

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

HD USB zvuková karta

Jaroslav Dohnal

Kroměříž 2014

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor SOČ: 10. elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

HD USB zvuková karta

The HD USB Sound Card

Autor: Jaroslav Dohnal
Škola: SŠ - Centrum odborné přípravy technické
Kroměříž, Nábělkova 539
Konzultant: Ing. Bc. Miloslav Otýpka

Kroměříž 2014

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci vypracoval samostatně, použil jsem pouze podklady (literaturu, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu a postup při zpracování a dalším nakládání s prací je v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Kroměříži dne 13. 2. 2014

Podpis:

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Ondřeji Luterovi za cenné rady ohledně návrhu D/A převodníků a USB transportu a Ing. Bc. Miloslavu Otýpkovi za vedení práce a pomoc při výrobě krabičky.

Anotace

Cílem práce bylo navrhnout a sestavit externí stereo zvukovou kartu vysokých kvalit, která by mimo poslechu a záznamu hudby měla sloužit také na měření parametrů audio zesilovačů, zvukových karet a jiných zařízení. Podmínkou bylo použití USB kvůli možnosti připojení nejen ke stolnímu PC, ale také k notebooku. Karta je podporována ve všech majoritních operačních systémech – Windows, Mac OS X a Linux.

Klíčová slova: zvuková karta; USB; měření; přehrávání; záznam

Anotation

The goal of this work was to design and build an external stereo high quality sound card, which would be used to listening and recording music and also for measuring parameters of audio amplifiers, sound cards and other devices. The condition was using USB connectivity because I wanted to use it not only with my desktop PC, but also with my laptop. It's supported in all of major operating systems - Windows, Mac OS X and Linux.

Keywords: sound card; USB; measurement; playing; recording

1 Obsah

1	Úvod	6
1.1	Problematika zvukových karet	6
1.1.1	Analogově-digitální převod	6
1.1.2	I/V převodníky	8
1.1.3	Hodiny	9
1.1.4	USB a zvuk	11
2	Hardware	13
2.1	Popis jednotlivých částí	13
2.1.1	USB část	14
2.1.2	Sběrnice a řízení	15
2.1.3	D/A převodníky	16
2.1.4	A/D převodník	17
2.1.5	LPF a I/V sekce	17
2.1.6	Oscilátory	19
2.1.7	Zdroje	19
2.1.8	Modul spínání	21
2.2	Celkové provedení	22
3	Software	22
3.1	XMOS - USB	23
3.2	Atmega 8 – řízení převodníků	24
3.3	Attiny 13 – modul spínání	24
4	Výsledky	25
4.1	Naměřené parametry	25
4.1.1	Spektrální analýza a SNR	25
4.1.2	THD, THD+N	25
4.1.3	Šířka pásma	26
4.1.4	IMD	26
4.2	Chování karty v operačních systémech a shrnutí parametrů	27
4.2.1	Windows	27
4.2.2	Linux	27
4.2.3	Mac OS X	27
4.2.4	Shrnutí parametrů	28
5	Závěr	29

6	Obsah přílohy	30
6.1	Hardware	30
6.1.1	Modul USB (usb_board):	30
6.1.2	Modul převodníků (analog_board):	30
6.1.3	Modul napájecího zdroje (supply_board):	30
6.1.4	Modul spínání (relay_board):	30
6.1.5	Krabička:	30
6.2	Software	30
6.3	Naměřené výsledky	31
7	Použité zdroje a prostředky.....	32
7.1	Použitá literatura	32
7.2	Použitý software	34
7.3	Použitý hardware.....	35

1 Úvod

Cílem mé SOČ bylo použít veškeré mé dosavadní zkušenosti s návrhem audio zařízení, zejména D/A převodníků, ke zrealizování zvukové karty, jež bude sloužit nejen k poslechu hudby, nýbrž i k měření ostatních audio zařízení, případně jiných zvukových karet. Z toho důvodu jsem se snažil dosáhnout co nejlepších parametrů s minimem kompromisů. V přístroji se nachází celkem tři mikrokontroléry – dva 8 bitové AVR a jeden 32 bitový XMOS, který je zajímavý tím, že integruje v jednom pouzdře 8 nezávislých výpočetních jednotek schopných zpracovávat 8 paralelně běžících vláken, 64 bitový digitální signálový procesor a FPGA – programovatelné logické pole. Pro převod mezi analogovým a digitálním signálem jsou použity vícebitové sigma-delta převodníky.

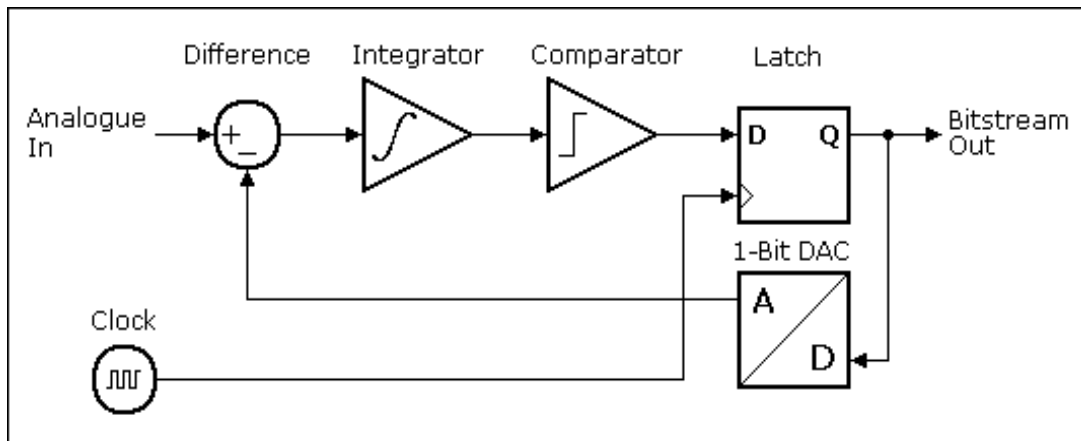
Zařízení se k počítači připojuje prostřednictvím USB 2.0 a podporovány jsou všechny majoritní operační systémy, avšak v režimu UAC2 v OS Windows je potřeba použít ovladače třetí strany. Část starající se o transport audio a řídicích dat je galvanicky oddělena od části D/A převodu, nehrozí tak žádné zemní smyčky a rušení z PC je prakticky eliminováno.

1.1 Problematika zvukových karet

1.1.1 Analogově-digitální převod

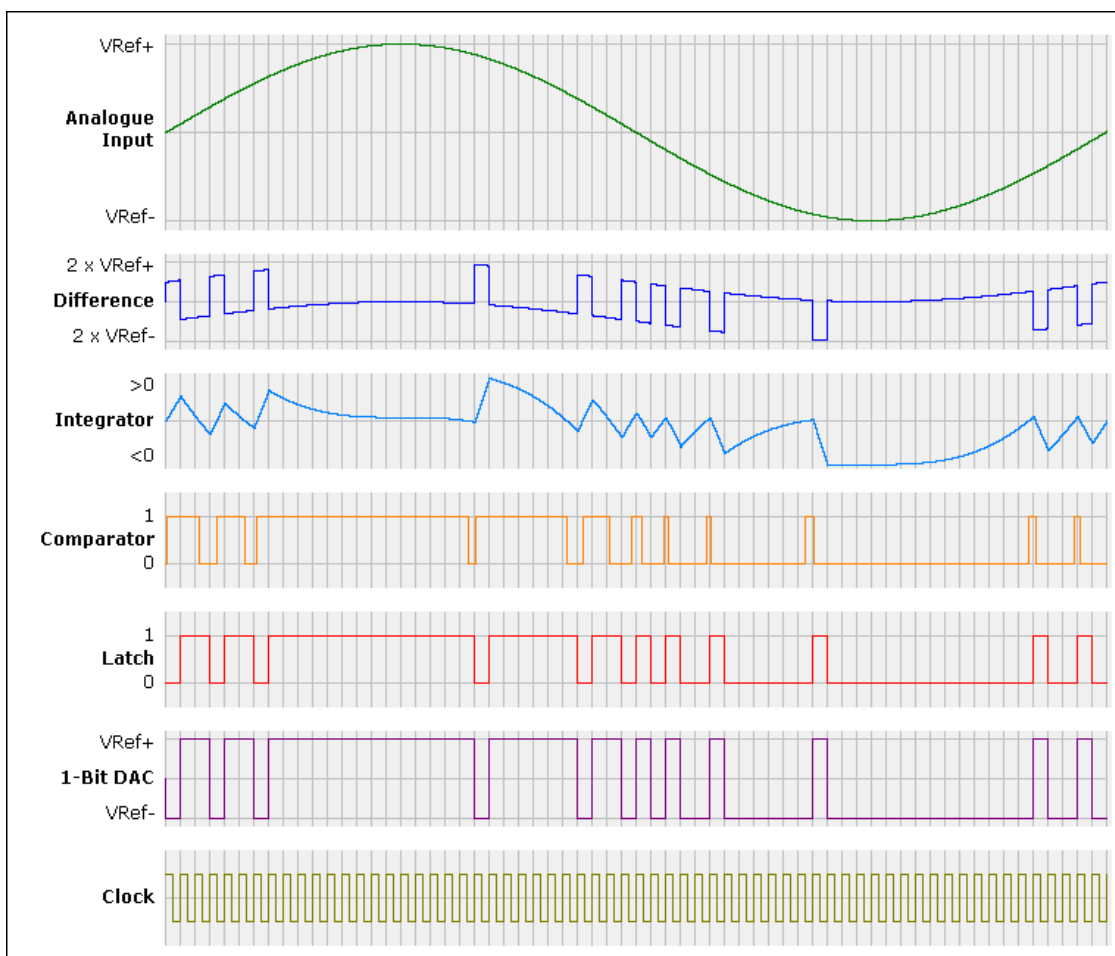
Jelikož se dnes v domácích zvukových zařízeních používají téměř výhradně sigma-delta převodníky, chtěl bych trochu přiblížit jejich odlišnosti od PCM.

Sigma-delta převodník jako takový je 1 bitový, ale má vysokou vzorkovací frekvenci, často až 6,144 MHz a pro převod využívá pulzně-poziční modulaci.



Obr. 1 Blokové schéma $\Sigma\Delta$ modulátoru

Výstupní signál tohoto převodníku je bitstream – jednobitový sériový bitový tok s vysokým kmitočtem. Jeho hlavní vlastnost je, že průměrná úroveň bitstreamu představuje průměrnou úroveň vstupního signálu.



Obr. 2 Zpracování analogového signálu $\Sigma\Delta$ modulátorem

Ten se pak matematicky převede na klasický PCM signál pomocí decimačního filtru. Avšak dnes můžeme pracovat se samotným bitstreamem, vyvedený na sběrnici se nazývá DSD (Direct Stream Digital). Setkáme se s ním většinou v SACD přehrávačích nebo jej lze neoficiálně přenést přes USB přímo do D/A čipu.

Z výše uvedeného plyne, že sigma-delta čipy jsou, spíše než převodníky, modulátory. To byl v dřívějších dobách problém. Před ním všude vládly R-2R konvertory, kde byla vnitřní velmi přesná rezistorová síť obsahující tolik členů, kolik měl převodník bitů a ohromný výrobní rozmach jednobitových čipů měl také ohromné úskalí - jejich zvuk byl špatný. Nikdo je nechtěl kupovat, každý raději sáhl po osvědčeném R-2R, který měl sice horší linearitu, ale mnohem lepší zvuk. Důvodem bylo, že sigma-delta modulátor měl na výstupu, mimo samotného signálu, také ohromné množství VF rušení, které přirozeně při PPM převodu vzniká. Výrobci se tedy snažili přijít s lepším řešením. Tím byly dnes používané vícebitové sigma-delta převodníky. Nejsou už jednobitové, ale tří až šestibitové a skloubily výhody PCM a sigma-delta – mají výbornou linearitu, mnohem menší náchylnost na vstupní jitter, než R-2R, nízkou cenu a hlavně lepší zvuk, jelikož mění i samotnou amplitudu PPM.

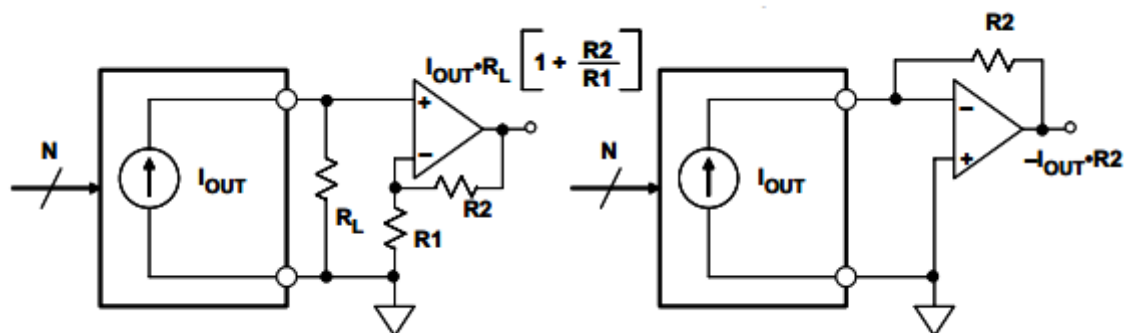
1.1.2 I/V převodníky

Dnes můžeme narazit prakticky na tři druhy analogových výstupů D/A čipů:

- napěťový
- diferenciální napěťový
- diferenciální proudový

Napěťový se používá u převodníků nižších tříd, diferenciální napěťový pak u převodníků vyšších tříd. Diferenciální výstup zajistí lepší odstup signálu od šumu. Oba mají však společné to, že už v samotném čipu se nachází obvod, který zajistí převedení proudového výstupu převodníku na napěťový.

Diferenciální proudový výstup využívají čipy nejvyšších řad. Konverze proudu na napětí se zde musí řešit externě, kdy lze dosáhnout vyšší kvality než v případě, kdy je I/V sekce přímo uvnitř obvodu.



Obr. 3 I/V převodníky

Na obrázku č. 3 můžete vidět dva základní druhy I/V převodu. První je pomocí rezistoru R_L , na kterém se procházejícím proudem vytváří úbytek napětí a ten se dále jen zesílí neinvertujícím zapojením OZ. Je dnes v audio již nevýhodný, jelikož D/A převodník bude mít tím lepší parametry, čím menší bude zatěžovací impedance jeho proudového výstupu, nicméně R_L nemá nulový odpor (v praxi se pohybuje kolem 200Ω , kvůli tomu aby byl úbytek napětí dostatečný) a tedy roste THD+N.

Druhé zapojení je aktivní I/V převodník. Dosahuje mnohem lepších parametrů, protože jeho vstupní odpor se blíží nule. Šířka pásma OZ by měla být větší, aby zde nedocházelo k demodulaci VF rušení, které vzniká v sigma-delta modulátoru, ale bylo přeneseno dále a odfiltrováno v LPF. Vysoká rychlost přeběhu OZ zajistí rychlou reakci na změnu vstupního signálu.

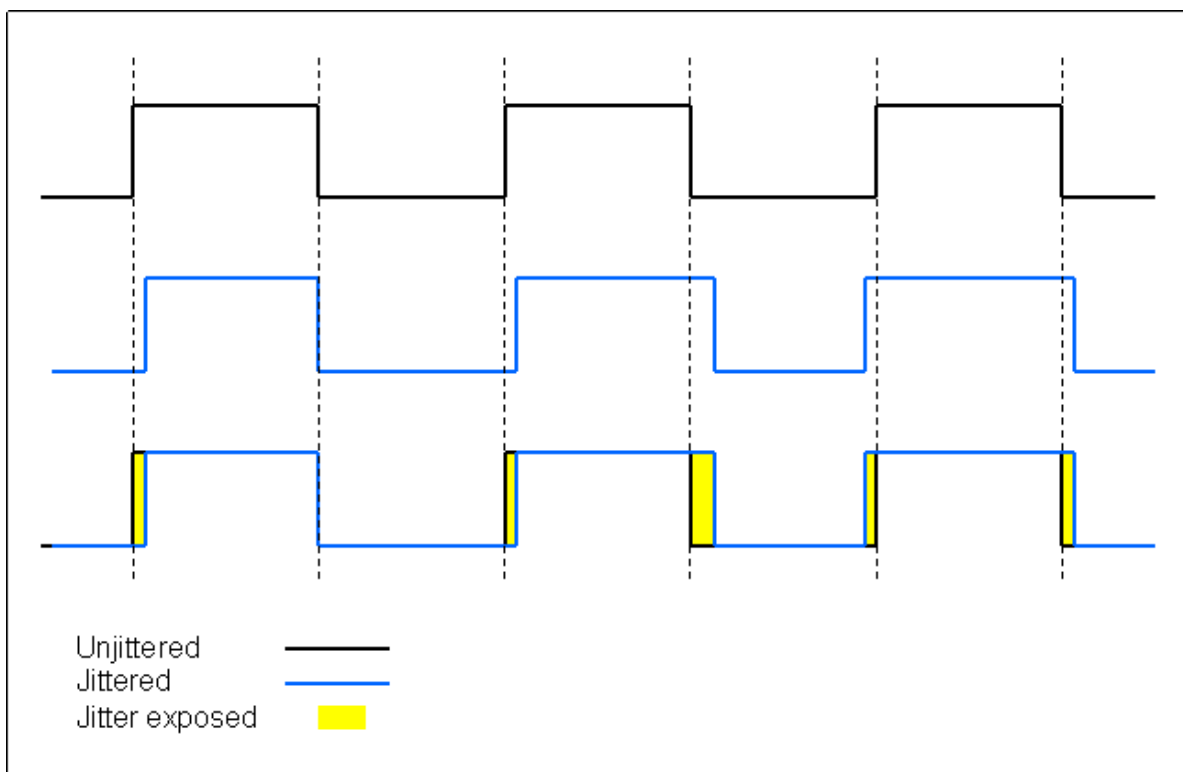
1.1.3 Hodiny

Pojmem hodiny (clock) se v digitální technice rozumí zdroj synchronizačního kmitočtu, tedy oscilátory. U analogově digitálního převodu však neslouží pouze k účelům synchronizačním, ale jsou také nutné ke správnému fungování D/A a A/D převodníků. Nepřesné hodiny plné fázového šumu způsobí, že převod není proveden ve správném čase. To znamená, že data jsou správné hodnoty, nicméně čas, ve kterém jsou převedena do analogové domény, není a dochází k nepřesnostem.

V digitální technice se místo pojmu fázový šum oscilátoru používá spíše pojem jitter, což je fázový šum převedený do časové domény.

Ten se skládá ze dvou částí – náhodného jitteru a deterministického jitteru. Náhodný nemůžeme, na rozdíl od deterministického, předvídat, jeho chování je naprosto náhodné. Deterministický lze snadno určit a lze jej tedy i eliminovat. Pro potřeby tohoto projektu není nutné rozebírat jitter do hloubky, stačí znát jeho celkovou hodnotu.

Na obrázku č. 4 je jitter znázorněn graficky – černý průběh je ideální, modrý pak „zajitterovaný“. Je vidět, že náběžné a sestupné hrany se od ideální liší a hlavně se liší v každé periodě, to znamená, že data lineárně vzrůstající s každou periodou budou v analogový signál převedena v jiný čas a způsobí nelinearitu.



Obr. 4 Znázornění jitteru

Následkem je, že výsledný zvuk při velké míře jitteru zní velmi nepříjemně na vysokých frekvencích, roste zkreslení a hlavně se zhoršuje odstup signál-šum.

1.1.4 USB a zvuk

Předpokládám, že rozhraní USB (Universal Serial Bus) každý zná. Jedná se o velmi rozšířený standart připojení periferií k PC, od flash klíčenek, přes myši a klávesnice, až po rozsáhlá zařízení, jako jsou například zvukové nebo síťové karty. Je velice propracované a ve své době bylo do jisté míry revoluční, dokáže totiž připojit opravdu skoro vše bez toho, že by uživatel musel instalovat podpůrný SW nebo HW manuálně identifikovat – je tedy PnP (Plug and Play). To je zajištěno díky třídám, které obsahují velké množství různých zařízení, jež standart USB definuje. Samotná enumerace USB pak probíhá takto:

- připojení zařízení (device), inicializace
- host (například PC) zažádá o device aby se identifikovalo
- device pošle sadu deskriptorů, to jsou tabulky bytů, u nichž záleží na pořadí a přesně definují třídu zařízení, tedy o jaké zařízení se jedná, co vyžaduje od hosta (požadovaný proud do USB atp.) a jaké má parametry
- host vyhledá ovladače, pokud žádné své nenalezne, zažádá o ně uživatele
- host zavede ovladače a spustí zařízení

Tedy díky deskriptorům uživatel vůbec nemusí řešit, jedná-li se například o externí disk (třída MSD – Mass Storage Device), myš, klávesnici (třída HID – Human Interface Device), nebo úplně jiné zařízení. Vše je zajištěno automaticky, na rozdíl třeba od sériového portu.

Samotná komunikace probíhá přes tzv. endpointy, můžeme si je představit jako koncové buffery u sériové linky, nebo jako jednosměrné datové tunely. Jejich velikost, počet a směr jsou nastavitelné.

Všechna zvuková USB zařízení využívají třídy UAC (USB Audio Class) a HID (zejména pro zpětnou vazbu) a mohou pracovat ve třech režimech:

- **Isynchronní** – Host posílá zvukovému zařízení datové balíčky (snímky) každou jednu milisekundu, device je pak zpracuje a přenesse na výstup. Zdrojem hodin pro převodníky je oscilátor USB řadiče v PC, což není

rozhodně dobré řešení, jelikož je zde ohromné množství jitteru (v praxi cca 3500 ps).

- **Adaptivní** – Používá isynchronní přenos s tím, že u převodníků je lokální zdroj hodin, jehož frekvence je přizpůsobována na frekvenci příchozích dat (například pomocí PLL). Je to lepší řešení, ale pořád s velkým množstvím jitteru. Pro hosta se tváří téměř stejně jako isynchronní.
- **Asynchronní** – Nejlepší možné řešení USB audia. U převodníků se nachází velmi přesné lokální oscilátory se stálou frekvencí. Příchozí data od hosta jsou ukládána do bufferu a „přehrávají“ se podle frekvence lokálního zdroje hodin. Device neustále diktuje jakou velikost má mít další USB packet a udržuje tak své vnitřní buffery stále na optimální hodnotě, tj. nedojde k přetečení ani podtečení. Jitter je zde pouze oscilátorů samotných (řádově maximálně desítky ps).

Třídy UAC jsou dvě:

- **UAC1** – Dnes již zastaralá (1998), podporuje pouze 96 kHz 24 bit stereo a jen v jednom směru (je omezena Full Speed USB), většinou isynchronní, nicméně podporuje i asynchronní mód. Nevyžaduje ovladače třetí strany pod žádným rozšířeným OS. Windows, Linux, Mac i FreeBSD jej podporují nativně již velmi dlouho.
- **UAC2** – Moderní verze této třídy (2009), vyžaduje asynchronní mód a Hi-Speed USB 2.0. Podporuje téměř libovolné vzorkovací frekvence, bitovou hloubku do 256 bitů a to v desítkách vstupních a výstupních kanálů současně, vývojář je zde omezen pouze rychlostí přenosu USB 2.0 (480 Mbps). Podporována je na téměř všech operačních systémech, výjimkou je Windows, kde se musí použít ovladače třetí strany.

Má zvuková karta primárně využívá UAC2 (je zpětně kompatibilní s UAC1 a do tohoto režimu se automaticky přepne, pokud je připojena k USB 1.1) v asynchronním módu, je schopna zpracovat vzorkovací frekvence 44,1 – 192 kHz a bitovou hloubku 24 bitů stereo nahrávání i přehrávání.

2 Hardware

Celé zařízení je koncipováno jako modulární, tvořeno čtyřmi základními moduly:

- modul USB
- modul převodníků
- modul napájecího zdroje
- modul spínání

Desky plošných spojů pro USB a převodníky jsou čtyřvrstvé, profesionálně vyrobené, kde horní a spodní vrstva jsou signálové, druhá vnitřní rozvod napájení a první vnitřní je nepřerušovaná rozlitá zem. PCB napájecího zdroje a spínání jsou jednovrstvé a vyráběl jsem si je sám. Rozhodl jsem se pro jednu velkou spojitou zem pro analogovou i digitální část, která má v tomto případě více výhod. Součástky jsou kupované pouze značkové od oficiálních distributorů, abych se vyhnul padělkům, kterými je bohužel zaplavena nemalá část českého trhu. Rezistory pro analogové části jsem použil minimelf 0204 z důvodu Johnsonova šumu, který je u klasických SMD rezistorů mnohem výraznější. Ten však v digitální technice příliš nevadí, proto zde používám obyčejné SMD velikosti 0603. Kondenzátory jsou na důležitých místech s nízkým ESR, pro menší kapacity pak používám tantalové, osazené z druhé strany desky. Pájeno bylo vše ručně, většina mikropáječkou, QFN USB PHY pak horkovzduchem.

2.1 Popis jednotlivých částí

K dobrému porozumění popisu jednotlivých částí karty je nutné zároveň přihlížet k přiloženým schémátům, fotkám modulů a obrázkům DPS vyexportovaných z CADu.

Tyto snímky jsou u čtyřvrstevných PCB dva:

- kompletní – zobrazené úplně všechny vrstvy i rozlité měď
- spoje – je vypnuta vrstva spojitě země a odstraněny GND polygony ve třetí vrstvě, aby byly spoje vidět co nejlépe

V příloze práce se taktéž nachází Gerber soubory PCB, které lze otevřít například v programu GerberLogic a libovolně prohlížet.

2.1.1 USB část

Na USB modulu se nachází jádro veškeré digitální komunikace – osmijádrový XMOS XS1-L01A-TQ128 procesor, jež obsahuje také 64 bitové DSP (regulace hlasitosti) a FPGA, pomocí něhož lze vytvořit naprosto jakékoliv periferie – doslova vytvářet vlastní hardware pomocí kódu.

Malý čip, připojený k hlavnímu MCU po 8bitové paralelní sběrnici, je USB PHY. Obstarává převod mezi vysokorychlostní seriovou diferenciální linkou v podobě USB a 8bitovou sběrnici, se kterou již procesor dokáže přímo komunikovat. Veškeré tyto procesy synchronizuje 13 MHz oscilátor tvořený krystalem Q1 a inverotrem U4.

Důležité jsou galvanické izolátory ADUM3441 (IC1 a IC2), pomocí kterých je docíleno úplného galvanického oddělení mezi USB částí, zatíženou rušením z PC a modulu převodníků, které jsou na toto rušení citlivé. Taktéž se tím eliminují zemní smyčky při měření zařízení zapojeného do stejného PC, jako je zapojena tato zvuková karta.

Na tomto modulu se nachází 3 napěťové regulátory, jeden hlavní 3,3 V pro napájení I/O pinů procesoru, galvanických izolátorů a jiných podpůrných obvodů. Další je 1 V stabilizátor napětí pro jádro procesoru, které dokáže špičkově odebírat až 200 mA. Posledním regulátorem je 1,8V pro napájení USB PHY čipu. Součástí desky je také sekvenční spínání napětí procesoru a jeho resetu. Je totiž důležité, aby se

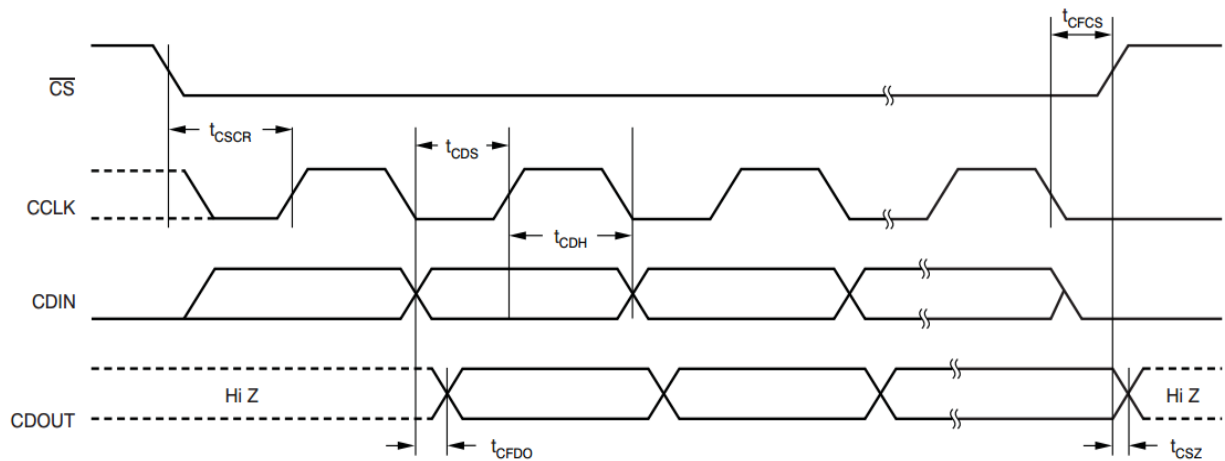
jako první na procesor přivedlo napětí 3,3 V, až poté 1 V pro jádro a nakonec proběhl jeho reset.

2.1.2 Sběrnice a řízení

V projektu jsou použity dvě hlavní digitální sběrnice pro vnitřní komunikaci:

- **SPI (Serial Peripheral Interface)**

Tato linka je použita pro komunikaci mezi XMOS procesorem a malým osmibitovým AVR kontrolérem na desce převodníků a také na řízení a nastavování parametrů AD1955 D/A obvodů.



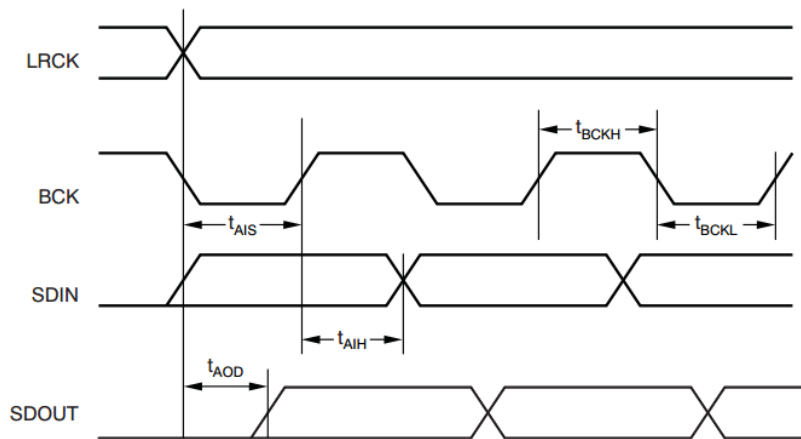
Obr. 5 Časový diagram SPI sběrnice

SPI obsahuje tyto vodiče:

- CCLK – clock, použit pro synchronizaci datových přenosů
- CS – chip select, pokud je v logické 1, slave zařízení nereaguje na příchozí signály, používá se v případě, že je na jednu sběrnici zapojeno více integrovaných obvodů
- CDIN – datový vstup do slave zařízení, vstup master
- CDOUT – datový vstup do master zařízení, výstup slave, v mém projektu nepoužita

- **I²S** (Integrated Interchip Sound)

I²S (neplést s I²C), nebo také IIS, je již dlouho uznávána jako standartní sběrnice pro přenos PCM zvuku mezi integrovanými obvody.



Obr. 6 Časový diagram I²S sběrnice

Jak je vidět na časovém diagramu, skládá se za 4 základních vodičů:

- BCK – bit clock, někdy označován SCK (system clock), synchronizuje přenos dat
- LRCK – word clock, určuje, jestli právě přicházející vzorek je pro pravý, nebo levý kanál, frekvence tohoto vodiče je vždy stejná jako vzorkovací frekvence (např. 44,1 kHz)
- SDIN – datový vstup do D/A převodníků
- SDOUT – datový výstup z A/D převodníku

2.1.3 D/A převodníky

Zvolil jsem AD1955 od Analog Devices, což jsou dnes prakticky nejlepší D/A převodníky pro komerční sféru. I přes to, že jsou stereo, používám jeden pro každý kanál s tím, že proudové výstupy pro levý a pravý kanál spojím paralelně, uzpůsobím této úpravě data a nastavení převodníku, čímž dosáhnu lepšího odstupu signál/šum, vyššího dynamického rozsahu, lepšího přeslechu mezi kanály a nepatrně nižšího zkreslení. Tedy zlepšení prakticky všech parametrů.

Tyto DAC mají I²S i DSD vstupy a SPI pro nastavení funkce. Katalogový list udává zkreslení THD+N -110 dB, SNR 123 dB, obsahují vnitřní osminásobné převzorkování a digitální filtr FIR filtr.

2.1.4 A/D převodník

Nakonec jsem osadil ADC CS5381 od společnosti Cirrus Logic, je to opět jedno z nejlepších dnes dostupných ADC. Jeho maximální vzorkovací frekvence je 6,144 MHz v multibit, která je pak matematicky převedena na PCM 24 bitů a 192 kHz. Integrovaný obvod taktéž obsahuje LPF a HPF digitální FIR filtry, LPF pro odfiltrování vyšších frekvencí nad hranicí Nyquist–Shannonova teorému a HPF pro odfiltrování stejnosměrné složky v signálu. Tento filtr jsem zapojil jako vypínatelný, to znamená, že v případě potřeby je možno s převodníkem měřit i stejnosměrné signály.

2.1.5 LPF a I/V sekce

Analogové LPF filtry jsou ve zvukové kartě celkem 4, pro každý vstupní a výstupní kanál jeden. Filtry jsem navrhl a simuloval v programu Multisim.

- **Vstupní část**

Signál před vstupem do A/D obvodu nejprve prochází fóliovými kondenzátory C106 – C109 (jejich volba je zřejmá, keramické by způsobovaly zkreslení, zejména z důvodu piezoelektrického jevu keramického dielektrika), které lze přemostit signálovým relé K4, pokud potřebuji měřit DC signály.

Dále postupuje do neinvertujících zesilovačů LME49990 (IC18 a IC19), jež upraví vstupní amplitudu na vhodnou hodnotu a fungují taktéž jako impedanční oddělení (buffery). Nejdůležitější částí jsou plně diferenciální zesilovače v podobě OPA1632 (IC16 a IC17), zajišťující jednak převedení nesymetrického signálu na symetrický (diferenciální) a jednak vstupní dolnoproustný filtr pro odfiltrování vyšších kmitočtů, které nedokáže převodník zpracovat a kvůli kterým by docházelo k aliasingu. Následuje RC člen jako další stupeň filtru a vstup ADC. IC13 je nízkošumový operační

zesilovač, který proudově posiluje výstupní napěťovou referenci A/D čipu pro vytvoření virtuální nuly symetrického signálu v OPA1632.

▪ **Výstupní část**

Výstup DAC je diferenciální proudový, to znamená, že je nejprve potřeba jej převést na napětí. I/V převodníky jsem rozebíral v teoretické části, zde je popíši jen z praktického hlediska.

Zvolil jsem aktivní provedení s operačními zesilovači AD8045 (IC3-IC6), které mají vhodné vlastnosti, zejména nízký šum, velmi nízké zkreslení a velkou šířku pásma - až 1 GHz. Taková šířka pásma se zdá být v audio naprosto zbytečná, nicméně sigma-delta modulátory mají na výstupu ohromné množství harmonických kmitočtů, často sahajících až do pásma desítek, či stovek MHz, které je třeba odfiltrvat. Pokud by se použily pomalé OZ s nevhodnou vnitřní architekturou, dojde na nich k demodulaci těchto kmitočtů, vzniká zkreslení a zhoršuje se odstup signál-šum.

Za I/V sekcí se nachází dolnoproputný filtr opět s operačními zesilovači LME49990 (IC7 a IC8), filtrující právě tyto vysoké harmonické násobky. Taktéž slouží jako převodník z diferenciálního signálu, produkovaný AD1955 čipem, na nesymetrický. Mimo to ještě pracuje jako výstupní proudové posílení.

Jistě si všimnete částečně osazeného diskrétního sledovače na výstupu. Jedná se o upravené diamond buffer zapojení, ale nakonec jsem se rozhodl jej nepoužít z důvodu možného zhoršení parametrů. Měl sloužit jako další silné proudové posílení, se kterým by zvuková karta byla schopna napájet i náročnější sluchátka. Nakonec jsem od tohoto řešení ustoupil, IC7 a 8 jsou schopny dodat přes 45 mA_{pp}, to považuji za dostatečné.

2.1.6 Oscilátory

Zdroj hodin je zásadní věc u návrhu jakéhokoliv převodníku. Určuje nemalé množství jeho parametrů a synchronizuje všechny procesy převodu a transportu audio signálu.

Proto jsem se rozhodl použít opravdu špičkové oscilátory CCHD-957, vyráběné speciálně pro zvuková digitální zařízení, u nichž výrobce Crystek garantuje velmi nízký fázový šum (maximálně 1 ps) v celém slyšitelném pásmu. Oscilátory musí být dva, jeden o frekvenci 22,5792 MHz ($44100 \text{ Hz} * 512$) pro vzorkovací frekvence 44,1 kHz a druhý 24,576 MHz pro násobky 48 kHz. Přepíná mezi nimi mikrokontrolér Atmega 8 (IC29) ovládaný hlavním CPU XMOS.

Na výstupu oscilátorů jsou v těsné blízkosti umístěny logické buffery (IC20 a IC21), posilující hodinový signál před vstupem do NOR hradla (IC22), které signály sčítá (přepíná mezi nimi, je vždy aktivní jen jeden oscilátor). Za ním je umístěno dalších několik logických sledovačů, jež rozvádí tento synchronizační clock do všech převodníků a kontroléru. Často jsou zde umístěny sériové rezistory 68 Ω , jejichž účel je vytvořit RC článek, kde C je kapacita plošného spoje + vstupní kapacita následujícího logického obvodu a tímto omezit zákmity – omezit pronikání rušení do analogové části.

2.1.7 Zdroje

Napájecí zdroje jsou neméně podstatnou částí zvukových karet. Jejich zvlnění a šum proniká do analogových signálů a taktéž dokáže zásadně zhoršit vlastnosti převodníků. Při návrhu jsem se snažil maximálně oddělit digitální a analogovou část z důvodu minimalizace digitálního rušení v analogovém signálu.

Celkem jsem vytvořil 4 hlavní zdroje napájení:

- **USB**

Zdrojem je v tomto případě PC, ze kterého lze odebírat 5 V a maximálně 500 mA. Často nese i velké množství rušení, proto USB používám pouze pro napájení XMOS procesoru, který je na něj přímo napojen a modulu spínání.

- **Analog**

Velmi důležitým zdrojem je analogový zdroj. Je symetrický, jelikož napájí všechny operační zesilovače a všechny analogové části převodníků. Využívá první dvě sekundární vinutí toroidního transformátoru, obě dodávají 14 V a 0,5 A. Po usměrnění rychlými diodami (shottky z důvodu minimalizace rušení vznikajícím při spínání diod) následují velké filtrační kondenzátory 10 mF a diskrétní zapojení nízkošumového napěťového regulátoru. Prakticky je to neinvertující zesilovač s napěťovou referencí, viz schéma. Na samotné desce převodníků je napájení ještě přivedeno na kapacitní násobiče pro další minimalizaci zvlnění a šumu. Dále už jsou napájeny přímo některé OZ a několik dalších regulátorů, snižujících výsledných 12 V na 5 V pro napájení převodníků a +/- 5 V pro napájení operačních zesilovačů v I/V sekci.

- **Digitál**

Digitální zdroj je zapojen na další vinutí transformátoru, konkrétně 8 V a 0,7 A, následuje usměrnění, filtrace a stabilizace rychlým nízkošumovým stabilizátorem LT1794, snižující toto napětí asi na 5,5 V. Na desce převodníků je další regulátor IC9 s velmi rychlou odezvou, jehož výstupem je již 3,3 V pro napájení téměř všech digitálních obvodů vyjma LVC hradel, které mají vlastní nízkošumový zdroj IC24.

- **Oscilátory**

Zdroj pro oscilátory je velmi zásadní, sebelepší oscilátory můžou být „zabity“ špatným napájením plného šumu a rušení. To je důvod, proč jsem se rozhodl pro oscilátory navrhnout další zdroj, vycházející ze zapojení Flea. Ten je napojen na poslední vinutí transformátoru – 21 V/100 mA. Po usměrnění a vyhlazení je napětí ještě vyfiltrováno kapacitním násobičem. Odtud pokračuje na desku převodníků, kde následuje známý 7812 v poněkud netypickém zapojení, zelená LED slouží zároveň jako reference pro nízkošumový operační zesilovač, který následuje za ním. Výstupní napětí OZ je 3,3 V, jež napájí oscilátory. Celkový úbytek napětí na regulátoru je tedy

vysoký a nutný, jelikož tento zdroj podle mých měření dosahuje výstupního šumu asi 8 nV na 1 kHz a cca 900 nV na 10 Hz, což je excelentní výsledek (pro srovnání, obyčejný LM317 má šum asi 50-200 μ V, záleží na zapojení a zátěži). V celém zdroji není použit jediný keramický kondenzátor z důvodu jejich piezoelektrického efektu. Keramické kondenzátory jsou až u oscilátorů, ty mají však dielektrikum z hmoty NP0, která má výborné elektrické i termoelektrické vlastnosti a tímto jevem netrpí.

Všechny ostatní obvody mají blokové napájení většinou 100nF X7R keramickými kondenzátory + 10 μ F tantal, rychlé digitální mají pak navíc ještě 1 nF NP0. Často také naleznete v přívodu napájení „feritku“, já zvolil BLM21 s 220 Ω při 100 MHz. Toto opatření omezí proudění rušení z a do obvodů, takže je napájení ve výsledku mnohem čistší.

2.1.8 Modul spínání

Poslední částí zvukové karty je malý modul, zajišťující jen jednu, relativně jednoduchou funkci – spínání 230 V napájení. Je zde použit malý 8bitový mikrokontrolér Attiny13, který se zdá být poněkud zbytečný, jeho program lze taktéž složit z několika logických obvodů. Rozhodl jsem se použít mikroprocesor z důvodu menších rozměrů a lepší ochrany proti zákmitům tlačítka, případně jiným jevům způsobujících nestabilitu.

K plošnému spoji vede 4 žilový plochý kabel, kde dva vodiče snímají stav tlačítka a další dva jsou připojeny na dvoubarevnou LED, ta svítí červeně v případě vypnutého zařízení a zeleně při běžném provozu.

Relé je dvoupólové abych zajistil odpojení nejen fázového, ale taktéž nulového, vodiče. Celý modul je napájen 5 V z USB.

2.2 Celkové provedení

Bylo pro mne důležité dostat se na co nejmenší velikost, takže už od začátku bylo vše navrhováno s ohledem na tento požadavek. Krabička je koupěna jako finální výrobek s tím, že přední a zadní panel jsem navrhl a nechal vygravírovat na CNC. Dno jsem si navrtal ve škole.

Na předním panelu je umístěno zmíněné zapínací tlačítko, dvoubarevná LED a šest dalších LED, zobrazujících vzorkovací frekvenci, na které právě zařízení pracuje.

Na zadním panelu je další ovládací prvek v podobě přepínače, jímž se volí mezi stejnosměrným a střídavým vstupním režimem. Přepnutí do SS módu přemostí vazební kondenzátory a vyřadí hornopropustný digitální filtr, který filtruje DC složku. Dále se zde nachází vstupní a výstupní RCA konektory, USB rozhraní a síťové napájení.

3 Software

Téměř celý SW je psaný v jazyce C a jeho odnoží XC, výjimkou jsou některé rutiny v XMOS MCU, které jsou napsané v ASM (zejména z důvodu přesného časování a vysoké rychlosti). XC je jazyk společnosti XMOS. Vychází z C, ale dá se v něm zároveň programovat FPGA (integruje zjednodušený ekvivalent VHDL jazyka) a DSP jádro. Taktéž je rozšířen o vlákna a komunikaci mezi nimi.

AVR 8 kontroléry jsem programoval v čistém C v Atmel Studiu, postaveném na Visual Studiu, XMOS procesor pak v xTime Composer Studiu, založeném na Eclipse IDE.

3.1 XMOS - USB

Hlavní SW, který řídí veškeré pochody karty, je postaven na frameworku dodávaném od XMOS, kde se nachází spousta ovladačů (modulů). Celý firmware je uložen v externí SPI flash paměti, ze které procesor bootuje. CPU má aktivních 6 jader, DSP a FPGA a pracuje na 500 MHz. Celková velikost zkompilevaného programu je asi 45 kB.

Základní USB modul se nazývá USB XUD, vytváří si skrze něj už přímo endpointy a interface, přes které pak komunikují s hostem. Celý datový tok vypadá velmi zjednodušeně nějak takto:

PC posílá přes isynchronní endpoint stream vzorků. Jakmile je device obdrží, USB DMA je přenesou přímo do FIFO bufferu v RAM paměti. Tyto vzorky přichází každý mikrosnímek, což je u hi-speed USB jednou za 125 μ s. CPU vypočítá podle rozdílu mezi SOF (Start of Frame – doba, kdy přišel vzorek) a SOF-1 potřebnou velikost packetu v dalším mikrosnímku a odešle tuto hodnotu zpět hostu skrze další isynchronní endpoint. Tak je zajištěno, že nedojde k přetečení ani podtečení bufferu, jelikož host streamuje vzorky na jiné frekvenci, než je device odebírá (proto asynchronní audio přenos). V případě nahrávání se vzorky posílají PC a ten si určuje velikost USB packetů. Tedy stejná operace, pouze se vymění role device a host.

Z FIFO zásobníku v paměti je čte 64 bitové DSP jádro, synchronizované na vzorkovací frekvenci, které každý vzorek násobí číslem mezi 1 a 0 podle logaritmické tabulky v decibelech. Tím docílím regulace hlasitosti. Hlasitost je určována hostem, který ji pošle přes HID interface. Po zpracování signálu se opět uloží do dalšího, již výstupního, bufferu.

Do výstupního bufferu přistupuje I²S periferie. Ta je vytvořena v FPGA a zprostředkovává komunikaci mezi audio převodníky a tímto procesorem. Je to

právě tato periférie, která určuje celý chod vzorků po I²S sběrnici, rychlost vybírání výstupního bufferu, tedy i synchronizaci s DSP a zpětnou vazbu pro PC.

Mimo jiné je zde ještě řízení a přepínání vzorkovacích frekvencí, ty diktuje host. Před začátkem streamu pošle PC na jaké vzorkovací frekvenci stream poběží, XMOS CPU tento požadavek zpracuje, nastaví podle toho děličky pro SCK na I²S sběrnici, přizpůsobí buffery a přes SPI pošle příkaz do procesoru na desce převodníků.

3.2 Atmega 8 – řízení převodníků

Jedná se o malý osmibitový mikrokontrolér, který zpracovává požadavky a příkazy předchozího XMOS procesoru a řídí podle nich převodníky a oscilátory. Pracuje na frekvenci 8 MHz, která je dána interním zkalibrovaným oscilátorem.

Program není složitý, MCU po přivedení napájení inicializuje všechny potřebné vstupy, výstupy a periférie, nastaví převodníky, oscilátory a poté se uspí do režimu power down (omezení rušení). V tomto režimu setrvá tak dlouho, dokud nepřijde požadavek přes SPI od XMOS, který obsahuje vzorkovací frekvenci, na kterou je potřeba nastavit desku převodníků. Tento příkaz vygeneruje přerušování, procesor se probudí, spadne do přerušování, vyčte SPI, přenastaví převodníky, oscilátory a opět se uspí.

3.3 Attiny 13 – modul spínání

Modul spínání je naprosto samostatný, nezávislý na ostatních. Podle toho jsem také sestavil program, jenž je velice jednoduchý. Takt procesoru postačuje pouze 1 MHz z vnitřního oscilátoru.

Program po inicializaci I/O a periférií spadne do nekonečné smyčky, kde kontroluje stav tlačítka. Pokud se sepne, provede očekávané operace, jako

sepnutí/rozepnutí relé a změnu barvy LED. Prakticky se jedná o pokročilý klopný obvod typu D, navíc ošetřený různými zpožděními proti zákmitům a podobně. To znamená, že ve výsledku je toto řešení mnohem spolehlivější než D flip-flop

4 Výsledky

4.1 Naměřené parametry

Měření jsem prováděl v programu ARTA, na spektrální analýzy a měření zkreslení jsem používal 17 bitovou rychlou Fourierovu transformaci. Měřil jsem ve smyčce, to znamená, že výstup zvukové karty je připojen do jejího vstupu. Program byl zkralibrovaný – úrovně dbFS odpovídají reálným hodnotám napětí (0 dbFS = 2,1 V_{RMS}). IMD a THD měřeno při vstupní úrovni -6 dB.

Všechna měření jsou v příloze ve formě snímků.

4.1.1 Spektrální analýza a SNR

Spektrální analýza bez vstupního signálu ukázala dobrou čistotu pozadí. Vyčnívají jen kmitočty 50 Hz a jejich harmonické, což se dá očekávat při síťovém napájení. Mají však velmi nízkou intenzitu, takže nepředstavují problém.

Výsledný odstup signál/šum je -116,2 dB RMS.

4.1.2 THD, THD+N

Harmonické zkreslení jsem měřil při signálu 1 kHz a dosahuje dle mě velmi dobrých hodnot:

THD: 0,0002 %

THD+N: 0,0005 %

Takové hodnoty jsou daleko za slyšitelnou hranicí. Úrovně harmonických kmitočtů jsou taktéž velmi nízko, jen bych byl asi raději za nižší amplitudu páté a vyšší harmonické.

Jelikož se jedná o nejdůležitější parametry zvukových karet, přikládám pro porovnání další měření harmonického zkreslení integrovaného zvukového kodeku na běžné základní desce počítače (cenová kategorie desky cca 3 000 Kč) zeleně, a zvukové karty do PCI-Express rozhraní v podobě Asus Phoebus (cena 4 000 Kč) žlutě.

Můžeme vidět zásadní rozdíl, zejména pak proti integrovanému čipu, který používá drtivá většina posluchačů. Pro přehlednost jsem vytvořil srovnávací tabulku:

Tabulka 1 – srovnání zvukových karet

Parametr	USB HD zvuková karta	Asus Phoebus	Integrovaný kodek
THD	0,00021 %	0,001 %	0,0056 %
THD+N	0,0005 %	0,0042 %	0,028 %

Pro zajímavost ještě přikládám digitální loopback (I²S sběrnice ve smyčce), na kterém je vidět, že jsem zde už opravdu narazil na matematické dno 24 bitové hloubky vzorků.

4.1.3 Šířka pásma

Dalším parametrem ZK, který stojí za zmínku, je šířka pásma, tedy frekvenční charakteristika. Byla měřena za pomoci růžového šumu a následné analýzy výstupu ADC.

Výsledná šířka pásma vychází pro toleranci 3 dB cca **2 – 66500 Hz** a pro toleranci 0,5 dB asi **5 – 33000 Hz**. Frekvenční charakteristika je tedy pro audio pásmo naprosto dostačující. Po přepnutí na DC režim se přemostí vstupní kondenzátory a vyřadí hornopropustný FIR filtr, což způsobí, že na nízkých kmitočtech není téměř žádný pokles.

4.1.4 IMD

Intermodulační zkreslení bylo měřeno při signálech 13 a 14 kHz v poměru 1:1.

Výsledek 0,00015 % je podle mého úsudku opět výborný.

4.2 Chování karty v operačních systémech a shrnutí parametrů

4.2.1 Windows

Karta je podporována ve všech operačních systémech Microsoftu verze XP a vyšší po nainstalování UAC2 ovladačů třetí strany, například TheSycon. Jak se s těmito ovladači chová ve Windows 8.1 lze vidět na snímku windows.png v příloze.

4.2.2 Linux

Operační systémy založené na linuxovém jádře nativně podporují tato zařízení již několik let. UAC2 dokonce podporují i porty na platformy ARM, karta by tedy měla fungovat i na Androidu 4.2 a vyšším, různých portech na Raspberry Pi, Beagleboard, Cubieboard a dalších s kompatibilním kernelem. Identifikaci karty v Xubuntu 13.04 nalezne v příloze na snímku linux.png.

4.2.3 Mac OS X

Posledním majoritním operačním systémem je Mac OS X, jež se vyskytuje oficiálně jen na produktech Applu, ale lze jej zakoupit a nainstalovat na každý PC. Je to unixový systém, stejně jako Linux, nevyžaduje ovladače pro UAC2 kompatibilní zařízení již od verze 10.6.4. Stejně jako Linux, Mac OS X portovaný a upravený pro ARM v podobě iOS podporuje UAC2 nativně, to znamená, že lze kartu připojit k iPadu, iPhone, iPodu a dalším. Snímek chování zařízení pod Mac OS X 10.9 Marverick je v příloze pod názvem mac.png.

4.2.4 Shrnutí parametrů

Tabulka 2 – shrnutí parametrů zvukové karty

Podporované vzorkovací frekvence	44,1; 48; 88,2; 96; 176,4; 192 kHz
Podporované bitové hloubky	16 a 24 bitů
Počet kanálů	2
Harmonické zkreslení	0,00021 % (-114 dB)
Harmonické zkreslení + šum	0,0005 % (-106 dB)
Intermodulační zkreslení	0,00015 %
Šířka pásma	5 - 33000 Hz \pm 0,5 dB
Odstup signálu od šumu	> 116 dB
Úroveň při plném vybuzení (0 dBFS)	2,1 V _{RMS}
Komunikační rozhraní	USB 2.0
Napájení a příkon	230 V/50 Hz, 25 W max

5 Závěr

Cílem mé práce byla praktická realizace zvukové karty požadovaných parametrů, která umožní nejen poslech hudby, nýbrž i měření většiny audio zařízení, případně jiných zvukových karet. Vytčený cíl se mi podařilo naplnit i když jsem se jako žák střední školy často potýkal s ekonomickým a časovým deficitem. Současně přínosem mé práce bylo získání sumy vědomostí a zkušeností, které mohu uplatnit při návrhu dalších digitálních i analogových zařízení. Konečně mám také k dispozici kvalitní A/D a D/A převodníky pro měření vlastních zvukových zařízení. O USB modul karty mají komerční zájem některé české a slovenské společnosti, což mě velmi těší a naplňuje.

V práci pokračuji, vyvíjet USB, zejména pak audio, mě odborně obohacuje. Nyní pracuji na audio transportu postaveného na Cortex M3 procesoru architektury ARM v podobě SAM3U od Atmelu. Toto rozhraní zpracuje PCM do 384 kHz 32 bitů a taktéž DSD až do frekvence 5,6448 MHz (DSD128) včetně nahrávání. Můj kolega vyvíjí naše společné USB Audio Class 2 ovladače pro operační systémy Windows, které budou primárně určené k této ARM platformě.

Mimo to jsem již sestavil další dva D/A převodníky (o které je mezi DIY komunitou zájem), foto jednoho z nich naleznete v příloze pod označením Bluestring X6. Dále pracuji na A/D převodníku, který by měl parametrově překonat tuto práci (předpokládané zkreslení THD je dokonce o řád nižší – 0,00002 %).

Úplným závěrem bych chtěl poděkovat za zájem o mou práci i přes to, že je ve svém výkladu často zjednodušená. Jedná se o velmi rozsáhlý projekt a provést detailní deskripci by mi obsahově zabralo asi 3× více, než je doporučený rozsah práce SOČ.

6 Obsah přílohy

6.1 Hardware

6.1.1 Modul USB (usb_board):

- Schémata: 1× A3 + 1× A4 v jednom PDF souboru
- Desky plošných spojů: snímek z Eagle kompletní, snímek z Eagle spoje, gerber soubory
- Fotografie modulu

6.1.2 Modul převodníků (analog_board):

- Schémata: 4× A3 v jednom PDF souboru
- Desky plošných spojů: snímek z Eagle kompletní, snímek z Eagle spoje, gerber soubory
- Dvě fotografie modulu

6.1.3 Modul napájecího zdroje (supply_board):

- Schémata: 1× A4
- Desky plošných spojů: snímek z Eagle kompletní
- Fotografie modulu + fotografie zakázkového toroidního transformátoru

6.1.4 Modul spínání (relay_board):

- Schémata: 1× A5
- Desky plošných spojů: snímek z Eagle kompletní
- Fotografie modulu

6.1.5 Krabička:

- Přední panel (front_panel): snímek ze SolidWorks + SolidWorks projekt
- Zadní panel (rear_panel): snímek ze SolidWorks + SolidWorks projekt
- Tři fotografie finálního výrobku
- Dvě fotografie Bluestring X6 modulu, což je další zvukový převodník mé výroby

6.2 Software

Obsahuje zdrojové soubory a zkompilevané binární obrazy do všech mikrokontrolérů. Celkem 3 různé programy.

Dále jsou zde tři snímky chování zvukové karty pod operačními systémy (kapitola 4, podkapitola 2.) ve formátu png.

6.3 Naměřené výsledky

Obsahuje snímky z programu ARTA ke kapitole 4, podkapitola 1. Naměřené parametry.

Celkem šest měření:

- THD a THD+N (thd_n.png)
- Spektrální analýza a SNR (spectrum_snr.png)
- Šířka pásma (bandwidth.png)
- IMD (imd.png)
- Měření ZK Asus Phoebus a integrovaného čipu Realtek (phoebus_realtek.png)
- Digitální smyčka XMOS rozhraní (digital_loopback.png)

7 Použité zdroje a prostředky

7.1 Použitá literatura

- [1] Katalogový list ADC obvodu CS5381:
http://www.cirrus.com/cn/pubs/proDatasheet/CS5381_F2.pdf
- [2] Katalogový list DAC obvodu AD1955:
http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD1955.pdf
- [3] Katalogový list operačního zesilovače AD8045:
http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8045.pdf
- [4] Katalogový list operačního zesilovače LME49990:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lme49990.pdf>
- [5] Katalogový list symetrického operačního zesilovače OPA1632:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa1632.pdf>
- [6] Katalogový list operačního zesilovače OPA1612:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa1612.pdf>
- [7] Katalogový list operačního zesilovače NE5534:
<http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/ne5534.pdf>
- [8] Katalogový list logického 3S sledovače 74LVC1G125:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc1g125.pdf>
- [9] Katalogový list logického hradla OR 74LVC1G02:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc1g02.pdf>
- [10] Katalogový list logického invertoru 74LVC1G04:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc1g04.pdf>
- [11] Katalogový list dvojitého logického open drain sledovače NC7WZ07P6:
<http://www.fairchildsemi.com/ds/NC/NC7WZ07.pdf>
- [12] Katalogový list prahového detektoru se zpožděním TPS3808G09:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps3808g09.pdf>
- [13] Katalogový list oscilátorů Crystek CCHD-957:
<http://www.crystek.com/crystal/spec-sheets/clock/cchd-957.pdf>
- [14] Katalogový list stabilizátoru 7812:
<http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD0000444.pdf>
- [15] Katalogový list regulátoru ADP150AUJZ-3.3:
http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADP150.pdf

- [16] Katalogový list regulátoru LT1762:
<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1762fa.pdf>
- [17] Katalogový list záporného ekvivalentu [16] LT1964:
<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1964fb.pdf>
- [18] Katalogový list regulátoru TPS7A4901:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps7a4901.pdf>
- [19] Katalogový list regulátoru TPS7A4533:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps7a4533.pdf>
- [20] Katalogový list regulátoru TPS76318:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps76318.pdf>
- [21] Katalogový list regulátoru TPS77633:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps77633.pdf>
- [22] Katalogový list regulátoru LP3879MR-1.0:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lp3879.pdf>
- [23] Katalogový list regulátoru LT1794:
<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1794fs.pdf>
- [24] Katalogový list galvanických izolátorů ADuM3441:
http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADuM3440_3441_3442.pdf
- [25] Katalogový list SPI flash paměti AT25FS010:
http://www.sos.sk/a_info/resource/c/Atmel/AT25FS010.pdf
- [26] Katalogový list USB PHY USB3318:
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/3318.pdf>
- [27] Katalogový list mikrokontroléru Attiny13:
<http://www.atmel.com/images/doc2535.pdf>
- [28] Katalogový list mikrokontroléru Atmega8:
[http://www.atmel.com/Images/Atmel-2486-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8 L datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-2486-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8_L_datasheet.pdf)
- [29] Katalogový list mikrokontroléru XMOS XS1-L01A-TQ128-C5:
[https://www.xmos.com/download/public/XS1-L01A-TQ128-Datasheet\(X1154A\).pdf](https://www.xmos.com/download/public/XS1-L01A-TQ128-Datasheet(X1154A).pdf)
- [30] XMOS USB Audio Software Design Guide:
<https://www.xmos.com/en/download/public/USB-Audio-Software-Design-Guide%28X6299D%29.pdf>
- [31] XMOS USB and USB Audio System Requirements Guide:
<https://www.xmos.com/en/download/public/XMOS-USB-and-USB-Audio-System-Requirements-Guide%281.0%29.pdf>

- [32] XMOS USB Device (XUD) Library:
<https://www.xmos.com/en/download/public/XMOS-USB-Device-Layer-Library-Guide%281.0%29.pdf>
- [33] XMOS USB Audio 2.0 Ref Design XS1-L1 Hardware Manual:
<https://www.xmos.com/en/download/public/USB-Audio-2.0-Ref-Design-XS1-L1-Hardware-Manual-%281v1%29%281.1%29.pdf>
- [34] Integrované dokumentace v XMOS xTimeComposer studiu k jednotlivým modulům.
- [35] Silabs USB AUDIO CLASS TUTORIAL:
<http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/AN295.pdf>
- [36] Guido Tent – Supply decoupling and layout of circuits with digital ICs:
http://members.chello.nl/~m.heijligers/DAChtml/Supply_decoupling.pdf
- [37] Regulators for High-Performance Audio: <http://waltjung.org/Regs.html>
- [38] Walt Kester – Converting Oscillator Phase Noise to Time Jitter:
<http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-008.pdf>
- [39] Bruce Carter – Buffer Op Amp to ADC Circuit Collection:
<http://www.ti.com/lit/an/sloa098/sloa098.pdf>
- [40] Basic Linear Design – Chapter 6: Converters:
<http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/43-09/edch%206%20converter.pdf>
- [41] The Flea Supply DIY project: http://www.acoustica.org.uk/flea_manual.pdf
- [42] OneAudio ADC Design: <http://www.oneaudio.net/Pict/AA5381v1sch.pdf>
- [43] Cirrus Logic – Evaluation Board for CS5381:
<http://www.cirrus.com/cn/pubs/rdDatasheet/cs5381eb-1.pdf>
- [44] Analog Devices – Evaluation Board for AD1955:
http://www.analog.com/static/imported-files/user_guides/UG-048.pdf
- [45] Zdroj obrázku 1:
<http://www.beis.de/Elektronik/DeltaSigma/DeltaSigma.html>
- [46] Zdroj obrázku 4: http://www.tnt-audio.com/clinica/jitter1_e.html

7.2 Použitý software

- [1] CadSoft Eagle v6 – návrh PCB a kreslení schémat
- [2] National Instruments Multisim 11 – simulace obvodů filtrů, návrh filtrů, simulace I/V sekce

- [3] Dassault Systèmes SolidWorks 2012 – návrh předního a zadního panelu krabičky
- [4] Altium Designer 14 – kreslení schémat, routování PCB, převedení 4V PCB do 3D modelů a následná kontrola
- [5] Atmel Studio 6.1 – vývoj firmware pro Atmel kontroléry
- [6] XMOS xTimeComposer 13 – vývoj firmware pro XMOS kontrolér
- [7] ArtaLabs – ARTA v1.8 – měření parametrů zvukové karty
- [8] XMOS UAC2 testovací Windows ovladače Thesycon – kontrola správné funkce pod OS Windows
- [9] XMOS Software Framework
- [10] Atmel Software Framework

7.3 Použitý hardware

- [1] Debugger XMOS XTAG v2 – vývoj firmware pro mikrokontrolér XMOS
- [2] ISP programátor USBASP mé výroby – programování mikrokontrolérů Atmel
- [3] Procesorem řízená mikropáječka mé výroby
- [4] Horkovzdušná pájecí stanice W.E.R 853DA
- [5] Stabilizovaný laboratorní zdroj mé výroby
- [6] Ultrabook Samsung + stolní PC s operačními systémy Debian 7.1, Windows 7, Windows 8.1 a Mac OS X Mavericks 10.9