

AKADEMIE MÚZICKÝCH UMĚNÍ V PRAZE

HUDEBNÍ A TANEČNÍ FAKULTA

Hudební umění

Zvuková tvorba

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**ÚVOD DO PROBLEMATIKY ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU
VE VYSÍLACÍM ŘETĚZCI**

se zaměřením na dynamické úpravy hudební stereo nahrávky

Filip Beneš

Vedoucí práce:

doc. Tomáš Zikmund

Oponent práce:

doc. MgA. Ing. Ondřej Urban, Ph.D.

Datum obhajoby:

5. června 2017

Přidělovaný akademický titul:

BcA.

Praha, 2017

ACADEMY OF PERFORMING ARTS IN PRAGUE

MUSIC AND DANCE FACULTY

Art of Music

Sound production

BACHELOR THESIS

**INTRODUCTION TO THE SIGNAL PROCESSING
IN BROADCASTING CHAIN**

focusing on dynamics processing of stereo music recording

Filip Beneš

Thesis supervisor:

doc. Tomáš Zikmund

Opponent:

doc. MgA. Ing. Ondrej Urban, Ph.D.

Date of defence:

5th June 2017

Academic degree conferred:

BcA.

Prague, 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Úvod do problematiky zpracování signálu ve vysílacím řetězci, se zaměřením na dynamické úpravy hudební stereo nahrávky“ vypracoval(a) samostatně pod odborným vedením vedoucího práce a s použitím uvedené literatury a pramenů.

Ve Zbuzanech dne

.....
podpis diplomanta

Upozornění

Využití a společenské uplatnění výsledků diplomové práce, nebo jakékoliv nakládání s nimi je možné pouze na základě licenční smlouvy, tj. souhlasu autora a AMU v Praze.

Evidenční list

Uživatel stvrzuje svým podpisem, že tuto práci použil pouze ke studijním účelům a prohlašuje, že jí vždy řádně uvede mezi použitými prameny.

[illegible]

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou zpracování zvukového signálu pro rozhlasové a televizní vysílání s důrazem na dynamické úpravy hudebního signálu v rozhlasovém řetězci. Zabývá se otázkou zásahu do hudebního obsahu a do umělecké práce zvukového mistra.

Jsou zde popsány základní dynamické úpravy, princip fungování vysílacího řetězce a speciální část je věnována rozboru částí modulačního procesoru. Práce tak nabízí vhled do jeho jednotlivých částí s upozorněním na možnosti jejich negativních vlivů na obsah.

Do práce byly zahrnuty světově nejrozšířenější a v České republice dostupné vysílací platformy audio vysílání.

Práce je doplněna o ilustrativní experiment, ve kterém byla srovnána hudební nahrávka před průchodem a po průchodu analogovým i digitálním řetězcem, s poukázáním na jeho základní vlivy.

Abstract

The thesis deals with the processing of audio signal for radio and television broadcasting with emphasis on dynamics processing of music audio signal in radio broadcast chain. It deals with the question of modifying in the musical content and also the art work of the sound engineer.

The basic dynamics processing, the principle of how the transmission chain works and as a special part the analysis of parts of the broadcasting processor are described here. The thesis offers an insight into individual parts of the processor including a warning about the possibility of their negative influence on the content.

The thesis includes the world's most widespread and in Czech Republic available audio broadcasting platforms.

It is accompanied by an illustrative experiment with that compares a music recording before and after both analog and digital broadcasting chain passage pointing out its basic influences.

Obsah

Seznam příloh	1
Seznam použitého označování a zkratk.....	2
Úvod	4
1 Důvody zásahu do dynamiky hudebního signálu ve vysílání.....	5
1.1 Cílové poslechové podmínky	5
1.2 Technické aspekty dynamických úprav signálu	6
1.3 Umělecké aspekty dynamických úprav signálu	6
2 Způsoby úpravy dynamického rozsahu signálu a jeho měření pomocí LU.....	8
2.1 Manuální úpravy dynamiky signálu.....	8
2.2 Úpravy dynamického rozsahu zvukovým procesorem	8
2.2.1 Snižování dynamického rozsahu.....	8
2.2.2 Zvyšování dynamického rozsahu	11
2.3 Systém měření a normalizace hlasitosti loudness unit	12
2.3.1 Základní jednotky systému měření hlasitosti podle ITU-R BS.1770	13
3 Vysílací řetězec.....	15
3.1 Analogové vysílání.....	16
3.1.1 Vysílání na dlouhých a středních vlnách	16
3.1.2 FM vysílání	17
3.2 Digitální vysílání.....	18
3.2.1 DAB	18
3.2.2 DVB	18
3.3 Internetový streaming	19
3.3.1 Ztrátová datová komprese digitálního zvukového signálu.....	19
4 Modulační procesory.....	21
4.1 Struktura a princip jednotlivých částí	21
5 Vliv vysílacího řetězce na hudební nahrávku.....	26
5.1 Shrnutí možných vlivů na hudební obsah.....	26
5.2 Experimentální průchod hudební nahrávky řetězcem	27
5.2.1 Postup práce	27

5.2.2 Výsledky – zásahy do dynamiky	28
5.2.3 Výsledky – spektrální zásahy	30
Závěr	37
Seznam literatury	39
Příloha 1: Blokové schéma modulačního procesoru Orban Optimod	41
Příloha 2: Grafy znázorňující hlasitost porovnávaných snímků v čase	42

Seznam příloh

Příloha 1: Blokové schéma modulačního procesoru Orban Optimod

- 1.1: Vnitřní blokové schéma modulačního procesoru Orban Optimod 8600

Příloha 2: Grafy znázorňující hlasitost porovnávaných snímků v čase

- 2.1: Krátkodobá hlasitost originálního signálu v čase vůči integrované (PL)
- 2.2: Krátkodobá hlasitost signálu z FM příjmu v čase vůči integrované (PL)
- 2.3: Krátkodobá hlasitost signálu z DVB-T příjmu v čase vůči integrované (PL)

Seznam použitého označování a zkratk

AAC	Advanced Audio Coding (pokročilé audio kódování) – standard ztrátové komprese
AES/EBU	správněji AES3 – standard přenosu digitálního audio signálu vyvinutý Audio Engineering Society (AES) a EBU
AGC	Automatické vyrovnaní citlivosti (Automatic Gain Control)
AM	amplitudová modulace
DAB/DAB+	Digital Audio Broadcasting (Digitální rozhlasové vysílání); DAB+ představuje druhou generaci DAB
DAW	Digital Audio Workstation – obecné označení pro software používaný k zpracování zvuku na počítači
dBFS	decibel vztažený k plnému rozsahu digitálního média (fullscale)
dBTP	decibel true peak (TP)
DSP	digitální signálový procesor
DVB	digitální televizní vysílání (Digital Video Broadcasting)
EBU	European Broadcast Union
FFT	Rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier transform)
FM	frekvenční modulace / označení FM vysílání
ITU	Mezinárodní telekomunikační unie (International Telecommunication Union)
L, R	Označení stereo kanálů (levý/pravý; left/right;)
LRA	Loudness range (dynamický/hlasitostní rozsah)
LU	Loudness unit – jednotka hlasitosti podle normy ITU-T BS.1770
LUFS	Jednotka hlasitosti LU vztažená k plnému rozsahu
M, S	„Mid“ a „Side“; neboli součtový (M) a rozdílový (S) kanál
MADI	Multichannel Audio Digital Interface – vícekanálové zvukové digitální rozhraní; technicky značené jako AES10

MPEG	Moving Picture Experts Group (doslovně „Skupina expertů pro pohyblivý obraz“) – pracovní skupina vytvořená Mezinárodní organizací pro normalizaci (ISO) a Mezinárodní elektrotechnickou komisí (IEC), která vyvíjí standardy kompresních algoritmů pro kódování zvuku a obrazu.
MPX	zkratka pro multiplex
OGG	Open-source projekt nabízející alternativy kódování zvuku a obrazu, jako například audio kodek Vorbis
PL	Program loudness – hlasitost programu / integrovaná hlasitost
PLR	Peak-to-loudness ratio – poměr TP a PL
RDS	Radio data systém – systém přenosu doplňkových informací v FM
TP	True peak (v překladu „pravá špička“)

Úvod

Jakožto zvukový mistr specializující se na nahrávání artificiální („klasické“) hudby jsem se dostal k jednoduché otázce, která mě zaujala; co se děje s hudební nahrávkou ve vysílacím řetězci? Zatímco hudební nahrávky z oblasti non-artificiální hudby si lidé navykli poslouchat i s leckdy již kontraproduktivní mírou dynamických úprav, tak v případě nahrávky artificiální hudby mohou podobné úpravy dokonce poškodit hudební obsah. Jsem si vědom toho, že je těžké definovat, co je to „poškození obsahu“, protože se jedná o zcela subjektivní záležitost. Jiné stanovisko k dynamickým úpravám zaujme milovník Hi-Fi zvuku a jiné chatař, co při práci na zahrádce rád poslouchá Beethovena. Tím chci říct pouze to, že se jen stěží dá říct jaké nastavení je správné, či špatné a tato práce si ani neklade za cíl snažit se jednotlivé úpravy hodnotit, či předepisovat.

Cílem této práce je poskytnout náhled do způsobu zpracování signálu ve vysílacím řetězci a upozornit na možná úskalí jeho jednotlivých částí. Její přínos vidím ze všeho nejvíce v tom, že může posloužit ostatním kolegům zvukovým mistrům k rozšíření aspoň základního povědomí o problematice vysílacího řetězce. Obzvlášť přihlédnou-li k tomu, jak obezřetně, svědomitě a s citem pro detail i hudební celek se většinou snaží zvukový mistr ke své práci přistupovat, je dobré vědět, co ještě snímek čeká na cestě k posluchači.

V kapitole 1 se zabývám obecnými důvody vedoucími k úpravě dynamiky signálu, jak těmi technickými, tak těmi uměleckými.

Způsoby, jakými se dynamika upravuje a relativně nový systém měření hlasitosti, který využívám v 5. kapitole, představuji v kapitole 2.

Jednotlivé části vysílacího řetězce jsou popsány na příkladu rozhlasového řetězce ve 3. kapitole. Zabývám se zde i omezeními, které do cesty kladou jeho jednotlivé části.

Jelikož největší zásahy do signálu mají na svědomí tzv. modulační procesory, věnuji rozboru jejich činností 4. kapitolu. Jsou zde popsány jednotlivé části a základní principy jejich fungování.

V kapitole 5 se zabývám shrnutím vlivu vysílacího řetězce na originální signál a součástí této kapitoly je i ilustrativní experiment s porovnáním originálního signálu se signálem zaznamenaným na různých koncích celého řetězce.

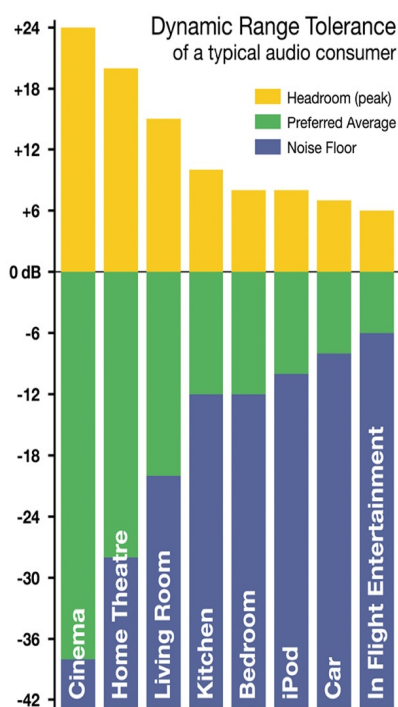
1 Důvody zásahu do dynamiky hudebního signálu ve vysílání

Do vysílacího proudu se může dostat prakticky jakýkoliv zvukový signál od mluveného slova přes ruchy reportáží, filmů, či rozhlasových her, po hudbu všech žánrů. Bylo by technicky problematické (a pro diváka/posluchače silně rušivé) ponechávat signály v nezměněném stavu. Není v lidských silách všechny parametry ovládat manuálně a z toho důvodu se již od 60. let 20. století používají takzvané modulační procesory – více v kapitole 5.

Jedním ze stěžejních důvodů úpravy dynamiky signálu je přizpůsobování se cílovým podmínkám – tedy příjemci, vlastnostem poslechu a šumovému pozadí na straně uživatele. (KATZ, 2015, STRAŇÁK 2007)

1.1 Cílové poslechové podmínky

Firma TC elektronik, která se zabývá mimo jiné výrobou masteringových a vysílacích procesorů (cit. TC electronic), provedla ve spolupráci s Robertem A. Katzem (KATZ, 2015) měření, ve kterém přibližně stanovili uživatelem tolerované dynamické rozsahy v různých poslechových podmínkách. Na obrázku 1.1 je modře vyznačena oblast šumového pozadí, zeleně oblast průměrných hodnot a žlutě oblast špiček signálu. Pokud se úroveň hlasitosti zvukového signálu ocitá příliš často v oblasti šumového pozadí,



Obrázek 1.1: Uživatelem tolerované dynamické rozsahy (LUND 2006, KATZ, 2015)

nebo naopak nad úrovní špiček, působí pak zvukový signál na posluchače nepříjemně a neumožňuje mu klidný poslech. (LUND, 2006)

Z tohoto vyplývá první důvod pro úpravu celkové dynamiky, kterým je spokojenost co největšího množství posluchačů, kde je nastavení konkrétních dynamických úprav podřízeno cílové skupině posluchačů a jejím cílovým poslechovým podmínkám. Zde bych jako příklad uvedl dvě ze současných stanic Českého rozhlasu – stanice Radiožurnál a stanice Vltava. Radiožurnál vysílá primárně zpravodajství, a víc než Hi-Fi kvalita přenosu, je zde na prvním místě srozumitelnost i za horších poslechových podmínek, kdy je potřeba přistoupit k výraznějšímu snížení dynamického rozsahu. V případě FM vysílání jde i o dosah vysílače, více v kapitole 3.1.2. Vltava je oproti tomu stanice zaměřená na kulturu a přílišné snížení dynamického rozsahu by mohlo posluchače připravit o estetickou hodnotu dynamických kontrastů v zvukovém (a obecně audiovizuálním) uměleckém díle.

1.2 Technické aspekty dynamických úprav signálu

Jedním ze základních technických aspektů je dosažení co nejvyšší možné účinnosti využití přenosové cesty – zejména v případě FM vysílání je to co největší využití (a tedy i dosah) vysílače. Dále jsou to technická omezení přenosové cesty, která jsou (stejně jako u všech audio médií) – horní hranice (přebuzení v analogové doméně / clipping v digitální) a dolní hranice v podobě šumu. S tím souvisí i dodržování veškerých norem, které se k pozemnímu vysílání vážou. (STRAŇÁK, 2010)

Do technických aspektů lze zařadit i srozumitelnost slova.

1.3 Umělecké aspekty dynamických úprav signálu

Mezi umělecké aspekty patří zvukové sjednocení, charakter a konzistentnost projevu konkrétní rozhlasové či televizní stanice, kde je právě úprava dynamiky jedním z vlivů. Dalším významným vlivem je celková ekvalizace, která v modulačních procesorech probíhá také. (2)

Mezi umělecké aspekty lze zařadit něco, co bych nazval žánrové přizpůsobení stanice – tedy vhodné nastavení úprav v kontextu zvukového obsahu. Kupříkladu populární hudba vyžaduje zcela jiný přístup k dynamice než rozhlasová hra a zcela jiný přístup se uplatní u „klasické“ umělé hudby.

K obecným uměleckým důvodům patří i využití dynamických úprav jako efektu především v non-artificiální rytmičné hudbě, kde se jedná například o tzv. punch efekt (z angl. úder), který představuje charakteristické zvýšení energie zesílením zakmitaného stavu zejména velkého bubnu („kopáku“) a baskytary kompresí s rychlými náběhovými i doběhovými časy (o kompresorech více v kapitole 2.2). (KATZ, 2015)

Ve vysílacím řetězci lze takovéto dynamické úpravy uplatnit v rámci již zmíněného žánrového přizpůsobení – například pro celkové zvýšení uvedeného punch efektu u stanice vysílající rockovou hudbu.

2 Způsoby úpravy dynamického rozsahu signálu a jeho měření pomocí LU

U zvukového signálu rozlišujeme makrodynamiku a mikrodynamiku. Makrodynamikou rozumíme hlasitostní rozdíly mezi většími celky (mezi částmi skladby, mezi skladbami, či mezi pořady ve vysílacím proudu) a které jsme případně schopni změřit a statisticky vyjádřit pomocí tzv. loudness range (více v kapitole 2.3). Makrodynamikou rozumíme změny amplitudy v kratším časovém úseku – například průběh obálky tónu.

2.1 Manuální úpravy dynamiky signálu

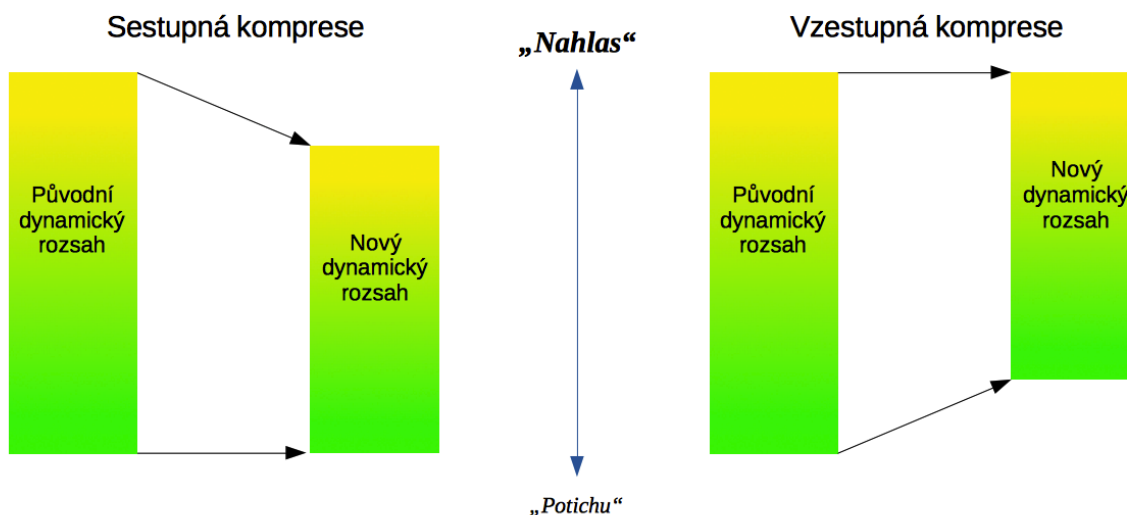
Úplně nejzákladnější a nejjednodušší dynamickou úpravou signálu jsou manuální změny celkové úrovně, kterou si ve své nejjednodušší formě lze představit jako pohyb faderu, který vykoná zvukový mistr. Za předpokladu, že faderem „nelomcuje jako smyslů zbavený“, tedy koná klidný a plynulý pohyb, je zásah do mikrodynamiky poslechem neznatelný. Tímto způsobem lze například provádět kompresi signálu jeho tlumením v silných částech nebo zesilováním ve slabších částech, či expanzi ztlumením signálu během „zašuměného ticha“ (z elektroakustického hlediska rozumějme jako místo kde se nenachází užitečný signál). V praxi tak lze pracovat mimo reálný čas (postprodukčně) automatizací výsledného zisku signálu v DAW, kde už známe dynamické vlastnosti signálu, ale i v reálném čase, kde například v případě hudebního signálu už podle crescenda či decrescenda dokážeme odhadovat následující dynamický vývoj.

2.2 Úpravy dynamického rozsahu zvukovým procesorem

2.2.1 Snižování dynamického rozsahu

Máme dvě možnosti, jak snížit celkový dynamický rozsah – ztlumením silných částí (sestupná komprese), nebo zesílením slabých částí (vzestupná komprese) – obrázek 2.1.

Zvukový procesor, který provádí sestupnou kompresi obvykle nazýváme kompresor, jeho speciálním případem je limiter. Speciálním případem limiteru v digitální podobě je ořezávač. Mezi procesory snižující dynamický rozsah lze zařadit i tzv. leveler, což je zařízení využívající automatického vyrovnávání citlivosti (AGC; automatic gain control), kterým ovlivňuje makrodynamiku signálu.



Obrázek 2.1: Sestupná vs. vzestupná komprese. Inspirováno Katzem, 2015.

Vzestupnou kompresi je možné provádět upraveným expanderem, který umožňuje nastavit ratio i do převrácených hodnot (více o expanderu v 2.2.2).

Zajímavým způsobem vzestupné komprese je tzv. paralelní komprese, kdy se komprimovaný nebo limitovaný signál (tzv. wet; v překladu „mokrý“) smíchá se signálem původním, dynamicky neupravovaným (tzv. dry; „suchý“). Množství komprese se nastaví pomocí prahu a poměru wet/dry. V digitální doméně je potřeba zajistit, aby wet a dry byly ve stejné fázi pomocí kompenzace zpoždění. Když je úroveň signálu pod nastaveným prahem wet signálu, tak se jedná o prostý součet zdublováním kanálů a jakmile se signál dostane nad nastavený práh, tak jsou špičky signálu zachovány z dry signálu a wet je potlačen dynamickým procesorem. Veškeré nežádoucí produkty kompresoru je možno dostat hluboko pod maskovací prahy a dynamika tak může být upravena velmi citlivě a přirozeně s minimálním rizikem slyšitelného zkreslení. (KATZ, 2015)

2.2.1.1 Kompresor a limiter

Nejjednodušší a nejčastěji využívaný druh komprese. V analogové formě se jedná o napětím řízený zesilovač, který od dané úrovně signálu začne ubírat zisk v nastaveném poměru. Kompresory provádějící sestupnou kompresi mají několik základních parametrů:

Práh (threshold) – hodnota v dBFS, od které začne úbytek zisku signálu.

Poměr (ratio) – poměr, ve kterém se hodnoty nad prahem snižují (například při nastavení poměru 2:1, bude mít signál o úrovni 10 dB nad prahem ve výsledku jen 5 dB nad prahem).

Attack („náběh“) – čas, za který kompresor dosáhne plného úbytku zisku po tom, co signál překročí práh.

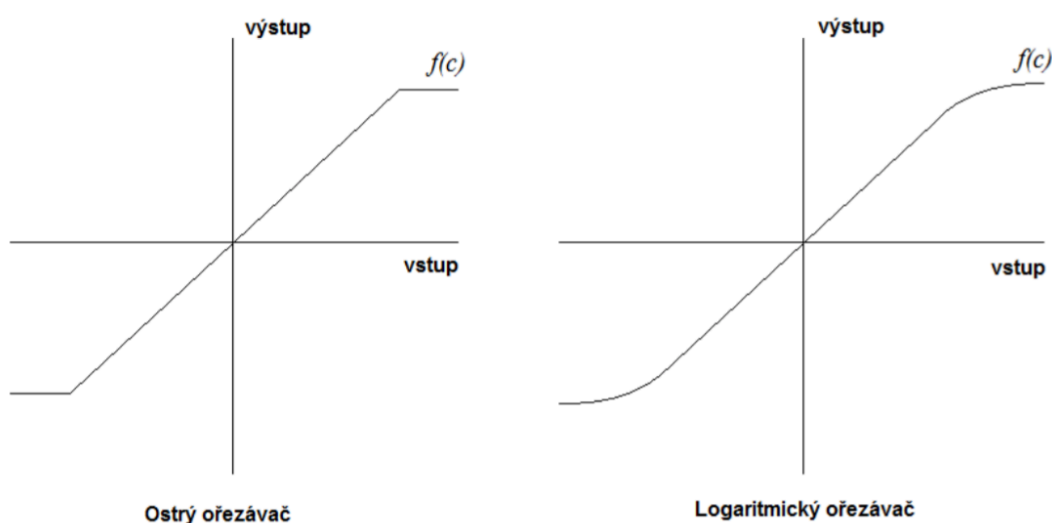
Release („doběh“) – čas, za který přestane kompresor ubírat zisk po tom, co se signál zase dostane pod práh.

Limiter je kompresor s poměrem obvykle nad 10:1 (v případě digitálních kompresorů klidně 1000:1) s rychlými náběhovými časy. Používá se v situacích, kdy potřebujeme jasně omezit výstupní úroveň (například ochrana proti přebuzení).

V digitální podobě je možné dosáhnout až okamžitých náběhových časů pomocí tzv. funkce look ahead („pohled vpřed“), kdy si je procesor schopný načíst signál předem (při práci v reálném čase tím samozřejmě vytvoří zpoždění) a reagovat na špičku signálu i s okamžitou přesností.

2.2.1.2 Clip-limiting (ořezávání)

Speciálním případem limitace digitálního signálu je tzv. clip-limiting, který je ve své primitivní podobě pouze přebuzením digitálního média – to co, většinou považujeme za technický problém. Ořezávač už nepracuje na principu úpravy zisku signálu, ale přímo zasahuje do signálových hodnot pomocí matematické funkce. Na obrázku 3.2 vlevo je převodní funkce odpovídající přebuzení média, jehož výsledkem je slyšitelné zkreslení signálu, ale efektivní navýšení hlasitosti. Když se ovšem použije jiná převodní funkce jako například na obrázku 2.2 vpravo, je možné zkreslení dostat na únosnou míru, pod maskovací prahy lidského ucha za zvýšení hlasitosti signálu. Průběhu

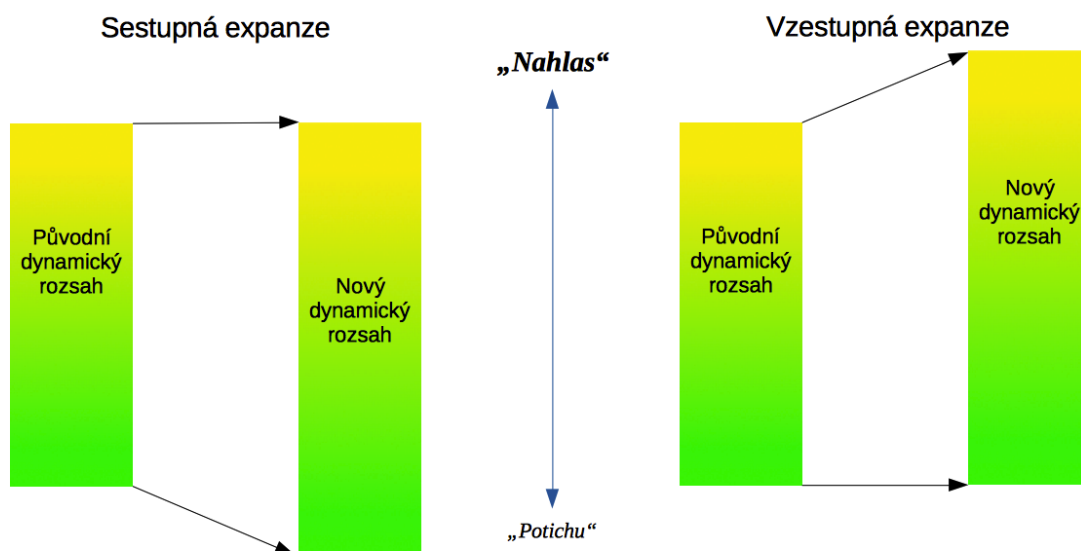


Obrázek 2.2: Převodní funkce ostrého a logaritmického ořezávače (převzato od Straňáka, 2009)

na obrázku 2.2 vpravo se říká „soft-clipping“ a byl hojně využíván (a stále ještě dost je) k zvýšení hlasitosti digitálního signálu během tzv. války hlasitostí.

2.2.2 Zvyšování dynamického rozsahu

Opět jsou dvě cesty ke zvýšení dynamického rozsahu – zeslabením slabých částí (sestupná expanze), nebo zesílením silných částí (vzestupná expanze) – obrázek 2.3.



Obrázek 2.3: Sestupná vs. vzestupná expanze. (Inspirováno Katzem, 2010)

Procesor využívaný k sestupné expanzi se nazývá expander, jeho speciálním případem je gate (brána).

Vzestupnou expanzi je možné provádět upraveným kompresorem, který umožňuje nastavit poměr i do převrácených hodnot (například 0,5:1). Využití není úplně běžné; použít se dá například k zvýšení efektu tranzientů jejich zdůrazněním (například u bicí soupravy).

2.2.2.1 Expander a gate

V analogové formě je expander napětím řízený zesilovač, který pod daným prahem začne snižovat zisk v nastaveném poměru. Expandery provádějící sestupnou expanzi mají podobné základní parametry jako kompresor:

Práh (threshold) – hodnota v dBFS, pod kterou se bude snižovat zisk signálu.

Poměr (ratio) – poměr, ve kterém se hodnoty pod prahem snižují.

Attack („náběh“) – čas, za který se expander vrátí do stavu nad prahem

Release („doběh“) – čas, za který expander dosáhne plného snížení zisku poté, co se signál dostane pod práh.

Gate je expander s ostrým poměrem. Jeho běžné použití je například jako šumová brána, kdy při dostatečném odstupu užitečného a neužitečného signálu dokáže při citlivém nastavení časů potlačit šum v tichých pasážích.

Podobně jako u kompresorů a limiteru je v digitální doméně možné využít pro expander a gate funkci look ahead, která dokáže zajistit jejich včasné otevření a zachování tranzientu. (KATZ, 2015)

2.3 Systém měření a normalizace hlasitosti loudness unit

Ačkoliv máme k dispozici spoustu způsobů měření signálu, skutečnou hlasitost signálu na výstupu nedokáže popsat žádná z nich už jen z principu, že různá přehrávací zařízení mají různé výkony a převodní charakteristiky. Hlasitost je zcela subjektivní vjem. Hlasitost signálu tedy můžeme posuzovat pouze když neměníme zbytek cesty a posuzovat můžeme signály pouze mezi sebou. Zároveň trend normalizace podle špiček signálu vytváří naprostý chaos v hlasitostech jednotlivých nahrávek – např. sólové housle pak můžou znít (a bohužel v praxi často i zní) při zachování stejné poslechové hlasitosti hlasitěji než dechový orchestr v důsledku normalizace, tedy srovnání nejvyšší špičkové úrovně vzorku (sample peak) k maximální úrovni digitálního média (0 dBFS). (ITU, 2017; srov. KATZ, 2015)

Dalším problémem je takzvaná „válka hlasitostí“ (loudness war), při které se zejména v populární hudbě zneužívá psychoakustického efektu, kdy se hlasitější nahrávka zdá být subjektivně „lepší“ a snadněji upoutá posluchačovu pozornost. To už od 90. let vede producenty a masteringové zvukaře k tomu, že využívají extrémních kompresí a limitací k dosažení co největší hlasitosti signálu, čímž samozřejmě naprosto devastují hudební dynamiku. (KATZ, 2015) Toto téma je rozsáhlé a překračuje rozsah i téma této práce.

Důsledkem toho je, že řadit za sebe různé hudební i nehudební zvukové signály, což je přesně to, co se děje při tvorbě rozhlasového proudu, je obtížné, protože co přispěvek, to jiná hlasitost signálu.

2.3.1 Základní jednotky systému měření hlasitosti podle ITU-R BS.1770

Tomuto dlouho centrálně neřešenému problému se rozhodla postavit Mezinárodní telekomunikační unie (ITU), která v doporučení ITU-R BS.1770-1–4 (ITU, 2017) stanovila tzv. jednotku hlasitosti, anglicky loudness unit se zkratkou LU. Pomocí LU je možné každému signálu vyčíslit hlasitost tak, že odpovídá subjektivní hlasitosti jen s drobnými odchylkami.

Výpočet hodnoty LU je poněkud složitý matematický postup, který v principu probíhá následovně: zvukový signál je zpracován pro každý kanál separátně, je váhován normovanými filtry (horní propust a zdůraznění výšek pomocí filtru typu shelving), následně je vypočtena hodnota středního výkonu signálu (mean square) (samozřejmě v závislosti na velikosti časového okna), poté jsou hodnoty násobeny konstantami v závislosti na typu kanálu (různé hodnoty pro jednotlivé kanály mono/stereo/surround) a sečteny. Signál je rozdělen na bloky o délce 400 ms s 75% překryvem. Jsou stanoveny horní a dolní prahy k eliminaci chyby měření způsobené například tichem mezi skladbami. Poté je hodnota logaritmována a násobena konstantou. Výpočet je složitý, více v (ITU, 2017).

Sinusový signál o frekvenci 1 kHz ve dvou kanálech s modulací –20 dBFS bude mít přibližně –20 LUFS. Ten samý signál pouze v jednom kanále už bude mít pouze –23 LUFS. (pozn.: FS znamená vztažení vůči celému rozsahu, z angličtiny full scale).

Další veledůležitou jednotku, kterou doporučení ITU definuje, je tzv. *true peak*, zkráceně TP, s jednotkou dBTP. Pod anglickým pojmem sample peak, tedy špičková hodnota samplu se skrývá číslo v dBFS, které říká, do jaké nejvyšší hodnoty vzorku se ve vymezeném časovém úseku signál dostal. Pro zvukového mistra představuje tato hodnota informaci o tom, zda má signál dostatečný odstup od přebuzení vstupního převodníku. V zaběhnuté praxi jsou zvukoví mistři zvyklí tuto hodnotu sledovat i během DA převodu, kde už ovšem přichází jeden klam. I signál, jehož špička je –0,5 dB je schopený přebudit výstupní převodník. Děje se tak v důsledku jevů, jako je například překmit, které se dějí „mezi vzorky“. Přesný princip popsán v (ITU, 2017). True peak pracuje s oversamplingem (znásobením vzorkovacího kmitočtu), který zaručuje potlačení těchto jevů a nabízí tak pohled „za převodník“.

Na těchto základních kamenech byly organizací EBU (European Broadcast Union) v doplňku EBU tech 3342 k doporučení EBU R 128 (EBU, 2014 a EBU, 2017) vystavěny další důležité jednotky:

Momentary loudness (okamžitá hlasitost¹): Hlasitost v LUFS měřená v časovém okně 400 ms, s 75% překryvem.

Short-term loudness (krátkodobá hlasitost): Hlasitost v LUFS sledovaná ve třech sekundách.

Integrated/Program loudness (hlasitost programu/integrovaná hlasitost; PL): Integrovaná hlasitost (v LUFS) celého programu, kdy „program“ EBU (EBU, 2014) definuje jako samostatný audio/audiovizuální celek prezentovaný v rozhlase/televizi či v jiném digitálním médiu.

Loudness range (rozsah hlasitosti; LRA): Statisticky stanovená hodnota rozsahu hlasitostí mezi nejhlasitější a nejslabší částí. Hodnoty nad 95 % a pod 10 % reálného rozsahu signálu jsou vyřazeny pro zamezení vlivu například krátkodobých špiček nebo naopak fade-inů a fade-outů, a tím i vzniku nepřesností. Dá se považovat za odpovídající jednotku makrodynamiky.

Headroom (nově definovaný): Rozdíl mezi program loudness a maximální hodnotou digitálního média (0 dBFS)

Peak-to-loudness ratio (poměr špičky k hlasitosti, PLR): Termín, o který tento systém rozšířil Bob Katz (KATZ, 2015) – poměr mezi integrovanou hlasitostí a true peak sledovaného úseku. Čím zkomprimovanější signál, tím nižší poměr. Představuje tedy určité měřítko mikrodynamiky.

¹ Rozhodl jsem se pro užití překladu názvu těchto nových jednotek s tím, že pro „momentary“ a „short-term“ loudness mi přijde vhodnější užití termínů „okamžitá“ a „krátkodobá“ hlasitost pro jasnější odlišení způsobu jejich výpočtu.

3 Vysílací řetězec

Při největším zjednodušení se vysílací řetězec skládá z bloků: studiový komplex – distribuční síť – vysílač nebo jiný způsob distribuce. V rámci studiového komplexu se pro přenos signálu mezi pracovišti používá v dnešní době již výhradně bezztrátové digitální cesty; například AES3, známější jako tzv. AES/EBU, či MADI (AES10) a další podobné protokoly pro přenos digitálního zvukového signálu.

Následující příklad distribuce rozhlasového vysílání se opírá o způsoby vysílání v Českém rozhlasu. V případě jiných rozhlasových stanic je situace obdobná, povětšinou zjednodušená.

Signály určené k vysílání (z jednotlivých studií, či již hotové příspěvky, pořady, znělky atd.) se přivádějí na tzv. vysílací pracoviště, kde se vytváří celý vysílací proud stanice. Odtud je veden k hlavnímu přepojovači, který umožňuje digitální cestu „odkudkoliv–kamkoliv“. Z hlavního přepojovače se signál přivádí do tzv. modulačního procesoru, který má na starosti výsledný zvuk celé stanice a přípravu signálu pro další zpracování. Úpravám, které provádějí modulační procesory je věnována kapitola 4. Z hlediska zásahu do zvukového signálu má přenosová cesta do modulačního procesoru prakticky nulový vliv. Počínaje modulačním procesorem se cesty dělí do jednotlivých distribučních platforem, které jsou dále popsány níže.

Signál z modulačního procesoru je přes hlavní přepojovač rozdělen do jednotlivých cest, které jsou v současnosti (jaro 2017) v ČR k dispozici (Český rozhlas, 2017):

- AM vysílání
- FM vysílání
- DAB+ – Digital audio broadcasting (digitální rozhlasové vysílání)
- DVB-T – Digital video broadcasting – terrestrial (digitální televizní vysílání – pro pozemní vysílače)
- DVB-S2 – Digital video broadcasting – Satellite, second generation (digitální televizní vysílání satelitní, druhá generace)
- DVB-C – Digital video broadcasting – cable (digitální televizní vysílání kabelové)
- Internetový streaming

V případě televizního vysílání se jedná o formáty DVB-T(2), DVB-S2, DVB-C, internet a nová média, jako například HbbTV (Hybrid Broadcast Broadband TV) – plně internetová interaktivní platforma kvalitního TV přenosu. (HbbTV, Česká televize, 2016)

3.1 Analogové vysílání

Některé modulační procesory (jako například Orban Optimod 9600, jehož blokové schéma je v přílohách na straně 41) dovedou rozdělit vysílací cestu do dvou nezávislých cest, kdy jedna je určena pro analogové zpracování, druhá pro digitální zpracování. Zatímco enkodéry pro digitální cesty (DAB/DVB) se mohou nacházet přímo u modulačního procesoru, vysílače analogového vysílání jsou rozmístěny po celé ČR a signál ze studiového komplexu je k nim potřeba dopravit v co nejvyšší kvalitě. V současné době se využívá optické páteřní sítě Českých radiokomunikací, která přivádí signál v digitální podobě přímo k vysílači. Využívá se ztrátového kodeku aptX s datovým tokem 576 Kb/s, který disponuje nízkou latencí a přitom vysokou kvalitou. (Pro porovnání formát mp3 (MPEG-2 Audio Layer III) poskytuje nejvyšší kvalitu při datovém toku 320 Kb/s.) Signály pro analogové vysílání jsou přivedeny do enkodéru a následně v digitální podobě putují až k vysílači do dekodéru. Poté je čeká poslední stupeň zpracování v dalším modulačním procesoru, jehož hlavním úkolem je především ochrana před přebuzením vysílače a dodržování všech závazných norem pro analogové vysílání a v neposlední řadě převod do analogového MPX signálu.

3.1.1 Vysílání na dlouhých a středních vlnách

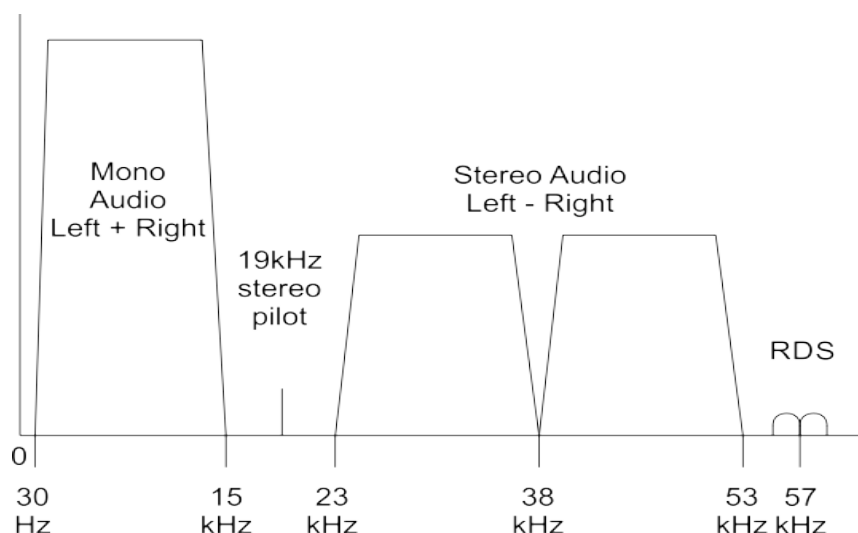
Na dlouhých a středních vlnách se využívá amplitudové modulace (modulovaným signálem měníme amplitudu nosné frekvence). Jedná se o nejstarší a zároveň nejjednodušší způsob vysílání zejména kvůli své technické nenáročnosti (oproti jiným druhům vysílání), zejména co se přijímače týče (příkladem může být primitivní přijímač, tzv. krystalka²). Další výhodou je velký dosah vysílače – například zatímco pro pokrytí České Republiky FM vysíláním potřebuje stanice ČRo Radiožurnál téměř 30 vysílačů, pro pokrytí vysílání na dlouhých vlnách stačí jeden.

Posuzovat kvalitu AM vysílání je zcela nerelevantní, protože zvukový signál modulovaný přes AM je frekvenčně omezen na přibližně 30–4500 Hz a je monofonní – z tohoto důvodu ho již nepodrobují dalšímu srovnávání, protože z hlediska vlivu na hudební nahrávku se jedná o silně destruktivní cestu, která poskytuje pouze informační sdělení. Ačkoliv se na dlouhých a středních vlnách ještě vysílá, tak se z dnešního pohledu jedná, již o dožívající způsob vysílání.

² Viz. Wikipedie: Krystalka (<https://cs.wikipedia.org/wiki/Krystalka>)

3.1.2 FM vysílání

Frekvenčně modulované vysílání je stále hojně využívaný způsob příjmu rozhlasového vysílání. Při frekvenční modulaci se mění frekvence v závislosti na modulovaném signálu, zatímco amplituda nosné frekvence zůstává stejná. FM stereo signál se kóduje pomocí převodu do M a S signálů ($M = L + R$, $S = L - R$), kdy se S složka moduluje (pomocí Amplitudové modulace s dvěma postranními pásmy s potlačenou nosnou) na tzv. subnosnou frekvenci, která je v případě FM sterea 38 kHz. K identifikaci a synchronizaci FM sterea se používá tzv. pilotní tón o frekvenci 19 kHz (nosná frekvence S signálu je jeho dvojnásobkem). Spektrum zakódovaného multiplexového signálu pro FM je na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Spektrum zakódovaného signálu pro FM (FM multiplex). Převzato z Wikipedie: FM Broadcasting

Ztrojnásobením frekvence pilotního tónu se dostaneme na nosnou frekvenci tzv. RDS signálu (Radio data system), kde jsou klíčována jeho digitální data. Systém RDS poskytuje přijímačům, které jsou vybaveny jeho dekodérem, metadata jako například název stanice, skladby a spoustu dalších. Například některá autorádia nabízejí posluchači funkci automatického zapnutí rádia při vysílání dopravního zpravodajství.

Na obrázku 3.1 je u M signálu ($L + R$) vidět omezený frekvenční rozsah pro přenos audio signálu, který je u FM 30–15000 Hz. Spektrum šumu FM přenosové cesty je tzv. trojúhelníkové, takže se vzrůstající frekvencí vzrůstá lineárně i množství šumu. Z toho vyplývá, že nejvíc bude šumem po demodulaci zasažen S signál a poté vyšší kmitočty M signálu. Pro potlačení tohoto nežádoucího efektu se využívá tzv. preemfáze a deemfáze. Preemfáze je zdůraznění vyšších kmitočtů od časovou konstantou

dané frekvence o 6 dB/oktávu. V FM přijímači se uplatní tzv. deemfáze, kdy jsou vysoké kmitočty opět potlačeny. Jelikož se vzrůstající frekvencí narůstá i množství rušivého šumu, je tento šum deemfází dostatečně utlumen a zvýší se tak odstup signál–šum.

Kvůli zpětné kompatibilitě s mono signálem je třeba, aby většina energie ležela v M signálu. Z tohoto důvodu se přistupuje k úpravám stereofonní báze, které jsou blíže popsány v odstavci 4.1.1.7.

Frekvenční modulace zvuku se využívá (v ČR využívala) i v analogovém televizním vysílání, které dnes již po celém světě nahrazují formáty DVB.

3.2 Digitální vysílání

3.2.1 DAB

Standard digitálního rozhlasového vysílání (DAB) je využíván v mnoha státech světa, ale do povědomí široké veřejnosti se nedostal tolik, jako například systémy DVB. Počátky první verze DAB spadají do 80. let minulého století. V roce 2007 byl nahrazen mnohem kvalitnějším systémem DAB+, který není plně zpětně kompatibilní (na DAB přijímači nelze přijímat DAB+).

Zatímco původní DAB využívá kodek MPEG Layer II, tak DAB+ využívá velmi kvalitní kodek AAC+, který disponuje mnohem výhodnějším poměr kvalita/datový tok. (DAB kodek MP2, 128 Kb/s, zatímco DAB+: kodek AAC+, 64 Kb/s.)

3.2.2 DVB

Standard DVB se dále dělí na vysílání pozemní (DVB-T, DVB-T2), vysílání satelitní (DVB-S, DVB-S2) a vysílání kabelové (DVB-C).

Jak DAB, tak i DVB-T používají OFDM modulaci (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) – což je způsob širokopásmové frekvenční modulace, který umožňuje paralelní přenos klíčovaného signálu pomocí několika vzájemně kolmých subnosných frekvencí s velkým pásmovým překryvem. Data přenášená přes systém DVB-T používají i protichybový algoritmus v podobně paritních dat (takovému kódování se pak říká COFDM (kódované OFDM)). Spektrum zakódovaného OFDM signálu je natolik využité, že se jeví prakticky jako šum. Jedno pásmo představuje tzv. multiplex, v rámci něhož lze přenášet několik kanálů současně. Velkou výhodou je možnost rozdělení datového

toku dle potřeb jednotlivých kanálů a lze přenášet více kanálů v menší kvalitě a naopak, nebo multiplex doplňovat o další metadata, či další informace (například teletext). (Líška, 2002)

Všechny zmíněné systémy DVB využívají rodinu kodeků MPEG-2 nebo MPEG-4, jejichž součástí jsou audio kodeky MPEG Audio Layer II–III i AAC.

Americkou alternativou k systému DVB je ATSC (standard tzv. Advanced television systems committee, což je výbor pro pokročilé televizní vysílací systémy). Využívá audio standardů Dolby A3C.

3.3 Internetový streaming

Internetové vysílání je omezeno opět pouze datovým tokem použitého kodeku a kvalita příjmu je jím zcela podmíněná. Moderní aplikace dokáží podle kvality připojení uživatele k internetu navolit optimální datový tok. Mezi nejvyužívanější kodeky pro streaming patří MP3, AAC a OGG (Vorbis).

3.3.1 Ztrátová datová komprese digitálního zvukového signálu

Jelikož každá vysílací cesta nějaký ztrátový kompresní algoritmus využívá, rozhodl jsem se udělat malé shrnutí jejich fungování a nastínit úvod do této problematiky.

Algoritmy ztrátové datové komprese využívají psychoakustické modely, na základě kterých jsou schopny vyhodnotit míru zásahu do signálu (v podobě snižování datového toku), která je pro lidské ucho nezaznamatelná. Základním principem je rozdělení signálu do určitého počtu frekvenčních pásem a vzorkování každého pásma se sníženou vzorkovací frekvencí. (například u formátu MP2 i MP3 to je 32 pásem a při původní vzorkovací frekvenci 48 kHz připadá na jedno pásmo 1,5 kHz). Kompresní algoritmus provede FFT celého signálu a na základě srovnání s maskovacími prahy lidského ucha přidělí jednotlivým pásmům počet bitů tak, aby kvantizační šum vzniklý snížením bitové hloubky byl pod maskovací křivkou. Tento základní princip využívají všechny zvukové kompresní algoritmy.

Nadstavbou nad tento systém je tzv. SBR (spectral band replication; replikace spektrálních pásem), kdy se přenáší jen spodní polovina spektra, zatímco o horní polovinu se pouze zapisují informace o tvaru obálky. Horní polovina je pak v dekodéru „dovyrobená“ pomocí zapsaných informací. Díky tomuto principu dokáží kodeky s SBR dosáhnout stejné kvality jako ty, které tento systém nepoužívají, už při výrazněji nižším datovém toku. Tento systém využívá například AAC+ (HE-AAC v1).

Další rozšířenou nadstavbou, která dokáže ušetřit datový tok, je systém PS (parametrické stereo). kdy se využívá toho, že jsou stereo kanály často v korelaci, takže pak lze zapsat stereo informaci pouze jako popis jejich rozdílů a přenášet pouze jeden kanál. Tento systém využívá například HE-AAC v2. (STRAŇÁK, 2010)

4 Modulační procesory

Modulačním procesorem rozumíme zařízení, které má na starosti úpravu signálu mezi výstupem studiového komplexu rozhlasu/televize a vstupem vysílače, popřípadě jinou přenosovou cestou. Samotná modulace signálu pro FM je v dnešní době jen jednou z jeho mnoha funkcí (všechny popsány níže), takže anglický termín „broadcast audio processor“, v překladu „vysílací audio procesor“ je v tomto ohledu mnohem přesnější.

Jeho hlavním úkolem je příprava signálu pro vysílač nebo přenosovou cestu k vysílači za dodržení všech norem týkající se konkrétního druhu vysílání. Dále pak má na starosti automatickou úpravu signálu do podoby celistvého vysílacího proudu.

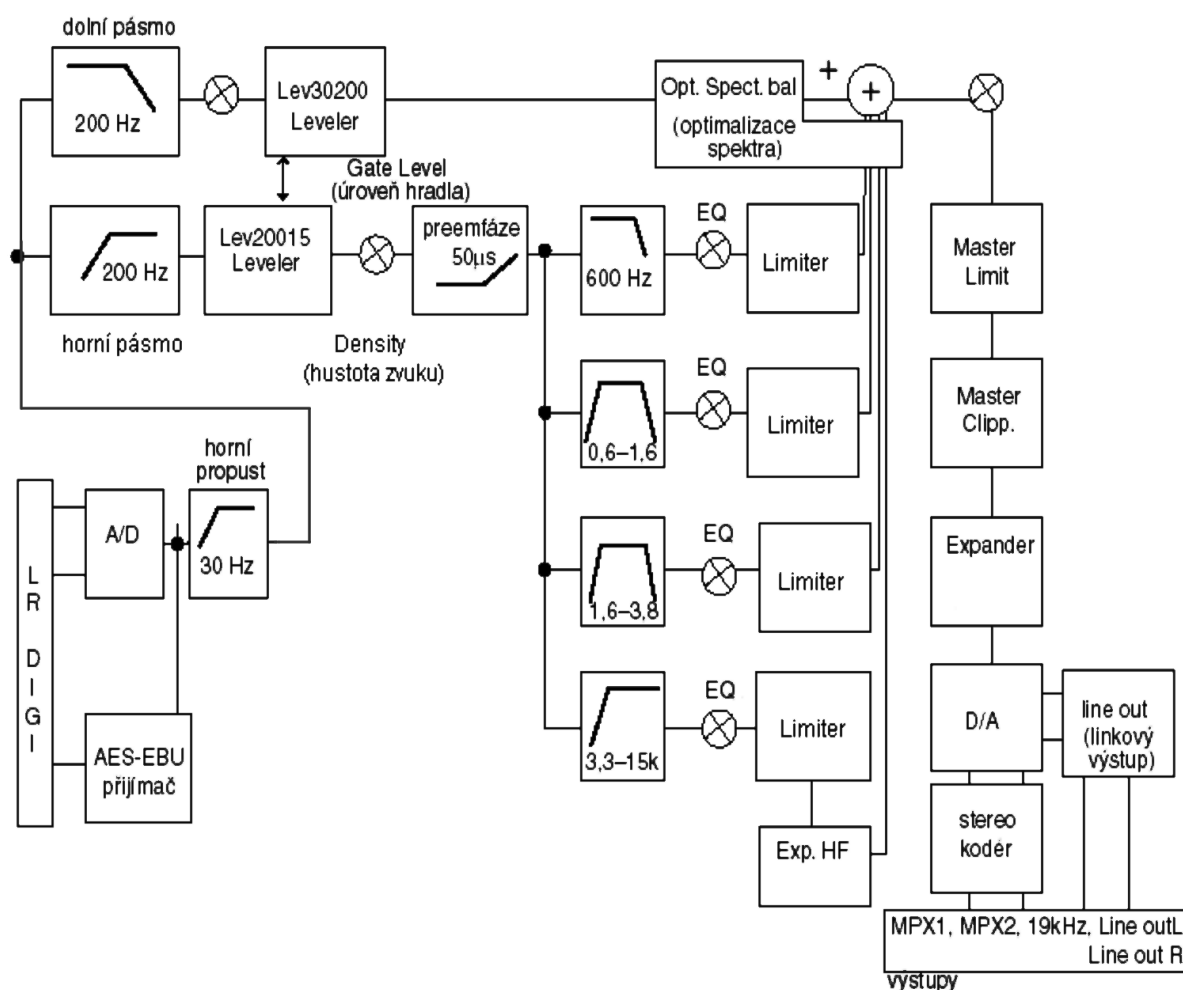
4.1 Struktura a princip jednotlivých částí

V současnosti už se s jinými než digitálními modulačními procesory nesetkáme. Obvykle se jedná o autonomní optimalizovaný počítač skládající se z mnoha DSP (digitální signálový procesor). Příklad vnitřní struktury modulačního procesoru je na obrázku 4.1 a struktura je popsána níže. Pořadí a vůbec složení jednotlivých částí zpracování není nikterak závazné a co výrobce to pořadí, názor a nápad. To, co však má většina modulačních procesorů společného, je základ v podobě: vstup – leveling – vícepásmová komprese – limitace – přizpůsobení dalšímu zpracování.

V případě analogového vysílání jsou v cestě procesory, kdy je ještě jeden použit přímo před vstupem vysílače a má na starosti především ochranu vysílače před přemodulováním, dodržování všech norem, které se týkají pozemního vysílání a konečně také samotné zakódování signálu pro vysílač.

4.1.1.1 Vstupní část

Vstupující signál (v dnešní podobě nejčastěji již v digitální podobě) je převeden do potřebné pracovní vzorkovací frekvence a bitové hloubky. Dle potřeb následujícího zpracování je aplikována horní i dolní propust (shora převážně v neslyšitelných pásmech, v případě FM je to nutné níže a ostřeji i z důvodu ochrany pilotní frekvence 19 kHz).



Obrázek 4.1: Příklad struktury modulačního procesoru. (2)

4.1.1.2 Phase rotator (allpass filter) – změna fáze

Jedna z možných úprav signálu, při které se signál nechá projít skrz tzv. „allpass filter“ (český ekvivalent nenalezen). Jedná se o soustavu filtrů, které neprovádějí žádnou ekvalizaci (jsou nastaveny „rovně“), ale mění fázové spektrum. Jednotlivé frekvenční složky se vůči sobě posunou a tranzienty se tím pádem mírně „rozmažou“ v čase a sníží se jejich špička, čímž se dá ušetřit pár dB headroomu. Při rozumném nastavení řádů filtru není úprava slyšitelná a pomáhá symetrizovat výchylku signálu v čase. Problém nastává, pokud má signál příliš mnoho krátkých tranzientů, kterým tato úprava může ubrat na efektu. Další nevlídný dopad může mít změna fáze na signál, který prošel markantním ořezáváním (například popová nahrávka masterovaná s potřebou dosáhnout co nejvyšší hlasitosti signálu). V takovém případě mohou být nelineární produkty ořezávání vytaženy zpod maskovacích prahů jejich posunem v čase a zkreslení může být slyšitelné. (BERNERS, 2008; KATZ 2015)

4.1.1.3 Preemfáze

V případě zpracování pro FM je preemfáze nutnou součástí přenosové cesty. Jedná se o zdůraznění vyšších kmitočtů od časovou konstantou dané frekvence o 6 dB/oktávu. V FM přijímači se uplatní tzv. deemfáze, kdy jsou vysoké kmitočty opět potlačeny. Jelikož se vzrůstající frekvencí narůstá i množství rušivého šumu, je tento šum deemfází dostatečně utlumen a zvýší se tak odstup signál–šum. Vliv preemfáze a následné deemfáze na signál je subjektivně nezaznamatelný. Některé modulační procesory využívají preemfázi i pro své vnitřní fungování a pro digitální výstupy provedou zpětnou vnitřní deemfázi. (Viz přílohu 1 na straně 41.)

4.1.1.4 Leveling / automatic gain control

Automatic gain control / leveler (česky někdy též „automatické vyrovnávání citlivosti“) je ve své podstatě limiter s dlouhými časovými konstantami, který pro následující zpracování hlídá stabilní úroveň signálu a zajišťuje tak definované podmínky zpracování. Jeho zkreslení je díky dlouhým časům nepatrné. Představuje ovšem nelítostný zásah do makrodynamiky. V případě FM vysílání je tato úprava výraznější kvůli potřebě zvýšení odstup signálu od šumu. (STRAŇÁK, 2010)

Dalším stupněm levelingu může být normování hlasitosti, kdy se modulační procesor snaží držet předepsanou úroveň integrované hlasitosti. (ORBAN, 2016)

4.1.1.5 Vícepásmová úprava dynamiky

Signál se obvykle rozkládá do 2–6 pásem, ve kterých je separátně komprimován a zalimitován. Po kompresi se pásma mohou rovnou sečíst a pro limitaci znovu přerozdělit (což umožňuje limitovat s jinak rozdělenými pásmy), nebo mohou rovnou pokračovat do limiteru, což umožňuje jejich spolupráci a možnost zpětné vazby. Vícepásmová úprava umožňuje nastavit pro každé pásmo vlastní časové konstanty (obvykle čím vyšší pásmo tím nižší) a vlastní prahy. Další výhodou je možnost hlídání energetických vlastností signálů v jednotlivých pásmech, čímž je možné držet jednotný spektrální charakter celého vysílacího proudu. (STRAŇÁK, 2007)

Nejzásadnější zásah do dynamiky i barvy signálu, nastavení časů a prahů vyžaduje velmi citlivý přístup.

4.1.1.6 Ekvalizace a filtrace

Jak již bylo naznačeno v předchozím odstavci, tak samotná vícepásmová úprava dynamiky je sama o sobě silným ekvalizačním zásahem. Nicméně i jednotnou ekvalizaci

celé stanice je možné nastavit (například typické uchu lahodící nastavení podporující nízké a vyšší kmitočty).

Další důležitou součástí modulačního procesoru je vhodná filtrace pro další přenosovou cestu. V případě FM je potřeba dosáhnout co nejostřejšího odfiltrování kmitočtů už nad 15 kHz, na což se používají digitální filtry s časovou kompenzací proti fázovým posunům, které by vznikly, kdyby se použilo klasického filtru s vysokým řádem.

4.1.1.7 M/S úpravy

FM stereo je kódováno pomocí signálů M a S. Z důvodu kompatibility s mono přijímači není dobré, když je příliš informace obsaženo v S signálu, protože v takovém případě by mohla kolísat hlasitost při mono přehrávání. Pavel Straňák³ popisuje metodu, při které se šířka sterea omezuje automatickou kontrolou poměru M/S dle nastaveného poměru M/S. Pokud je informace v S signálu mnoho, tak je jeho úroveň snížena, pokud je stereo informace málo, tak je S signál zesílen. (V případě zesilování S je potřeba nastavit limit). V praxi to znamená, že stereofonní báze snímku s širokou bází nebo vysokým množstvím protifázových složek (nejčastěji dozvuk) bude zúžena na nastavený poměr, a naopak snímek příliš úzký bude rozšířen. (STRAŇÁK, 2010)

S signál je amplitudově modulovaný na subnosné frekvenci 38 kHz FM multiplexu a je náchylnější na rušení šumem. Po dekódování ($L = M + S$, $R = M - S$) je jeho šum v protifázi. Pokud klesá kvalita příjmu, jsou některé přijímače vybaveny funkcí, která začne vytvářet uměle přeslech mezi kanály, čímž se šum odčítá za cenu omezení stereo složky.

Všechny výše popsané úpravy se týkají FM stereo vysílání a podobné problémy u digitálního příjmu z větší části odpadají.

Některé modulační procesory mohou provádět i kompletní rozšiřování sterea, pokud je dostatek informace v M signálu, aby výsledný zvuk stanice při stereo poslechu působil dramatičtěji a posluchače zaujal – tzv. stereo enhancement. (KATZ, 2015)

Nutno dodat, že úpravy M/S, které stereofonní bázi rozšiřují, mohou téměř přemíchat snímek. Na opačné úpravy (přidávání M signálu) zvukový mistr povětšinou myslí už při vytváření mixu, protože s mono poslechem může i částečně počítat.

³ STRAŇÁK: *Optimalizace metod modulačního procesingu zvukového signálu pro multimédia a stereofonní kódování pro rozhlasové vysílání FM*. Praha, 2010

4.1.1.8 Celková limitace a ořezávání

Výhodou digitálního prostředí je možnost užití look ahead úprav (vysvětleno v kapitole 2.2) a možnost „spolupráce“ jednotlivých částí řetězce, které jsou schopny pomocí zpětné vazby upravovat své parametry tak, aby nedocházelo k příliš velkým limitacím a ořezávání, které by mohly být slyšitelné.

Výstupní ořezávač stanovuje jasnou úroveň, nad kterou už se signál nedostane, což se používá k ochraně další přenosové cesty před přebuzením. Užití klasického ořezávače fungujícího na principu omezování signálových hodnot je problematické v řetězcích využívajících ztrátové datové komprese, protože se ztrátový kódér snaží nelineární produkty ořezávání za každou cenu popsat a vyplývá na ně datový tok, který mu pak schází k popsání zbytku signálu, čímž se výrazně snižuje kvalita přenosu. Z toho důvodu se používají jiné metody jako například ta, kterou popisuje Pavel Straňák⁴ jako metodu kompozitního ořezávání, při které se sledují dané časové úseky, kterým se přiděluje hodnota tzv. faktoru měřítka, kterým se jednotlivé úseky násobí. Když se v daném úseku nachází špička překračující nastavený práh, tak měřítko pro celý úsek upraví tak, aby se špička do daného rozsahu vešla. Jedná se opět o look ahead metodu, která odstraňuje problém se ztrátovým kódováním signálu, protože tento způsob produkuje mnohem menší množství neharmonických složek.

4.1.1.9 Expanze

Expanze probíhá většinou v podobě šumové brány na konci řetězce, nebo expanderů a bran v rámci vícepásmových úprav, kde dokáží šum potlačit s vyšší účinností. Opět se využívá principu look-ahead, aby se zabránilo poškození užitečného signálu.

4.1.1.10 Modulace a výstupní část

Po finálním ořezání a limitaci již následuje pouze příprava signálu pro další zpracování. V případě digitální cesty je třeba provést deemfázi, pokud byla užita preemfáze a nejedná se o cestu FM přenosu. Následuje digitální výstup, například AES/EBU, pro který je potřeba převést signál na požadovanou frekvenci a bitovou hloubku.

V případě procesoru před vysílačem se provede M/S kódování, přidání RDS dat a vytvoření multiplexového signálu.

⁴ STRAŇÁK: *Optimalizace metod modulačního procesingu zvukového signálu pro multimédia a stereofonní kódování pro rozhlasové vysílání FM*. Praha, 2010

5 Vliv vysílacího řetězce na hudební nahrávku

5.1 Shrnutí možných vlivů na hudební obsah

Pro úplnost bych zde ještě rád uvedl shrnutí vlivů základních vysílacích cest a jejich částí na signál, kdy se budu zaměřovat na všechny vlivy, které mohou ubrat na kvalitě hudební nahrávky. Do vlivů nepočítám technické problémy způsobené vnějšími okolnostmi, jak například chyby v digitálním přenosu nebo výpadky signálu a podobně.

Tabulka 5.1: Shrnutí vlivů FM vysílacího řetězce na signál

Část řetězce	Její vliv
(kontribuce z exteriéru)	Možné frekvenční omezení, algoritmus datové komprese.
Studiový komplex	Zanedbatelný
1. modulační procesor	Největší vliv na dynamiku i barvu signálu.
Přenosová cesta k vysílači	Algoritmus datové komprese
2. modulační procesor	Další zásah do barvy i dynamiky, nekompromisní limitace. Omezení šířky stereofonní báze.
Vysílač	Zanedbatelný
FM přenos	Šum
Přijímač	Zásah do sterea v případě horší kvality signálu.

Tabulka 5.2: Shrnutí vlivu digitálního řetězce na signál

Část řetězce	Její vliv
(kontribuce z exteriéru)	Možné frekvenční omezení, algoritmus datové komprese.
Studiový komplex	Minimální
Modulační procesor	Největší vliv na dynamiku i barvu signálu, ale jediný.
Enkodér	Algoritmus datové komprese, v případě internetu závisí na použitém kodeku a datovém toku
Vysílač / v případě internetu není	Žádný
Přenos	Žádný
Přijímač	Standardní D/A převod, žádný další vliv (nepočítáme-li cílená uživatelská nastavení úprav)

5.2 Experimentální průchod hudební nahrávky řetězcem

Pro ilustraci zmíněných zásahů a jejich objektivnější předvedení jsem udělal drobný experiment, ve kterém jsem se rozhodl srovnat hudební nahrávku před průchodem a po průchodu řetězcem. K porovnávání jsem si vybral přímý přenos koncertu barokního orchestru Collegium Marianum, který se uskutečnil 18. 4. 2017, na jehož přípravě jsem se podílel coby zvukový technik z Českého rozhlasu. Na programu bylo Velikonoční oratorium J. S. Bacha a koncert byl vysílán na celoplošné veřejnoprávní stanici Český rozhlas Vltava.

5.2.1 Postup práce

Natáčel jsem současně pomocí vícestopého záznamu ze tří zdrojů. Prvním byl analogový výstup mixážního stolu, tedy původní signál shodný s tím, který byl přes kontribuční síť, hlavní přepojovač a vysílací oddělení veden do modulačního processoru. (V případě Vltavy to je Orban Optimod 8600, jehož blokové schéma je v přílohách na straně 41).

Druhým zdrojem byl Hi-Fi FM tuner AIWA TX-110 s jednoduchou dipólovou anténou. Přijímač má zabudovaný přibližný měřič „kvality příjmu“, pomocí kterého jsem nastavil nejlepší umístění a nasměrování antény. Výstup tuneru byl stejně jako výstup mixážního stolu veden do zvukové karty.

Třetím zdrojem byla USB DVB-T karta, která dekódovala signál a jejíž výstup byl veden digitálně rovnou do DAW. Kodek použitý v případě DVB-T vysílání stanice Vltava byl MPEG-II s datovým tokem 192 Kb/s.

Pro záznam bylo použito jednotné vzorkovací frekvence 48 kHz a bitové hloubky 24 bitů.

Z originálního záznamu koncertu jsem vybral hudební ukázkou dlouhou 15 minut, kterou jsem pak dále rozčlenil. Jedná se o části Bachova Velikonočního oratoria; Duet a sbor: *Kommt, eilet und lauffet*, recitativ: *O kalter Manner Sinn!* a árii: *Seele, deine Spezereien*. První a poslední ze zmiňovaných částí jsem ještě zpracovával separátně, kvůli jejich dynamické kontrastnosti, kdy zatímco v duetu začíná v rychlém tempu a ve forte orchestr a posléze i sbor, tak v předehře árie pouze flétna a doprovod continuo v poklidném duchu, ke kterým se později přidá sólový soprán. (Partitura Velikonočního oratoria; Breitkopf und Härtel, 1874)

Vybrané úryvky jsem nastříhal na vždy stejně dlouhé části – celek (duet, recitativ, árie) – 15 min, silná část (duet) a klidná část (árie) – pro přehlednost uvedené označení používám dále.

Vzhledem k různé míře dynamických úprav ve srovnávaných ukázkách jsem všechny vztáhl k normované hlasitosti –24 LUFS. Poté jsem změřil další údaje jako loudness range a true peak. Z celkových ukázek jsem zaznamenal hodnoty krátkodobé hlasitosti a vývoj hodnot integrated loudness. Principy algoritmů užitých veličin a přehled základních i odvozených jednotek je popsán v kapitole 2.3.

Z ukázek začátků dueta (přibližně 1 min) a árie (přibližně 1,5 min) jsem vytvořil spektrogramy. Délky úseku byly zvoleny tak, aby se jednalo o hudebně logickou část skladby a zároveň, aby byl spektrogram dostatečně přehledný.

Pro vytvoření spektrogramu bylo použito rychlé Fourierovy transformace s Hannovým okénkem o délce 1024 vzorků a 50% překryvem. Nastavení, včetně kontrastu a barevnosti, bylo voleno vzhledem k optimální viditelnosti sledovaných parametrů.

5.2.2 Výsledky – zásahy do dynamiky

V tabulce 5.3 jsou uvedeny naměřené údaje týkající se hlasitosti. V grafu na obrázku 5.1 jsou znázorněny hodnoty dynamických rozsahů jednotlivých ukázek a v grafu na obrázku 5.2 jsou znázorněny hodnoty vypočtené PLR.

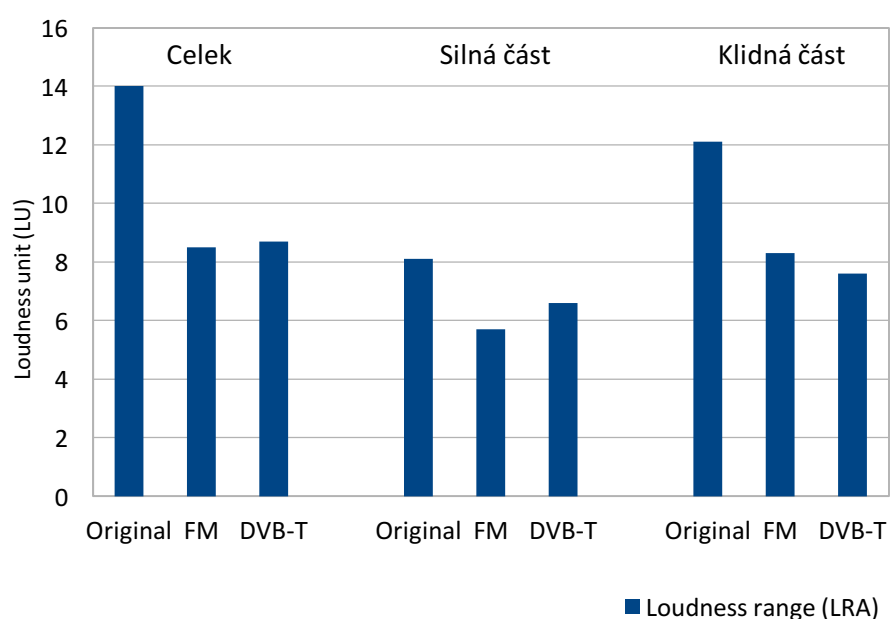
		Program loudness (PL)	Loudness range (LRA)	True peak (TP)	Peak to loudness ratio (PLR = TP – PL)
Celek (Duet, recitativ a árie)	Originál	–24 LUFS	14 LU	–2,7 dBTP	21,3 LU
	FM		8,5 LU	–9,2 dBTP	14,8 LU
	DVB-T		8,7 LU	–7 dBTP	17 LU
Silná část (Duet)	Originál	–24 LUFS	8,1 LU	–5,3 dBTP	18,7 LU
	FM		5,7 LU	–9,9 dBTP	14,1 LU
	DVB-T		6,6 LU	–8,3 dBTP	15,7 LU
Klidná část (Árie)	Originál	–24 LUFS	12,1 LU	–1,5 dBTP	22,5 LU
	FM		8,3 LU	–10,2 dBTP	13,8 LU
	DVB-T		7,6 LU	–7,4 dBTP	16,6 LU

Tabulka 5.3: Změřené hodnoty LRA a TP a vypočtený PLR

Z naměřených hodnot dynamického rozsahu (LRA) je vidět, že celkový dynamický rozsah byl značně snížen, v případě FM téměř na polovinu, což už považuji za výrazný zásah do makrodynamiky, který v tomto případě ubírá efekt barokní afektovanosti, ale

zato umožňuje poslech i v hlučnějším prostředí. Ze subjektivního hlediska se tím například znečitelnil interpretační záměr dynamických kontrastů, například při opakování fráze ve slabší dynamice. Zajímavostí je, že na FM cestě byla makrodynamika mnohem více potlačována v silnějších pasážích, zatímco větší prostor jí byl ponechán v klidnější a dynamičtější části, jelikož se jedná o jeden konkrétní případ (celkový dynamický rozsah předpokladu odpovídá), tak se tento výsledek samozřejmě nedá zobecnit.

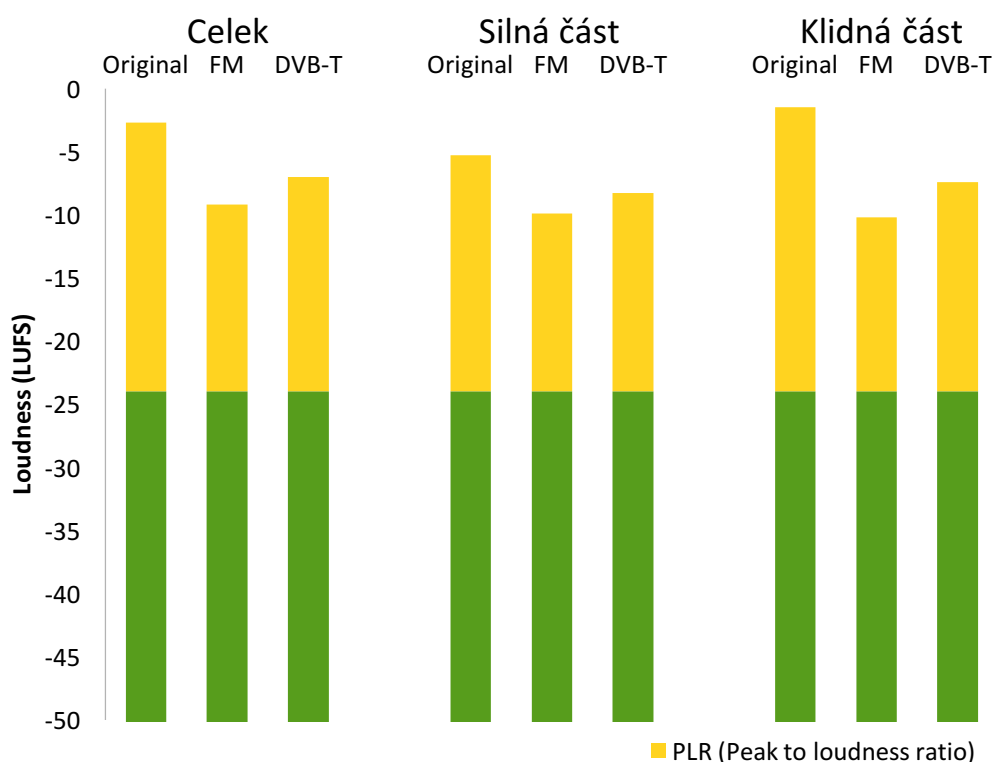
Z naměřených hodnot PLR (Peak to loudness ratio) je zase vidět, že mikrodynamika signálu byla zasažena mírněji. Je zde vidět, že u FM je potřebná větší síla dynamických úprav.



Obrázek 5.1. Graf hodnot dynamických rozsahů

Při porovnávání hodnot je důležité nezapomínat, že druhá a třetí ukázka jsou součástí té první a v rámci celku měli jednotlivé ukázky rozdílnou hlasitost než samostatně v důsledku separátní normalizace hlasitosti na -24 LUFS.

Grafy znázorňující vývoj hlasitosti v čase jsou v příloze 2 na stranách 43–45.



Obrázek 5.2: Hodnoty PLR, horní okraj žluté části odpovídá hodnotě true peak

5.2.3 Výsledky – spektrální zásahy

Na následujících stránkách jsou k dispozici spektrogramy, na kterých bych chtěl demonstrovat spektrální zásahy, které ve vysílacím řetězci během pokusu probíhaly.

První jasně viditelný i slyšitelný rozdíl oproti originálním nahrávkám je nárůst pásma nejnižších kmitočtů okolo 50–100 Hz, což se stalo pravděpodobně z důvodu vyrovnávání spektrálního vyvážení při vícepásmové úpravě dynamiky.

Tento zásah z původního snímku zdůrazňuje především nežádoucí nehudební informace jako jsou kročejové hluky, či rezonance sálu na nízkých kmitočtech obsažené v dozvuku. Zároveň při poslechu vyvolává pocit přílišné blízkosti nástrojů (tzv. proximity efekt) – subjektivní hodnocení autora.

Dalším výrazným rozdílem je absence kmitočtů nad 15 kHz, kdy u FM odpovídá jeho rozsahu do 15 kHz a hranice je velmi ostrá. V případě DVB-T hranice není tak přísná a je posunuta až k 16 kHz.

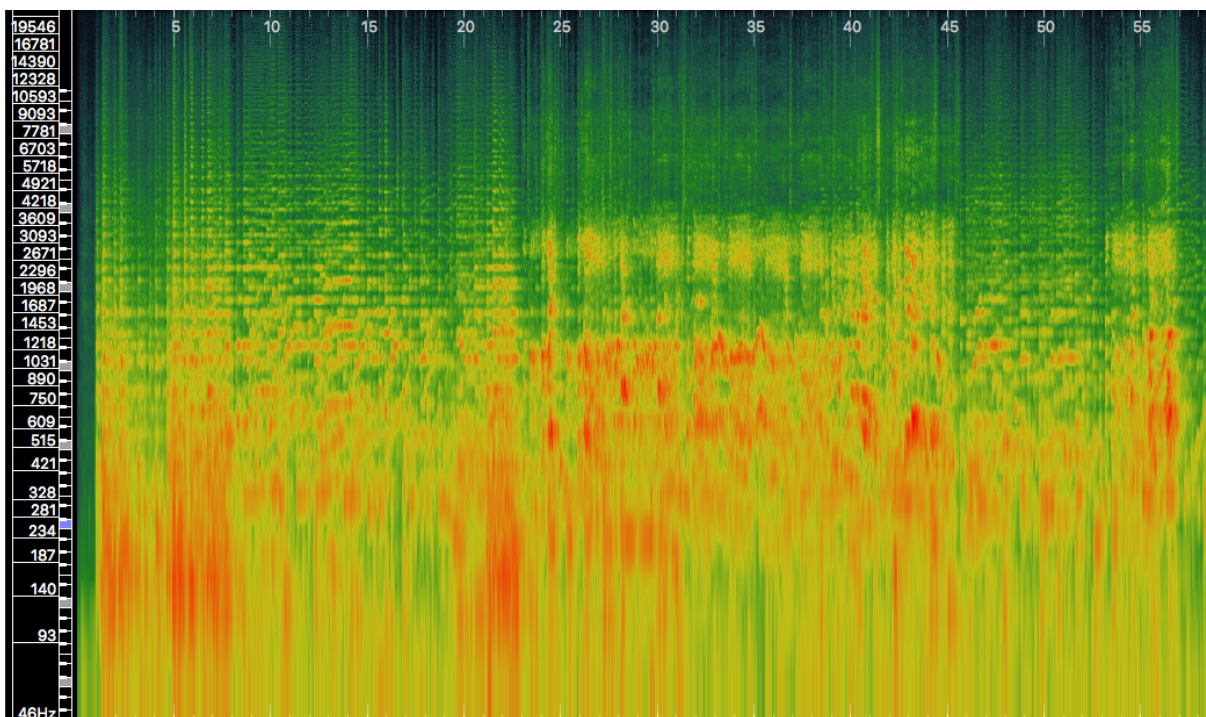
Další výrazně viditelnou složkou je analogový šum v oblasti vysokých kmitočtů u FM přenosu a maskovaný kvantizační šum viditelný u nahrávky z DVB-T (MP2/MP3, 192 Kb/s).

Na spektrogramech z FM příjmu je dokonce vidět zbytek přijímačem neúplně odfiltrované pilotní frekvence 19 kHz. Při této intenzitě a faktu, že je mimo slyšitelný rozsah většiny populace, je samozřejmě neslyšitelná a i v tichu je dostatečně maskována šumem.

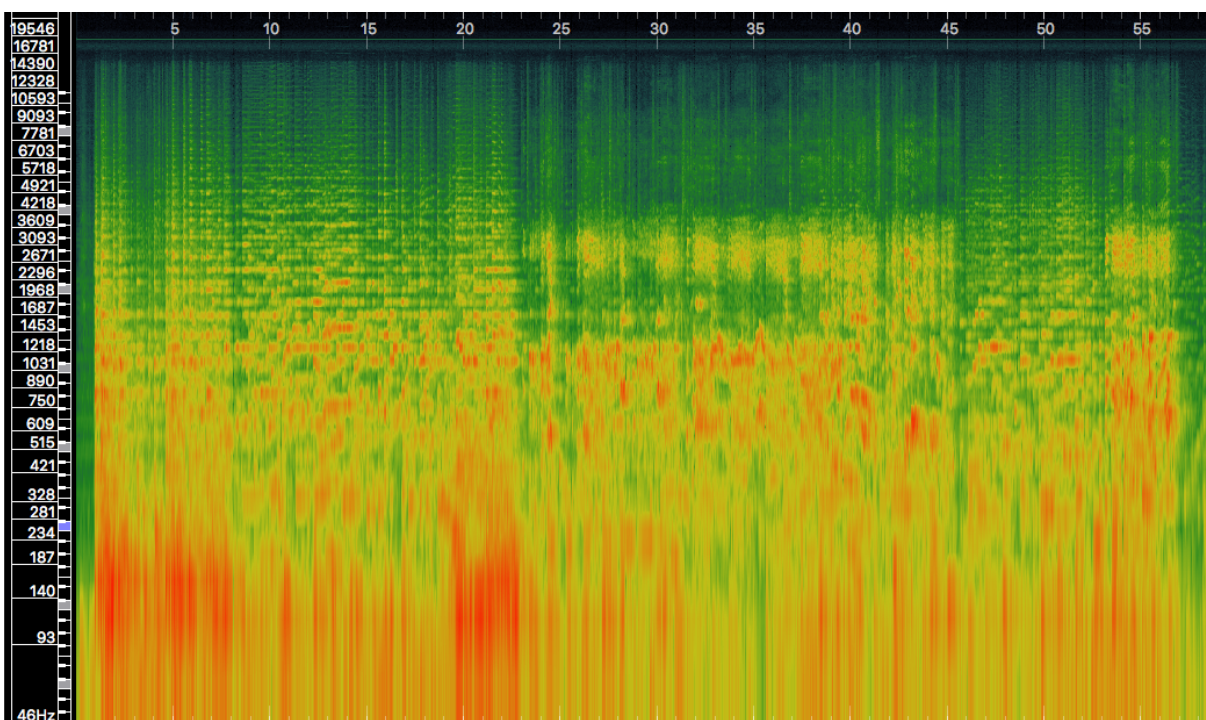
Pro další porovnání přikládám samotné spektrogramy.

Seznam a čísla obrázků se spektrogramy:

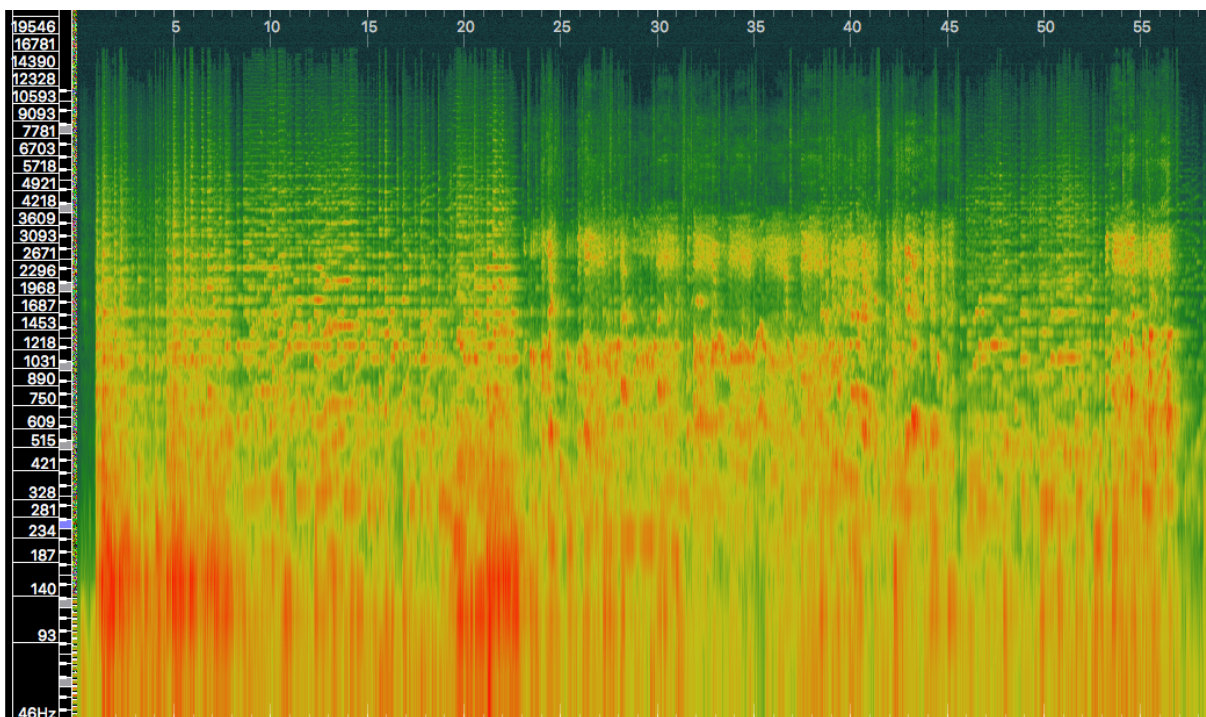
- 5.3: Spektrogram silného a rychlého začátku. (Duet a sbor) z originálního signálu
- 5.4: Spektrogram silného a rychlého začátku. (Duet a sbor) z FM příjmu
- 5.5: Spektrogram silného a rychlého začátku. (Duet a sbor) z DVB-T příjmu
- 5.6: Spektrogram klidného začátku (árie) originálního signálu
- 5.7: Spektrogram klidného začátku (árie) z FM vysílání
- 5.8: Spektrogram klidného začátku (árie) z DVB-T příjmu



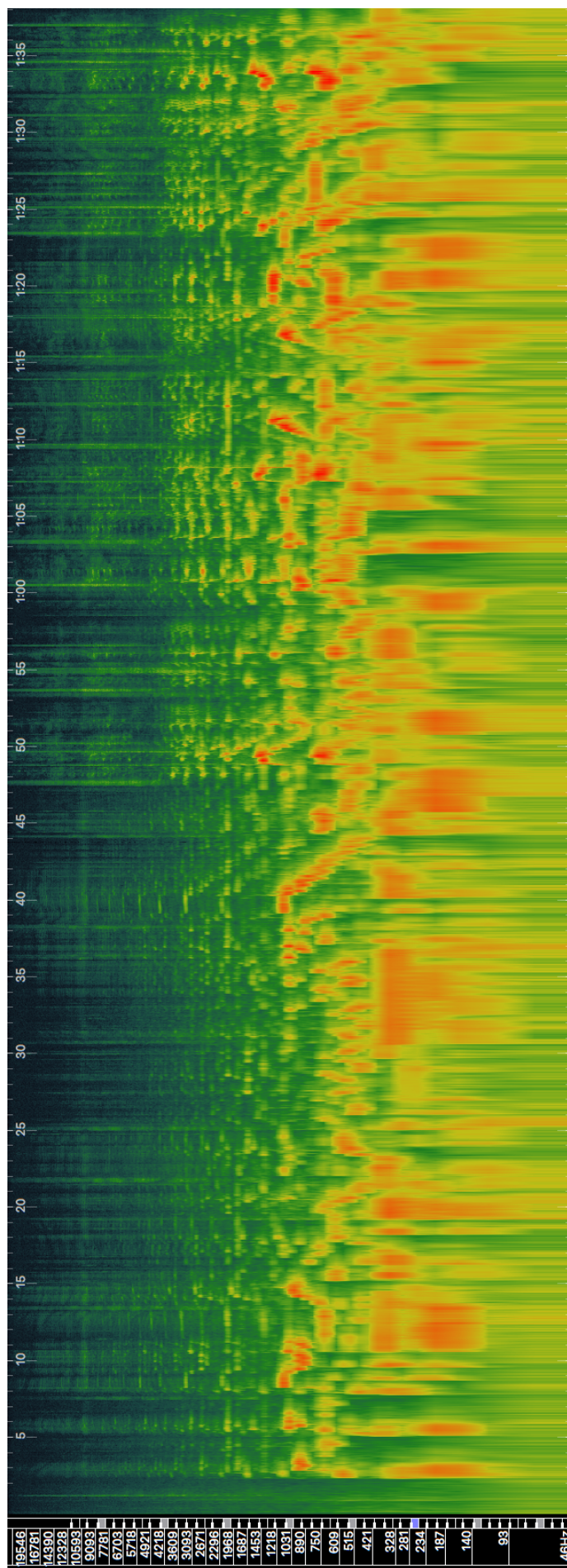
Obrázek 5.4: Spektrogram silného a rychlého začátku. (Duet a sbor) z originálního signálu



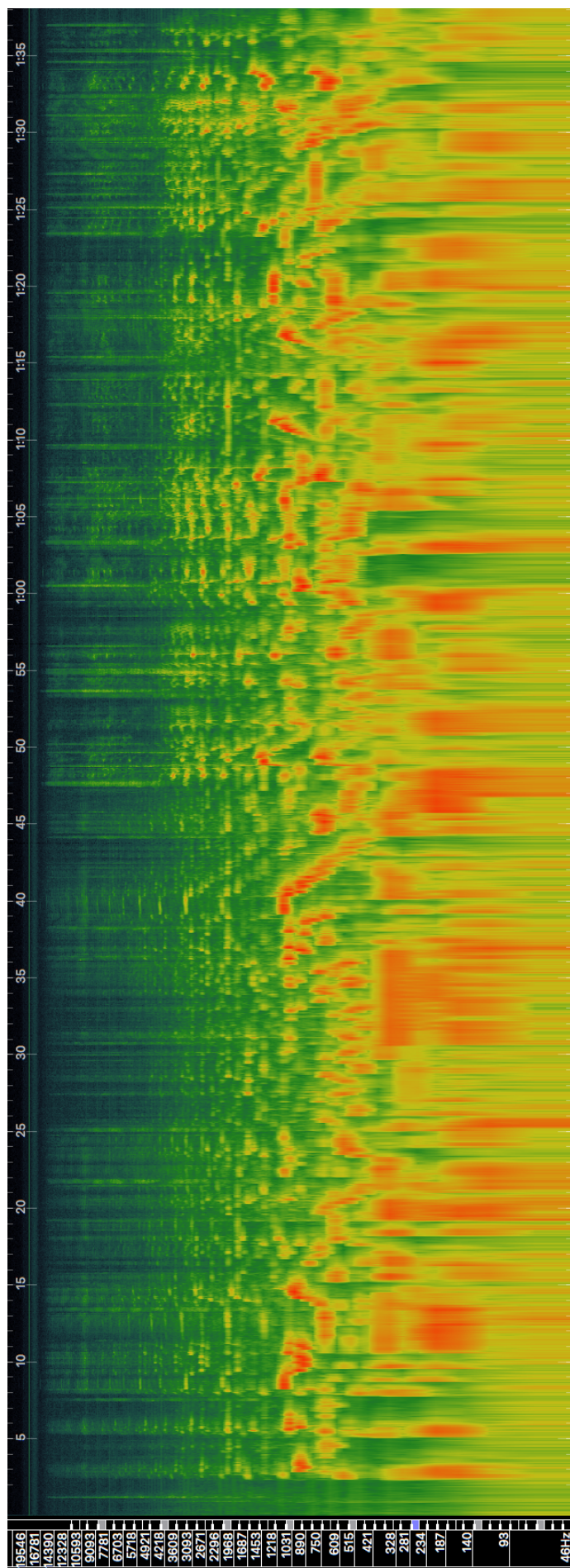
Obrázek 5.3: Spektrogram silného a rychlého začátku. (Duet a sbor) z FM příjmu



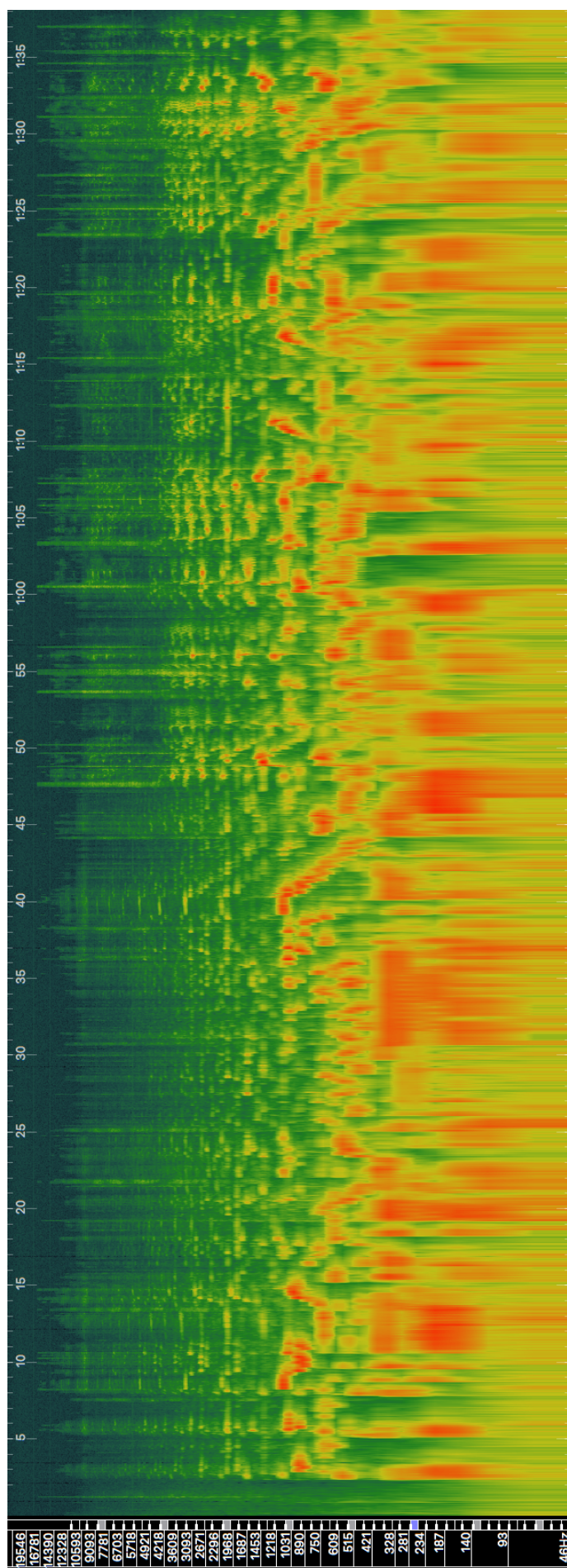
Obrázek 5.5: Spektrogram silného a rychlého začátku. (Duet a sbor) z DVB-T příjmu



Obrázek 5.6: Spektrogram klidného začátku (arie) originálního signálu



Obrázek 5.7: Spektrogram klidného začátku (árie) z FM vysílání



Obrázek 5.8: Spektrogram klidného začátku (árie) z DVB-T příjmu

Závěr

V kapitolách 2–4 byly dopodrobna vysvětleny nejdůležitější části vysílacího řetězce s ohledem na jeho zásahy do signálu z pohledu zvukového mistra. Nabízejí tak způsob, jak se s touto problematikou seznámit, a upozorňují na omezení a zásahy, které jsou v signálové cestě.

Celý vysílací řetězec pracuje s unifikací zvukového signálu a velká míra hodnocení jeho práce je čistě subjektivní. Z tohoto hlediska musím vyjádřit velký obdiv k výrobcům modulačních procesorů, protože se jedná o odvětví, které je celé o kompromisech a kde není možné plně uspokojit všechny strany.

Po důkladném prostudování modulačních procesorů jsem postupně dospěl k zobecnitelnému poznatku – není důležité, *jaké* zařízení se na zpracování zvuku používá, ale *jak* se používá. Vliv na hudební signál je tedy více než na volbě modulačního procesoru a jeho vnitřních komponentů závislý na tom, jak jsou procesory nastavené.

V ilustrativním experimentu byly ověřeny předpokládané vlivy řetězce na hudební nahrávku a je zřejmé, že pro stanovování závěru to byl experiment naprosto nerelevantní. Znovu tedy připomínám, že jeho hlavní hodnotu vidím v ilustraci již zmíněných principů a jejich základní ověření v praxi.

Velkou rezervu vidím ve spolupráci zvukových mistrů (zejména těch masteringových), kteří sice nemusí detailně rozumět přístrojům, se kterými pracují, ale o to více vidí do umělecké podstaty hudebního signálu, a inženýrů elektrotechniků/programátorů, kteří navrhují a nastavují vysílací procesory a jsou schopni vymyslet spoustu geniálních technických řešení.

Omezení současného stavu vidím v rozšířenosti a oblibě FM vysílání, které je po kvalitativní stránce z pohledu dnešní doby na hraně možností. Zároveň potřeba dosahovat hodnot těsně u maximálního kmitočtového zdvihu se silným a oprávněným argumentem, že je potřeba co nejvyšší dosah vysílání, vytváří stále jistou lokální „válku hlasitosti“, která způsobuje nadužívání silných kompresí a limitací ve vysílacím řetězci – opět je diskutabilní, jak definovat nadužívání, ale jelikož jsem příznivcem zdravějšího uvažování nad dynamikou hudebního signálu, tak z čistě subjektivního hlediska se domnívám, že u spousty českých rozhlasových stanic se dynamika už zbytečně devastuje. Vysvobození vidím v normování hlasitostí u digitálních médií.

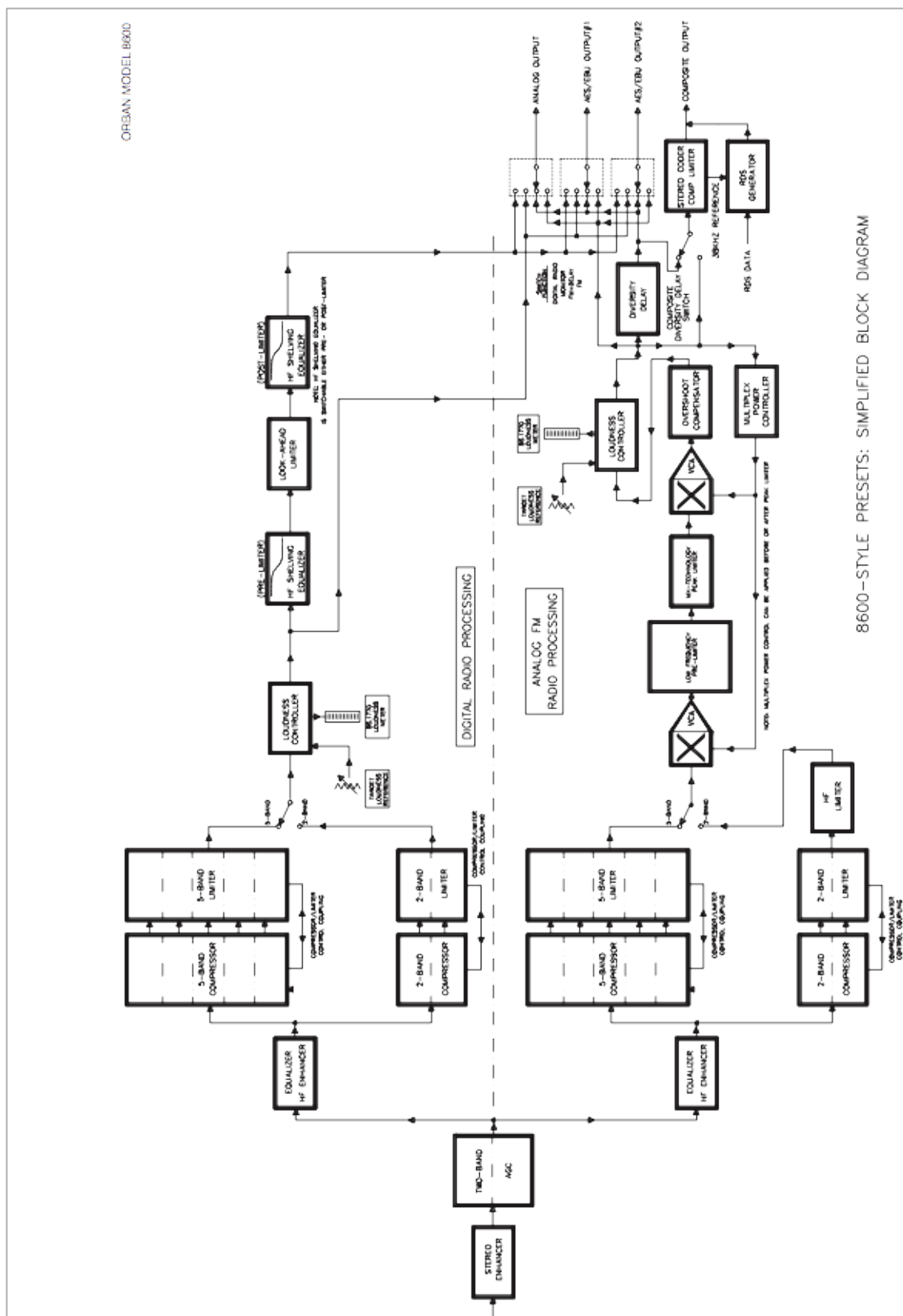
Téma zpracování signálu ve vysílacím řetězci je rozsáhlé a vývoj nových metod ještě zdaleka není u konce.

Seznam literatury

- BERNERS (2008) BERNERS, Dave. ALLPASS FILTERS. In: *Universal audio* [online]. Scotts Valley, 2008 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.uaudio.com/blog/allpass-filters/>. Popis fungování produktu z webových stránky výrobce.
- Breitkopf und Härtel: BACH, JOHANN SEBASTIAN: *Oster-Oratorium*. BWV 249. Bach-Gesellschaft Ausgabe, Band 21 Leipzig: Breitkopf und Härtel, 1874. Plate B.W. XXI (3). Dostupné také z: [http://imslp.org/wiki/Oster-Oratorium,_BWV_249_\(Bach,_Johann_Sebastian\)](http://imslp.org/wiki/Oster-Oratorium,_BWV_249_(Bach,_Johann_Sebastian))
- Česká televize (2016): HbbTV aplikace. *Česká televize* [online]. 2016 [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <http://www.ceskatelevize.cz/hbbtv/>
- Český rozhlas (2017) ČESKÝ ROZHLAS. *Distribuce a vysílání programů Českého rozhlasu*. Prezence informačního charakteru doplněná o schémata. Pavel Balíček. Praha, 2017, 14 s.
- EBU (2014): EBU R 128. *Loudness Normalisation And Permitted Maximum Level of Audio Signals*. Ženeva: European Broadcast Union, 2014, 5 s. Dostupné také z: <https://tech.ebu.ch/docs/r/r128.pdf>
- EBU (2017): EBU TECH 3342. *Loudness range: A measure to supplement EBU R 128 loudness normalization*. 3. vydání. Ženeva: European Broadcast Union, 2017, 9 s. Dostupné také z: <https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3342.pdf>
- ITU (2017): RECOMMENDATION ITU-R BS.1770-4. *Algorithms to measure audio programme loudness and true-peak audio level*. 4. vydání. Ženeva: International telecommunication union, 2017. Dostupné také z: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BS.1770/en>
- KATZ, R. (2015): KATZ, Robert A. *Mastering audio: the art and the science*. Third edition. Burlington/Abingdon: Focal Press, 2015. ISBN 978-024-0818-962.
- Líška (2002) LÍŠKA, Dušan. *Digitální terestriální televize DVB-T: Technické minimum - COFDM 2.díl*. In: DigitálníTelevize.cz [online]. ČR, 2002 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: https://www.digitalnitemlevize.cz/magazin/dvb-t/dvb-t-technologie/technicke_minimum_cofdm.html

- LUND, T (2006): LUND, Thomas. *Control of Loudness in Digital TV*. TC Electronic, 2006
- ORBAN (2016): ORBAN LABS, Inc. *Operating Manual OPTIMOD-FM 8600*. Scottsdale, 2016. Dostupné také z: <http://www.orban.com/orban/>
- STRAŇÁK, P. (2007): Pavel STRAŇÁK, Pavel. *Zpracování zvukového signálu pro vysílání: FM, AM, TV, DVB-T, DAB....* Praha [i.e. Brno: Tribun], 2007. Knihovnicka.cz. ISBN 978-80-7399-009-1.
- STRAŇÁK, P. (2010): STRAŇÁK, Pavel. *Optimalizace metod modulačního procesingu zvukového signálu pro multimédia a stereofonní kódování pro rozhlasové vysílání FM*. Praha, 2010. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Dobeš, CSc.
- SYROVÝ, V (2014): SYROVÝ, Václav. *Hudební zvuk: příspěvek k teorii zvukové tvorby*. 2., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2014. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-323-4.
- TC electronic: Web firmy TC electronic. *TC electronic* [online]. [cit. 2017-01-28]. Dostupné z: <http://www.tcelectronic.com/>
- Web ČRo: Web ČRo. *Český rozhlas* [online]. [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <http://www.rozhlas.cz/portal/portal/>
- Web ČT: Web ČT. *Česká televize* [online]. [cit. 2017-4-23]. Dostupné z: <http://www.ceskatelevize.cz/>
- Wikipedia: FM FM broadcasting. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/FM_broadcasting
- Wikipedie: krystalka: WIKI, Aunt: Krystalka. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Krystalka>

Příloha 1: Blokové schéma modulačního procesoru Orban Optimod



Příloha 1.1: Vnitřní blokové schéma modulačního procesoru Orban Optimod 8600

Příloha 2: Grafy znázorňující hlasitost porovnávaných snímků v čase

Doplněk k 5. kapitole.

Jedná se o hodnoty vzniklé měřením pomocí softwaru iZotope RX Loudness Control.

Hodnoty byly uvedeny do grafu a z důvodu velkého množství dat byla vytvořena spojnice pomocí funkce klouzavý průměr pro zvýšení přehlednosti.

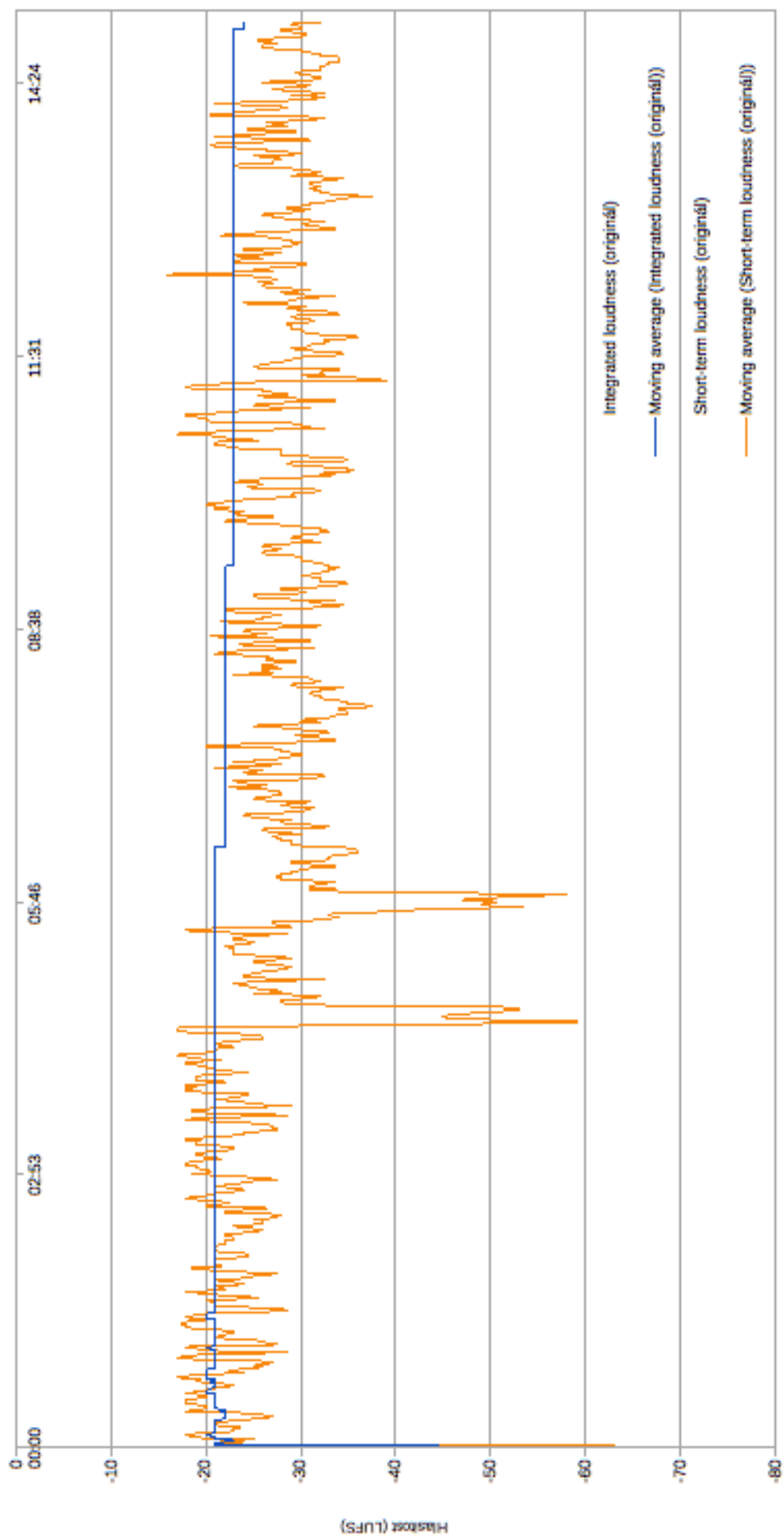
Předěly mezi částmi (Duet a sbor – Recitativ – Árie) jsou viditelné v podobě výrazných poklesů krátkodobé hlasitosti.

Je zde vidět i vliv AGC, kdy zatímco PL původní nahrávky (modře vyznačena) postupně klesá, protože je árie přirozeně tišší, tak u DVB-T a FM obzvlášť je prakticky rovná a drží stabilní hlasitost.

Další pozorovatelným zásahem je i vyšší proměnnost krátkodobé hlasitosti (oranžově vyznačená) během árie u originálního snímku, zatímco na konci DVB-T i FM cesty je relativně jednotvárná v důsledku snížení makrodynamiky i mikrodynamiky signálu.

Hlasitost originálního signálu v čase (Bach)

Krátkodobá hlasitost vůči integrované

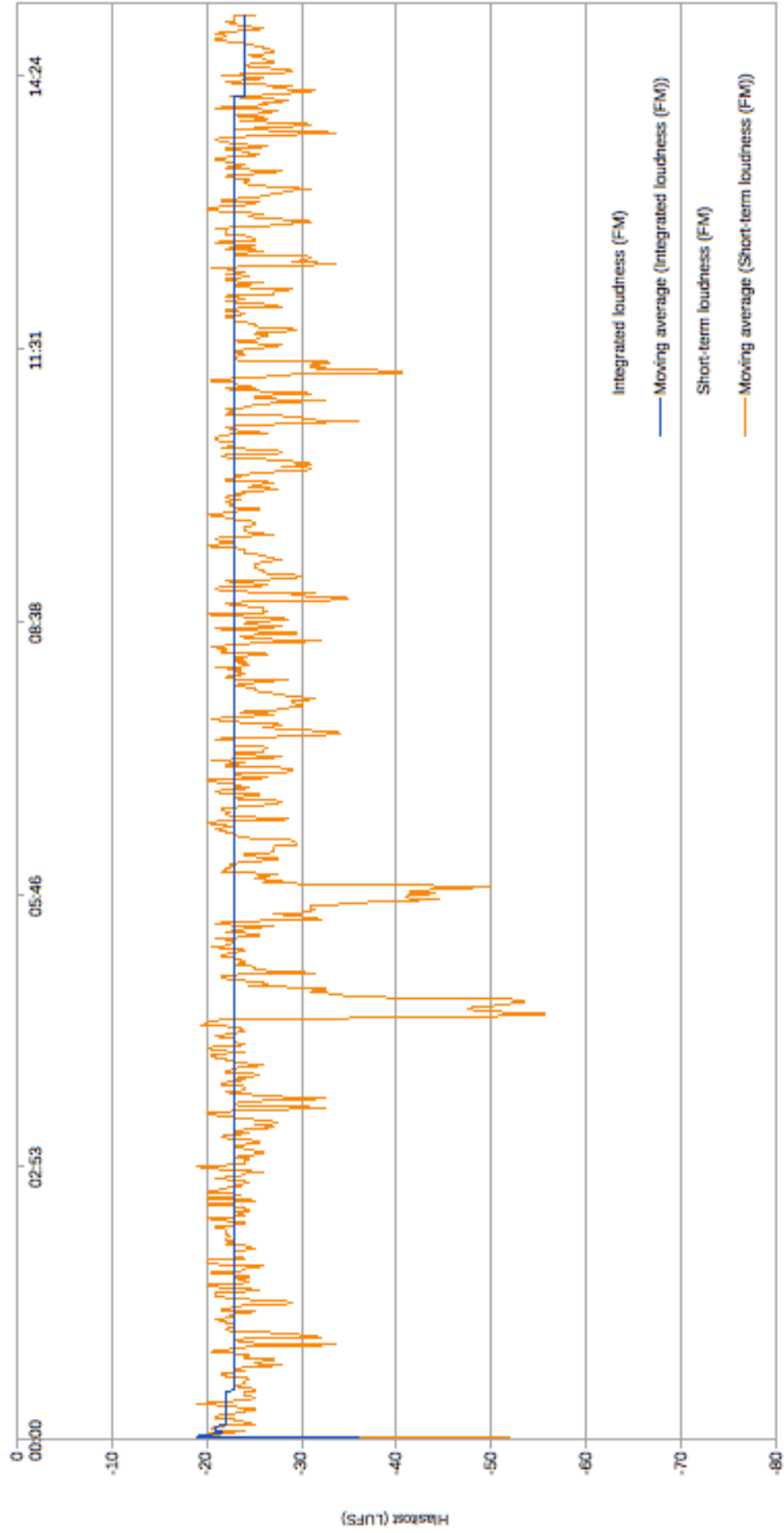


Čas (mm:ss)

Příloha 2.1: Krátkodobá hlasitost originálního signálu v čase vůči integrované (PL)

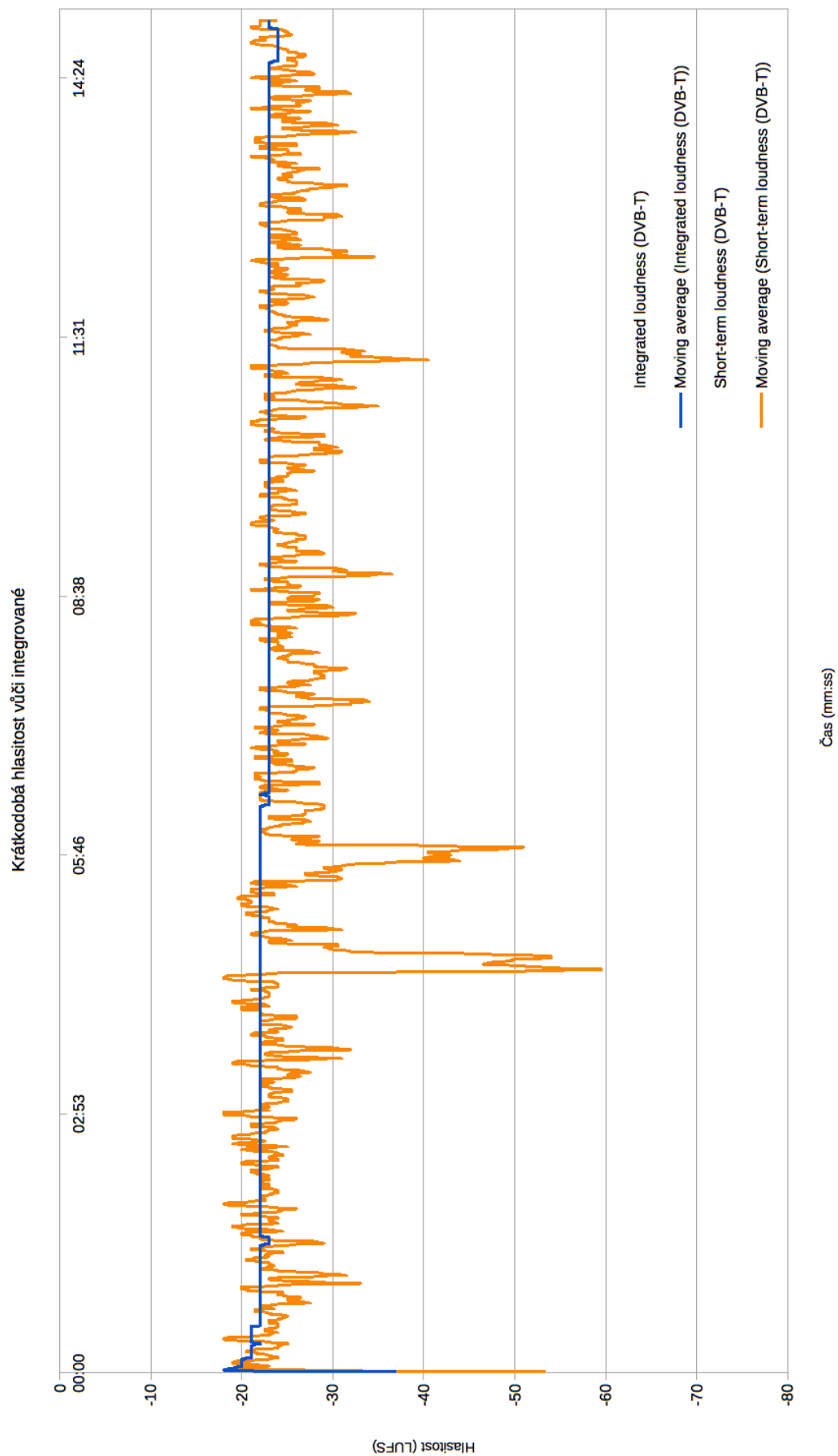
Hlasitost signálu z FM přijímače v čase (Bach)

Krátkodobá hlasitost vůči integrované



Příloha 2.2: Krátkodobá hlasitost signálu z FM příjmu v čase vůči integrované (PL)

Hlasitost signálu z DVB-T v čase (Bach)



Příloha 2.3: Krátkodobá hlasitost signálu z DVB-T příjmu v čase vůči integrované (PL)