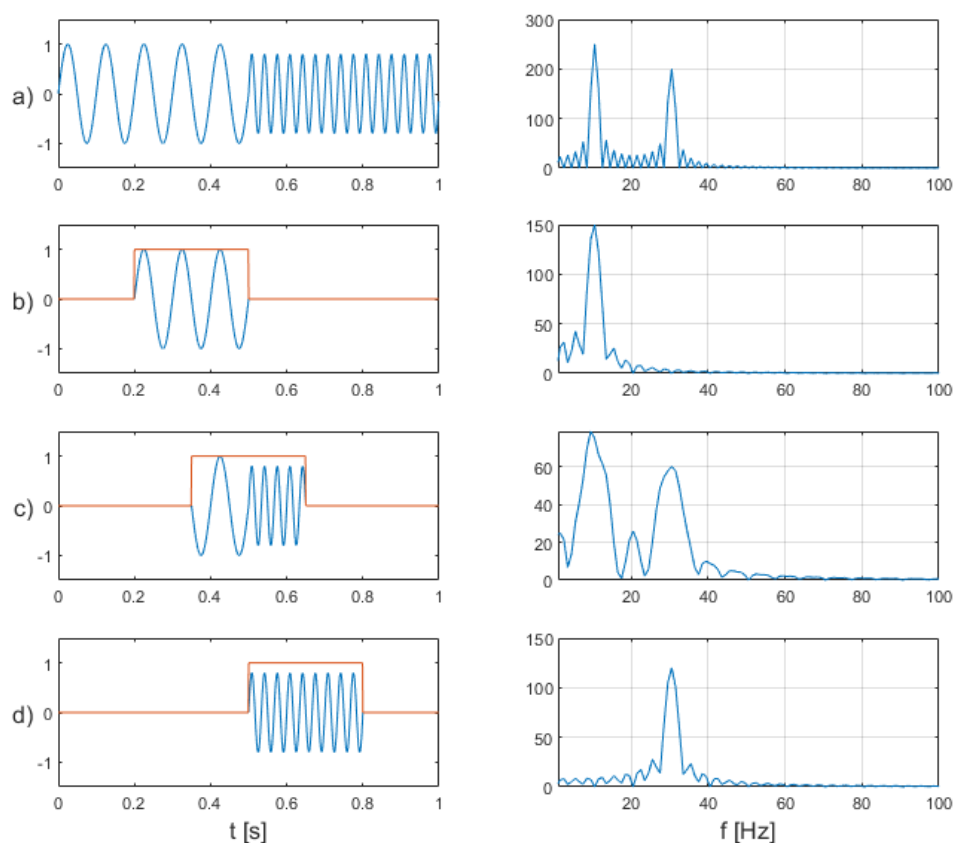
Ze strany výpočetní náročnosti je takto definovaný algoritmus neefektivní a výpočetně náročný. Při počítání Fourierova koeficientu $X(k)$ je zapotřebí velkého množství velké množství operací v řádu N^2 . Proto pokud počet vzorků N dosahuje většího množství je ve většině případů tento algoritmus příliš pomalý pro praktické využití.

Počet potřebných operací může být výrazně redukován použitím efektivního algoritmu známého jako FFT (Fast Fourier transform - Rychlá Fourierova transformace). Na vytvoření FFT se zasloužil Carl Friedrich Gauss a Joseph Fourier zhruba před dvěma sty lety. Vynález tohoto algoritmu změnil své odvětví zpracování signálů a je dnes používán v miliardách telekomunikačních zařízeních. Ačkoliv je ve velké míře využíván v telekomunikacích, tak právě i ve zpracování a analýze zvukových signálů zabírá důležitou roli.

Zjednodušeně FFT využívá redundance napříč sinusovými signály různých frekvencí ke společnému výpočtu všech Fourierových koeficientů pomocí rekurze. Díky tomu je dosaženo snížení výpočetní náročnosti počtu operací z řádu N^2 na $N \log_2 N$. Například při použití vzorků $N = 2^{10} = 1024$, FFT vyzáduje $N \log_2 N = 10240$ operací namísto $N^2 = 1048576$ operací při použití DFT. Jak je vidět snížení výpočetní náročnosti je velké a exponenciálně roste s větším počtem vzorků N .

1.2.5 STFT - Short-time Fourier transform

V roce 1946 Dennis Gabor představil STFT jako potřebu zařazení frekvenčních složek do konkrétního času signálu. Fourierova transformace umožňovala převod signálu z časové oblasti do frekvenční ale nebylo zřejmě v jakém časovém úseku signálu se získané frekvenční složky nachází. Hlavní myšlenkou STFT je, že namísto analyzování celého signálu je signál analyzována pouze jeho malá část. Za tímto účelem je definována tzv. okénková funkce, která je nenulová pouze v malé části signálu. Analyzovaný signál je následně vynásoben vzniklou okénkovou funkcí a díky tomu vzniká malá nenulová část signálu dle okénkové funkce viz obr. č. ???. Chceme-li analyzovat signál v různých časech je tato funkce po signálu posouvána a následně se počítá Fourierova transformace pro každý výsledný okénkový signál.



Obr. 1.5: Signál o délce $1s$ s počáteční frekvencí $10Hz$ a koncovou frekvencí $30Hz$
a) Původní signál **b)** Signál s okénkem od $0,2s$ do $0,5s$ **c)** Signál s okénkem od $0,35s$ do $0,65s$ **d)** Signál s okénkem od $0,5s$ do $0,8s$

;

Na obrázku č. 1.5 je graficky znázorněna myšlenka STFT, která ukazuje výhodu přesného určení frekvenčních složek signálu v čase. Signál je násoben obdelníkovou okénkovou funkcí ve třech místech. Tyto tři vzniklé signály jsou následně na sebe nezávazně transformovány do frekvenční oblasti. Z výsledků Fourierovy transformace lze vidět, že každá z těchto částí má jiné frekvenční spektrum. Pokud by bylo zapotřebí například určit přesný přechod mezi dvěma frekvencemi nacházejícími se v signálu. Lze spřesnit časové měřítko analýzy pomocí délky okénka. Tím ale dochází ke zmenšení přesnosti ve frekvenční oblasti.

Na výsledku přesnosti analýzy pomocí STFT závisí také tvar použité okénkové funkce. V obrázku č. 1.5 je použito obdelníkového okénka které díky svým ostrým hranám zkresluje výsledek o nechtěné frekvenční složky. Existuje více tvarů okénkových funkcí pro odstranění nežádoucích složek. Například to jsou Kaise, Chebyshev, Hann a Haming a další. [1];

1.2.6 Dynamika intenzita a hlasitost

Pojem **dynamika** je vyjadřuje jak hlasitost „volume“ zvuku stejně jako v notovém zápise udává hlasitost „volume“ přednesu. V notovém zápise je dynamika popsána symboly jako jsou například pianissimo „*pp*“, piano „*p*“, forte „*f*“ a další.

Naopak ve audio je dynamika udána **hlasitostí** „loudness“ představována amplitudou signálu nebo jeho efektivní hodnotou RMS v čase. Při měření hlasitosti je pak využíváno pojmů **intenzita** zvuku a **akustický výkon**. Kde akustický výkon je definován jako kolik energie je vzduchem vyzářeno zvukovým vysílačem za jednotku času. Jednotkou je $[W]$ A intenzita zvuku pak je definována jako množství energie, které projde jednotkovou plochou kolmou na směr šíření na jednotku času. Jednotkou pak je $[Wm^{-2}]$ [5]

Z pohledu vnímání hlasitosti lidským uchem je rozsah vnímané intenzity zvuku v řádech bilionů. Práh slyšení činí $10^{-12}Wm^{-2}$ a práh bolesti je $10Wm^{-2}$. Pro zmenšení tak velkého řádu je definována hladina intenzity zvuku v decibelech **[dB]**. Kde vztažnou hodnotou je práh slyšení $I_0 = 10^{-12}Wm^{-2}$. Hladina intenzity se vypočítá dle rovnice č. 1.3

$$L_I = 10 * \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (1.3)$$

1.2.7 Barva

Jedním z důležitých nástrojů pro jeho nalažuj je určení obálky signálu.

1.3 Detekce tempa a dob

1.4 Klasifikace žánrů a nálady

1.5 Systém Spectoda

1.6 Hudební signál jako animace

2 Výsledky studentské práce

Praktická část a výsledky studentské práce vhodně rozdělené do částí.

2.1 Programové řešení

Závěr

Shrnutí studentské práce.

Literatura

- [1] Cohen, L.: Time-frequency distributions-a review. *Proceedings of the IEEE*, ro n k 77, . 7, 1989: s. 941–981, doi:10.1109/5.30749.
- [2] Lidy, T.; Rauber, A.: Music Information Retrieval. In *Handbook of Research on Digital Libraries: Design, Development, and Impact*, IGI Global, 2009, ISBN 978-1-59904-879-6, s. 448–456.
- [3] Müller, M.: *Fundamentals of Music Processing*. Springer International Publishing, 2015, doi:10.1007/978-3-319-21945-5.
URL <https://doi.org/10.1007%2F978-3-319-21945-5>
- [4] Schreibman, S.; Siemens, R.; Unsworth, J. (edito i): *A new companion to Digital Humanities*. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd, 2016, ISBN 9781118680599.
- [5] WikiSkripta: Vlastnosti zvuku —. 2022, [Online; navštíveno 21. 11. 2022].
URL https://www.wikiskripta.eu/index.php?title=Vlastnosti_zvuku&oldid=458442

Seznam symbolů a zkratek

MIR	Music information retrieval - Obor zabývající se vyhledávání informací v hudebních dílech
MIDI	Musical Instrument Digital Interface - Digitální rozhraní hudebních nástrojů
ISMIR	International Society of Music Information Retrieval - Mezinárodní združení pro MIR
MIREX	The Music Information Retrieval Evaluation eXchange
FFT	Fast Fourier transform - Rychlá Fourierova transformace
DFT	Discrete Fourier transform - diskrétní Fourierova transformace
STFT	Short-time Fourier transform - krátkodobá Fourierova transformace
RMS	Root mean square - efektivní hodnota

Seznam příloh