Abstrakt

Tato práce si dává za cíl vytvořit ucelenou podobu studijních materiálů, doplněných o názorné příklady, pro předmět Signály a soustavy. Úvodní část diplomové práce obsahuje charakteristiku vybraných skupin signálů: zvukové, sdělovací, obrazové a biologické. Další část je věnována signálům spojitým a AD&DA převodům a pro doplnění zadání nakonec také signálům diskrétním. Diplomová práce jako celek obsahuje základní teoretický popis probírané problematiky, který se snaží doplnit o zajímavé příklady, souvislosti, grafy a skripty napsané v programu Matlab pro názornou prezentaci probírané látky.

Abstract

This paper takes aim at creating a consistent form of study materials, supplemented with illustrative examples, for Signals and systems subject. The thesis starts with basic characteristics of acoustic, image, biological and communication signals. Characteristics of linear signals and AD&DA conversion has been added to the next part and to complete the submission, discrete signals follow. Diploma thesis as a whole contains basic theoretical description of problematics, which it tries to supplement with interesting examples, connections, graphs and matlab scripts for illustrative presentation of mentioned problematics.

Klíčová slova: signál, systém, hudební signál, zvukový signál, řeč, vzorkovací kmitočet, přenosová rychlost, jednorázový signál, ergodicita, stacionarita, AD a DA převod, konvoluce, echo, šum, AMDF, kvantizace, filtr

Key words: signal, system, music signal, acoustic signal, speech, sampling frequency, bit rate, pulse signal, ergodicity, stacionarity, AD and DA conversion, convolution, echo, noise, AMDF, quantization, filter

PASEČNÝ, J. *Multimediální podpora předmětu BSIS.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 53 s. Vedoucí semestrální práce prof. Ing. Milan Sigmund, CSc.

Obsah

1 Úvod ... 1
2 Definice signálu ... 2
3 Příklady signálů ... 2
3.1 Sdělovací signály ... 2
3.2 Biologické signály ... 4
3.2.1 Příklady biologických signálů ... 4
3.3 Zvukové signály ... 6
3.3.1 Řečový signál ... 6
3.3.2 Hudební signál ... 7
3.4 Obrazové signály ... 10
4 Spojité signály ... 12
4.1 Spektrální funkce ... 12
4.1.1 Vlastnosti spektrální funkce ... 12
4.1.2 Násobení konstantou ... 13
4.1.3 Změna časového měřítka ... 13
4.1.4 Posunutí v čase ... 14
4.1.5 Obrácení časové osy ... 14
4.2 Spektra některých signálů ... 14
4.2.1 Jednorázové signály ... 14
4.2.2 Kmitočtové filtry ... 16
5 Náhodné signály se spojitým časem ... 17
5.1.1 Stacionarita ... 18
5.1.2 Ergodicita ... 18
5.2 Komprese ... 19
6 A/D & D/A převod ... 21
6.1 Analogově – číslicový převod ... 21
6.2 Vzorkování ... 22
6.2.1 Ideální vzorkování ... 23
6.2.2 Reálné vzorkování ... 24
6.3 Chyba vzorkování ... 25
6.3.1 Kvantování ... 25
6.3.2 Kvantizační šum ... 27
6.4 Chyba kvantování ... 27

6.5 Kvantování reálného signálu ... 28
6.6 Digitálně analogové DA převodníky ... 29
6.7 Podvzorkování ... 30
6.8 Návrh filtru v Matlabu ... 31
7 Diskrétní signály ... 35
7.1 Základní diskrétní signály ... 36
7.1.1 Diskrétní jednotkový impuls ... 36
7.1.2 Diskrétní jednotkový skok ... 36
7.1.3 Exponenciální a lineárně rostoucí diskrétní signál ... 36
7.2 Určení základního tónu metodou AMDF ... 38
7.2.1 Realizace v Matlabu ... 39
7.3 Konvoluce ... 42
7.3.1 Impulzní odezva ... 44
7.3.2 Ozvěna ... 44
7.4 Vliv šumu na užitečný signál ... 46
8 Závěr ... 48

Seznam obrázků

Obr. 1.: Binární signál 3
Obr. 2.: Čtyřstavový signál 3
Obr. 3.: Úplný obrazový signál 4
Obr. 4.: EMG graf pro různé úrovně stisku ruky 5
Obr. 5.: EKG signál 5
Obr. 6.: Rentgenový snímek 5
Obr. 7.: Průběh napětí „s“ a „i“ 6
Obr. 8.: Ukázky tónů hraných na klavír 8
Obr. 9.: Úprava spektra jednoduchého tónu 9
Obr. 10.: Srovnání flétny, violy a zpěváka 10
Obr. 11.: Černobílý obraz 11
Obr. 12.: Šedotónový obraz 11
Obr. 13.: Operace se signálem 13
Obr. 14.: Obrácení časové osy 14
Obr.15.: Jednotkový impulz 15
Obr.16.: Jednotkový skok 15
Obr. 17.: Zákmity při změně napětí 16
Obr. 18.: Příklad útlumové charakteristiky a zapojení 16
Obr. 19.: Ukázka využití filtrů v kmitočtových výhybkách akustické soustavy 17
Obr. 20.: Stacionární proces 18
Obr. 21.: Proces fotosyntézy v závislosti na denní době 19
Obr. 22.: Blokové schéma AD převodu 21
Obr. 23.: přehled typů signálů a vzorkování 22
Obr. 24.: Postup při vzorkování 23
Obr. 25.: Dva různé typy vzorkování 24
Obr. 26.: Vliv vzorkovací frekvence 25
Obr. 27.: příklad kvantování 26
Obr. 28.: Převodní charakteristiky kvantování 26
Obr. 29.: Kvantizační šum 27
Obr. 30.: Kvantovaný sinus. signál 28
Obr. 31.: Kvantovaná hudební znělka 29
Obr. 32.: Postup při DA převodu 30
Obr. 33.: Změna spektra při podvzorkování 31
Obr. 34.: Výsledek dolní propusti 32

Obr. 35.: Výsledek horní propusti 33
Obr. 36.: Frekvenční charakteristika DP 33
Obr. 37.: DP s mezní frekvencí 1 kHz 34
Obr. 38.: DP s mezní frekvencí 100 Hz 34
Obr. 39.: Charakteristiky vytvořených filtrů 35
Obr. 40.: diskrétní jednotkový skok (a)) a impuls (b)) 36
Obr. 41.: Exponenciální a lineárně rostoucí diskr. signál 37
Obr. 42.: Periodický signál 37
Obr. 43.: Periodický signál 38
Obr. 44.: Typický průběh AMDF 38
Obr. 45.: Výstup skriptu *AMDF.m* 40
Obr. 46.: Výstup skriptu *AMDF.m* pro reálný signál 41
Obr. 47.: Výsledek zadané konvoluce 44
Obr. 48.: Impulsní odezva u ozvěny 45
Obr. 49.: Výstup skriptu echo.m 45
Obr. 50.: Typické odezvy systémů 46
Obr. 50.: Typy šumu 47
Obr. 51.: Výstup skriptu signalnoise.m 47

1 Úvod

Cíle předmětu BSIS (Signály a systémy) jsou v seznámení studentů se signály a systémy se spojitým časem, diskrétním časem a jejich reprezentací v kmitočtové oblasti. Předmět se ve studentovi snaží vytvořit základní přehled o této problematice, a kde to není potřeba, nezacházet zbytečně do velkých detailů.

V úvodu diplomové práce čtenáře seznámím se základním popisem vybraných druhů signálů a to jmenovitě zvukových, obrazových, sdělovacích a biologických. Každá skupina bude doplněna o názornou ukázku daného signálu, aby si případný čtenář mohl nejen představit problematiku z textu, ale také vidět, jak v praxi přesně vypadá. Jelikož je předmět BSIS hlavně o zvukových signálech, budu se zabývat v práci především touto skupinou.

Další část práce obsahuje dle zadání kapitolu o zpracování spojitých signálů a AD&DA převodů. Je vysvětlen princip převodu z AD na DA a naopak, princip vzorkování, kvantizace a vliv těchto úprav na vstupní signál. Každou kapitolu jsem se snažil doplnit něčím interaktivním, což jsou v případě této diplomové práce hlavně skripty v programu Matlab, vytvořené obrázky a grafy.

Finální část diplomové práce obsahuje popis signálů diskrétních. Výpočet základní periody ze signálu, příklady konvoluce, vliv šumu na užitečný signál a základní teoretické poznatky ohledně této problematiky.

V práci najdeme odkazy na několik různých vytvořených skriptů v Matlabu, které právě demonstrují použití té, či oné funkce, nebo metody, zrovna probírané v textu. Kódy jsem se snažil psát tak, aby každý, kdo si je prohlédne, ihned pochopil jejich význam. Komentáře všech jednotlivých důležitých řádků v kódu jsou samozřejmostí a .m soubory mají také v hlavičce jednoduchý popis celé jejich funkce, takže po přečtení budeme vědět přesně co je potřeba funkci zadat (vstupní signály) a jaké má funkce výstupy.

2 Definice signálu

Pokud chceme o signálech mluvit, musíme je také nějakým způsobem definovat. Tady nastává ovšem problém, jelikož jinou představu o signálu má obvodář, který v něm vidí popis určitého systému a jinou má odborník na zpracování signálů, který se snaží signál analyzovat a určovat jeho jednotlivé parametry. Pro něj je místo vzniku signálu většinou nepodstatné, nebo dokonce neurčitelné.

Definuji si tedy signál lehce a všeobecně, jako každou veličinu, obvykle fyzikální, která nese určitou informaci. Informací je rozuměno cokoliv nám užitečného, co je možno v signálu najít. Může to být přenesená řeč, sled jedniček a nul, nebo i jednoduché impulzy, signalizující něco důležitého.

Z hlediska informace nesené signálem není důležité, jakou má vlastní signál formu. Z hlediska prostředí, kterým se signál šíří, však ano. Někdy signál při cestě od zdroje k příjemci (přenosový kanál) často střídá svou formu. Důležité je, aby při konverzi z jedné formy na druhou, zůstávala zachována původní přenášená informace. Může však bohužel také dojít k rušení či ovlivňování nežádoucím signálem (šum), o kterém se zmíním později, a původní informace může být pozměněna.

Signál může být buď spojitý, nebo diskrétní, tedy buď analogový, nebo digitální. Rozdíl mezi nimi je v počtu stavů signálu. Analogový signál má stavů nekonečně (nazýván někdy spojitý) a digitální konečně mnoho (2, 4, 20, 50,... stavů). Digitální signál je často pouze binárním signálem, přenášené hodnoty jsou jen dvě — nula a jednička.

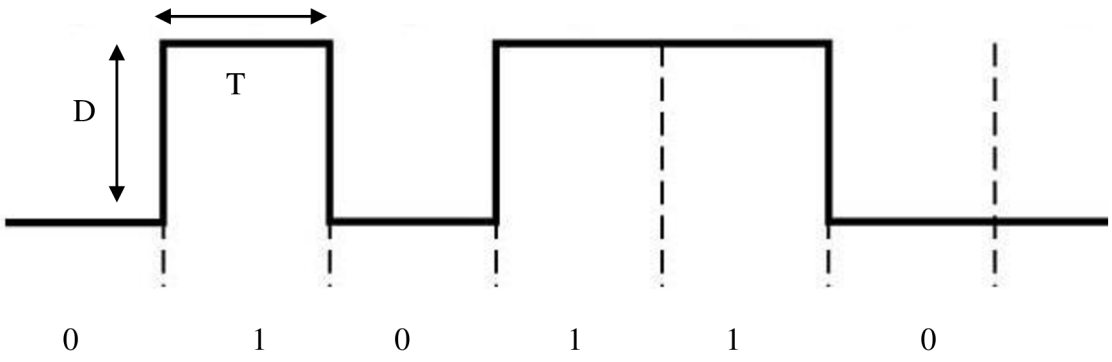
Nejčastější veličinou nesoucí signál bude elektrické napětí, nebo elektrický proud, jelikož v dnešní době je tento způsob levný a také efektivní. Na tyto veličiny je možno převést cokoliv, od obrazů, přes lidský hlas, až po např. měření teploty a dalších snímatelných veličin.

3 Příklady signálů

Existuje množství signálů, které se liší svou povahou a přenášenou informací. Pro představu mohu uvést několik známých příkladů signálu.

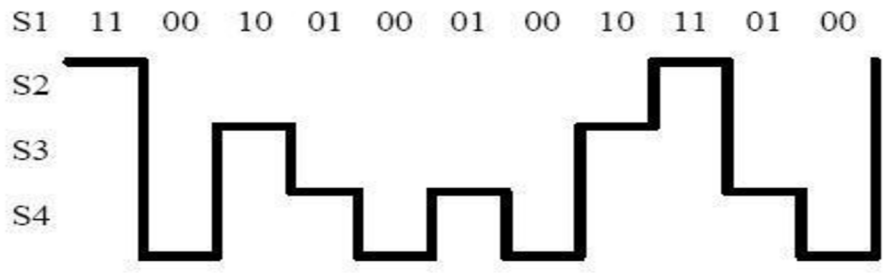
3.1 Sdělovací signály

V dnešní době výpočetní techniky, kdy komunikace probíhá prostřednictvím jedniček a nul, je důležité tyto hodnoty efektivně přímo, nebo zprostředkovaně přenášet. Jelikož se jedná pouze o dvě hodnoty, je velmi lehké takovýto signál vyjádřit např. dvěma úrovněmi napětí. Příklad možného signálu je na obr. 1. Signál má dvojí polaritu, pro vyjádření 1 a 0. Každá hodnota má přesně definovanou úroveň napětí a délku trvání. Pro 1 v tomto případě tedy platí kladný impuls výšky D a délky T a pro nulu logicky impuls záporný o stejné výšce D a délce T.



Obr. 1.: Binární signál

U sdělovacích signálů se budeme často zabývat pojmy, jako jsou modulační rychlost a přenosová rychlost, což není v podstatě nic jiného, než vyjádření množství informací, které je signál schopen přenést za určitý časový úsek (sekundu). Požadavky na rychlost jsou pochopitelně co největší, se stále větším množstvím přenášených dat. V závislosti na těchto faktech byly vyvinuty vícestavové signály, z nichž můžu uvést např. tzv. čtyřstavový signál. Jak již název napovídá, signál bude mít čtyři funkční stavy. V tomto případě se jedná o vyjádření vždy dvou po sobě jdoucích bitů (dibitů) dvěma úrovněmi impulzů v obou polaritách.

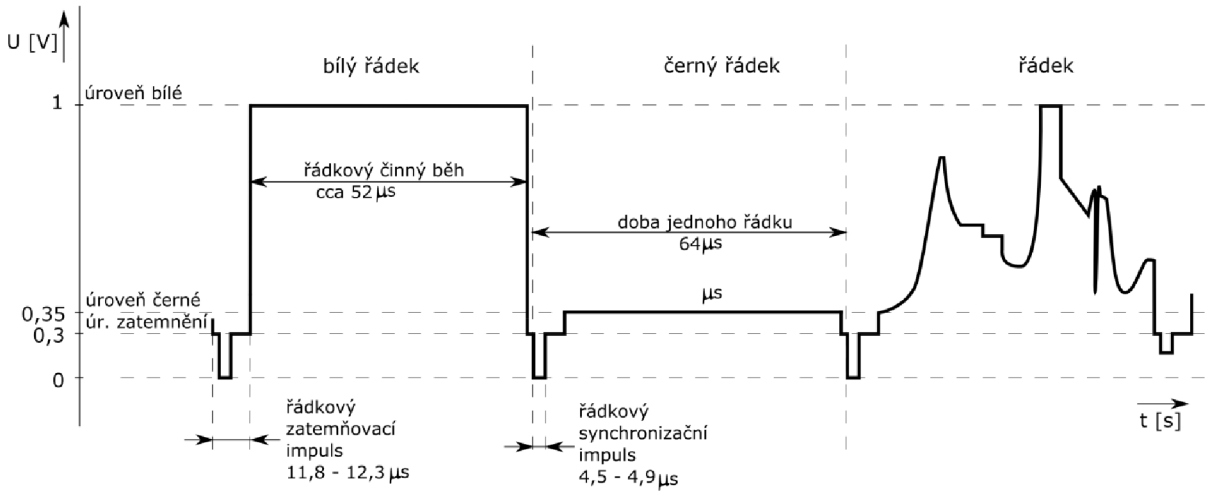


Obr. 2.: Čtyřstavový signál

U vícestavových signálů je ovšem více problémů s úrovní šumu, který signál ovlivňuje a velkou mírou určuje kvalitu a možnosti přenosu. Je lehké si představit, že lépe od sebe rozlišíme 2 úrovně, než 4 a více při stejném vysílacím výkonu.

To byly ty nejjednodušší základní typy sdělovacích signálů. Jako názornou ukázku komplexního signálu, používaném neustále, mohu uvést např. **úplný obrazový signál** televizního vysílání. Ten obsahuje informaci o průběhu jasu jednotlivých bodů každého řádku a řídící impulzy, které umožňují rekonstrukci vysílaného obrazu. Jsou to řádkové zatemňovací impulsy o délce trvání kolem 12 μs (11,8 – 12,3 μs), v nichž se vyskytují ještě řádkové synchronizační impulzy o délce cca 5 μs (4,5 – 4,9 μs).

Z obr. 3. je patrné, že bílé barvě náleží nejvyšší amplituda a černé naopak. Proto pokud chceme vykreslit bílý řádek, bude po dobu trvání jednoho řádku (64 μs) signál konstantní s vysokou amplitudou. Naopak to bude u řádku černého, a pokud se budou hodnoty jasu na daném řádku měnit, tak se signál bude podle toho také měnit, jak je vidět na konci signálu v obrázku.



Obr. 3.: Úplný obrazový signál

3.2 Biologické signály

Jako biosignály mohu označit veškeré signály, jejichž existence je zaznamenatelná v živých organismech. Může se jednat o průběhy elektrických napětí, proměnlivá magnetická pole, změny chemických koncentrací, mechanické pohyby, zvuky, změny teplot aj. Můžeme je registrovat v důsledku spontánní aktivity biologického systému (nativní signály) anebo jako důsledek nějakých úmyslných podnětů (evokované signály, provokace apod.).

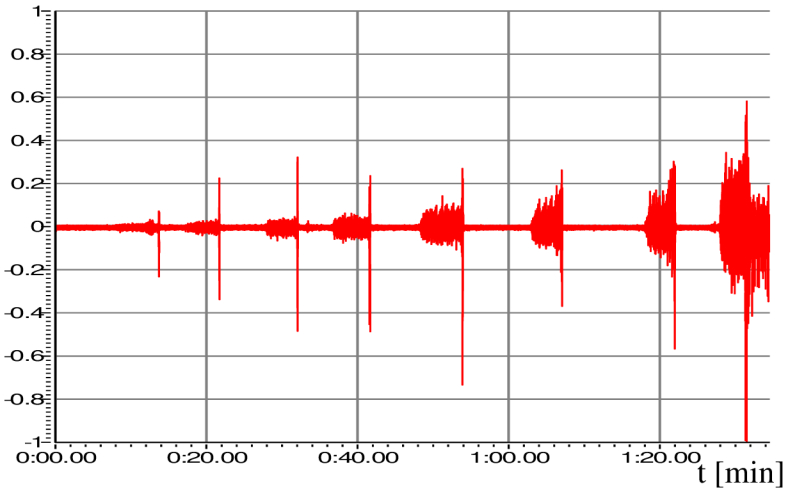
Biologické signály je možné dělit podle měřených veličin na bioelektrické, bioakustické, biomagnetické, biomechanické, bioimpedanční a biochemické. Jednotlivé typy, jako jsou EKG (elektrokardiograf), EEG (elektroencefalograf), nebo EMG (elektromyograf), zná z života snad každý.

3.2.1 Příklady biologických signálů

Elektromyografie (EMG) - Typickým představitelem biosignálu, snímaného z určitého okrsku tkáně, je elektromyogram. Tato metoda může být neinvazivní (snímání EMG povrchovými elektrodami), ale i invazivní – snímání jehlovými koncentrickými elektrodami. Při snímání jehlovými elektrodami z malého okrsku o velikosti zlomku mm máme možnost vidět i potenciály jednotlivých motorických jednotek. Naproti tomu elektromyogram, snímaný plošnou elektrodou, je typickým sumačním potenciálem, tvořený množstvím vzájemně se překrývajících signálů z velkého množství buněk; jeho frekvenční spektrum se pohybuje v oblasti řádově stovek až tisíců Hz a je závislý na aktivitě vyšetřované části svalu. Signál o tak vysoké frekvenci není možno přímo zapisovat na papír, proto jej lékař sleduje na obrazovce a je také možné jej převést na akustický signál pro posouzení sluchem, kdy je vnímán jako praskot až hřmot.

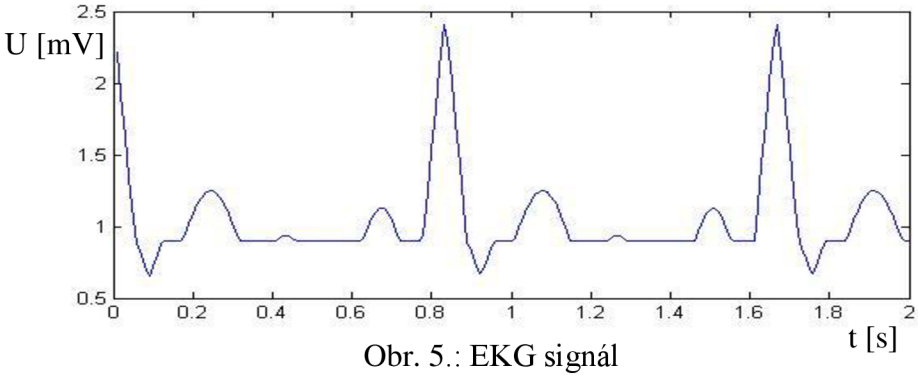
V rámci EMG je často vyšetřována i rychlost vedení periferních motorických nervů. Vyšetření spočívá v tom, že je stimulován nerv elektrickým výbojem (zpravidla v podkolenní či loketní jamce a na kotníku nebo na zápěstí) a přitom je elektromyograficky sledována

reakce svalových skupin. Z patologicky prodloužených latencí je potom možné diagnostikovat různé typy nemocí, popř. poruch.



Obr. 4.: EMG graf pro různé úrovně stisku ruky

Elektrokardiografie (EKG) - snad nejznámější biologický signál EKG, což je záznam časové změny elektrického potenciálu způsobený srdeční aktivitou. Nebudu zmiňovat způsob měření (získání) signálu, ale čistě jeho popis. Je to periodický signál, s periodou cca 1s u zdravého člověka, který má všechny své části vymezeny a důležité je zobrazení tzv. QRS komplexu. Jako kterýkoliv jiný signál je i tento ovlivňován rušivými složkami, což můžou být například svalové stahy, nebo naindukované napětí ze zdroje.



Obr. 5.: EKG signál

Obr. 6.: Rentgenový snímek

Samozřejmě do oblasti biologických signálů musíme počítat také dvourozměrné signály, jimiž jsou například rentgenové obrazy různých částí těla.

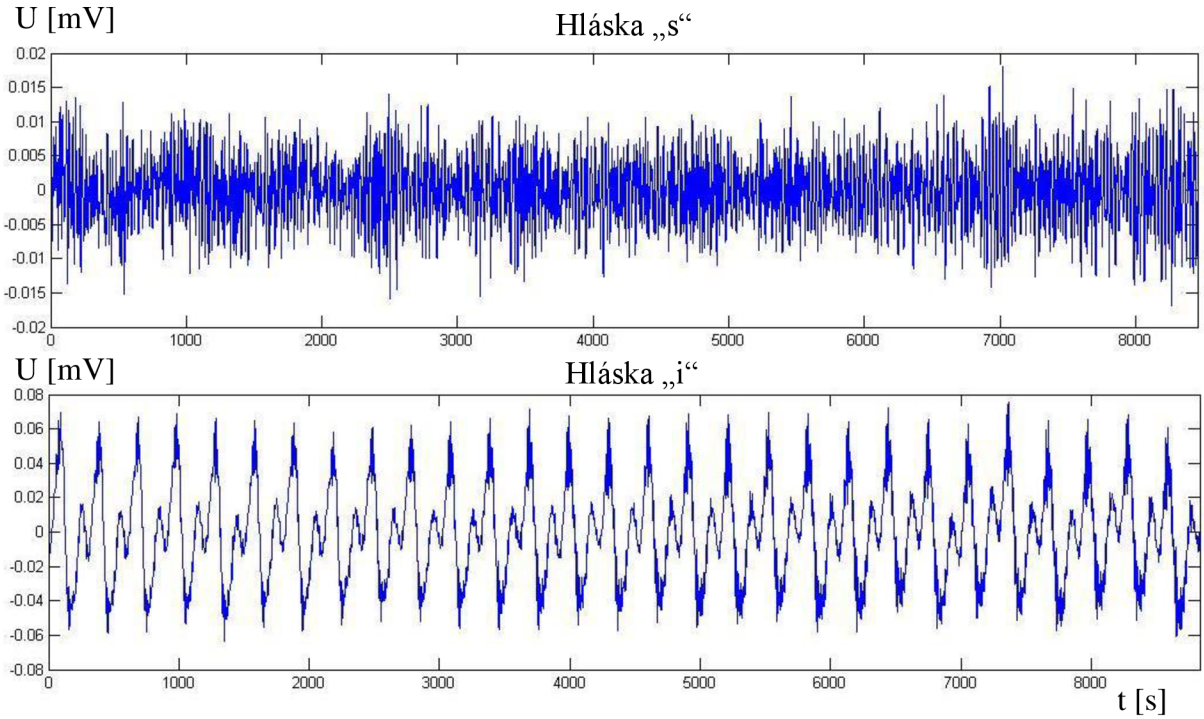
3.3 Zvukové signály

3.3.1 Řečový signál

Akustických signálů je celá řada. Vyzdvihnu z nich dvě nejvýznamnější oblasti a to je lidská řeč a hudba. Ne každý si to ihned uvědomí, ale lidskou řeč jsme schopni analyzovat stejně jako kterýkoliv jiný signál a určit tak plno důležitých, nebo zajímavých věcí. Samozřejmostí a tím nejdůležitějším, co budeme ze vzorku řeči chtít získat, je věcný obsah, neboli obsažená slova, která se dají interpretovat písmem. Výzkum v zpracování řečového signálu za dlouhou dobu pokročil a nyní jsme schopni určit, zda-li je mluvčí muž, žena, nebo dítě, jestli je nervózní, popřípadě jazyk, kterým mluví. Jelikož každý člověk má hlas jiný, liší se v určitých mezích i signál jeho řeči oproti jiným. Tohoto je zase využíváno v bezpečnostních systémech, kdy je třeba rozpoznat oprávněnou osobu podle hlasu.

Při přenosu hlasu je dobré stanovit si důležité parametry, které se dají ze signálu získat a přizpůsobit jim kvalitu daného přenosu. Jakost tohoto signálu je z velké části dána hlavně kmitočtovým pásmem propustnosti sdělovacího systému. Různé kvality byly zavedeny v různých systémech, ať už jde o telefonní kvalitu, rozhlasovou kvalitu, nebo například CD kvalitu.

U řečového signálu budu mluvit o dalším termínu a tím je „foném“. Foném je nejmenší součást zvukové stránky řeči, která má rozlišovací funkci řeči v systému konkrétního jazyka. Každý jazyk má odlišnou sadu fonémů, proto dva odlišné zvuky mohou v některých cizích jazycích mít stejnou funkci. Zjednodušeně, změnou fonému se změní také význam daného slova (např. **l**is-l**e**s-l**o**s).



Obr. 7.: Průběh napětí „s“ a „i“

Na obr. 7 je časový průběh napětí dvou hlásek, „s“ a „i“, zaznamenaný mikrofonem. Je vidět že hláska „s“ je vyloženě nepravidelná, zatímco „i“ se dá klasifikovat jako docela periodická.

Další důležitý faktor ovlivňující řečový signál je použitý vzorkovací kmitočet. Pro různé signály se opět používají různé hodnoty, kdy je vše řízeno Shannonovým teorémem. Ten určuje vzorkovací frekvenci jako minimálně dvojnásobek frekvence původního vzorkovaného signálu. V praxi se ještě volí mírná rezerva, takže například signál s horním mezním kmitočtem 7 kHz se vzorkuje se vzorkovacím kmitočtem 16 kSa/s. Dále se ještě kvalita signálu může měnit v závislosti na požadavcích dané aplikace. Lidský sluch je omezen několika faktory a ve většině případů není třeba přenášet kompletně celý řečový signál, nýbrž jen určité jeho složky.

Další kapitolou v řečových signálech může být např. rozpoznávání slov, které je v dnešní době předmětem intenzivního vývoje. Některé výsledky jsou již v praxi aplikovány, nicméně je na tomto poli pořád co zlepšovat.

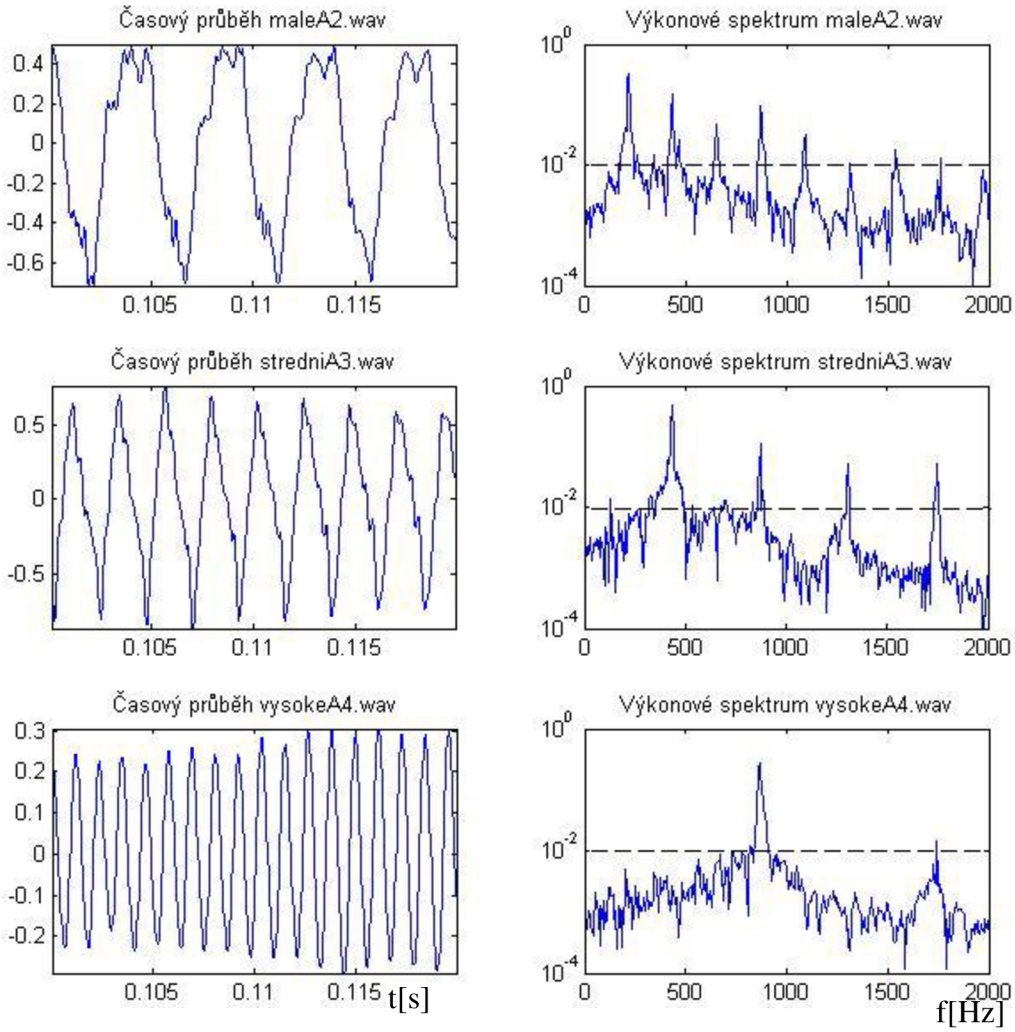
3.3.2 Hudební signál

Další důležitou oblastí akustických signálů je oblast hudby. Jak později zjistíme každý nástroj vydává tóny lišící se od ideálního popisu, ať už tím že nejsou přesně periodické, nebo že nejsou dokonce ani přísně harmonické, což se projevuje nejvíce na vyšších frekvencích, jelikož např. u strunových nástrojů existuje závislost rychlosti šíření zvuku strunou na kmitočtu.

Jak už jsem naznačil, zvuk vydávaný většinou hudebních nástrojů je vytvářen kmity mechanického oscilátoru. Obvykle se jedná o napnutou strunu, kterou určitým způsobem vybudíme (tahem smyčce, úderem kladívka) a ta poté rozvibruje další části nástroje. Opět je dobré připomenout nutnost vzorkování hudby a to se pohybuje při Hi-Fi audiosignálu s horním mezním kmitočtem 20 kHz na hodnotě 44,1 kSa/s, nebo 48 kSa/s.

Otázky ohledně toho, jak se mění harmonické složky spektra pro různé hudební nástroje, mohou být zodpovězeny pomocí Matlabu. Funkce ***analyze.m*** využívá vestavěnou funkci pro Matlab wawread a fft k výpočtu výkonového spektra Microsoft wave (.wav) audio souboru.

Výstupní grafy z *analyze.m* mohou být použity k určení výšky a hlasitosti zvukové nahrávky. Obr. 8 ukazuje výsledky malého A, středního A a velkého A hraného na klavír. Časové průběhy nalevo zobrazují změny tlaku v závislosti na čase, jenž detekuje mikrofon. Amplituda vlny je měřítko tlakových oscilací a koresponduje s hlasitostí zvuku. Hlasitost je obvykle měřena v decibelech. Tady si můžeme všimnout přirovnání k tlakovým změnám, jako další možný náhled na popis zvuku. Každý už určitě někdy stál na koncertě blízko pódia, nebo všeobecně poblíž hlasitých reproduktorů a cítil tlakové vlny takového silného zvuku.

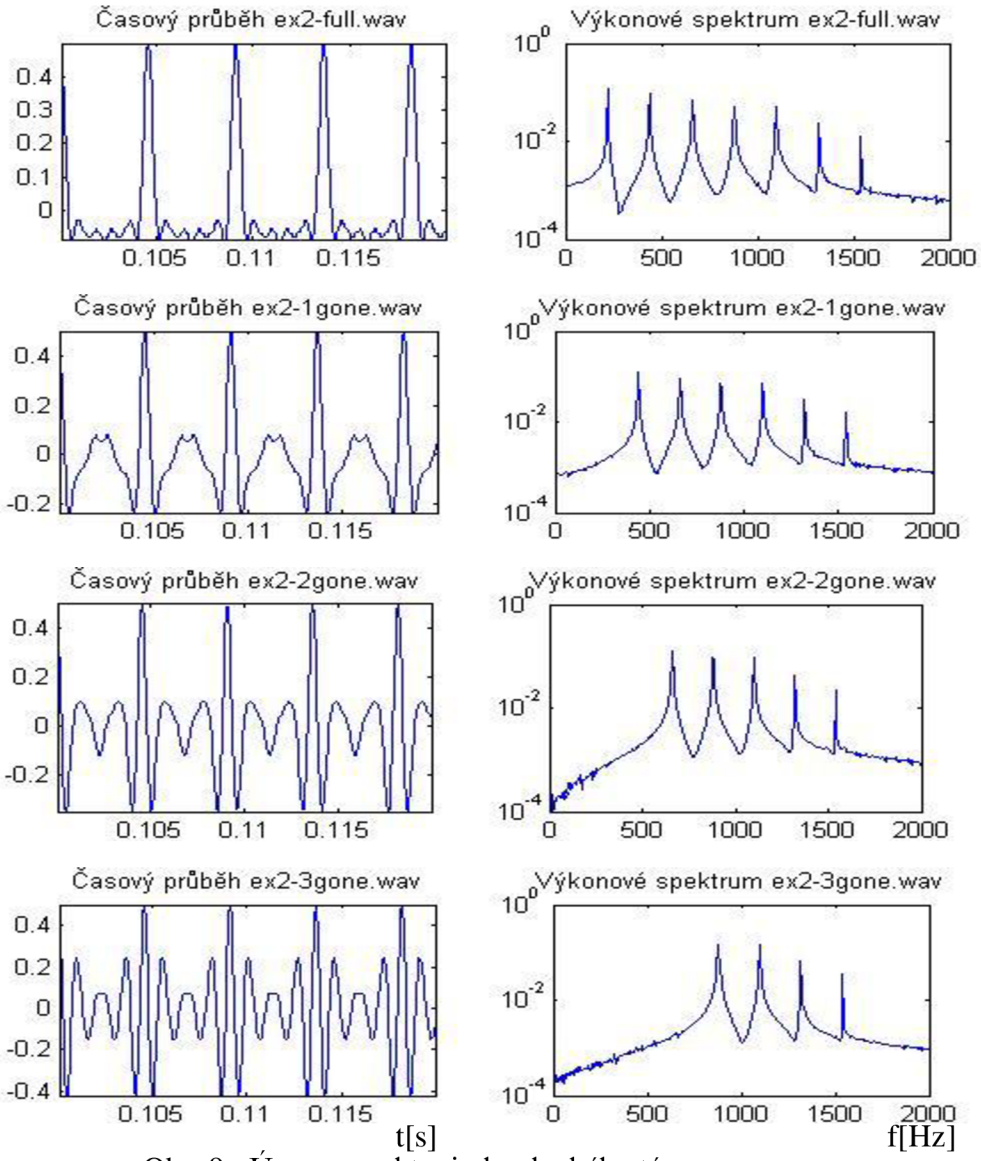


Obr. 8.: Ukázky tónů hraných na klavír

Z časových průběhů obr. 8 každý ihned vidí periodickou povahu každého zvuku a můžeme zde určit základní periodu signálu T. Odpovídající frekvence (f = 1/T) jsou: 220 Hz, 440 Hz, a 880 Hz pro jednotlivé tóny a znázorňují je první špičky na výkonových spektrech. Základní frekvence f se zdvojnásobuje s každou oktávou a vyšší harmonické jsou umístěny v závislosti na f dle očekávání. Spektrum mezi harmonickými je nenulové, protože vlny nejsou perfektně periodické.

Všimněme si, že frekvenční změna mezi jakýmikoliv dvěma návaznými harmonickými je vlastně rovna základní frekvenci. Lidská mysl podvědomě používá tento fakt k identifikaci výšky, i pokud jsou základní i nižší harmonické nepřítomny ve vzorku. Toto je způsob, jakým malé reproduktory vydávají nízké zvuky např. basové kytary, aniž by vyprodukovaly tak nízké frekvence.

Uvedu rovnou názornou ukázku takovéhoto případu. Následující zvuk je konstantní tón, kterému postupně ze spektra odeberu frekvence harmonických. Nejdříve první, pak druhou a třetí, jak je ukázáno na obrázcích. Jedná se o skript ***synthesize.m*** spojený s ***harmongone.m.***



Obr. 9.: Úprava spektra jednoduchého tónu

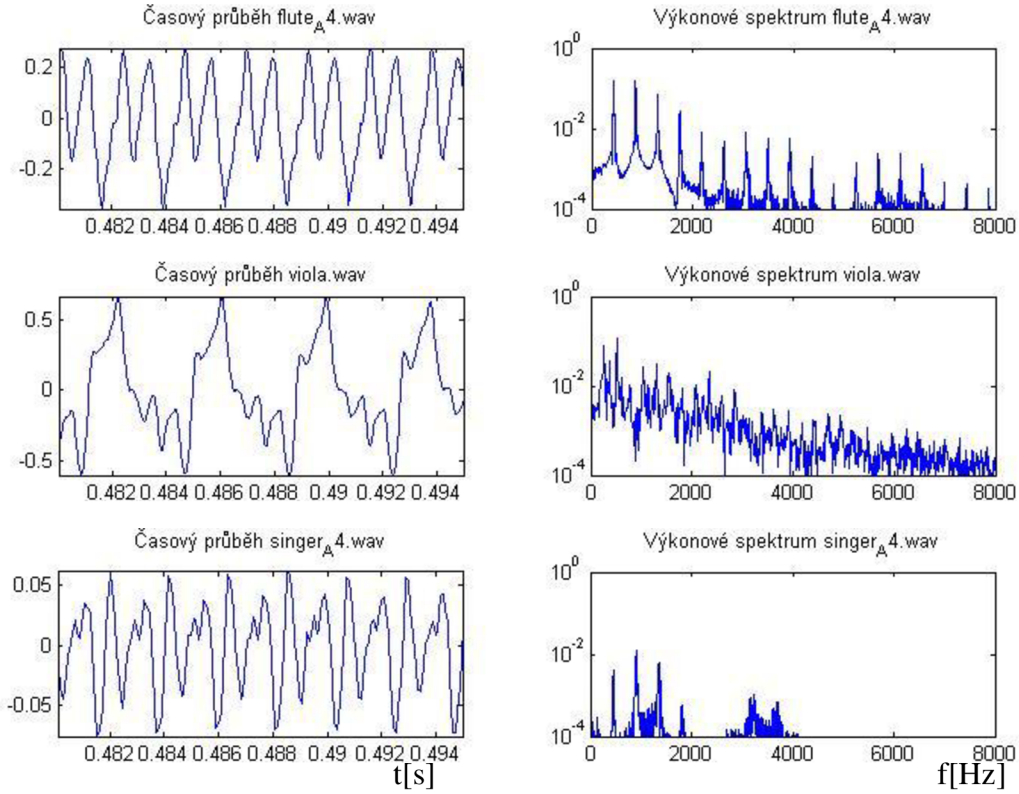
Když soubory přehrajeme, zjistíme, jak se jednotlivé zvuky od sebe liší. Každý zní trochu jinak, než ostatní, avšak výška všech zůstává pro lidské ucho víceméně stejná. Dá se říct, že čím více harmonických ubereme, tím se zvuk stává méně „barevnější“

Zvýšení oktávy vždy koresponduje se zdvojnásobením frekvence. Takže frekvence oktáv formují geometrickou řadu. Například, frekvence tónu A jsou 55, 110, 220, 440, 880 Hz.… Zdvojnásobení frekvence se dá dosáhnout zmenšením struny nástroje na polovinu, což je lehce ověřitelné na jakémkoliv strunném nástroji. Fakt, že frekvence tvoří geometrickou řadu má několik fyzických důsledků, např. :

- Nízké nástroje musí být znatelně větší, než vysoce hrající nástroje. Všeobecně, nástroj, který hraje o oktávu níže musí být 2x tak větší. Jednoduchým příkladem je postup od houslí přes violu, cello až k base. Housle jsou nejmenší, tudíž zvládnou nejvyšší tóny a opačně u basy.

- Varhany se také musí dvojnásobně prodloužit k dosažení nižší oktávy. Toto je důvod, proč varhany na začátku kostela, pokud jsou uspořádány sestupně, opisují exponenciální křivku.

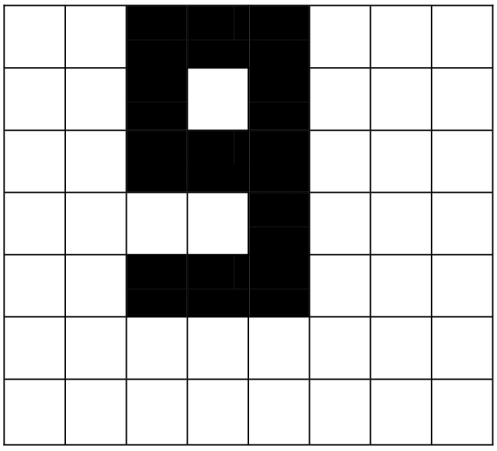
Lidské ucho dokáže identifikovat velké množství nástrojů i v případě, že hrají stejný tón o stejné hlasitosti. Ukážeme si, co vlastně odlišuje jednotlivé vydávané zvuky. Na obr. 10 je zobrazen časový průběh zvuku flétny, violy a lidského hlasu. Všechny tři vypadají na první pohled rozdílně. Barva, nebo kvalita zvuku nástroje je určena relativní silou harmonických. Čistý tón, složený pouze ze základní harmonické je pronikavý, ostrý, „kovový“. Výkon vyšších harmonických už přidává tónu zabarvení. Obr. 10 ukazuje, že např. u flétny dominují nižší harmonické, jelikož vydává v podstatě jednoduchý hvízdavý zvuk. Naproti tomu u violy se vyskytují ve větší míře vyšší harmonické, což jí dává barvitější, složitější zvuk.



Obr. 10.: Srovnání flétny, violy a zpěváka

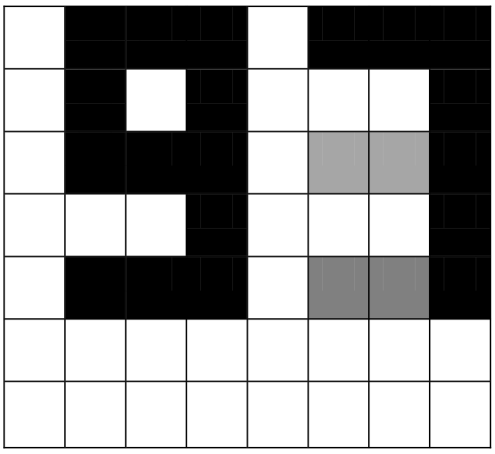
3.4 Obrazové signály

Obrazové signály nás dostávají do dvourozměrné roviny. Nejjednodušší je představit si obraz jako matici o určitém počtu řádků a sloupců, z nichž každá hodnota reprezentuje barevný odstín jednoho bodu v obraze. Překládat do signálové podoby najednou jak řádky, tak sloupce by bylo složitě realizovatelné, proto se problém řeší snímáním jednotlivých řádků po sobě (např. televizní přenos). Tímto se signál převede na jednorozměrný.



0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0	0
0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Obr. 11.: Černobílý obraz



0	3	3	3	0	3	3	3
0	3	0	3	0	0	0	3
0	3	3	3	0	1	1	3
0	0	0	3	0	0	0	3
0	3	3	3	0	2	2	3
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Obr. 12.: Šedotónový obraz

Obr. 11 je klasická ukázka binárního obrazu, který se skládá pouze z černé a bílé (černobílý obraz). Jeho vyjádření je pak jednoduché, když potřebujeme zpracovat pouze 2 hodnoty barvy. Jednotlivé plošky uspořádané do řádků a sloupců se nazývají pixely, a pokud chceme obrázek popsat, potřebujeme k tomu určitý počet bitů, který je dán jako „počet řádků x počet sloupců x bitové vyjádření odstínů“. V tomto případě je to 8 x 7 x 1 = 56 bitů.

Oproti tomu obr. 12 představuje složitější obraz, ve kterém se už rozlišují stupně šedi. Každý stupeň má svou definovanou hodnotu a je pouze na nás, kolik takovýchto stupňů definujeme. Samozřejmě platí čím více odstínů šedi, tím je obraz „hladší“, a nároky na zpracování takovéhoto signálu vyšší. Pro tento případ bychom potřebovali k vyjádření obrazu 8 x 7 x 2 = 112 bitů, jelikož máme čtyři stupně šedi, které mohou být znázorněny dvěma bity. V praxi se samozřejmě pracuje s mnohem náročnějšími a většími rozměry obrazů, což vytváří potřebu stále rozvíjet obor analýzy a zpracování obrazových signálů. Tato oblast zahrnuje také kompresi obrazových dat, potlačení šumu a různé metody úpravy obrazu.

4 Spojité signály

Podle charakteru definičního oboru argumentů signálu budeme nadále rozlišovat signály spojité a diskrétní, v případě více rozměrů může být jejich charakter i kombinovaný. Pokud je definičním oborem O souvislá R rozměrná oblast, hovoříme o **signálu spojitém**, který budeme značit ***s(t)***.

4.1 Spektrální funkce

Nyní bych mohl uvést několik dalších základních pojmů, s kterými se budeme velice často setkávat. Jeden z nejdůležitějších je snad spektrální funkce:

Spektrální funkce vyjadřuje kmitočtovou závislost fázorů (komplexních amplitud) spektrálních složek signálu. Spektrální funkci *S(ω)* můžeme vypočítat ze známého časového průběhu signálu (např. *s(t)*) pomocí Fourierovy transformace:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\, exp(-j\omega t) dt\,, \tag{4.1}$$

kde ω je úhlový kmitočet.

Definici spektrální funkce tedy známe a teď by bylo vhodné říci si něco o jejich vlastnostech a možnostech úpravy.

4.1.1 Vlastnosti spektrální funkce

Nabízí se možnost rozepsat výraz v integrálu z rovnice 4.1 na reálnou a imaginární část, a to *cos (ωt) – j sin (ωt)*. Nyní se dá určit reálná a imaginární část spektrální funkce *S(ω)* jako:

$$R(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cos(\omega t)\, dt, \tag{4.2}$$

a imaginární část

$$X(\omega) = -\int_{-\infty}^{\infty} s(t) \sin(\omega t)\, dt. \tag{4.3}$$

Při uvážení toho, jak se funkce sinus a cosinus chovají pod integrálem si můžeme uvědomit, že *R(-ω)= R(ω)* a *X(-ω)= -X(ω)*. Samozřejmě *X(0)= 0*, z čehož také vyplývá že *S(ω)* a *S(-ω)* jsou funkce **komplexně sdružené.**

Pokud budeme pracovat se sudou, nebo lichou funkcí signálu *s(t)*, bude se spektrální funkce podle toho také měnit a to tak, že pro sudou funkci signálu *s(t)* dostaneme ryze reálnou spektrální funkci (*X(ω)=0*) a opačně pro lichou funkci signálu *s(t)* dostaneme ryze imaginární spektrální funkci (*R(ω)=0*).

Princip superpozice

$$x_1(t) + x_2(t) \sim X_1(\omega) + X_2(\omega) \tag{4.4}$$

$$ax(t) \sim aX(\omega)$$

Změna časového měřítka

$$x(t/a) \sim aX(a\omega), \text{ kde } a>0 \tag{4.5}$$

Translace funkce

$$x(t-\tau) \sim X(\omega)e^{-j\omega\tau} \tag{4.6}$$

Transpozice spektra

$$X(\omega-\Omega) \sim x(t)e^{-j\Omega t} \tag{4.7}$$

Uvedené vztahy jsou sice přesné a zkušený matematik se v nich bude bez problému orientovat, nicméně určitě nebude na škodu popsat si matematické zápisy také slovně.

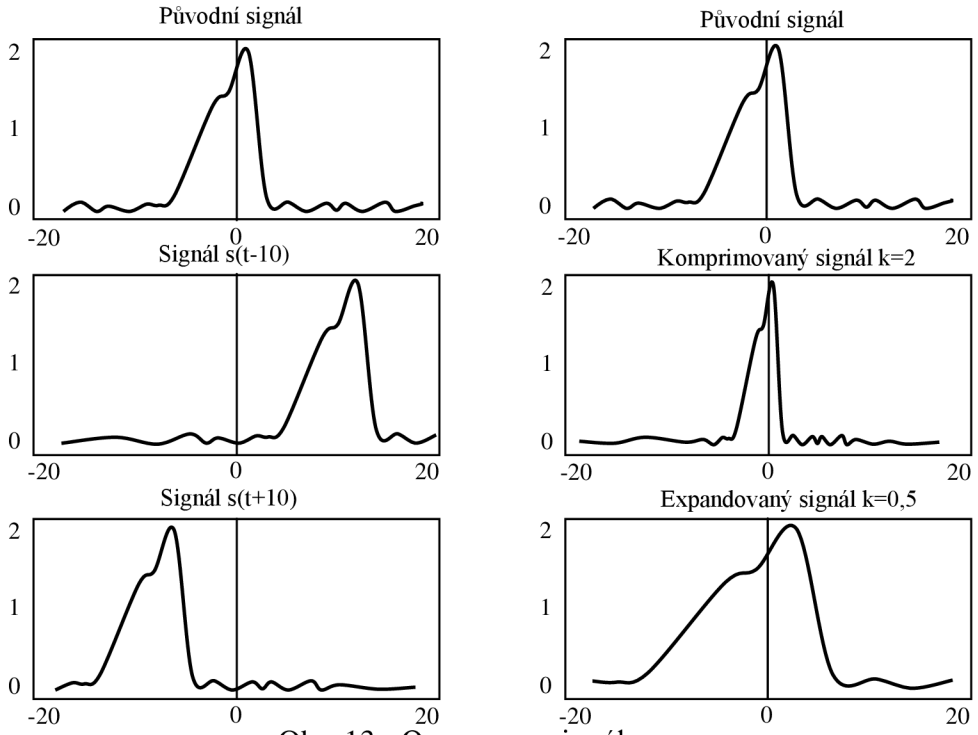
4.1.2 Násobení konstantou

Okamžitá hodnota signálu se zvětší (zmenší) a-krát po násobení signálu konstantou. Pro a > 1 hovoříme o zesílení, pro a < 1 o zeslabení.

4.1.3 Změna časového měřítka

Po vynásobení hodnot nezávislé proměnné (času) konstantou *k,* dochází k modifikaci časového měřítka - pro *k* > 1 hovoříme o časové kompresi, pro *k* < 1 o časové expanzi.

Poznámka: Je třeba si uvědomit, že v novém průběhu nabývá signál v čase t týchž hodnot jako původní signál v čase k.t, pro *k*>1 tedy plyne čas rychleji, pro *k*<1 plyne čas pomaleji



Obr. 13.: Operace se signálem

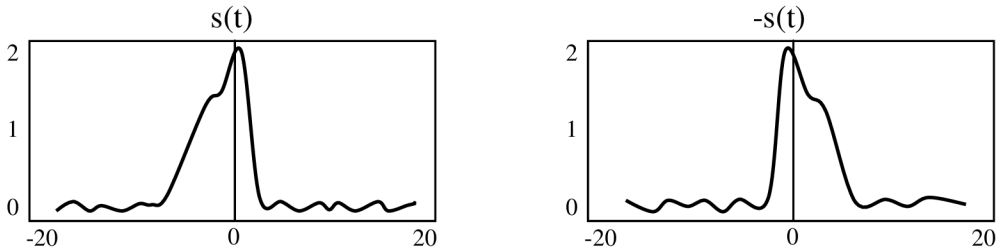
4.1.4 Posunutí v čase

Po přičtení (odečtení) hodnoty τ od původního času t dochází k posunu časového průběhu signálu vlevo (vpravo) na časové ose. Jinými slovy po přičtení hodnoty τ dochází ke zpoždění signálu, po odečtení se signál předchází.

Časově posunutý signál nabývá v čase $t \pm \tau$ hodnot, kterých nabývá původní signál v čase t. Jakým směrem dochází k posunu si lze nejsnáze uvědomit pro čas $t=0$. Aby posunutý signál nabyl téže hodnoty jako původní signál v daném čase $t=0$, musí být argument $t \pm \tau$ také roven nule. Tedy přičítáme-li τ, je argument nulový pro $t = -\tau$ a odečítáme-li τ, je argument nulový pro $t = \tau$.

4.1.5 Obrácení časové osy

Inverzi časové osy provedeme změnou znaménka časového argumentu. Má-li současně dojít k časovému posunu, je třeba změnit znaménko u všech členů argumentu.



Obr. 14.: Obrácení časové osy

4.2 Spektra některých signálů

4.2.1 Jednorázové signály

Neperiodické signály s relativně krátkým časovým intervalem, ve kterém nastávají změny průběhu, označujeme jako jednorázové. Mezi nimi zaujímají nejdůležitější pozici dva signály – jednotkový (Diracův) impuls a jednotkový skok (Heavisidova funkce).

Jednotkový impuls- jinak také Diracův impuls, Diracova funkce, funkce delta. Zjednodušeně lze říct, že jednotkový impuls $\delta(t)$ je velice úzký (limitně s nulovou šířkou) a velice vysoký (limitně s nekonečnou výškou) obdélníkový impulz, jehož výška je rovna převrácené hodnotě šířky, tzn., že mohutnost, definovaná plochou, kterou signál ohraničil spolu s časovou osou je jednotková.

Trochu matematického popisu toho, co bylo řečeno v předchozím odstavci:

$$\delta(t-\tau) = 0 \quad \text{pro } t \neq \tau \qquad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-\tau)dt = 1 \tag{4.8}$$

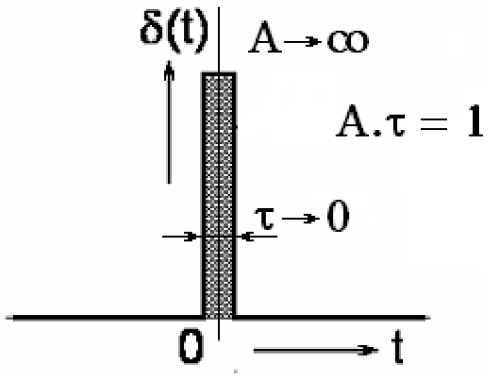
$$\rightarrow \infty \quad \text{pro } t = \tau$$

a definice:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\delta(t-\tau)dt = f(\tau). \tag{4.9}$$

V praxi nelze samozřejmě takovýto impulz vytvořit, ale pro potřebné aplikace bude dostačující impulz s dobou trvání podstatně kratší, než jsou časové konstanty systému, na který tímto impulzem působíme.

Velký význam má u diskrétních obvodů, kde přechází na prosté číslo 1.

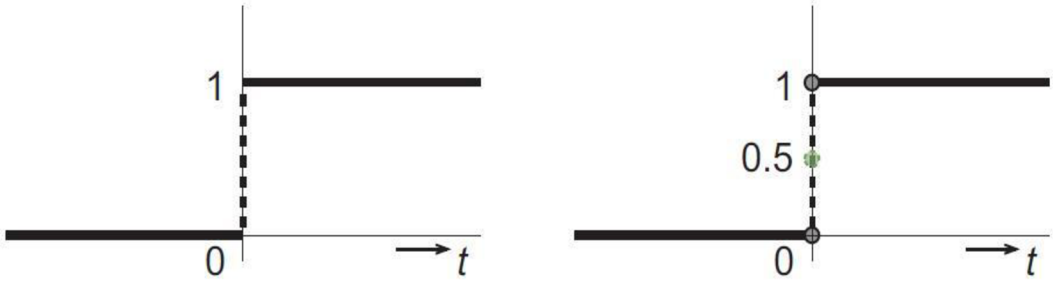


Obr.15.: Jednotkový impulz

Jednotkový skok- (Heavisidova funkce) Je druhý důležitý pojem v oblasti jednorázových signálů. Jedná se o funkci s jedním bodem nespojitosti a řadíme ho mezi signály s nekonečnou energií.

$$u(t) = \begin{cases} 0 & pro \quad t < 0 \\ 0{,}5 & pro \quad t = 0 \\ 1 & pro \quad t > 0 \end{cases}$$

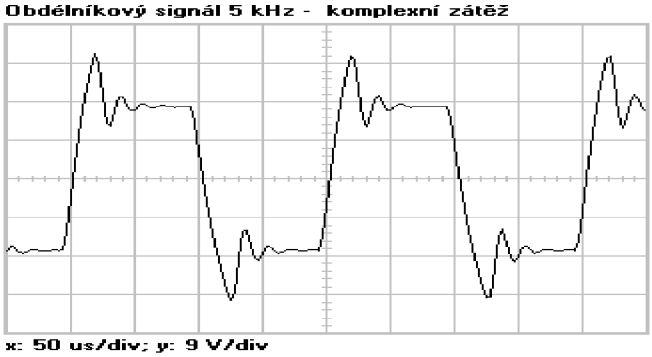
Snad nejjednodušší pro představení jednotkového skoku bude uvést jeho obrázek.



Obr.16.: Jednotkový skok

Jednotkový skok je jedním ze standardních signálů pro testování soustav. Z odezvy soustavy na buzení jednotkovým skokem lze zpravidla usuzovat na vlastnosti soustavy.

Dalším signálem bude např. **obdélníkový impuls**, který bude mít ideálně některé vlastnosti stejné s jednotkovým skokem. V praxi ovšem zase narazíme na rozdíl teorie od praxe, kdy se nám prakticky nemůže podařit vytvořit „dokonalý“ vzorek signálu. Na obr. 17. jsou jasně vidět překmity napětí, než se stabilizuje na dané úrovni po změně. Našim záměrem bude samozřejmě vždy mít průběh co nejhladší, nicméně dokonalosti docílíme pouze u matematických rovnic.

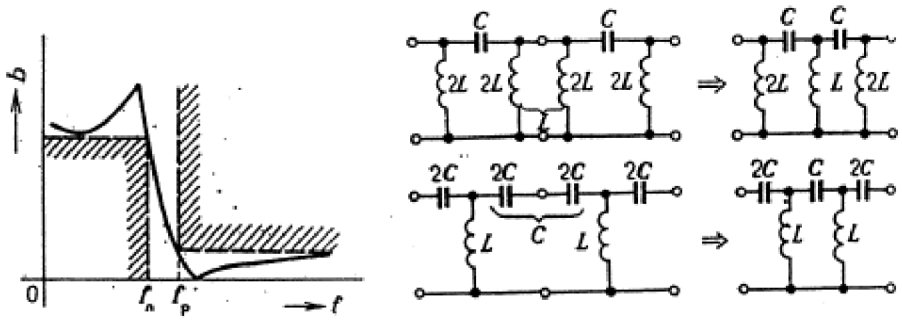


Obr. 17.: Zákmity při změně napětí

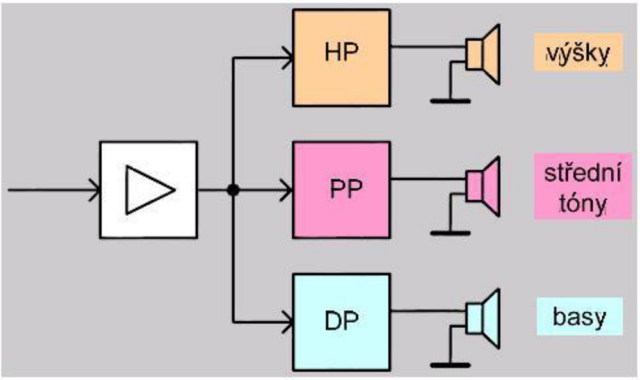
4.2.2 Kmitočtové filtry

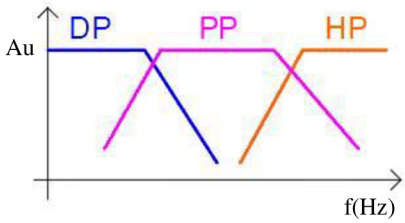
Kmitočtové filtry jsou lineární dvojbrany, které propustí (bez, nebo jen s malým útlumem) harmonické složky spektra zpracovávaných signálů v určitém pásmu kmitočtů, které nazýváme propustné pásmo. Mimo propustné pásmo jsou harmonické složky naopak silně utlumovány- tzv. nepropustné pásmo.

Základní dělení filtrů spočívá v definování propustného (nepropustného) pásma. Máme tak filtry typu horní propust, dolní propust, pásmová propust a pásmová zádrž. Např. dolní propust se používá v usměrňovačích, kde je třeba oddělit stejnosměrnou složku a potlačit všechny střídavé složky. Pásmová propust má uplatnění na vstupu přijímačů, kde vybírá signál určitého vysílače.



Obr. 18.: Příklad útlumové charakteristiky a zapojení





Obr. 19.: Ukázka využití filtrů v kmitočtových výhybkách akustické soustavy

Obr. 19. ukazuje blokové schéma kmitočtové výhybky v akustické soustavě, kde vyfiltrujeme vždy dané pásmo a to pak můžeme efektivněji zesílit.

5 Náhodné signály se spojitým časem

Všechny signály doposud byly v podstatě plně předvídatelné a přesně popsány vztahy. Nyní se ovšem dostáváme do oblasti, kdy se signály začínají chovat náhodně a je proto nutné zavést další nástroje pro jejich popis. Pro jednoduchou představu se jedná např. o signál, který je ovlivněn šumem, který má velmi nepravidelné chování. Budeme se muset zabývat stanovením pravděpodobnosti chyby, neboť pokud obdržíme zašuměný signál, a budeme jej chtít vyčistit, musíme přijít na způsob jak odstranit šum, který je v každém vzorku samozřejmě jiný.

Je možné uvést bezpočet příkladů náhodných procesů. Uvedu namátkou tyto:

Ve fyzikálních a technických vědách:

seismický záznam v geofyzice,

řada nejvyšších denních teplot v meteorologii,

změny v tloušťce drátu v průběhu jeho délky,

změny v počtu výzev na určité telefonní lince.

Ve společenských vědách:

změny v počtu obyvatelstva,

procesy mortality a invalidity obyvatelstva.

V ekonomice:

Změny poptávky po určitém výrobku,

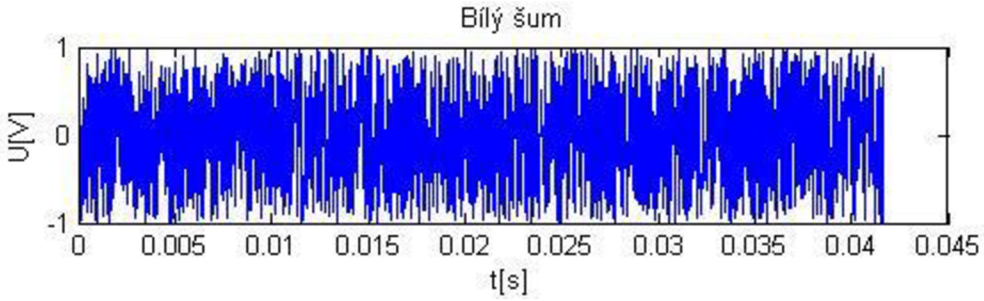
Analýza vývoje kursu akcií na burze

V této části bude opět vhodné zmínit několik důležitých termínů. Stacionarita je jedním z nich.

5.1.1 Stacionarita

Stacionární náhodný proces (stationary random process) je proces se stálým chováním. Přesněji formulováno, stacionární náhodný proces je takový proces, jehož libovolné statistické charakteristiky nejsou závislé na poloze počátku časové osy (nezávisí na absolutních hodnotách času, jen na délkách časových intervalů mezi okamžiky t_1 a t_2. Tato vlastnost se projevuje zjednodušením funkcí popisujících náhodný proces.

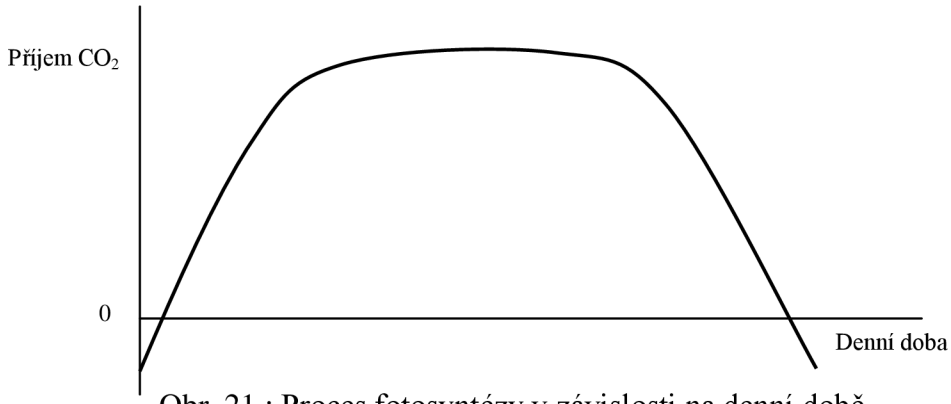
Jednoduchý příklad stacionárního procesu je např. bílý šum. Můžeme spolu srovnat jakékoliv dva vybrané úseky signálu a vždy tyto 2 úseky budou mít stejné vlastnosti (střední hodnoty).



Obr. 20.: Stacionární proces

5.1.2 Ergodicita

Ergodický náhodný proces (ergodic random process), se vyznačuje tím, že všechny jeho realizace mají stejné statistické vlastnosti (stejné chování)- To nám pak umožňuje při zkoumání náhodného procesu odhadovat funkce a veličiny náhodný proces popisující z průběhu jediné, a to libovolné realizace.



Obr. 21.: Proces fotosyntézy v závislosti na denní době

Obr. 21. ukazuje proces fotosyntézy u rostlin v závislosti na denní době, resp. příjem CO2 v závislosti na světle, které přes den mění svou intenzitu. Pokud se vezme realizace tohoto děje z různých dní, které byly stejně dlouhé, a nebylo oblačno, budou realizace shodné, tudíž se jedná o proces ergodický. Oproti stacionárnímu procesu se zde již nedají srovnat dva různé úseky jedné realizace, jelikož se od sebe liší. Samozřejmě proces fotosyntézy závisí na více parametrech, ale pro představu postačí tento model.

5.2 Komprese

Úkolem komprese dat je zmenšit datový tok, nebo zmenšit potřebu zdrojů při ukládání informací. Používáme dva mechanismy: **bezztrátovou** kompresi, která odstraňuje **nadbytečnou** (redundantní) informaci a **ztrátovou** kompresi, která odstraňuje **nepodstatnou** (irelevantní) informaci (vyšší kmitočty apod.).

Bezztrátová- Jestliže např. spolu dva lidé hovoří, tak jsou schopni se dorozumět i v případě výpadku nějakého slova z kontextu celého rozhovoru, věty apod. Z toho vyplývá, že se přenáší nějaká informace navíc. Tuto informaci neumí technická zařízení využívat, a proto se ji snažíme odstranit. Při odstranění nedochází ke ztrátě kvality, ale má menší stupeň komprese, než jiné metody. Bezztrátová komprese je založena na statistických metodách, např. formát .zip.

Ztrátová- Tato komprese už odstraňuje informaci pro nás nepodstatnou. V tomto případě už dochází ke ztrátě kvality na přijatelnou úroveň. Má vyšší stupeň komprese, než bezztrátová a tyto metody využívají znalosti o vzniku dat. Proto se pro různá data liší.

Přemýšlejme, jak bychom mohli změnit velikost například zvukového souboru formátu .wav. Mějme soubor *pokus.wav*, jehož vlastnosti jsou následující:

- délka: 5 s

- vzorkovací frekvence: 48 kHz

- počet bitů na vzorek: 16

- velikost: 485 KB

Vesměs všechny jeho atributy můžeme změnit v prospěch velikosti. Samozřejmě je nutné vědět, co si můžeme a co nemůžeme dovolit. Pokud chceme audio signál zkrátit časově, můžeme to provést jen, pokud se ve vymazaných úsecích nevyskytuje podstatná informace. Pokud nevyskytuje, vzorek zkrátíme a dostaneme menší velikost výsledného souboru.

Dále můžeme měnit vzorkovací frekvenci. Tady se dostáváme do problému s vzorkovacím teorémem. Víme, že vzorkovací frekvenci musíme zvolit minimálně dvojnásobnou, než jsou nejvyšší frekvence obsažené v signálu, pokud je chceme zaznamenat úplné. Tzn., že při f_{vz}= 48 kHz, uslyšíme i frekvence rovny 24 kHz. Jenže z biologie víme, že lidské ucho má pouze omezený rozsah frekvencí, které je schopno vnímat a ty se pohybují individuálně v rozmezí od 16 Hz do 20 kHz. S přibývajícím věkem se posunuje hlavně horní hranice směrem dolů. Tuto skutečnost opět můžeme využít v kompresi a vzorkovací frekvenci snížit. Bude samozřejmě záležet, o jaký audio signál jde a kolik informace jsme ochotni z něj vypustit. Pokud to bude rozhovor, kde nám jde pouze o věcný obsah, můžeme snížit vzorkovací frekvenci klidně na velmi nízkou hodnotu, jako jsou nízké jednotky kHz. Ovšem, pokud se bude jednat o zpěv operního zpěváka, kde vyžadujeme slyšet barvu jeho hlasu a „vychutnat“ si jej, nemůžeme si dovolit vzorkovací frekvenci příliš snižovat.

Další možností je ještě změnit počet bitů, kterými je vyjádřen každý vzorek. Předdefinované hodnoty dnes používané jsou 8, 16, 24 a 32 bitů.

Když si prohlédneme vytvořený soubor ***podvzorkovani.m***, zjistíme, jak se dá v matlabu provést podvzorkování signálu plus jeho uložení do souboru s jiným počtem bitů na vzorek. Můžeme si trochu pohrát s nastavením a vyzkoušet jak malý soubor dokážeme z původního dostat.

Samozřejmě tímto způsobem nedostaneme nijak zvlášť dobrý poměr velikost/kvalita a v praxi se používají ke kompresi sofistikované algoritmy, které se liší pro povahu komprimovaných dat.

Jedná se samozřejmě o ztrátové komprese zvuku, vycházející z řady psychoakustických vlastností lidského ucha. Ty využívají k zanedbání těch informací ve zvuku, na jejichž změnu ucho není citlivé, nebo které vůbec nepostřehne. V dnešní době jde o nejrozšířenější MPEG-1 a MPEG-2, v nichž jsou specifikovány tři postupy kódování zvuku, které se vzájemně liší složitostí a dosahovaným kompresním poměrem. Jsou označovány jako úroveň 1 až 3, přičemž úroveň 1 je nejjednodušší a má nejnižší kompresní poměr, zatímco úroveň 3 je nejsložitější a dosahuje nejlepšího kompresního poměru. Úroveň 3 je nám známa pod jménem **MP3** a dosahuje kompresního poměru 1:10 až 1:12.

6 A/D & D/A převod

Nejdříve uvedu pár základních termínů, které budu používat. Zkratka DA převod znamená digitálně analogový převod, tedy převod číselné hodnoty na analogovou hodnotu napětí nebo proudu. Někdy se též používá zkratka ČA – číslicově analogový.

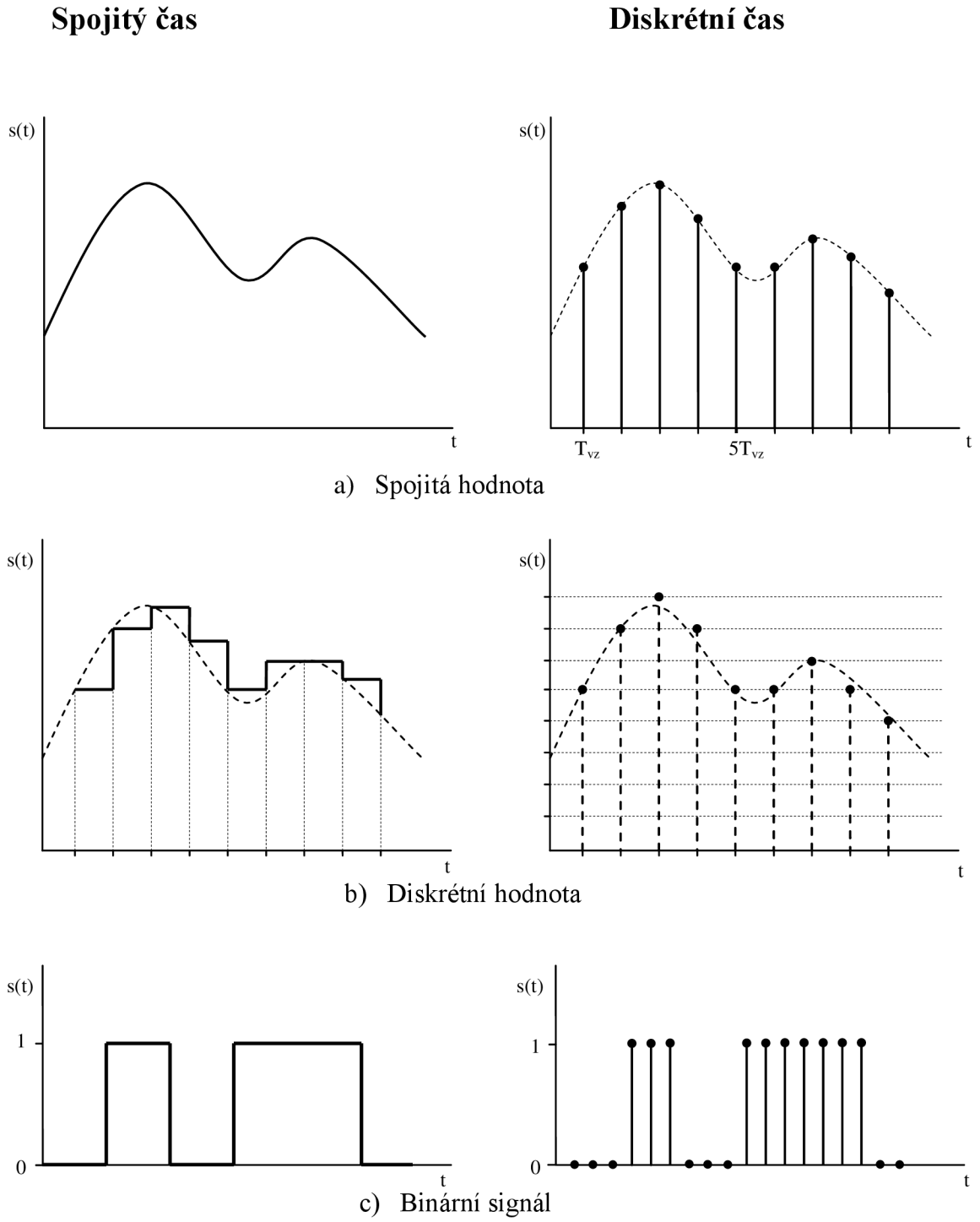
Zkratka AD převod znamená analogově digitální převod, převod hodnoty napětí nebo proudu na číselnou hodnotu, někdy se též používá zkratka AČ - analogově číslicový.

Elektronický obvod, který realizuje tyto převody se nazývá převodník (anglicky convertor). AD a DA převodníky se využívají v měřicí a regulační technice, při číslicovém záznamu obrazu a zvuku a podobně.

6.1 Analogově – číslicový převod

Obr. 22.: Blokové schéma AD převodu

Jak napovídá blokové schéma, při převodu analogového signálu na digitální musíme nejdříve daný signál **navzorkovat**, tzn. odebrat vzorky signálu v určitých časech. Pokud je splněna vzorkovací podmínka $f_{vz} > 2*f_{max}$ je možné signál obnovit bez chyb- nevzniká zkreslení. Navzorkovaný signál dále podstupuje **kvantování,** což je zaokrouhlení signálu na určité hladiny. Jednoduše jde o to, že každý zaznamenaný bod musí mít přesně definovanou hodnotu. Tady vždy vzniká zkreslení závislé na počtu hladin- označuje se jako **kvantizační šum**. Posledním krokem je **kódování**, neboli vyjádření hladin binárním kódem.



Obr. 23.: přehled typů signálů a vzorkování

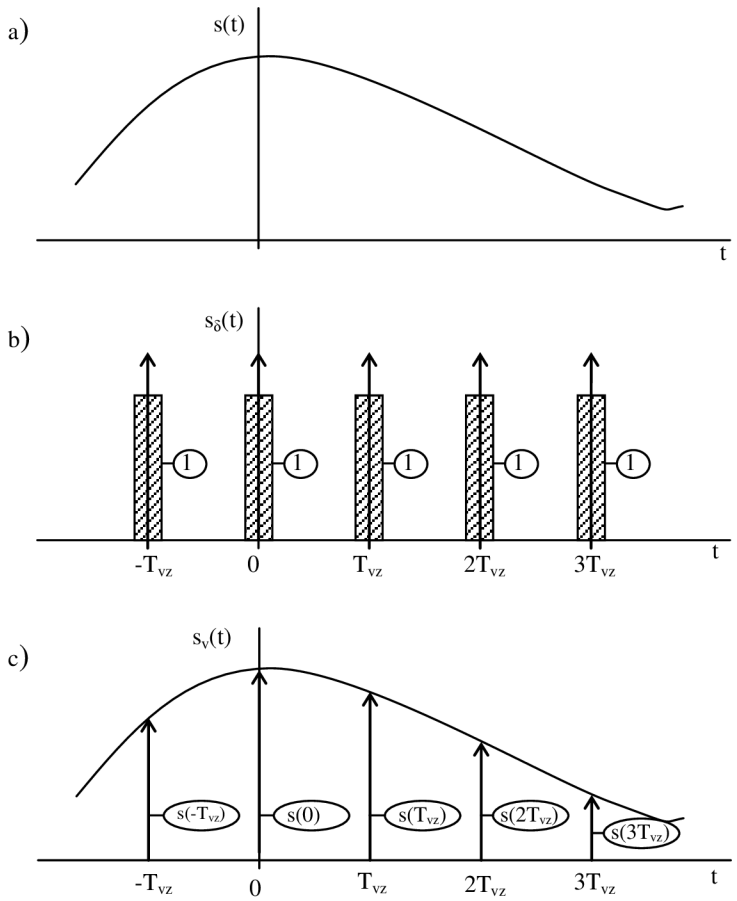
6.2 Vzorkování

Vzorkování je první problém, který se bude řešit při převodu analogového spojitého signálu na signál digitální. Pokud máme úsek spojitého signálu, můžeme ho donekonečna zvětšovat a pozorovat tak jeho nekonečně malé detaily. Jenže to vyžaduje jak velký výpočetní

výkon, tak kapacitu paměti, takže se musíme omezit na nezbytné množství vzorků, které vždy potřebujeme pro ten, či onen účel.

Vzorkování se provede tím způsobem, že rozdělíme vodorovnou osu signálu (časovou) na rovnoměrné úseky a z každého úseku odebereme jeden vzorek. Je přitom zřejmé, že tak z původního signálu ztratíme mnoho detailů, protože namísto spojité čáry, kterou lze donekonečna zvětšovat dostáváme pouze množinu diskrétních bodů s intervalem odpovídajícím použité vzorkovací frekvenci.

6.2.1 Ideální vzorkování



Obr. 24.: Postup při vzorkování

Navzorkovaný signál na obr. 24.c) dostaneme vlastně tak, že spojitý signál vynásobíme vzorkovacím signálem, který je tvořen impulzy. Dostaneme tak hodnoty spojitého signálu v časech impulzu= vzorek. Ideálně by tyto impulzy měly být samozřejmě nekonečně krátké, co se týče časového trvání a nekonečně vysoké. V opačném případě se začínají objevovat chyby vzorkování. Důsledkem ideálního vzorkování je periodizace spektra původního spojitého signálu.

Ideální vzorkování v časové oblasti

$$s_v(t) = s(t)s_\delta(t) = s(t)\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta(t - nT_{vz}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(nT_{vz})\delta(t - nT_{vz}) \qquad (6.1)$$

Tento vztah vyjadřuje výše popsané, tzn. signál se spojitým časem *s(t)* je vynásoben se sledem diracových impulsů $s_\delta(t)$, čímž dostaneme signál $s_v(t)$, který nese přesně stejnou informaci jako signál *{s(nT)}*, kde n je celé číslo.

Ideální vzorkování v kmitočtové oblasti

$$S_v(\omega) = F\{s(t)s_\delta(t)\} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} S_\delta(v)S(\omega - v)dv = \qquad (6.2)$$

$$= \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left[\frac{2\pi}{T}\sum_{k=-\infty}^{\infty}\delta(v - k\omega_{vz})\right]S(\omega - v)dv =$$

$$= \frac{1}{T}\sum_{k=-\infty}^{\infty} S(\omega - k\omega_{vz}) \qquad \omega_{vz} = \frac{2\pi}{T_{vz}}$$

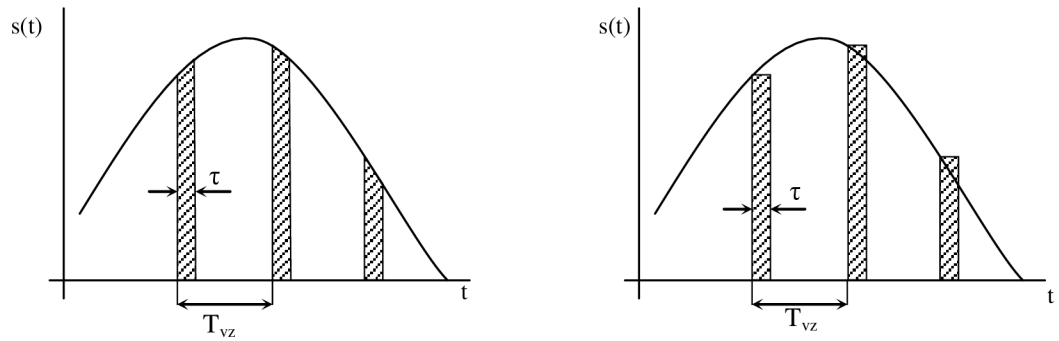
S_v – spektrum výstupního signálu

F- fourierova transformace součinu spojitého a vzorkovacího signálu

Rovnice 6.2 říká, že spektrální funkce součinu signálů je dána konvolucí jejich spektrálních funkcí. Zjistíme, že ideální vzorkování je doprovázeno periodizací spektra původního signálu.

6.2.2 Reálné vzorkování

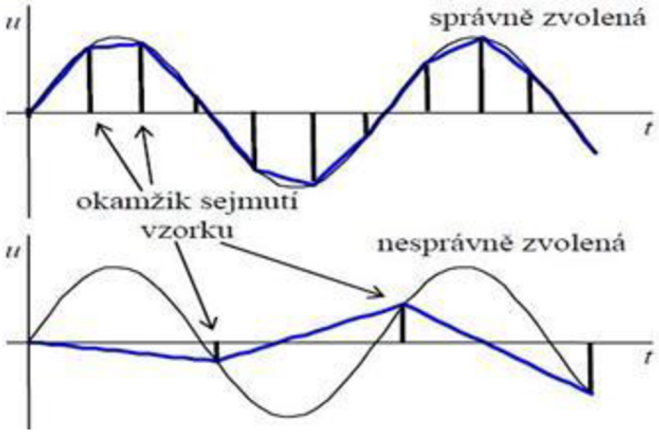
Jak už jsem naznačil výše, vzorkovací impulsy nejsou v reálu nekonečně krátké, ale vždy trvají nějakou krátkou dobu. Během této doby se vzorkovaný signál může samozřejmě měnit a tady přichází problém, jak určit co nejpřesnější hodnotu signálu v daném vzorku. Existují dva hlavní druhy reálného vzorkování. U jednoho se snímá hodnota vzorkovaného signálu po celou dobu vzorkovacího impulsu a pak se vybere střední hodnota a u druhého se bere vždy hodnota vzorkovaného signálu na začátku vzorku. Obě řešení jsou ukázána na obr. 25.



Obr. 25.: Dva různé typy vzorkování

6.3 Chyba vzorkování

Vzniká tehdy, jestliže převodníkem převádíme signál (např. napětí), které se v čase mění a chceme zaznamenat jeho změny. Potom ze signálu, který se v čase mění, spojitě odebíráme pouze vzorky v určitých časových intervalech. Rychlost vzorkování musí být podstatně vyšší, než rychlost změny měřeného signálu. Na obr. 26. je vidět správně a špatně zvolená vzorkovací frekvence a její vliv na výsledný signál. První obrázek ukazuje správně zvolené vzorkování, resp. dostatečně vysoké, aby se ze vzorků dal alespoň přibližně rekonstruovat průběh měřeného signálu. Ve druhém případě je vzorkovací rychlost příliš malá a záznam průběhu je zcela špatný. Jak už je uvedeno dříve, při vzorkování signálu je třeba dodržet Shannonův teorém (též Nyquistův).

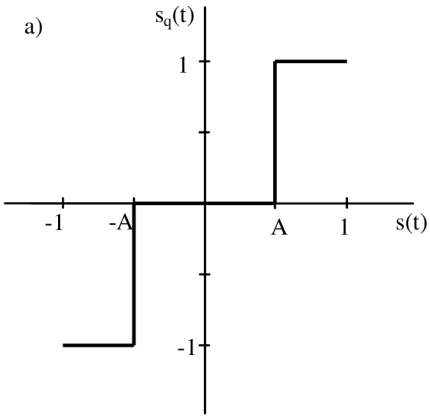


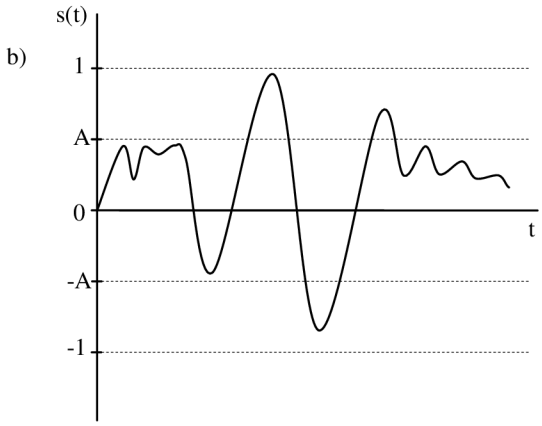
Obr. 26.: Vliv vzorkovací frekvence

6.3.1 Kvantování

Kvantování je zaokrouhlení signálu na určité hladiny. Tady vždy vzniká zkreslení závislé na počtu hladin- označuje se jako kvantizační šum. V audio technice a telekomunikacích používáme tzv. nelineární kvantování, kdy pro nízké úrovně signálu máme hustější hladiny a pro vysoké úrovně signálu hladiny řidší. Zajišťujeme tak nezávislost kvality kvantování na úrovni vstupního signálu. Dopředu totiž nevíme, jestli bude do telefonu někdo mluvit potichu, nebo nahlas. Ten, kdo by mluvil potichu, by byl kvantován pouze několika kvantovacími hladinami. Z tohoto důvodu na nízkých úrovních je kvantovacích hladin hodně, blízko u sebe a na vysokých méně.

Kvantování na malý počet úrovní



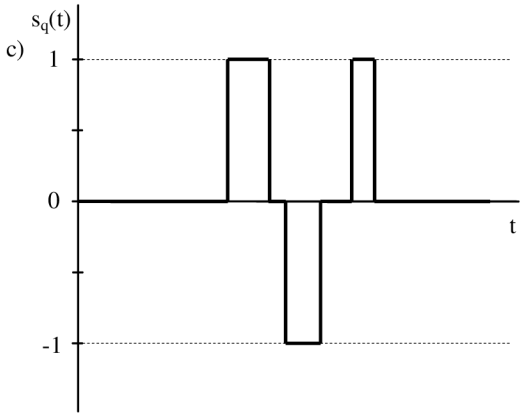


Obr. 27.: příklad kvantování

a)převodní charakteristika

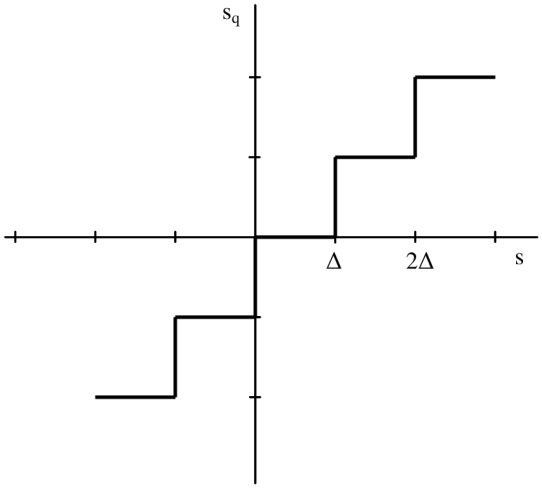
b)vstupní signál

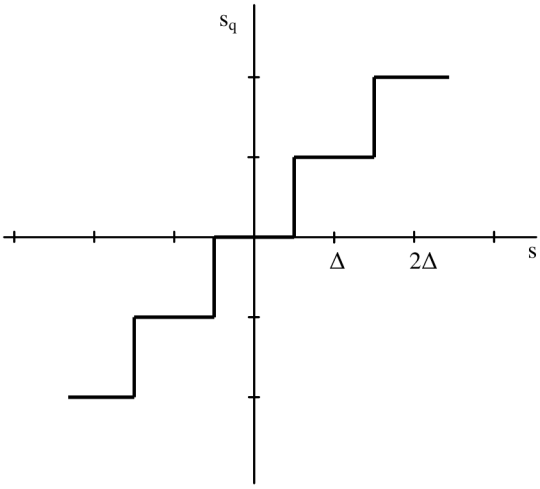
c)výstupní signál po kvantizaci



Kvantování se zaokrouhlováním

Dva druhy převodní charakteristiky:



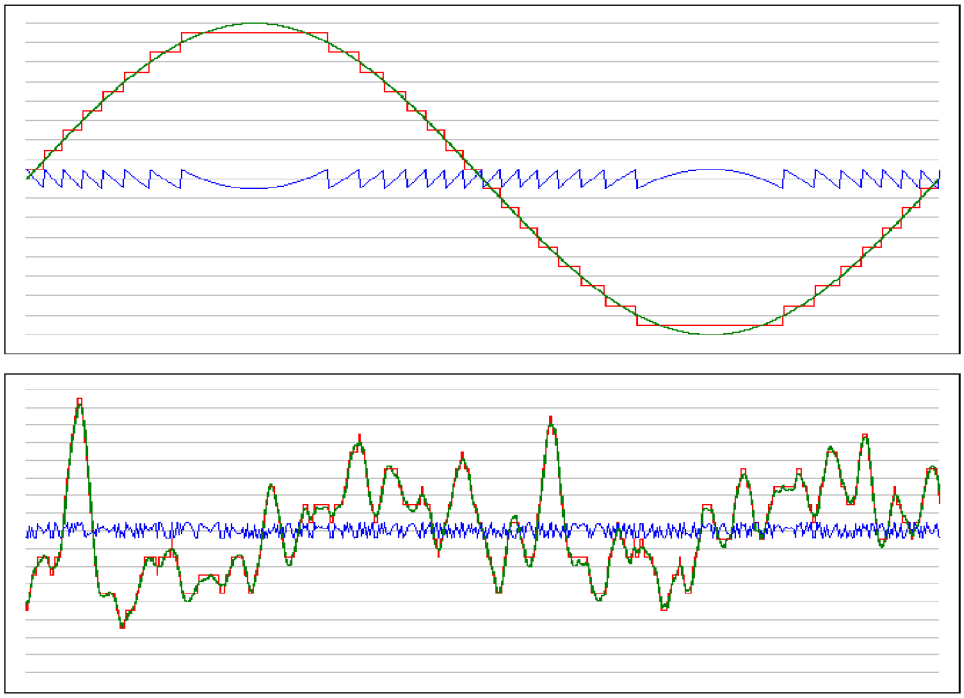


Obr. 28.: Převodní charakteristiky kvantování

6.3.2 Kvantizační šum

Pokusím se podrobněji vysvětlit kvantizační šum na signálu sinusového průběhu podle obr. 29. Tento signál bude zaokrouhlován na kvantovací hladiny, potřebujeme tedy jakési rozhodovací úrovně. Pokud je signál pod rozhodovací úrovní, zaokrouhluje se na nižší kvantovací hladinu, pokud je nad ní, zaokrouhluje se na vyšší kvantovací hladinu. Výsledný signál, který dostaneme je „hranatý“ a snaží se kopírovat vstupní sinusový signál. Z obrázku je vidět, že ve chvíli, kdy vstupní signál přechází přes rozhodovací úroveň, dochází k překlopení z jedné kvantovací hladiny na druhou.

Toto je jeden úhel pohledu, zaokrouhlování vstupního signálu na určité hladiny. Druhý úhel pohledu může být, že budeme k vstupnímu signálu přičítat jiný cizí signál a výsledkem bude výstupní signál totožný s kvantovaným. Tento signál v našem případě představuje obr. 29. b). Pokud jej přičteme ke vstupu, dostaneme výsledný kvantovaný signál. Tento fiktivní signál se nazývá **kvantovací šum** a označuje velikost chyby digitálního převodu. Dostaneme jej jednoduše tak, že **odečteme** od sebe signál **vstupní** a signál **kvantovaný**.



Obr. 29.: Kvantizační šum

6.4 Chyba kvantování

Při AD převodu jde o to, že analogovou veličinu, např. napětí, které je spojitou veličinou, nahrazujeme číselnou hodnotou- celým, nebo racionálním číslem. Proto výsledek převodu nemůže přesně odpovídat vstupnímu napětí. AD převodníky většinou podávají výsledek převodu ve dvojkové soustavě. Čím má převodník více bitů, tím může být převod přesnější.

Máme-li např. převodník se vstupním rozsahem 0 až 10 V a je 8-bitový, může se určit kvantizační krok tohoto převodníku (nejvyšší teoreticky dosažitelnou přesnost) následovně. Převodník může rozlišovat 2^8=256 úrovní , potom kvantizační krok = 10/(256-1) = 0,039 V.

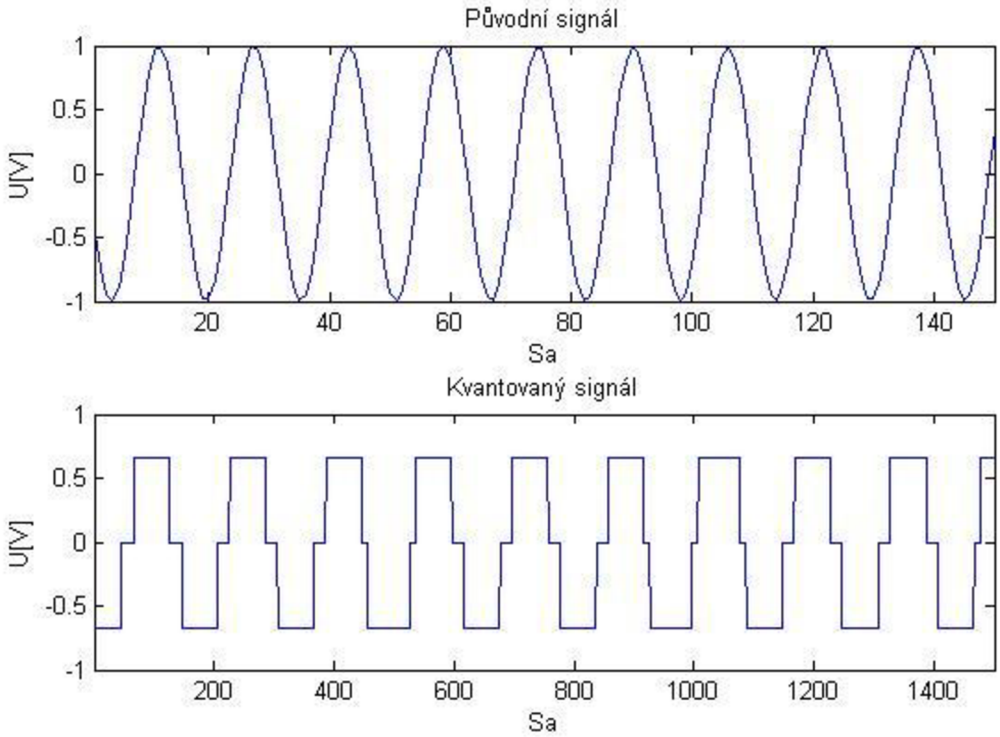
Převodník se stejným rozsahem 0 až 10 V, ale 16bitový, by rozlišoval 2^{16} = 65536 úrovní, což znamená, že kvantizační krok = 10/65536 = 0,00015 V.

Převodník nemůže nikdy převést hodnotu napětí s větší přesností, než je hodnota kvantizačního kroku, ve skutečnosti bude nepřesnost ještě horší, protože převod je zatížen dalšími chybami.

Hodnota kvantizačního kroku se někdy také označuje LSB (least signifiant bit). Zvyšováním počtu bitů lze velikost kvantizačního kroku zmenšit, ale převodník je pak složitější, dražší a často také pomalejší. Z toho plyne praktická hodnota bitů dnes používaných převodníků jako 8 až 16.

6.5 Kvantování reálného signálu

Jako ukázku kvantování v Matlabu máme k dispozici soubor ***kvantizace.m***. Program je napsaný tak, abychom mohli načíst námi zvolený soubor ve formátu .wav, určit si počet kvantizačních úrovní a vykreslit detail signálu ve výsledku, přičemž si velikost vykresleného okna můžeme měnit dvěmi proměnnými x1 a x2. Tímto si jednak můžeme prohlédnout výsledný kvantovaný signál a také výsledek uložit do spustitelného wav souboru a následně přehrát ať slyšíme změnu. Na obr. 30. je vidět jednoduchý sinusový signál kvantovaný pouze na 2 úrovně.

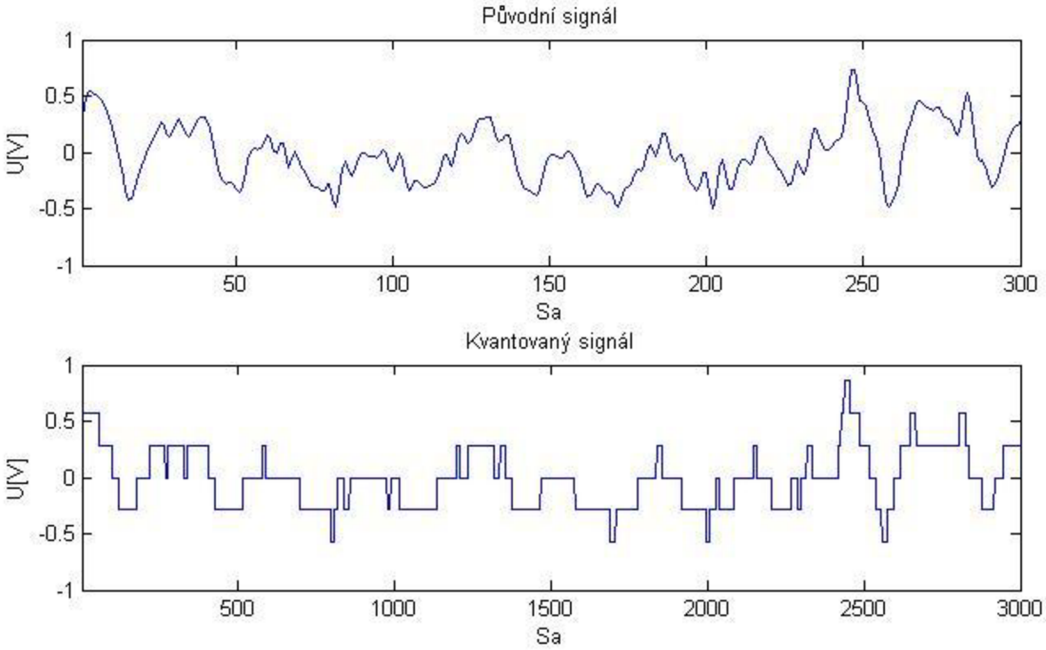


Obr. 30.: Kvantovaný sinus. signál

Pokud si přehrajeme původní a takto kvantovaný signál, je okamžitě patrný rozdíl. S větším množstvím kvantovacích úrovní můžeme zkoušet, jak velký vliv mají na výsledný signál a kde se pohybuje hranice rozlišitelnosti lidským uchem například.

Jednoduchý signál je dobrý pro názornost. My ovšem můžeme vzít nahrávku mluveného slova, nahrávku hudební atd. Signál, který je komplexnější, než obyčejná „sinusovka“ a vyzkoušet vliv kvantování na srozumitelnost přenášené informace.

Na dalším obrázku je výsledek zpracování záznamu mluveného slova s třemi kvantovacími hladinami. Výsledek je kvantizací silně ovlivněn, nicméně přenášené informaci- slovům, jde rozumět relativně dobře. Zkusme i jiné zvuky a můžeme se snažit najít situaci, kdy díky kvantování k přenosu užitečné informace vůbec nedojde.



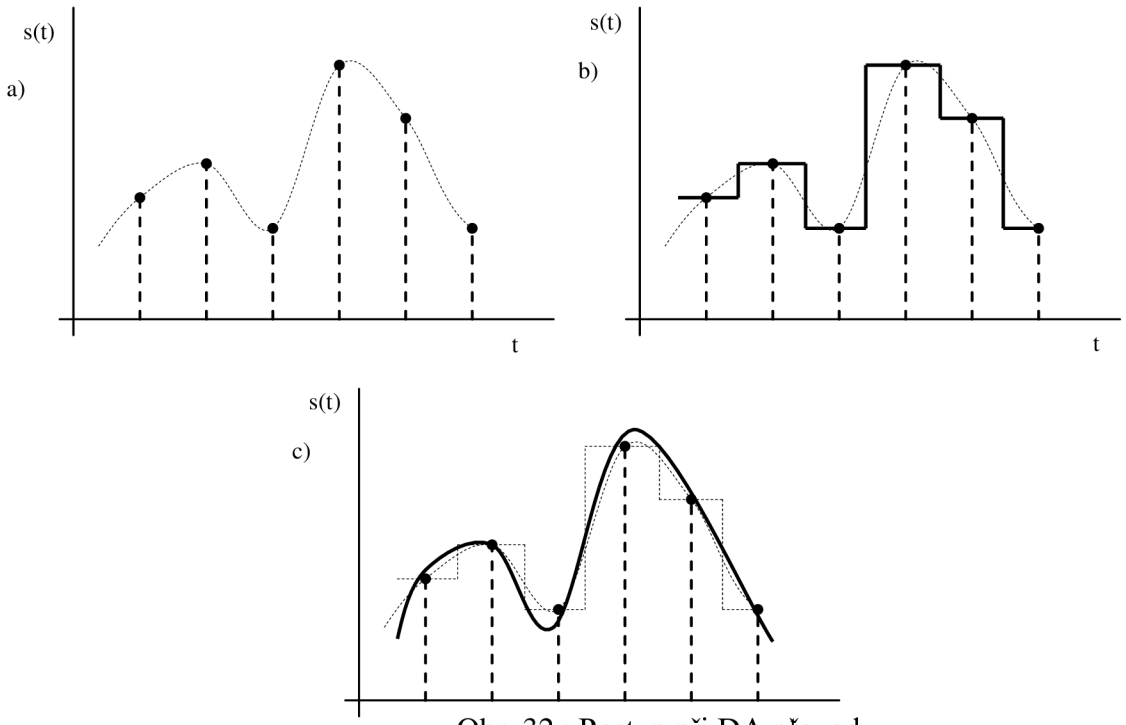
Obr. 31.: Kvantovaná hudební znělka

6.6 Digitálně analogové DA převodníky

Slouží k převodu číselně zadané hodnoty na napětí, nebo proud. Čísla se do převodníku zadají většinou ve dvojkové soustavě, buďto paralelně (např. u 8bitového převodníku po 8mi vodičích), nebo sériově postupně posloupnost logických jedniček a nul po jednom vodiči. Většinou se tedy převádí posloupnost čísel na posloupnost impulzů o určité šířce. V reálu ovšem nastává problém s impulzy, které nedokážeme vygenerovat dostatečně strmé. Toto se obchází většinou tak, že převodník udržuje poslední zadanou hodnotu do doby, než přijde nová a výsledný signál je schodového typu. Tento je pak dále upravován dolní propustí, aby se vyhladily ostré hrany.

Mohu snad uvést jen pár základních druhů těchto převodníků:

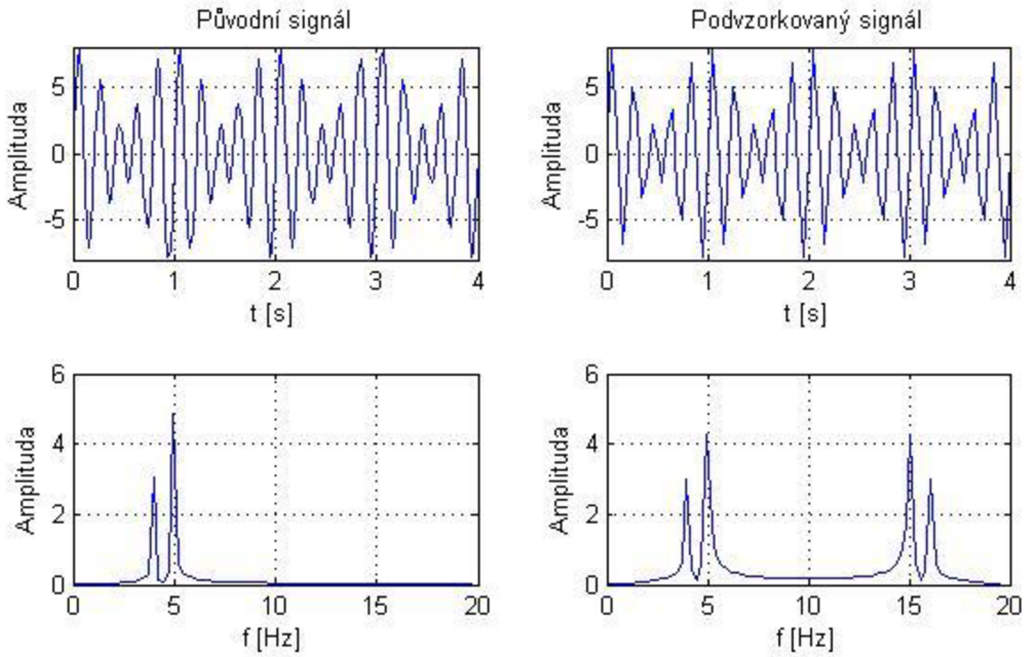
Jsou to DA převodníky pracující spojitě v čase, DA převodníky pracující v čase nespojitě (sem patří hlavně DA převodníky s pulsně šířkovou modulací – PWM) a DA převodníky frekvence-napětí.



Obr. 32.: Postup při DA převodu

6.7 Podvzorkování

Nedodržení vzorkovacího teorému se označuje jako podvzorkování signálu. Ukáži, co se stane s takovým podvzorkovaným signálem. Názorně se to dá předvést na jednoduchém tónu, který podvzorkujeme frekvencí znatelně nižší, než by bylo vhodné. Skript ***podvzorkovani.m*** nám takové podvzorkování umožní. Načteme vstupní soubor a zvolíme novou vzorkovací frekvenci, která se určí poměrem k původní. Výsledný signál se poté uloží do souboru a můžeme si jej poslechnout. Obr. 33 znázorňuje signál, jeho amplitudové spektrum a spektrum stejného signálu, akorát podvzorkovaného. V původním spektru vidíme 2 špičky. Jejich umístění označuje 2 frekvence, které se v signálu vyskytují a jejich výšky označují amplitudy sinusových průběhů v signálu. Při poslechu podvzorkovaného signálu zjistíme, co se vlastně stalo. K původnímu tónu se přidá další tón o vyšší frekvenci.



Obr. 33.: Změna spektra při podvzorkování

6.8 Návrh filtru v Matlabu

Teorie digitálních filtrů obsahuje velké množství různě složitých matematických rovnic, nicméně já se v této kapitole zaměřím na aplikaci těchto filtrů v prostředí Matlab. Digitální filtr může být vyjádřen dvěma vektory a a b, přičemž první hodnota vektoru a je vždy 1.

$$a=[a_1,a_2,\ldots a_p]$$

$$b=[b_1,b_2,\ldots b_q].$$

Pokud aplikujeme digitální filtr s parametry a a b na úsek diskrétního signálu x(n), výstup bude stanoven následující rovnicí.

$$\begin{aligned} &y[n] + a_2 y[n-1] + a_3 y[n-2] + \cdots + +a_p x[n-p+1] = \\ &= b_1 x[n] + b_2 x[n-1] + \cdots + b_q x[n-q+1] \end{aligned} \qquad (6.3)$$

Tato rovnice může vypadat trochu komplikovaně, takže uvedu několik specifičtějších příkladů, aby to bylo lépe pochopitelné.

Nejdříve mějme filtr s následujícími parametry:

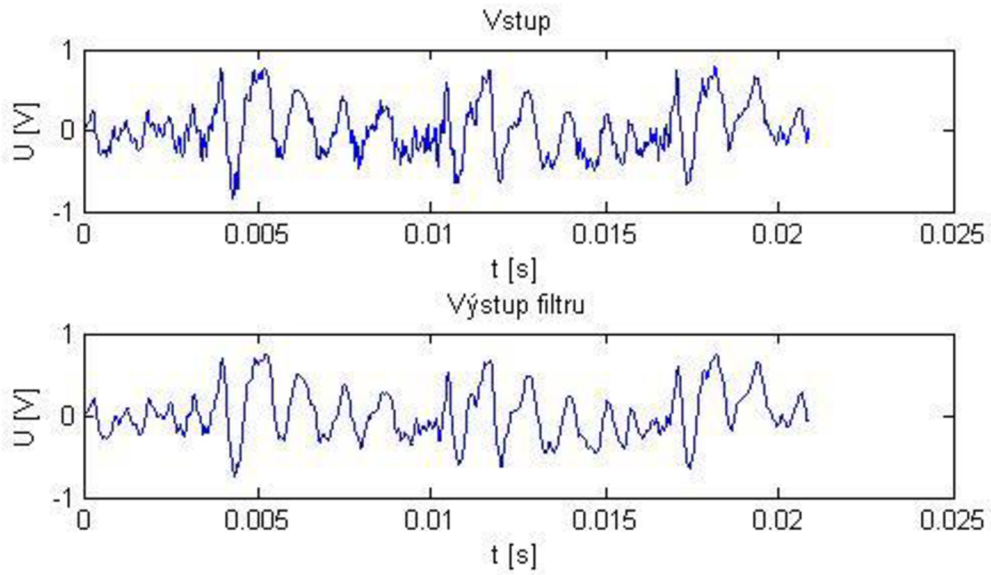
$$a=[1]$$

$$b=[1/5,\ 1/5,\ 1/5,\ 1/5,\ 1/5,].$$

Výstup filtru bude

$$y[n] = (x[n] + x[n-1] + x[n-2] + x[n-3] + x[n-4])/5 \quad .$$

Toto je klasický filtr, který vytvoří *y(n)* jako průměr předcházejících pěti bodů ze vstupního signálu. V podstatě se jedná o tzv. filtr typu dolní propust, jelikož rychlé změny, tzn. vysokofrekvenční složky, jsou průměrováním filtru odstraněny a pomalé změny, nízké frekvence jsou více méně zachovány. Efekt dolní propusti můžeme přirovnat např. k přiložení papírového kelímku na ústa během řeči, což způsobí, že slyšíme jen nízké frekvence, tzv. „huhňání“.



Obr. 34.: Výsledek dolní propusti

Na obr. 34. je jasně vidět vyhlazení signálu po průchodu dolní propustí. Tento výpočet provede skript uložený v souboru ***zakladnifiltrdp.m***, kde zadáme pouze název vstupního souboru a program vypočte výstup, který zobrazí a uloží do spustitelného souboru.

Další typ filtru, jehož realizaci ukážu, bude mít následující parametry:

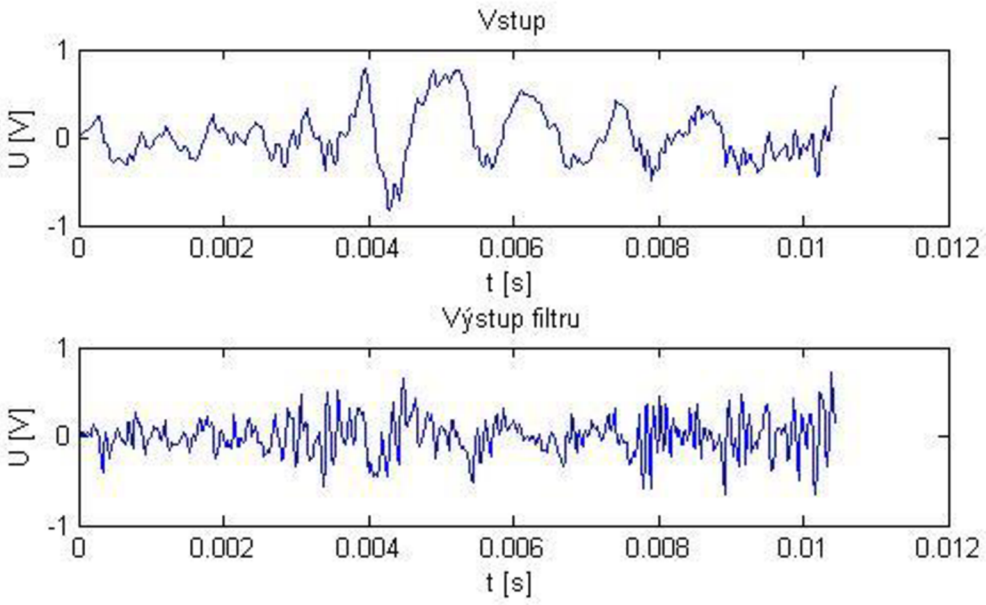
a=[1]

b=[1, -1] .

Výstup takovéhoto filtru bude

$$y[n] = x[n] - x[n-1] \quad .$$

Jinými slovy, výstup filtru *y[n]* je roven rozdílu předešlých dvou bodů *x[n]*. Tím se dosáhne toho, že nízkofrekvenční složky (s pomalou změnou) budou mít malé hodnoty, zatímco vysokofrekvenční (s rychlými změnami), budou mít hodnoty velké. Tímto je tedy vytvořena typická horní propust, která zesiluje vysoké frekvence a potlačuje nízké. Tento výpočet je uložen ve skriptu ***zakladnifiltrhp.m*** a výstup je zobrazen na obr. 35.



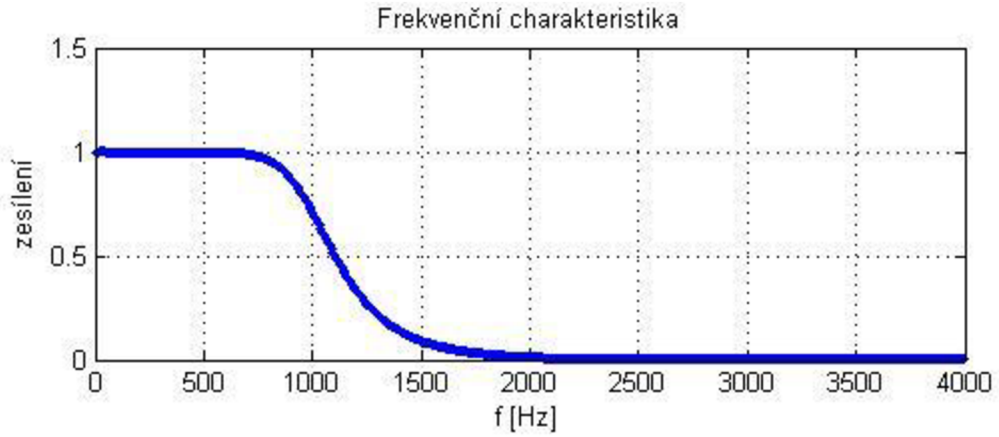
Obr. 35.: Výsledek horní propusti

Základy filtrů jsem shrnul, nyní se budu snažit přiblížit jednotlivá nastavení filtrů v Matlabu. Pomocí funkce „butter“ můžeme vytvořit Butterworthův filtr dolní propusti s následující syntaxí:

[b, a] = butter (order, wn, function),

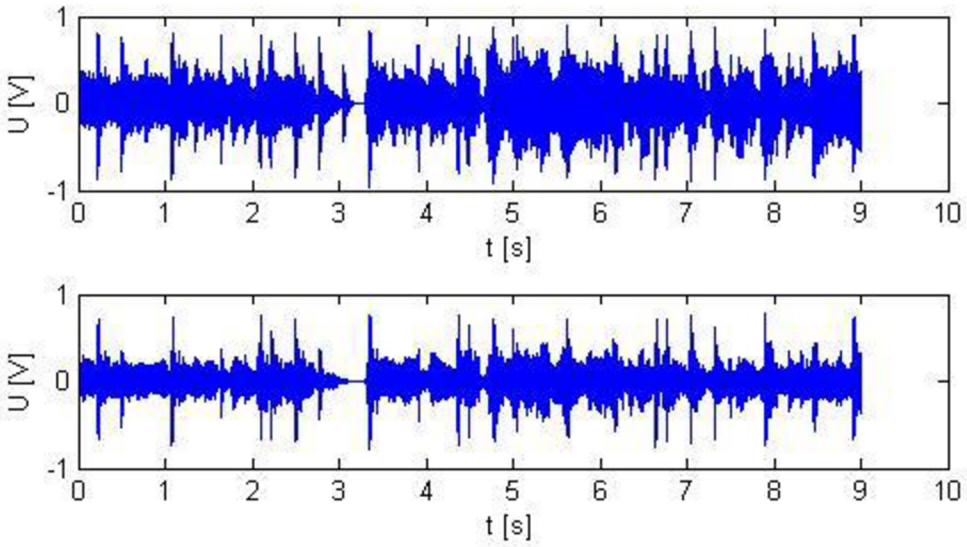
kde *order* udává řád filtru, *wn* je mezní (cut-off) frekvence a *function* nabývá hodnot low a high, což značí buďto dolní propust, nebo horní propust.

V dalším příkladu použiji funkci butter k vytvoření dolní propusti. Její frekvenční charakteristika je na obr. 36. Filtr je pátého řádu s mezní frekvencí 1 kHz.



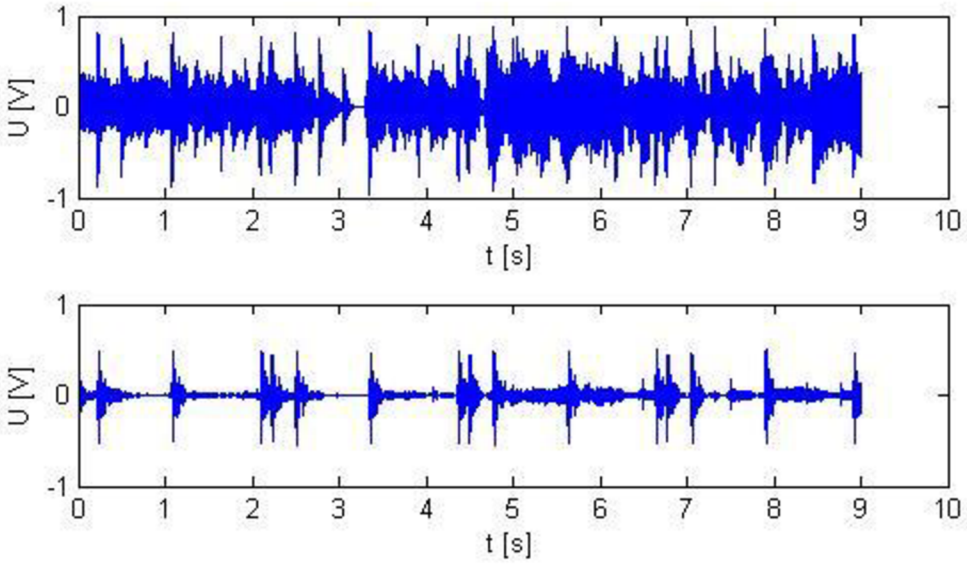
Obr. 36.: Frekvenční charakteristika DP

Pokud se tento filtr použije např. na nahranou písničku, bude z výsledku vidět, že se horní frekvence utlumily a zůstaly hlavně ty nízké. Obr. 37. obsahuje výsledek pro použitou zvukovou stopu.



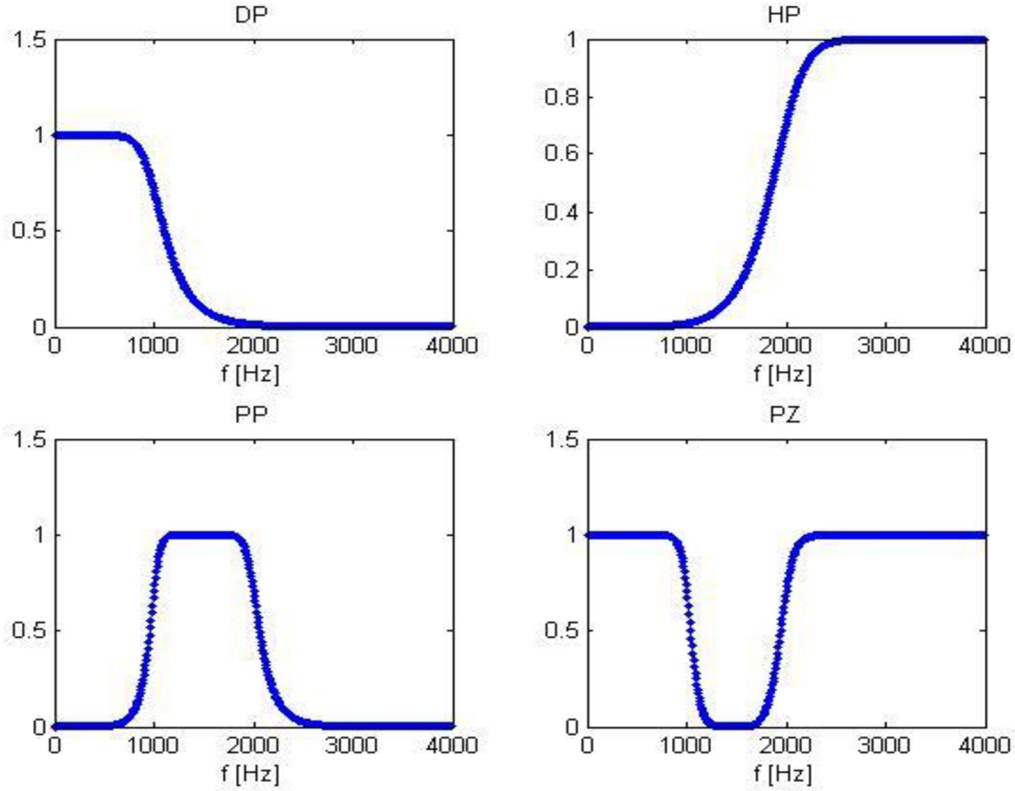
Obr. 37.: DP s mezní frekvencí 1 kHz

Pokud se mezní kmitočet výše popsaného filtru sníží na pouhých 100 Hz, výsledek se stane téměř neslyšitelným, pokud nemáme pro přehrátí zvuku subwoofer. V průběhu signálu jdou rozlišit většinou už jen basy, které vydává například bubeník do rytmu.



Obr. 38.: DP s mezní frekvencí 100 Hz

Změnou vstupních parametrů filtru se tak dají měnit jeho vlastnosti a to nám umožňuje vytvořit 4 druhy filtrů. Horní propust, dolní propust, pásmovou zádrž a pásmovou propust. Ukázka frekvenčních charakteristik všech čtyř je na obr. 39.



Obr. 39.: Charakteristiky vytvořených filtrů

Všechny typy filtrů jsem zapsal do skriptu ***filtracevyber.m***, kde je možno načíst vybraný wav soubor, vybrat typ filtru (DP, HP, PP, PZ) a výsledek vykreslit, popřípadě zapsat do spustitelného wav souboru. U všech typů se dá měnit jak řád filtru, tak jejich mezní kmitočty. Je tak možné vyzkoušet, jaký vliv bude mít na hudební signál např. pásmová zádrž s různě nastavenými hodnotami, a můžeme se snažit např. o vyfiltrování lidského hlasu ze vzorku.

7 Diskrétní signály

Na začátek uvedu trochu základní teorie ohledně diskrétních signálů. Z předchozích kapitol už je jasné, že většina signálů kolem nás jsou signály spojité tj. signály se spojitým časem. Pokud ovšem s nimi chceme pracovat, nevyhneme se jejich diskretizaci, což znamená přesnému číselnému vyjádření v každý okamžik, který potřebujeme znát. Ze spojitého signálu se tak stává posloupnost čísel, přičemž hodnotě signálu v daném okamžiku odpovídá hodnota

pod příslušným indexem v posloupnosti. Jak jsme už popsali výše, převod probíhá vzorkováním (sampling), kdy v pravidelných časových okamžicích T_{vz} jsou ze spojitého signálu odebírány vzorky.

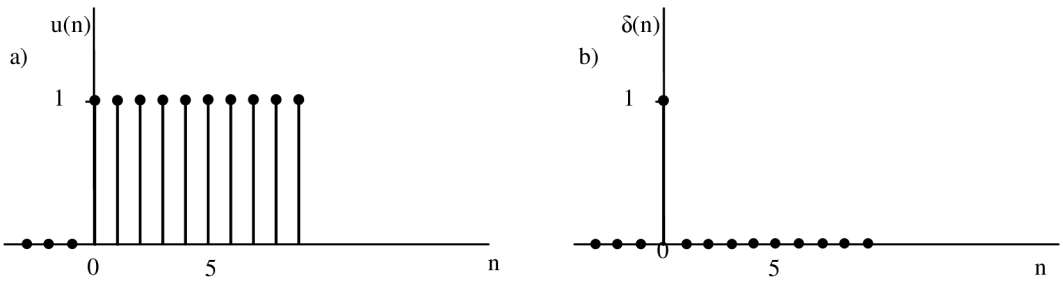
Diskrétní signály budou podle potřeby označovány *s(n)*, nebo *s(nT)*. Nebude-li řečeno jinak, bude se předpokládat, že diskrétní signály mají konečnou absolutní hodnotu pro všechna přípustná *n*.

7.1 Základní diskrétní signály

7.1.1 Diskrétní jednotkový impuls

Jednotkový impuls s diskrétním časem je posloupnost definovaná rovnicí (7.1) a graficky znázorněn je na obrázku 40.

$$\delta(n) = \begin{cases} 1 & pro \quad n = 0 \\ 0 & pro \quad n \neq 0 \end{cases} \tag{7.1}$$



Obr. 40.: diskrétní jednotkový skok (a)) a impuls (b))

7.1.2 Diskrétní jednotkový skok

Jednotkový skok s diskrétním časem je definován rovnicí (7.2) a je graficky znázorněn na obr. 40.

$$\delta(n) = \begin{cases} 1 & pro \quad n \geq 0 \\ 0 & pro \quad n < 0 \end{cases} \tag{7.2}$$

Diskrétní jednotkový skok a diskrétní jednotkový impuls hrají v diskrétních signálech stejnou roli jako jednotkový skok a Diracův impuls v signálech spojitých.

7.1.3 Exponenciální a lineárně rostoucí diskrétní signál

Tyto signály se dají rovněž zařadit do skupiny základních, a tudíž je dobré se o nich zmínit. **Lineárně rostoucí** signál je zobrazen na obrázku 41 a je definován jako

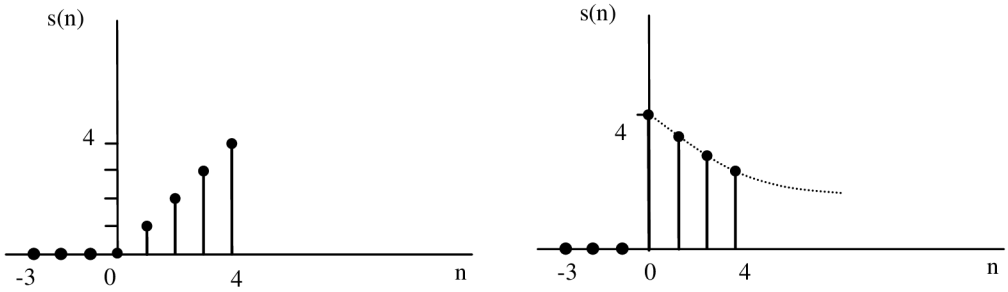
$$s(n) = \begin{cases} n & pro \quad n \geq 0 \\ 0 & pro \quad n < 0 \end{cases} \tag{7.3}$$

Rychlost nárůstu tohoto signálu je jednotková, takže signál zapsaný jako *As(n)* bude mít rychlost nárůstu rovnu *A*.

Diskrétní **exponenciální** signál je definován jako posloupnost

$$s(n) = \begin{cases} a^n & pro \quad n \geq 0 \\ 0 & pro \quad n < 0 \end{cases} \tag{7.4}$$

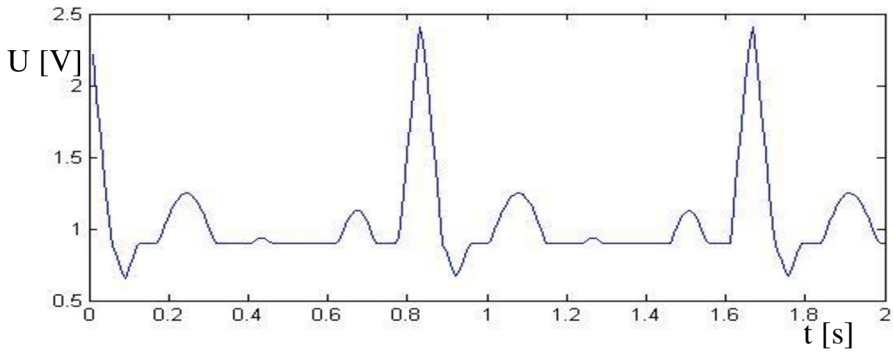
Která je pro $a<1$ klesající, pro $a>1$ je rostoucí a pro $a=1$ přechází tento signál v diskrétní jednotkový skok.



Obr. 41.: Exponenciální a lineárně rostoucí diskr. signál

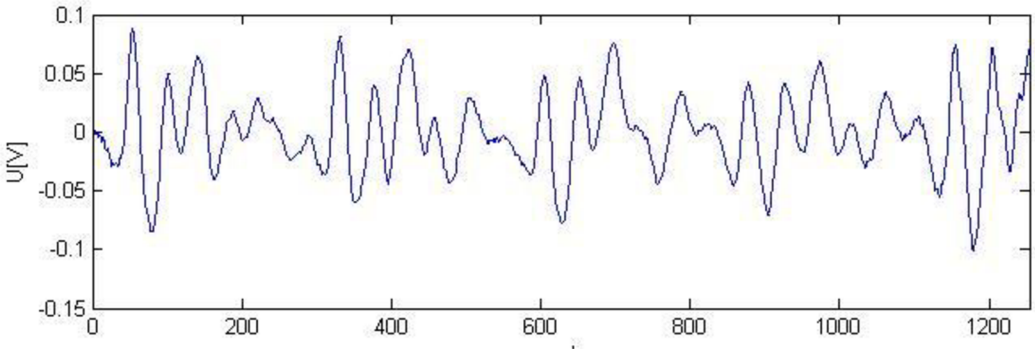
Dalším důležitým pojmem je **základní perioda**. Diskrétní signál *s(n)* se nazývá periodický, jestliže existuje kladné přirozené číslo N takové, že platí $s(n)=s(n+N)$ pro všechna celá čísla $n \in (-\infty,\infty)$. Nejmenší taková hodnota N se nazývá základní perioda. Logicky si představíme tuto základní periodu jako počet vzorků, které uplynou od doby prvního vzorku až po jeho znovu objevení a následné opakování ostatních vzorků po něm jdoucím.

Při analýze signálu nás může zajímat právě stanovení jeho základní periody, což je jednoduchá věc v případě jednoduchého signálu. Z obr. 42. je určitě všem jasné, jak bychom stanovili periodu tohoto signálu.



Obr. 42.: Periodický signál

Problém ovšem nastane, pokud dostaneme za úkol stanovit základní periodu signálu komplexnějšího, složeného z několika složek, navíc třeba zašuměného. Pro představu je na obrázku 43. ukázka takového signálu. Z prvního pohledu není vůbec jasné, zda-li se v signálu vůbec nějaká perioda objevuje. S trochou představivosti si dokážeme ukázat na části, které vypadají podobně, avšak s jistotou je neurčíme.



Obr. 43.: Periodický signál

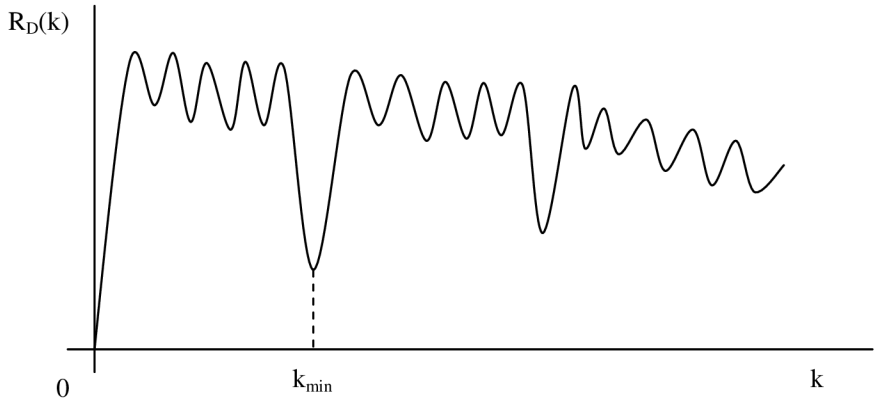
7.2 Určení základního tónu metodou AMDF

Odhad periody základního tónu řeči v časové oblasti je většinou založen na využití autokorelační funkce, která je aplikována v různých úpravách na řečový signál. Já předvedu v matlabu realizaci metody rozdílové funkce nazývané AMDF (Average Magnitude Difference Function).

Princip metody se dá zapsat pomocí matematického vztahu takto:

$$R_D(k) = \sum_{n=1}^{N-k} |s(n) - s(n+k)| \qquad k = 0,1,\dots,N-1 \qquad (7.5)$$

Odečítání je samozřejmě podstatně méně náročnější na výpočet, než násobení. Lze ukázat, že první výrazné minimum v průběhu $R_D(k)$ odpovídá svou polohou periodě základního tónu. Na obr. 44. je uveden typický průběh $R_D(k)$ pro znělý úsek.



Obr. 44.: Typický průběh AMDF

Periodu základního tónu T_0 pak určíme podle vztahu

$$T_0 = k_{min} T_{vz} \quad . \tag{7.6}$$

Resp. kmitočet základního tónu F_0 podle vztahu

$$F_0 = \frac{f_{vz}}{k_{min}} \quad , \tag{7.7}$$

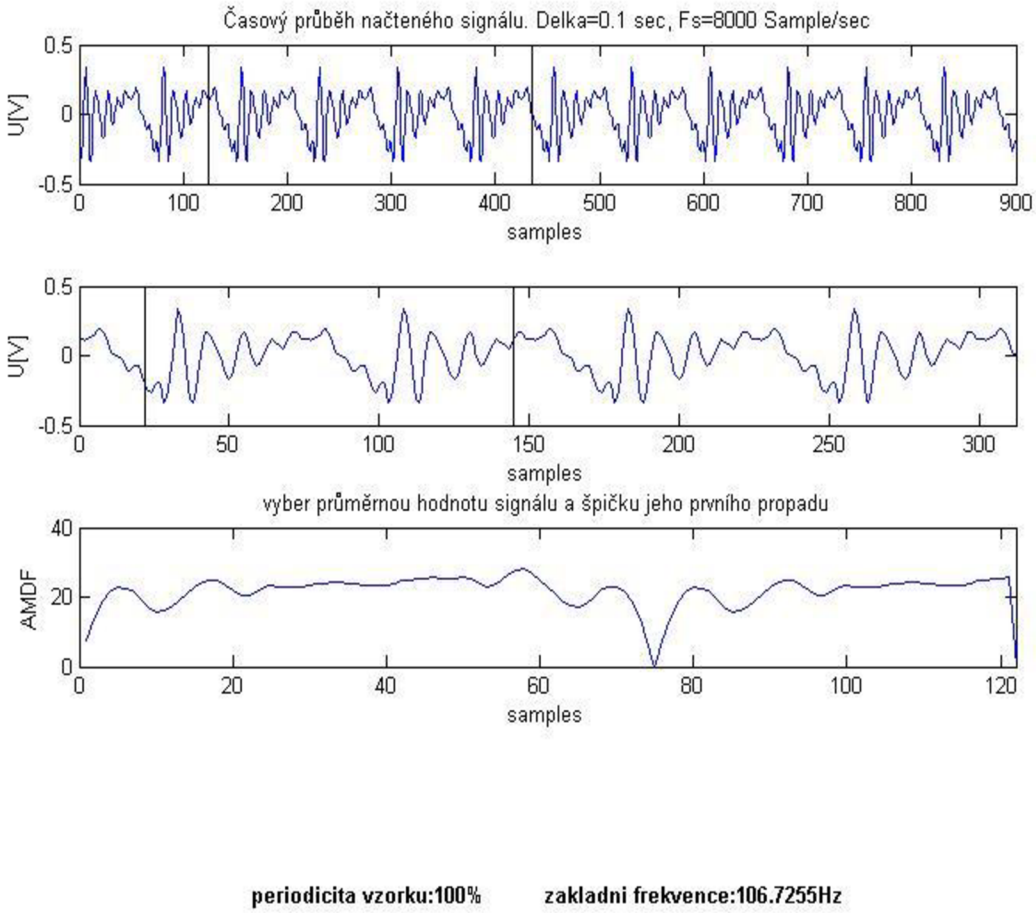
kde k_{min} přísluší hodnotě prvního minima $R_D(k)_{min}$ v průběhu $R_D(k)$.

7.2.1 Realizace v Matlabu

Kód pro Matlab je uložen v souboru ***AMDF.m*** a jeho výstup je zobrazen na obr. 45.

Pro funkčnost je potřeba zadat jméno vstupního souboru ve formátu .wav. Program tento soubor načte a celý vykreslí do prvního grafu. Máme tak přehled o charakteru signálu, jeho délce a časovým změnám v něm obsaženým. Obvykle v takto zobrazeném signálu, hlavně pokud je delší, nemáme moc přehled o detailech, a proto si kurzorem vybereme souřadnice x_1 a x_2 pro určení okna a vykreslení detailu, což je graf č. 2. Z něj už jsou lépe patrné časové změny signálu a právě v tomto průběhu vybereme kurzorem okno, pro které se bude počítat funkce AMDF.

Na obr. 45. je vidět ideální velikost okna, kdy je v něm obsažena celá jedna perioda signálu. Výsledná funkce AMDF tohoto okna je zobrazena v grafu č. 3 a je vidět, že se svou povahou shoduje s teorií. Obsahuje právě jeden strmý pokles, který nás zajímá a podle vztahů (7.6) a (7.7) výše zmíněných se z něj dá určit základní frekvence a periodicita v procentuálním vyjádření. Periodicita není nic jiného, než poměr y-psilonových souřadnic nejnižšího bodu poklesu a průměrné hodnoty funkce.

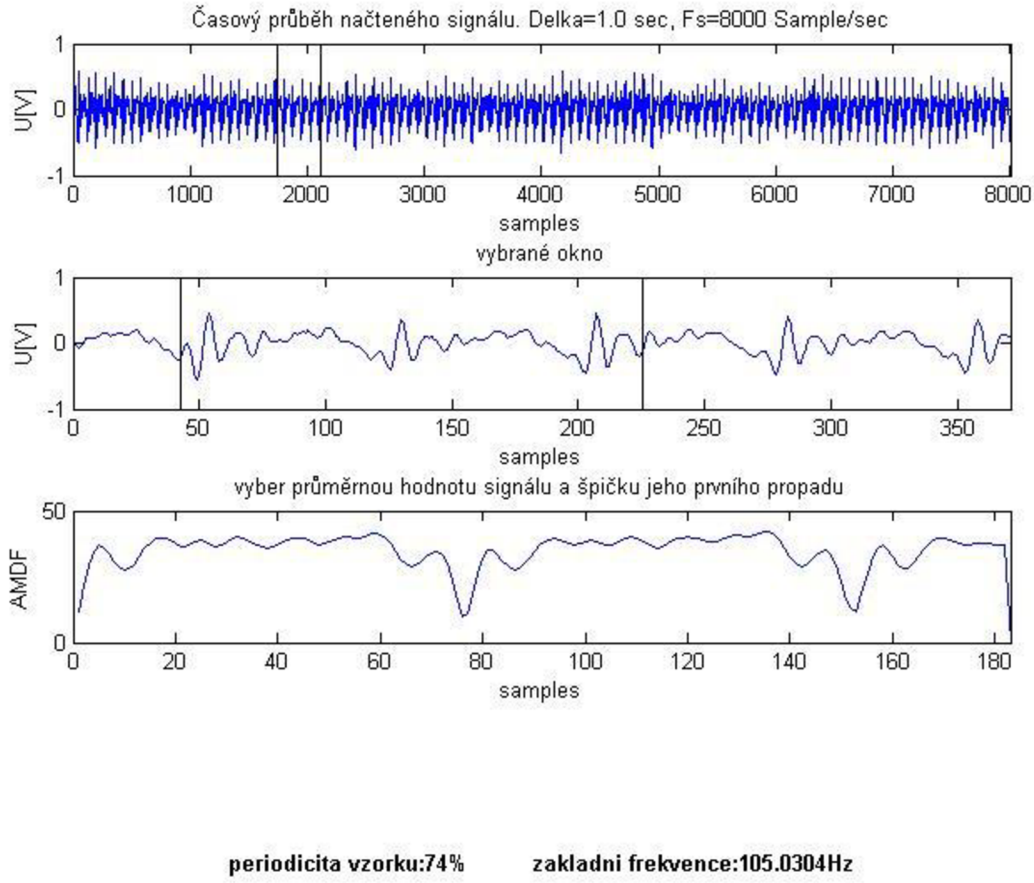


Obr. 45.: Výstup skriptu *AMDF.m*

Signál, který je ukázán na obr. 45. je vytvořen uměle v Matlabu pomocí kombinace několika funkcí a je tudíž přesně periodický. Jinými slovy se dá říct, že pokud budeme testovat jakýkoliv vzorek signálu, obsahující alespoň jednu periodu, funkcí AMDF, vždy nám vyjde periodicita 100%, tudíž absolutní shoda. Tato skutečnost se dá vyčíst z průběhu AMDF, kde je jasně vidět, že první strmý pokles sahá v podstatě až na osu x. Pokud bude nejnižší hodnota v poklesu funkce vzdálena od x-ové osy, ukáže nám to, že ve zkoumaném okně není periodicita stoprocentní. Tzn., že perioda v signálu existuje, ale její každé opakování se liší od původního vzoru.

Pro názornost vyberu reálný signál. V tomto případě se bude jednat o lidský hlas, přesněji hlásku „a“. Z obr. 46. vidíme, že tento reálný signál periodický určitě je, nicméně všechny periody se od sebe vždy trochu liší. Výpočtem AMDF pro zadané okno signálu se zjistí, jak moc se od sebe periody liší a jakou základní frekvenci vzorek má. Ze zobrazení průběhu AMDF jsou patrné 2 větší poklesy funkce a ne jen 1 jako doposud. To je samozřejmě dáno tím, že vybrané okno signálu obsahuje celé 2 periody a kousek. Kdybychom pro vstup AMDF vybrali okno ještě větší, obsahující např. celé 3 periody signálu, výsledek by

obsahoval poklesy 3. Zajímat nás bude hlavně pokles první, podle kterého určíme požadované atributy. Nejnižší hodnota v poklesu nesahá až na x-ovou osu, tudíž vzorek nemá periodicitu 100%. Vyjádření periodicity je vypočteno tak, že dáme do poměru výšku nejnižšího bodu v poklesu a výšku průměru funkce, což v obr. 46. vychází na 74%.



Obr. 46.: Výstup skriptu *AMDF.m* pro reálný signál

Vzdálenost poklesu od 0 pak udává velikost základní periody a po přepočtu vychází v obr. 46 jako *0,009521 s*, což je *105,0304 Hz*. Pro zajímavost si můžeme vyhledat informaci o základní frekvenci lidského hlasu a výsledky srovnat. Našli bychom, že frekvence mužského hlasu se pohybuje okolo 120 Hz a frekvence ženského je až dvojnásobně vyšší. Obr. 46 obsahuje hlas mužský a výsledná frekvence cca 105 Hz ukazuje na správný výsledek. Jako pokus můžeme zkusit navzorkovat hlas ženský, udělat s ním to samé jako doteď a srovnat teoretické a praktické výsledky.

7.3 Konvoluce

Konvoluce se používá při studiu odezvy systémů na libovolné signály, známe-li impulzní odezvu systému. Lineární konvolucí posloupností $s_1(n)$ a $s_2(n)$ rozumíme posloupnost $y(n)$ danou následujícím vztahem

$$y(n) = \sum_{m=0}^{N-1} s_1(m)s_2(n-m) \quad . \tag{7.8}$$

Tento vzorec se dá popsat následovně. Definujeme novou pomocnou proměnnou m, přes kterou budeme sumovat. Signál $s_1(m)$ obkreslíme tak jak ho dostanem definovaný a signál $s_2(m)$ otočíme, což z něj udělá $s_2(-m)$. Pro výpočet n-tého výstupního vzorku pak musíme vyrobit $s_2(n-m)$. Docílíme toho tak, že původní nulový čas sekvence $s_2(-m)$ posuneme do času n. Pak vše, co je nad sebou vynásobíme a sečteme. Tím dostaneme $y(n)$. Poté pokračujeme pro další n…

Nejjednodušší je uvést si příklad. Mějme dva signály, u kterých máme provést a zobrazit jejich lineární konvoluci. Signál délky 7 g a signál délky 10 x. Výsledná konvoluce bude označena jako $y(n)$.

g=[-1 0 3 5 3 0 -1], x=[0 0 1 1 1 1 1 1 1 1], y(n)= ?

Podle vztahu (7.8) můžeme začít počítat hodnoty pro n=0:

$$y(0) = \sum_{m=0}^{10-1} x(m)g(0-m) =$$

$$= x(0)g(0) + x(1)g(-1) + x(2)g(-2) + x(3)g(-3) + x(4)g(-4)$$
$$+ x(5)g(-5) + x(6)g(-6) + x(7)g(-7) + x(8)g(-8) + x(9)g(-9)$$
$$= 0.(-1) + 0.0 + 1.0 + 1.0 + \cdots = 0$$

Pro n=1:

$$y(1) = \sum_{m=0}^{9} x(m)g(1-m) =$$

$$= x(0)g(1) + x(1)g(0) + x(2)g(-1) + x(3)g(-2) + \cdots$$
$$= 0.0 + 0.(-1) + 1.0 + 1.0 + \cdots = 0$$

Pro n=2:

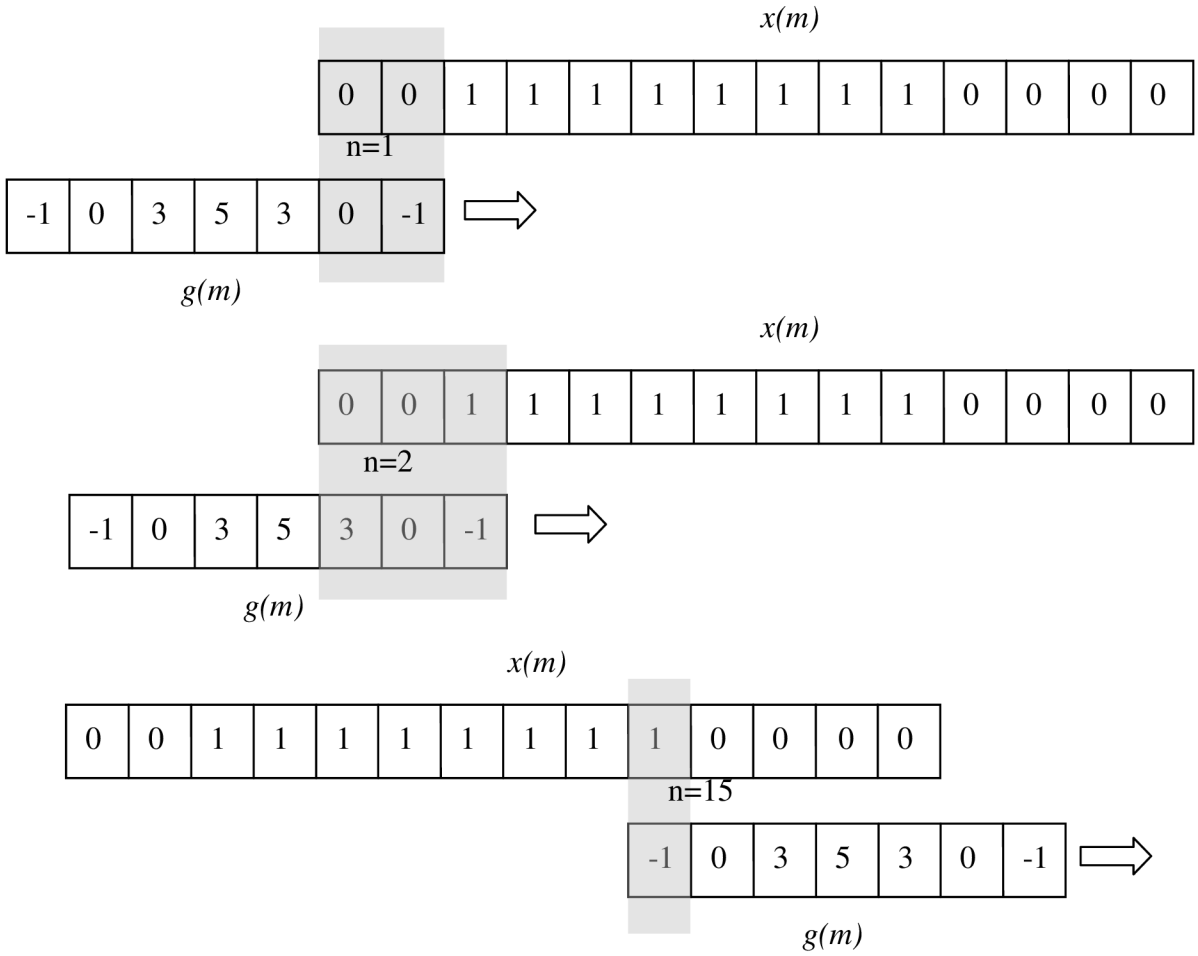
$$y(2) = \sum_{m=0}^{9} x(m)g(2-m) =$$

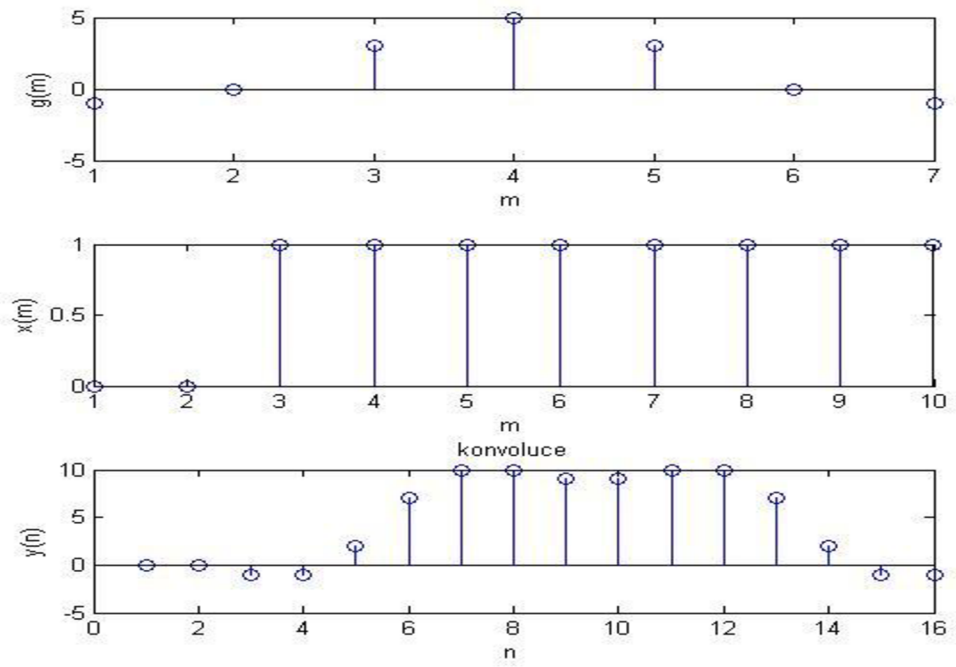
$$= x(0)g(2) + x(1)g(1) + x(2)g(0) + x(3)g(-1) + \cdots$$
$$= 0.3 + 0.0 + 1.(-1) + 1.0 + \cdots = -1$$

Pro n=15:

$$y(15) = \sum_{m=0}^{9} x(m)g(15-m) =$$

$$= x(0)g(15) + x(1)g(14) + x(2)g(13) + x(3)g(12) + \cdots + x(9)g(6) = 0.0 + 0.0 + 1.0 + 1.0 + \cdots + 1.(-1) = -1$$





Obr. 47.: Výsledek zadané konvoluce

7.3.1 Impulzní odezva

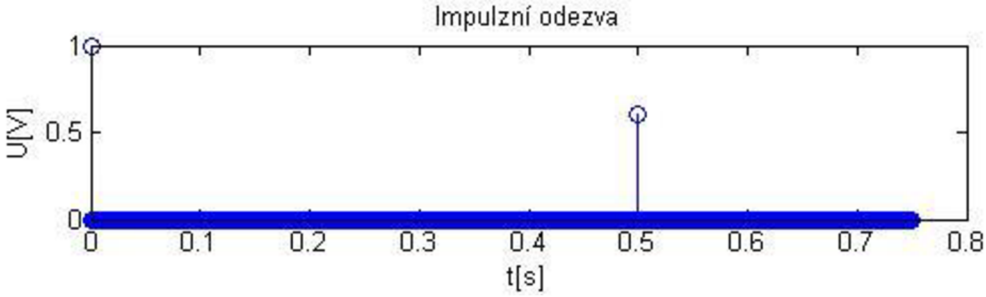
Něco teorie ohledně konvoluce už známe. Teď se budu snažit ukázat, k čemu nám může konvoluce posloužit. Bude nás zajímat pojem **impulzní odezva** systému, což je výstupní signál systému, na který je přiveden jednotkový signál. Pokud známe impulzní odezvu nějakého systému, tak o něm víme v podstatě vše potřebné, abychom mohli spočítat výstup na libovolný vstup.

Impulzní odezvu samozřejmě můžeme vytvořit i uměle, což nám dává do rukou mnoho možností úprav signálu.

7.3.2 Ozvěna

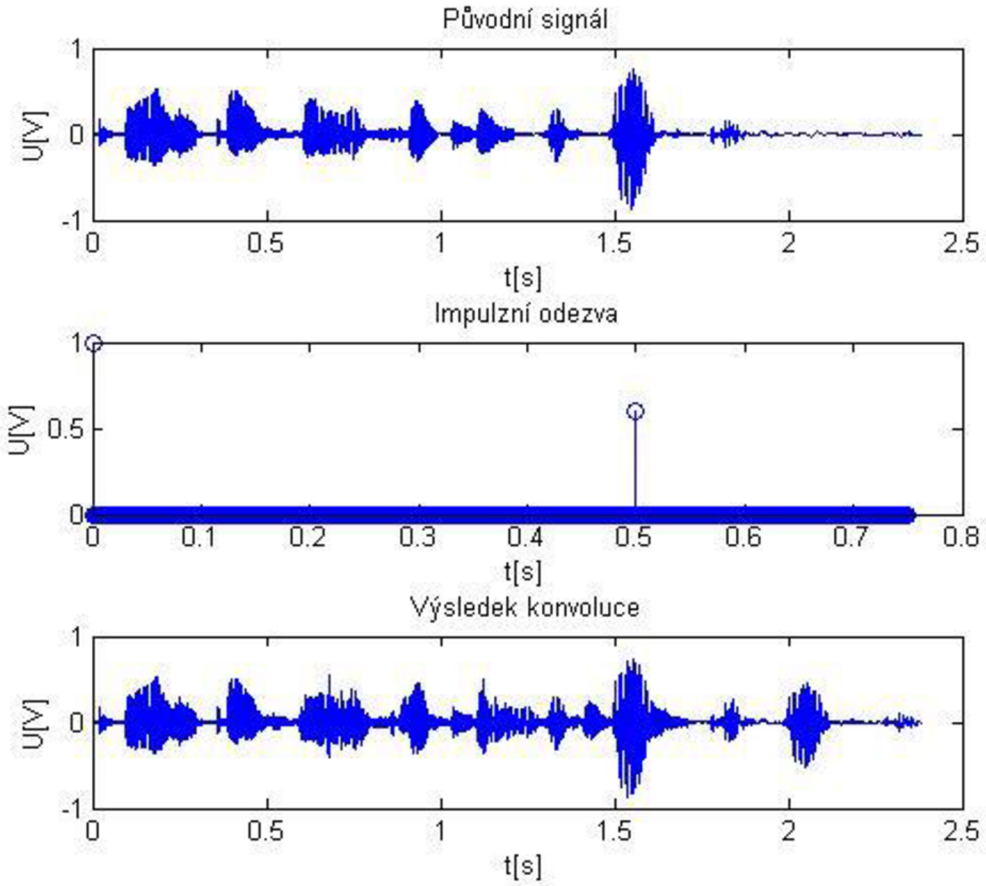
Ukážu, jak se dá například vytvořit zvuková ozvěna pomocí konvoluce. Asi nejjednodušší možnost vytvoření ozvěny ve zvukovém signálu je přičíst k němu signál stejný, omezený na amplitudě a mírně posunutý. Menší amplituda bude mít za následek nižší hlasitost ozvěny a posunutí určí časový úsek, za který bude ozvěna slyšet po začátku původního zvuku. Tento způsob je jednoduchý, avšak je to tak trochu podvádění, protože se nejedná o plnohodnotnou ozvěnu.

Lepšího výsledku dosáhneme konvolucí. Pokud bychom chtěli simulovat vznik ozvěny pro nějaké konkrétní prostředí, například uzavřenou místnost, potřebujeme k tomu impulzní odezvu této místnosti. Tu bychom mohli získat přímo na místě s mikrofonem, nebo ji vytvoříme uměle. Klasický tvar impulzní odezvy prostředí s ozvěnou je na obr. 48.



Obr. 48.: Impulsní odezva u ozvěny

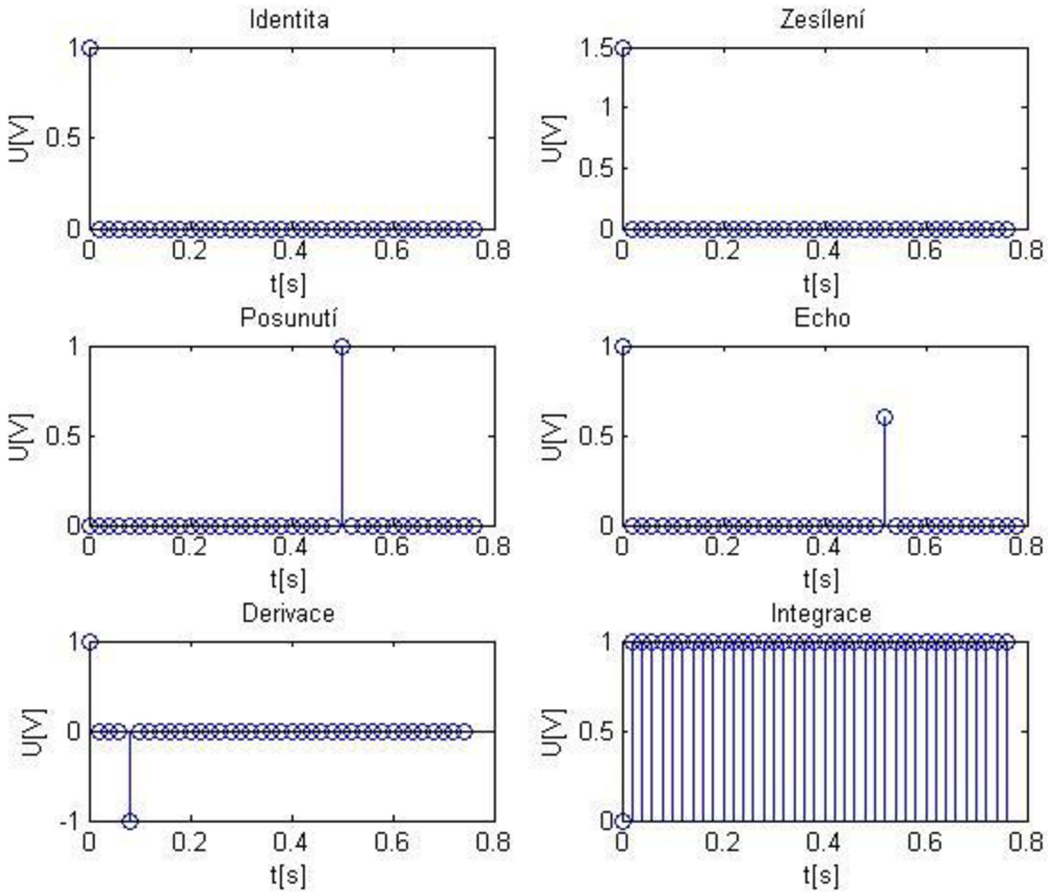
Nyní stačí vzít jakýkoliv vstupní signál a udělat konvoluci s touto odezvou. Zkusme se zamyslet, co vlastně body na obr. 48. znázorňují. Co asi bude určovat špička ve vzdálenosti 0,5s o hodnotě 0,6V? Spusťme kód v Matlabu a hned uvidíme. Pro tuto ukázku zvolíme skript ***echo.m.*** V něm je potřeba zadat vstupní signál, na který budeme chtít „nabalit“ ozvěnu. Program nám jej vykreslí, ukáže impulzní odezvu použitou pro daný výpočet a poté zobrazí výsledek. Jak graficky, tak ho také ihned přehraje, plus uloží do nového souboru pro další zkoumání.



Obr. 49.: Výstup skriptu echo.m

Impulzní odezva reálného prostředí se samozřejmě bude lišit. My si můžeme vyzkoušet její vliv na výsledný signál. Jednoduše změníme její hodnoty přímo v kódu a můžeme pozorovat různé výsledky. Buďto budeme modelovat jiné podobné typy odezev, nebo zkusíme odezvu upravit úplně jinak.

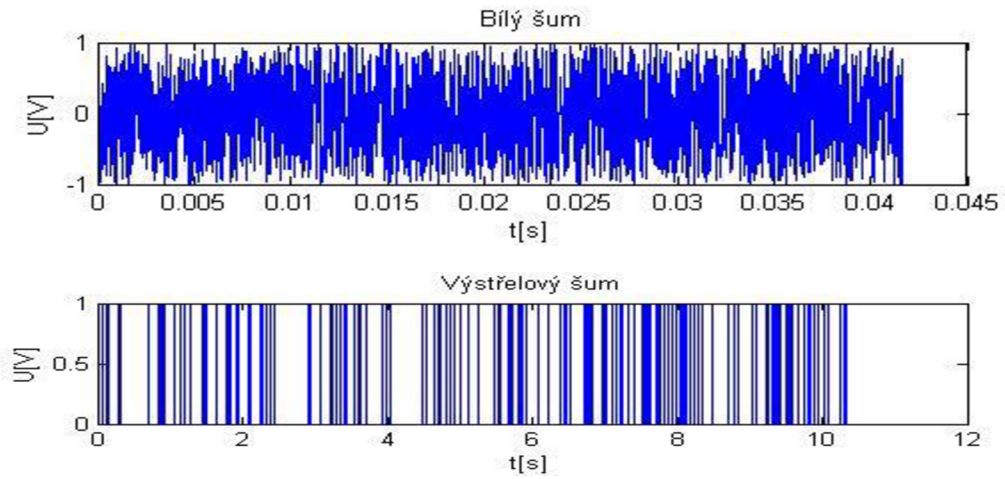
Jak už bylo řečeno, konvolucí se spočte výstup signálu na jakýkoliv vstup, známe-li impulzní odezvu daného systému. Pro názornost rovnou uvedu typické impulzní odezvy různých systémů, s kterými jsme se už většina setkala. Obr. 50 znázorňuje typické odezvy systémů, které vyprodukují signál identický, zesílený, posunutý, s ozvěnou, derivovaný a integrovaný.



Obr. 50.: Typické odezvy systémů

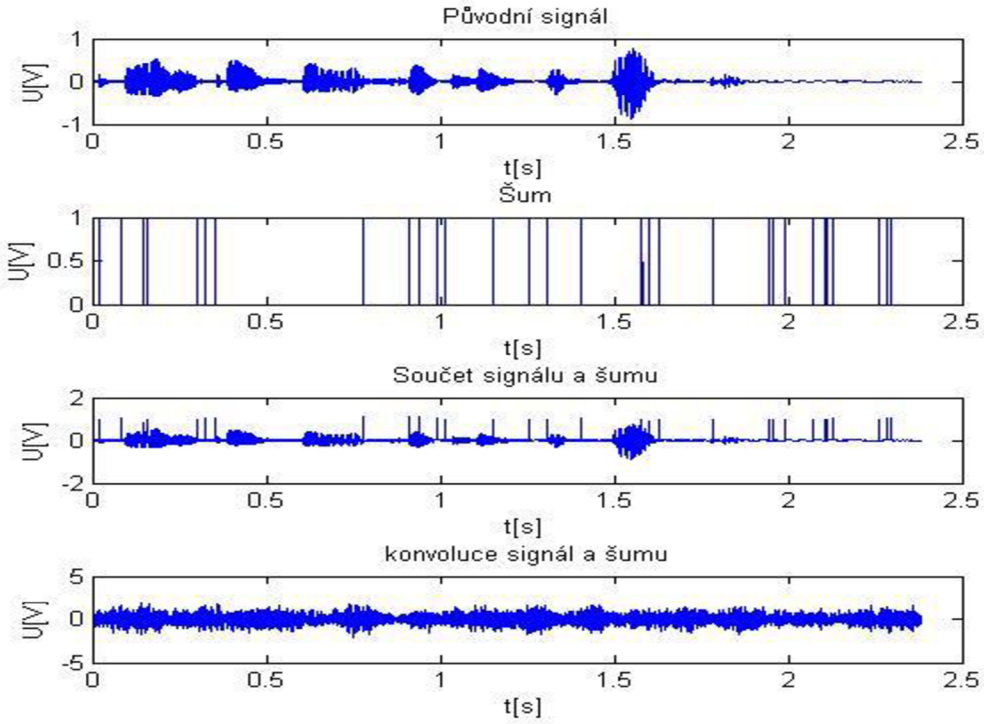
7.4 Vliv šumu na užitečný signál

V této kapitole, ukážu, co se stane se signálem, ke kterému se přidá určitý druh šumu. Budu pracovat se šumem tepelným (bílým) a šumem výstřelovým.Jedná se o nejčastější typy šumu v elektronice a snad každý už se s nimi někdy setkal.



Obr. 50.: Typy šumu

Ve skriptu ***signalnoise.m*** je ukázáno, jak vypadá spojení signálu se šumem a to jak normální operací sčítání, tak konvolucí lineární i cyklickou. Všechny výsledky se zpětně ukládají do wav souborů, z kterých si je pak možno rozdíly poslechnout. Pokud zkusíme mluvené slovo sečíst se šumovým signálem, dostaneme signál zašuměný a ve většině případu také srozumitelný. Zkrátka šum signál neovlivní natolik, abychom nerozuměli mluvené řeči. Jenže pokud přidáme šum konvolucí, situace se začne rapidně měnit. Z výsledku slyšíme, že i slabý výstřelový šum dokáže základní signál „rozházet“ natolik, abychom nerozuměli obsahu. Můžeme porovnat výsledky pro více druhů signálů a šumu. Zjistíme, že na některé signály má šum ve výsledku menší vliv, na jiné naopak větší.



Obr. 51.: Výstup skriptu signalnoise.m

8 Závěr

Podle první části zadání jsem do diplomové práce zpracoval základní charakteristiku vybraných druhů signálů. Všechny typy jsem se snažil doplnit příklady z praxe, nebo názornými příklady tak, aby si čtenář vždy po přečtení definice mohl danou problematiku prohlédnout a jednoduše ji porozumět. Celá část má tak za úkol přiblížit čtenářovi, o čem se bude jednat dále. Podrobněji zde srovnávám spektra několika základních signálů a různých druhů hudebních nástrojů. Veškeré výsledné průběhy jsou okomentovány a popsány tak, aby čtenářovi bylo jasné, k čemu v nich dochází.

Další část zadání obsahuje zpracování spojitých signálů a AD&DA převodů. Této problematice jsou věnovány kapitoly 4 až 7. Opět je uvedeno a vysvětleno několik základních pojmů a skutečností, které jsou poté doplněny o různé skripty v Matlabu. Jedná se o základní operace se signálem, jako je násobení, posunutí, princip filtrace signálu, postup při AD&DA převodu. Termínům jako je např. podvzorkování a kvantování je věnováno více místa a čtenář má opět možnost vyzkoušet napsané skripty v Matlabu, aby viděl, jak se tyto operace realizují a jaký mají vliv na výsledný signál.

Poslední kapitola se věnuje signálům diskrétním. Je zde popsán a realizován např. výpočet základní periody vzorku signálu metodou AMDF, vysvětlen princip konvoluce, vytvoření ozvěny zvukového signálu pomocí konvoluce plus definice různých typů impulsních odezev systému pro upravení vstupního signálu a vliv šumu na užitečný signál.

Obsah práce má být vhodný k použití pro výuku předmětu BSIS. Proto jsem u každé kapitoly začal většinou jednoduchým teoretickým výkladem, abych uvedl čtenáře do problematiky a poté přidával názorné praktické věci, které v této práci zahrnují obrázky, grafy, zajímavé souvislosti a hlavně skripty v Matlabu. Prostředí Matlabu jsem vybral proto, že jeho studentská verze je lehce dostupná a dá se s tímto programem jednoduše pracovat, přičemž obsahuje všechny potřebné funkce. Všechny napsané skripty jsou přiloženy na CD-ROMu a jsou psány tak, aby byly ihned spustitelné, bez potřeby nahrávat je někam jinam, popřípadě přesunovat vstupní soubory do jiných adresářů. Je k nim také přiložen adresář se všemi zvuky, použitými pro tvorbu této diplomové práce.

Seznam použité literatury

[1] ŠEBESTA, V., SMÉKAL, Z. Signály a soustavy. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2004. 145 s.

[2] JAN, J. Číslicová filtrace, analýza a restaurace signálů. Brno: VUT v Brně, 1997. 438 s.

[3] KUŽELKA, J. FAIIR Filters Editor [online] Praha: 2005, dostupné na http://tvorbawebu.wz.cz/faiirfe/help/ad_a_kvantovani.htm

[4] KOLÁŘ, V. DA a AD převodník [online] Přednáška. Září 2004. Dostupný z http://fei1.vsb.cz/kat452/VSB.CZ/elektronika_fs/prednasky/06_prevodniky_oddeleni.pdf

[5] Monson, H. Hayes, Schaum's Outline of Theory and Problems of Digital Signal Processing, Georgia. McGraw- Hill

[6] Stránka pro studenty kursu "Signály a systémy - ISS" - 2009/10, [online] Základní pojmy o signálech. Brno. Přednáška. Dostupný z http://www.fit.vutbr.cz/study/courses/ISS/public/.cs

[7] Máša, P. Impulsní a přechodová charakteristika, stabilita. Praha. Přednáška. Dostupný z http://amber.feld.cvut.cz/vyu/eo2/files/lectures/X31EO2_P9.pdf

[8] Loose, J. Obvody pro porovnávání a tvarování amplitudy. [online] Plzeň. Dostupný z http://hellweb.loose.cz/index.php?page=school&subpage=elt&id=44

[9] Raida, Z. Slovník pojmů [online] Brno. Dostupný z http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=def&src=spektralni_funkce&bck=6

[10] Holčík, J. Signály a lineární systémy. MUNI Brno. Skriptum. Dostupné z http://is.muni.cz/el/1431/podzim2009/Bi5440/um/USS2_1.pdf?fakulta=1431;obdobi=4663;kod=Bi5440

[11] Brančík, L., Dostál, T. Analogové elektronické obvody. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně. 2007, 194 s.

[12] JURA, P. Signály a systémy. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2004. 79 s.

[13] Kadlec, F. Zpracování akustických signálů. Vydavatelství ČVUT, 2002. 189 s.

Seznam zkratek

AMDF- Average Magnitude Difference Function

AD- Analogově digitální

DA- Digitálně analogový

EKG- Elektrokardiograf

EEG- Elektroencefalograf

EMG- Elektromyograf

Obsah CD-ROM

[TEXT]

textdp.pdf

prohlaseni.pdf

titulnilist.pdf

zadani.pdf

[SOUND]

aa.wav

bily.wav

flute_A4.wav

led.wav

maleA2.wav

music.wav

perioda.wav

pokus.wav

pokuskv.wav

shot.wav

singer_A4.wav

stredniA3.wav

tatoknizkamono.wav

viola.wav

vyoskeA4.wav

[MFILE]

[AMDF]

aa.wav

AMDF.m

perioda.wav

[FILTR]

filtracevyber.m

led.wav

music.wav

typyfiltru.m

zakladnifiltrdp.m

zakladnifiltrhp.m

[KONVOLUCE]

bily.wav

echo.m

konvolucegraf.m

shot.wav

signalnoise.m

tatoknizkamono.wav

typyodezvy.m

[KVANTIZACE]

kvant.m

kvantizace.m

led.wav

pokus.wav

pokuskv.wav

[PODVZORKOVANI]

led.wav

podvzokovani.m

podvzorkovanigraf.m

pokus.wav

[ZVUKSIGNAL]

ex2-1gone.wav

ex2-2gone.wav

ex2-3gone.wav

ex2-full.wav

flute_A4.wav

harmongone.m

maleA2.wav

singer_A4.wav

stredniA3.wav

synthesize.m

viola.wav

vysokeA4.wav

analyze.m