

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

DIGITÁLNÍ BEZDRÁTOVÁ KOMUNIKAČNÍ JEDNOTKA PRO PŘENOS
AUDIOSIGNÁLU

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PATRIK STRÁNSKÝ

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

DIGITÁLNÍ BEZDRÁTOVÁ KOMUNIKAČNÍ JEDNOTKA PRO PŘENOS AUDIOSIGNÁLU

DIGITAL WIRELESS COMMUNICATION UNIT FOR TRANSMISSION OF AUDIO SIGNAL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PATRIK STRÁNSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ PAVELKA

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Patrik Stránský

ID: 125312

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Digitální bezdrátová komunikační jednotka pro přenos audiosignálu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte dvě jednotky pro bezdrátovou komunikaci. Pro přenos audio signálu bude použit digitální kód. Proveďte výběr vhodného bezdrátového továrně vyráběného modulu, zohledněte parametry jako přenosová rychlost, výkon, cena apod., dále kódování a zabezpečení signálu včetně vhodných elektronických prvků pro uvažovanou konstrukci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Giesberts, T. :Wireless Microphone – Audio in the ISM band, Elektor 2/2005, p. 20-25, ISBN 978-90-5381-202-0

[2] Audio Coding for Wireless Applications [online]. [cit. 2014-09-21]. Dostupné z:
<http://www.design-reuse.com/articles/15836/audio-coding-for-wireless-applications.html>

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 26.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Pavelka

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je navržení a realizace dvou jednotek pro bezdrátovou komunikaci. Je zahrnut výběr vhodného bezdrátového továrně vyráběného modulu, zohledněny parametry jako přenosová rychlost, výkon, cena apod., dále kódování a zabezpečení signálu včetně vhodných elektronických prvků pro uvažovanou konstrukci. Pro přenos audio signálu je použit digitální kód. Práce dále popisuje návrh, stavbu komunikačních jednotek a měření jejich parametrů.

KLÍČOVÁ SLOVA

bezdrátová, komunikace, digitální, audio

ABSTRACT

Goal of this diploma thesis is to bring a design and create two cordless communication units and choose suitable factory produced wireless module. Selection depends on parameters such as bit rate, transmitting power, price, etc. as well as coding and securing signal. Signal is transferred using digital code. The thesis also describes the design, construction of communication units and measurements of their parameters.

KEYWORDS

digital, cordless, wireless, audio, transmission

STRÁNSKÝ, Patrik *Digitální bezdrátová komunikační jednotka pro přenos audiosignálu*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 42 s. Vedoucí práce byl Ing. Ondřej Pavelka

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Digitální bezdrátová komunikační jednotka pro přenos audiosignálu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno

.....

(podpis autora)

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Ondřeji Pavelkovi za příkladnou a užitečnou pomoc, náměty a cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 25. května 2015

.....
podpis autora

OBSAH

Úvod	9
1 Teoretický úvod	10
1.1 Historie bezdrátové komunikace	10
1.2 Digitální přenos informace	10
1.2.1 Přenos signálu	11
1.2.2 Šířka pásma	11
1.2.3 Analogová Modulace	12
1.2.4 Digitální Modulace	15
1.3 Digitalizace signálu	16
1.3.1 Vzorkování	17
1.3.2 Kvantování	17
1.3.3 Kódování	18
1.4 Frekvenční pásma pro bezdrátový přenos	18
1.4.1 Kmitočty pro zařízení krátkého dosahu	18
1.4.2 Pásma ISM	18
2 Předběžný návrh komunikačních jednotek	20
2.1 Výběr bezdrátového modulu	20
2.1.1 nRF24L01+ (Nordic Semiconductor)	20
2.1.2 nRF24Z1 (Nordic Semiconductor)	20
2.1.3 CC8520 (Texas Instruments)	21
2.1.4 SC14CVMDECT SF01 (Dialog Semiconductor)	21
2.1.5 DWAM83 (Microchip)	21
2.1.6 KC-6012(KC Wirefree)	21
2.2 Výběr řídicího mikroprocesoru	22
2.2.1 Atmel ATmega328	22
2.3 Blokový návrh jednotek	22
2.4 Předběžný návrh zapojení komunikační jednotky	23
3 Finální návrh a výroba komunikačních jednotek	24
3.1 Napájecí část jednotky	24
3.2 Přizpůsobení vstupních úrovní signálu	24
3.3 Zpracování a odeslání signálu	27
3.3.1 Rozhraní SPI	27
3.4 Návrh a konstrukce jednotky	28
3.5 Měření a testování jednotek	33

4 Závěr	37
Literatura	38
Seznam symbolů, veličin a zkratk	42

ÚVOD

Předložená diplomová práce na téma „Digitální bezdrátová komunikační jednotka pro přenos audiosignálu“ popisuje práci na vývoji dvou funkčních jednotek, pro digitální bezdrátovou komunikaci.

Zvukový signál jak jej známe je analogový, tedy spojitý. Pro návrh takovéto jednotky je tedy z funkčního hlediska třeba původní zachycený audiosignál přizpůsobit (napěťově a frekvenčně), zajistit analogově-digitální převod vzorkováním a následně kvantováním a kódováním. Obvod bezdrátového přenosu již tedy vysílá zesílený digitální signál. Tento je třeba po přijetí druhou jednotkou převést zpět na analogový, zesílit a posléze reprodukovat. Pro řízení vysílacích a přijímacích režimů a parametrů přenosu slouží mikroprocesor.

Přenosem dat rozumíme přenos digitální zprávy, či analogového signálu konvertovaného na digitální pomocí dvoubodového nebo vícebodového přenosového média. Jako přenosové médium mohou sloužit metalické a světlovodné kabely nebo jako v tomto případě vzduch (tzv. bezdrátový přenos).

1 TEORETICKÝ ÚVOD

1.1 Historie bezdrátové komunikace

Komunikace je způsobem sdělování informace již od pradávna. Vyvinula se od zvukových projevů a posunků až k lidské řeči, jak ji známe dnes. Když pomineme dorozumívání kouřovými a světelnými signály, které se používaly již před naším letopočtem, prvním způsobem dálkové komunikace byl semaforový telegraf, který v roce 1792 sestrojil francouzský vynálezce Claude Chappe. Vzhledem k tomu, že v této době nebylo možné soustředit světlo tak jako dnes, bezdrátové technologie se začly dále vyvíjet až s objevením elektromagnetických vln a zařízením, které by je dokázalo modulovat.

Velký pokrok přišel s objevením elektromagnetické indukce Michaelem Faradayem v roce 1831 a teoretickým popisem magnetického pole proslulými rovnicemi Jamese Clerka Maxwella v roce 1865. Tyto teoretické poznatky využil Heinrich Hertz a roku 1887 prakticky dokázal šíření elektromagnetických vln. Brzy poté fyzik Nikola Tesla významně zvýšil dosah přenosu elektromagnetických vln a vynalezl bezdrátový telegraf – první způsob radiového spojení, se kterým ovšem uspěl až Guglielmo Marconi svou manifestací a prvním přenosem radiových vln přes Atlantický oceán v roce 1901.

Dalším markantním pokrokem v rámci bezdrátové komunikace bylo vynalezení diody Johnem Flemingem roku 1904 a posléze triody Lee de Forestem, která jakožto první zesilovač elektrického signálu byla základem pro konstrukci radiopřijímačů až do vynálezu tranzistoru v roce 1947 v Bellových laboratořích. Nemałym krokem kupředu v bezdrátové komunikaci bylo vynalezení frekvenční modulace Edwinem Armstrongem. Přenos bezdrátové informace prošel tedy značným rozvojem a roku 1982 navrhla skupina „Groupe Spécial Mobile“ první verzi standartu GSM – globálního systému pro mobilní komunikaci. Roku 1989 evropská telekomunikační instituce ETSI představila GSM síť druhé generace (2G), který přešel z analogového vysílání na digitální. [1] [2] [3]

1.2 Digitální přenos informace

Hlavním výhodou digitálního přenosu oproti analogovému je skutečnost, že precizní úroveň digitálního není kritická. Data se přenášejí pomocí binárního kódu a signál je tedy imunní vůči nedokonalostem elektronických systémů. Eliminuje se tedy například rušení, přeslechy a zkreslení signálu. Digitální signál také potřebuje menší šířku pásma, tudíž můžeme při obsazení stejné šířky pásma přenést více informací

ve srovnání s analogovým signálem.

Další velkou předností digitálního přenosu je vysoká energetická efektivita, jelikož není třeba použít část vysílacího výkonu na přenos neužitečného signálu jako v případě analogového přenosu. Za zmínku stojí i nižší závislost reprodukováného signálu na příjmových podmínkách. V praxi tak pro bezchybný přenos stačí tak slabý signál, který by byl v analogové formě nepoužitelný. Digitální signál lze poměrně jednoduše šifrovat, tudíž je přenos velice bezpečný a také nabízí lepší možnosti zpracování signálu. Schopnost lépe zpracovat signál znamená, že komunikační chyby a nedokonalosti způsobené náhodnými okolnostmi při přenosu, je možno zjistit a opravit pomocí kontrolních součtů, či algoritmů. Také multiplexování digitálních signálů je mnohem jednodušší než je tomu u signálu analogového. Digitální komunikace a přenosy začínají analogovou formu vytlačovat kvůli obrovské a stále narůstající poptávce po přenosu počítačových dat a rostoucímu využití telekomunikačních technologií jako jsou mobilní telefony, videokonference, digitální televize, které přenos dat využívají.

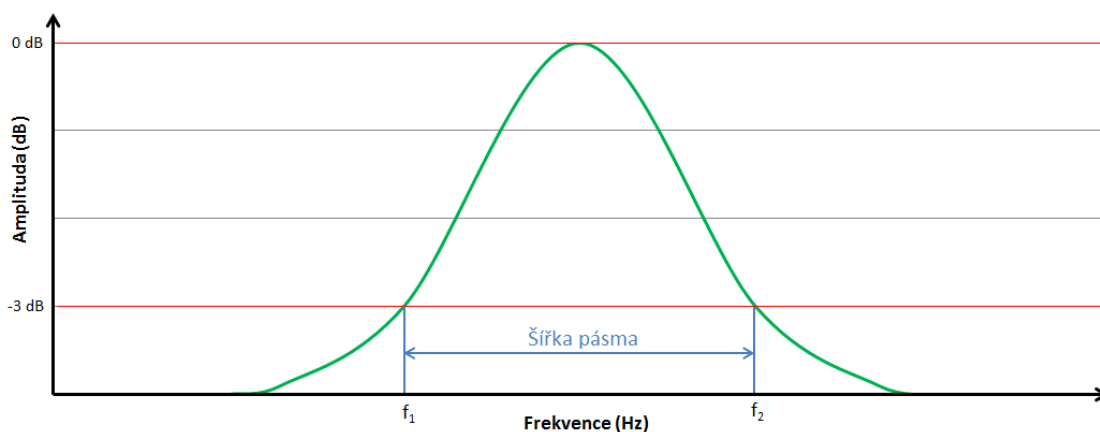
1.2.1 Přenos signálu

Přenos dvoustavového signálu, který má obdélníkový průběh a ostré hrany jej mění podle faktu, zda přenášíme jedničku nebo nulu se nazývá přenos v základním pásmu a používá se jako tzv. linkový kód pro přenos na krátké vzdálenosti. Pro vzdálenější bezdrátový přenos je ovšem efektivnější signál, který se nemění skokově nýbrž pozvolna. V praxi používáme signál sinusového či kosinusového průběhu a obvykle jej nazýváme harmonický. Jelikož samotný harmonický signál žádnou užitečnou informaci nenese, je třeba ji do něj zakomponovat. Toho dosáhneme metodou nazvanou modulace. Modulací se na základě informace mění některý z parametrů přenášeného signálu – amplituda, frekvence či fáze. Příjímač posléze signál demoduluje a z těchto změn rekonstruuje původní informaci. Takovýto přenos se nazývá modulovaný, popř. přenos v přeloženém pásmu. [4]

1.2.2 Šířka pásma

Před podrobnějším vysvětlením metod modulace je vhodné popsat reálné vlastnosti přenosových médií. Dosažitelná přenosová rychlost je dána souhrnem fyzikálních vlastností přenosového média a také vlastnostmi technických zařízení, které vytvářejí přenosový kanál (modemy, multiplexery). Přenosový kanál je vždy schopen přenášet jen signály z určitého rozpětí frekvencí, jelikož signály z jiných frekvencí by měly neúnosný útlum. Toto rozpětí frekvencí, které je rozdílem frekvence nejvyšší a nejnižší, nazýváme šířkou pásma. Jednotka šířky pásma odpovídá jednotce frekvence

tj. 1 Hz. Jak je patrné z obr. 1.1, 3 dB šířka pásma (zde pro pokles 3 dB - polovina výkonu) je dána rozsahem kmitočtů, v nichž amplituda signálu neklesne více než o 3 dB pod hranici maxima amplitudy. [5]



Obr. 1.1: Šířka pásma

Ačkoliv přesnou závislost přenosové rychlosti na dané šířce pásma nelze stanovit, existují teoretické poznatky, na jejichž základě je možno odhadnout její horní hranici. Nejvyšší dosažitelná přenosová rychlost je přímo úměrná šířce pásma, avšak koeficient této úměrnosti závisí na kvalitě signálu, přesněji na odstupu užitečného signálu a šumu.

1.2.3 Analogová Modulace

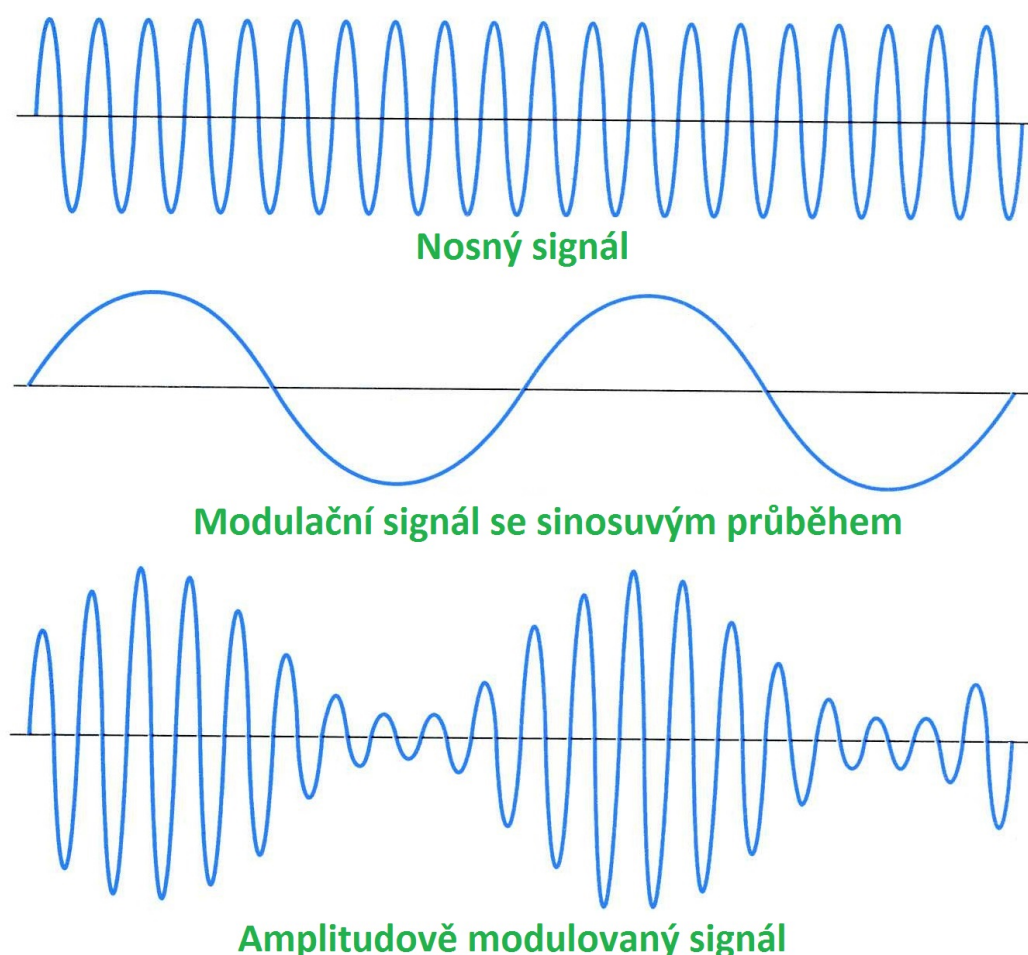
Jak je naznačeno výše, modulací rozumíme modifikaci jednoho signálu jiným, čehož se využívá zejména při přenosu dat. Rozlišujeme mnoho druhů modulací, dělíme je však na dvě základní skupiny – analogová a digitální modulace. Hlavní rozdíl mezi nimi je způsob přenosu dat – vstupní data pro analogovou modulaci mají analogový formát a pro digitální modulaci formát digitální.

Při analogové modulaci se signál mění v čase spojitě a nabývá tedy teoreticky nekonečně mnoho hodnot. Toto množství stavů je v praxi omezeno šumem přenosového prostředí a citlivostí rozlišování u demodulačního zařízení.

Amplitudová modulace

Historicky první a nejjednodušší modulační technikou je amplitudová modulace. K přenosu informace je využívána změna amplitudy nosné v závislosti na velikosti modulačního signálu. Byla a stále je využívána k přenosu zvuku v rádiích vysílacích

na dlouhých vlnách, avšak její značnou nevýhodou je malá energická účinnost spolu s náchylností na ovlivnění rušivými signály. Ve frekvenčním spektru AM je nosná vlna a dvě postranní pásma, které se z různých důvodů odstraňují a vznikají tak modulační s potlačenou nosnou. Časové průběhy nosného, modulačního a modulovaného signálu jsou znázorněny na obr. 1.2.

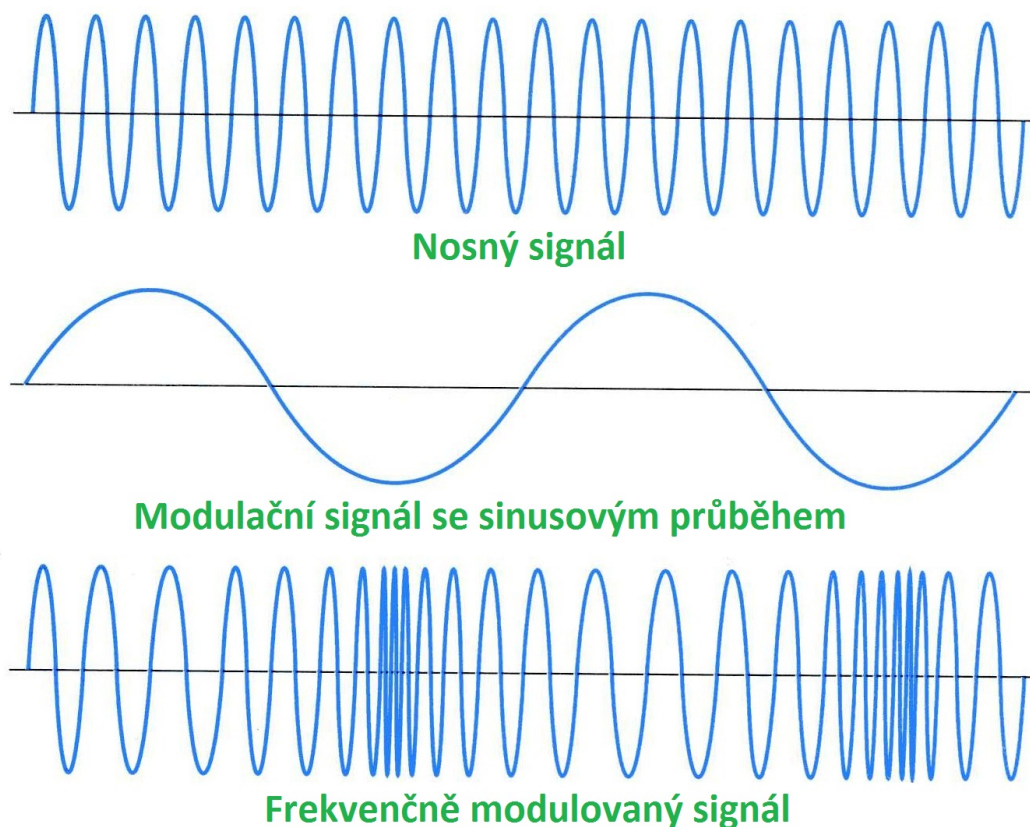


Obr. 1.2: Amplitudová modulační [8]

Frekvenční modulační

Další analogovou modulační technikou je modulační frekvenční. Tato technika spočívá v okamžité změně frekvence nosné vlny v závislosti na změně amplitudy modulačního signálu. Maximální amplitudě modulačního signálu náleží maximální změna frekvence nosného signálu, kterou nazýváme frekvenční zdvih. Její využití je obdobné jako u analogové modulační avšak je účinnější a vzhledem ke stálé amplitudě

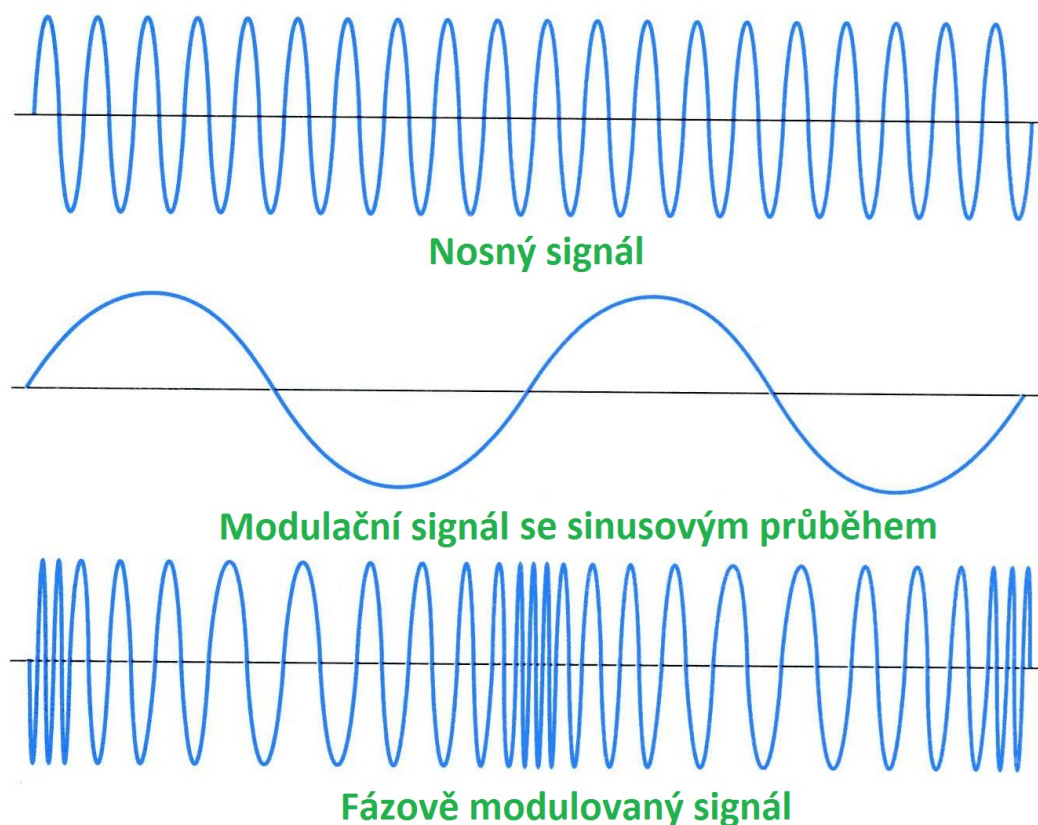
méně náchylná na šum. Časové průběhy nosného, modulačního a modulovaného signálu frekvenční modulace jsou znázorněny na obr. 1.3.



Obr. 1.3: Frekvenční modulace [8]

Fázová modulace

Poslední metodou modulace spojitého signálu je modulace fázová. U této modulace mění modulační signál fázi nosné vlny. Vzhledem k složitosti demodulace není fázová modulace příliš využívána. Jelikož modulační signál mění úhel nosného signálu, patří spolu s frekvenční modulací k tzv. úhlovým modulacím. Při srovnání s frekvenční modulací zjistíme, že fázová modulace se chová velice podobně, avšak při konstantní hodnotě modulačního signálu nemění hodnotu fázového posuvu, jak je tomu u modulace frekvenční. Časové průběhy jsou znázorněny na obr. 1.4.



Obr. 1.4: Fázová modulace [8]

1.2.4 Digitální Modulace

Digitální modulace je podobná analogové, ale namísto průběžné změny amplitudy, frekvence nebo fáze nosné vlny používá pro změnu těchto atributů pouze diskrétní hodnoty reprezentující bitovou posloupnost. Často se využívají několikastavové modulace kvůli snížení modulační rychlosti. Přenosovému kanálu je přizpůsoben počet stavů $M = 2^n$ modulace. M vyjadřuje počet stavů, n počet bitů vyjadřující daný počet stavů. Modulační rychlost udává počet signálových prvků přenesených za sekundu a vyjadřuje se v jednotkách *Baud*. Máme několik druhů digitální modulace, každá se liší rozdílnými sadami parametrů. Pro digitální modulaci se obvykle používá název „klíčování“.

Klíčování amplitudovým posuvem (ASK)

ASK, tedy *amplitude-shift keying* je koherentní modulační technika podobná analogové amplitudové modulaci používaná v přenosech po světlovodných kabelech. Její hlavní předností je její jednoduchá implementace, ovšem je ale velmi náchylná vůči šumu a rušení, což ji činí nevhodnou pro využití v bezdrátových či mobilních apli-

kacích. Širší využití má v kombinaci s klíčování fázovým posuvem jako kvadraturní amplitudová modulace.

Klíčování frekvenčním posuvem (FSK)

Použijeme-li pro reprezentaci dvou symbolů dvě různé frekvence, nazývá se tato technika FSK, tedy *frequency-shift keying*. Klíčování frekvenčním posuvem může být širokopásmová či úzkopásmová technika v závislosti na oddělení nosných frekvencí. Tato technika se využívá například u technologií DECT a Bluetooth.

Vylepšením této techniky je modulace GFSK, tedy *gaussian filtered frequency-shift keying* používající pro filtraci modulačního signálu gaussovskou dolní propust, která tvaruje pulsy za účelem zmenšení šířky jejich pásma a potlačení meziznakových interferencí.

Klíčování fázovým posuvem (PSK)

Pokud je modulačním signálem měněna fáze nosné vlny, jedná se o techniku PSK, tedy *phase-shift keying*. Tato technika nabízí jednoduchou implementaci, jelikož nosná vlna může mít pouze dva fázové stavy a její výhodou oproti jiným je nízká chybovost. Pro nižší rychlosti přenosu je využita např. u technologií Bluetooth, Wi-Fi, RFID.

Kvadraturní amplitudová modulace (QAM)

QAM, neboli *Quadrature amplitude modulation* je modulací využívající dvojici nosných obvykle sinusových signálů konstantního kmitočtu, které jsou vzájemně fázově posunuté o 90° . Tyto signály jsou amplitudově klíčovány a sečteny pro získání výsledného signálu. Jednotlivé stavy se posléze rozlišují jak pomocí amplitudy nosné, tak i její fáze a vzniká z nich tzv. konstelační diagram. Tento diagram znázorňuje pomocí konkrétní amplitudy a fázového posuvu přenos několika stavů současně. Této techniky využíváme u digitálního televizního vysílání. [6] [7] [8]

1.3 Digitalizace signálu

Pojmem digitalizace signálu rozumíme převod spojitého (analogového) signálu do posloupnosti číselných hodnot kódovaných do binární soustavy. Tento proces nám umožní další zpracování původně analogového signálu v počítačích a mikroprocesorech využívajících binární soustavu. Analogový signál se nejprve vzorkuje, tedy se stanoví jeho velikost po určitých časových úsecích. Posléze se signál kvantuje

do celočíselných hodnot a následně kóduje do binární posloupnosti.

1.3.1 Vzorkování

Prvním krokem převodu spojitého signálů je vzorkování. Vzorkováním rozumíme rozdělení signálu na krátké úseky (vzorky), které reprezentují velikost signálu v určitém čase. Ze spojitého signálu nám tedy vznikne konečné množství hodnot. Je zřejmé, že tímto procesem ztratíme z původního signálu určité množství informací, které je nepřímo úměrné vzorkovací frekvenci. V praxi je tato ztráta únosná, pokud dodržíme Shannonův teorém, který praví, že přesná rekonstrukce spojitého signálu z jeho vzorků je možná tehdy, pokud je vzorkovací frekvence vyšší než dvojnásobek nejvyšší harmonické složky vzorkovaného signálu. Tento teorém lze zapsat rovnicí:

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

(kde f_{vz} = vzorkovací frekvence, f_{max} = nejvyšší frekvence signálu)

Pokud bychom použili frekvenci nižší, než jakou určuje Shannonův teorém, může dojít ke zkreslení následkem jevu známému jako *aliasing*. Například při záznamu zvuku v CD kvalitě je použita frekvence 44,1 kHz. Lidské ucho zachycuje frekvence v rozpětí zhruba 20 Hz až 20 kHz, což znamená, že pro slyšitelné spektrum je tento vzorkovací kmitočet dostatečný.

1.3.2 Kvantování

Pro zjednodušení přenosu je vzorkovaný signál dále zpracováván metodou zvanou kvantování. Vzhledem k faktu, že počítače a mikroprocesory jsou schopny vyjádřit hodnoty vzorků jen s omezenou přesností, je třeba signál přizpůsobit i na svislé ose průběhu. Podstatou tohoto přizpůsobení je zaokrouhlení vzorkovaného signálu na tzv. *kvantovací úrovně*. Každému vzorku spadajícímu do příslušné kvantovací úrovně je přidělena její hodnota. Následkem odlišnosti této hodnoty od původní úrovně vzorku vzniká tzv. *kvantizační chyba*. Počet kvantizačních úrovní bývá obvykle roven n-té mocnině čísla 2, jelikož analogově-digitální převodníky zpravidla pracují ve dvojkové číselné soustavě.

1.3.3 Kódování

Poslední fází převodu spojitého signálu na diskrétní je jeho kódování. Kódováním rozumíme přiřazení binární hodnoty jednotlivým kvantizačním úrovním. Hodnota původního signálu byla při procesu kvantování přizpůsobena na některou z kvantizačních hladin a popsána číslem v desítkové soustavě. Při kódování se toto číslo převede do dvojkové soustavy, tedy posloupnosti jedniček a nul.

Digitální signál je tedy vzhledem k popsanému postupu méně kvalitní než analogový, jelikož obsahuje pouze některé hodnoty z původního spojitého signálu. Jeho výhodou je ovšem snadnější úprava a přenos. Proces vzorkování, kvantování a kódování obvykle zastupuje jediné zařízení, které nazýváme A/D převodník. [9] [10] [11] [12]

1.4 Frekvenční pásma pro bezdrátový přenos

S rostoucím využitím bezdrátového přenosu informací vznikla zákonná pravidla, jejich dodržování sleduje Český telekomunikační úřad (ČTÚ).

1.4.1 Kmitočty pro zařízení krátkého dosahu

Kmitočty a podmínky jejich využívání uvádí ČTÚ ve všeobecném oprávnění č. VO-R/10/05.2014-3, k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu. Mezi nejčastější problémy u tohoto typu zařízení patří to, že výrobky dovezené z mimoevropských zemí, pracují často v kmitočtových pásmech u nás nepřipustných. Vodítkem při koupi zařízení by měly být údaje o možnostech provozování v ČR, které musí být povinně uvedeny na obalu zařízení a návodu k obsluze, případně údaje o kmitočtech u zařízení. [13]

1.4.2 Pásma ISM

Pásma ISM (industrial, scientific and medical) je kmitočtové pásmo, určené pro radiové vysílání, konkrétně pro průmyslové, vědecké a zdravotní účely. Tyto pásma jsou nelicencovaná, což znamená, že použití homologovaných zařízení je povoleno bez poplatků, ovšem bez garance proti rušení. Mohou zde být provozovány i aplikace nesloužící k přenosu informace, které ovšem musí maximálně omezit rušení tohoto pásma. Poslední dobou se toto pásmo stále více používá pro nízkoenergetická komunikační zařízení komunikující na krátké vzdálenosti. Ačkoliv je pro mnoho lidí nejobvyklejším zařízením pracujícím v ISM pásmu mikrovlnná trouba, používají jej mimo jiné radioamatéři. V tomto pásmu pracují i další známé technologie jako např.

Frekvenční rozsah	Šířka pásma	Střední frekvence	Poznámka
6.765–6.795 MHz	30 kHz	6.780 MHz	Nutné povolení
13.553–13.567 MHz	14 kHz	13.560 MHz	Celosvětově
26.957–27.283 MHz	326 kHz	27.120 MHz	Celosvětově
40.660–40.700 MHz	40 kHz	40.680 MHz	Celosvětově
433.050–434.790 MHz	1.74 MHz	433.920 MHz	Evropa, Afrika, země bývalého Sovětského svazu
902–928 MHz	26 MHz	915.000 MHz	Severní a Jižní Amerika, Grónsko
2.4–2.5 GHz	100 MHz	2.450 GHz	Celosvětově
5.725–5.875 GHz	150 MHz	5.800 GHz	Celosvětově
24–24.25 GHz	250 MHz	24.125 GHz	Celosvětově
61–61,5 GHz	500 MHz	61.250 GHz	Nutné povolení
122–123 GHz	1 GHz	122.500 GHz	Nutné povolení
244–246 GHz	2 GHz	245.000 GHz	Nutné povolení

Tab. 1.1: Jednotlivá ISM pásma podle ITU [14]

Wi-Fi, NFC, DECT nebo Bluetooth.

Jak je patrné z Tab. 1.1, v České republice lze použít všechna ISM kmitočtová pásma s výjimkou pásma 902–928 MHz. Bezdrátové moduly použitelné pro navrhovanou komunikační jednotku obvykle využívají kmitočty 433 MHz, 868 MHz nebo 2,4 GHz. Podle všeobecného oprávnění VO-R/10/05.2014-3 ČTÚ povoluje pro nespécifikovaná zařízení krátkého dosahu vysílací výkon 10 mW (433 MHz) a 25 mW (868 MHz, 2,4 GHz). [15]

2 PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH KOMUNIKAČNÍCH JEDNOTEK

2.1 Výběr bezdrátového modulu

Hlavní součástí vyvíjených modulů bude komerčně vyráběný RF modul. Na trhu lze nalézt širokou škálu RF modulů, které jsou vhodné pro datovou komunikaci. Z porovnávaných dostupných RF modulů byl jako nejvhodnější zvolen obvod „nRF24L01+“ od firmy Nordic Semiconductor vzhledem k jeho dostupnosti a velice nízké ceně. Při samotném výběru bylo přihlíženo zejména k několika zadaným kritériím:

- Přenosová rychlost
- Vysílací výkon
- Cena
- Spotřeba energie
- Schopnost obousměrné komunikace

2.1.1 nRF24L01+ (Nordic Semiconductor)

Integrovaný obvod s označením „nRF24L01+“ je transceiver, neboli zařízení, které obsahuje vysílací (transmitter) i přijímací (receiver) obvody ve společném pouzdře. Obsahuje i kmitočtový syntetizér, SPI komunikační rozhraní a pokročilou správu napájení. Vysílá v celosvětovém pásmu ISM v rozsahu 2,4 GHz – 2,4835 GHz. Velkou předností tohoto obvodu je implementovaná protokolová sada ShockBurst™, kládoucí důraz na snížení spotřeby energie díky krátkým časům vysílání a tudíž také snížení rizika rušení z hlediska jiných vysílačů. Díky této technologii je relační vrstva zahrnuta v čipu, čímž se mimo jiné usnadňuje vývoj softwaru. Zahrnuta je i funkce cyklicky redundantního součtu (CRC) použitá k ověření správnosti dat. Komunikace s řídicím mikroprocesorem probíhá pomocí sběrnice SPI a k ovládní lze použít i takový mikroprocesor, který fyzicky SPI rozhraním nedisponuje, ale umí jej emulovat. Vysílací část obvodu používá modulační techniku GFSK popsanou v teoretické části. Přenosová rychlost je nastavitelná až do 2 Mbps.

2.1.2 nRF24Z1 (Nordic Semiconductor)

„nRF24Z1“ je komplexní nízkonákladový obvod v CMOS pouzdře navržený pro streamování zvuku v CD kvalitě. Disponuje S/PDIF rozhraním i SPI rozhraním a vestavěnými napájecími regulátory pro maximální odolnost vůči šumu. Samotný

výrobce ovšem pro tento obvod ukončil podporu a nedoporučuje jej již v nových návrzích využívat.

2.1.3 CC8520 (Texas Instruments)

Dalším nízkorozpočtovým řešením pro bezdrátový přenos zvuku je obvod řady CC8520 od Texas Instruments. Tento obvod zahrnuje vestavěné protokoly pro přenos zvuku, díky kterým zvládá přenášet 2 kanály zvuku v CD kvalitě bez komprese. Navíc zahrnuje mechanismy pro omezení interference s jinými bezdrátovými zařízeními na frekvenci 2,4GHz. CC8520 je autonomní obvod, který může fungovat bez i s ovládacím mikrokontrolérem. S externím MCU jej lze spojit pomocí rozhraní SPI a je tak možno ovládat některé jeho funkce.

2.1.4 SC14CVMDECT SF01 (Dialog Semiconductor)

Modul navržený pro bezdrátový přenos s názvem SC14CVMDECT SF01 pracuje ve frekvenčním pásmu standardu DECT, využívaném pro bezdrátové telefony. S externím MCU může komunikovat pomocí rozhraní UART v rámci sady příkazů API. Vzhledem k předpokladu použití 2,4 GHz pásma je tento modul pro návrh jednotky nevhodný, jelikož DECT standard využívá pásmo okolo frekvence 1900 MHz.

2.1.5 DWAM83 (Microchip)

Bezdrátový modul DWAM83 od výrobce Microchip podporuje přenos ve více pásmech (2,4; 5,2 a 5,8 GHz), čímž dokáže eliminovat rušení od jiných zařízení. Tento modul je primárně určen pro přenos zvuku pro domácí 5.1 a 7.1 systémy v HD kvalitě, neklade tedy přílišný důraz na úsporu energie.

2.1.6 KC-6012(KC Wirefree)

Modul bezdrátové komunikace KC6012 je kompletně integrovaný zvukový transceiver připravený pro použití v audio zařízeních. V modulu je zahrnut konfigurovatelný firmware s uživatelským rozhraním obsluhující převod signálů v 16-bitových A/D, D/A převodnicích i jejich bezdrátový přenos s využitím standardu Bluetooth v3.0. Proti využití tohoto modulu hovoří poměrně vysoká cena v porovnání s jinými řešeními.

2.2 Výběr řídicího mikroprocesoru

Při výběru mikroprocesoru byl kladen nárok na dostupnost, podporu SPI rozhraní a složitost implementace.

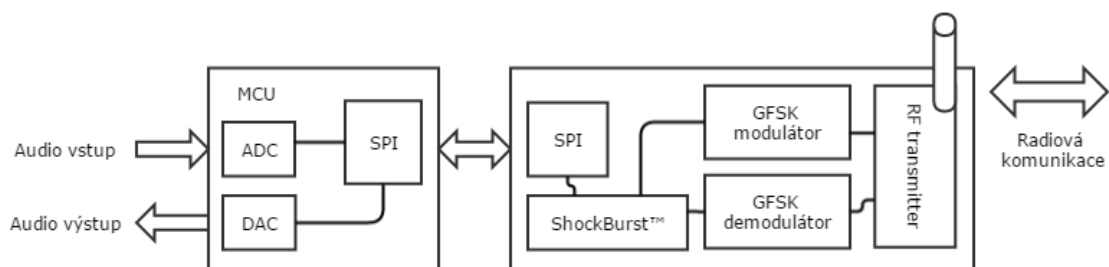
2.2.1 Atmel ATmega328

Vzhledem k předchozím zkušenostem s použitím se jeví jako vhodné k vývoji komunikační jednotky použít mikrokontrolér ATmega328. Po dobu vývoje bude využita vývojová deska Arduino Uno R3, která právě tento MCU využívá. Tato vývojová platforma používá pro mikrokontrolér vlastní bootloader, umožňující použít programovací jazyk založený na C++.

Po dokončení vývoje bude vhodné v rámci miniaturizace použít kontrolér s menšími rozměry, například SMD verzi ATmega328 v pouzdře TQFP namísto původního provedení DIP28.

2.3 Blokový návrh jednotek

Podstata analogově-digitálního převodu je popsána v teoretické části práce, v praxi nám tento převod zajistí mikrokontrolér, který bude zároveň řídicí jednotkou komunikačního modulu a případných periférií. Samotný blokový návrh jednotky je uveden na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Blokové schéma komunikační jednotky

3 FINÁLNÍ NÁVRH A VÝROBA KOMUNIKAČNÍCH JEDNOTEK

Při prvotním návrhu komunikační jednotky došlo na otázku, zda by bylo možno vstupní audiosignál přímo digitalizovat převodníkem vestavěným ve vybraném mikrokontroléru ATmega328 namísto použití jednočipového řešení ke zpracování i přenosu signálu. Po bližším nastudování problematiky se tento způsob vzhledem ke komunikačním účelům a tudíž nevelké náročnosti na frekvenční rozsah přenášeného signálu jeví jako zajímavé východisko.

Pro zesílení vstupního signálu byl s přihlédnutím k ceně a dostupnosti zvolen obvod NE5532 od výrobce Texas Instruments. Tento předzesilovač je pro tuto aplikaci vhodný, jelikož nabízí velice nízký šum a zkreslení, vysokou rychlost přeběhu a vstupní i výstupní ochranu.

Pro samotnou datovou komunikaci je použit komunikační modul založený na obvodu nRF24L01+ od výrobce Nordic Semiconductor, který byl popsán v předchozí kapitole.

3.1 Napájecí část jednotky

Komunikační jednotka se bude skládat z mikrokontroléru, aktivního filtru a bezdrátového komunikačního modulu. Jak lze vyčíst z datového listu všech hlavních součástek, napájecí napětí mikrokontroléru ATmega328 se pohybuje v rozmezí 1,8-5,5 V, operační zesilovače použitého obvodu NE5532 vyžadují napájecí napětí 0-22 V a komunikační modul s obvodem nRF24L01+ vyžaduje napájecí napětí 3,3 V.

Nejlépe se jeví možnost použití dvou napájecích napětí a to 5 V a 3,3 V. Pro získání 5 V úrovně je použit známý lineární regulátor LM7805 v pouzdře TO-220 podle doporučeného zapojení z datového listu výrobce, napájecí napětí komunikační jednotky má tedy rozpětí 7 V až 25 V. Za výstup obvodu LM7805, tedy na 5 V větvi je umístěn lineární regulátor napětí HT7533 v pouzdře TO92, který napájí samotný bezdrátový modul napětím 3,3 V a je rovněž zapojen podle doporučení datového listu.

3.2 Přizpůsobení vstupních úrovní signálu

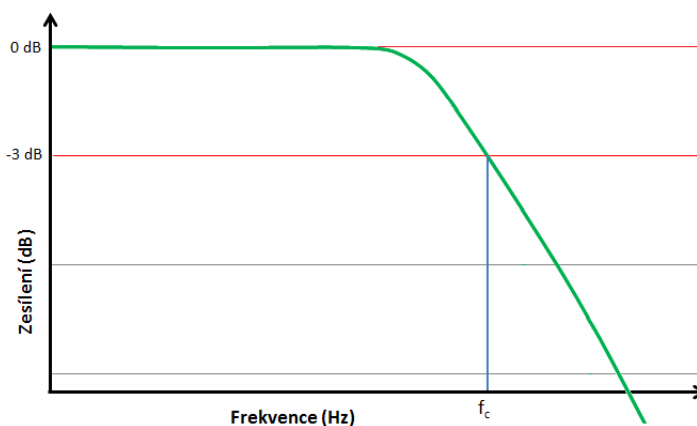
Použitý mikrokontrolér ATmega328 pracuje na kmitočtu 16 MHz a frekvence A/D převodníku je tedy $16 \text{ MHz} / 128 \text{ (prescaler)} = 125 \text{ KHz}$. Každý A/D převod zabere kontroléru 13 kroků (operací), tedy výsledný vzorkovací kmitočet který máme

k dispozici je $125 \text{ KHz} / 13 = 9615 \text{ Hz}$. Tato hodnota je absolutní maximum, ve skutečnosti bude ještě o něco málo nižší, jelikož některé takty procesoru budou využity pro komunikaci s bezdrátovým modulem. Protože se pro komunikační účely běžně používá vzorkovací frekvence 8 kHz , je tato hodnota dostatečná.



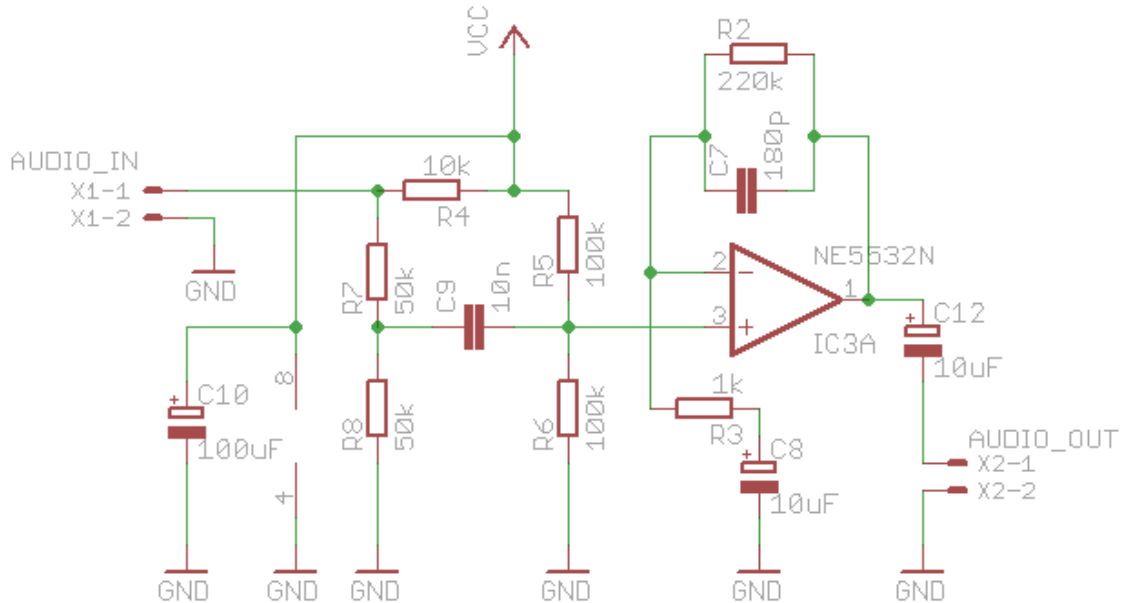
Obr. 3.1: Elektretový mikrofon

Vstupní elektroakustickou periferií má být podle zadání elektretový mikrofon, který obvykle disponuje rozpětím přenášených frekvencí v rozmezí $20 \text{ Hz} - 16 \text{ kHz}$. Vzhledem k nižšímu vzorkovacímu kmitočtu A/D převodníku je vhodné tuto frekvenční charakteristiku omezit vhodným kmitočtovým filtrem - dolní propustí, jejíž mezní frekvence (f_c viz. obr. 3.2) bude na úrovni frekvence převodníku. Toto frekvenční omezení také odstraní případný šum a nežádoucí rušení naindukované v nízkofrekvenční části obvodu. Napětí výstupního signálu elektretového mikrofonu je v řádech několika milivoltů, zatímco vstupní A/D převodník kontroléru ATmega převádí hodnoty napětí v rozsahu $0 \text{ V} - 5 \text{ V}$, je tedy třeba tento signál patřičně zesílit.



Obr. 3.2: Závislost zesílení na frekvenci – aktivní dolní propust

Pro funkci aktivního kmitočtového filtru byl zvolen nízkošumový operační zesilovač v obvodu NE5532. Uvedený OZ je zapojen jako neinvertující zesilovač. Jelikož by změna vstupní impedance připojeného zdroje audiosignálu v klasickém zapojení změnila i charakteristiku filtru, je frekvenční filtr umístěn ve zpětné vazbě operačního zesilovače. Pro vývoj a ověření funkce aktivního filtru bylo použito laboratorní pracoviště s generátorem sinusového průběhu a osciloskopem (viz. obr. 3.4).



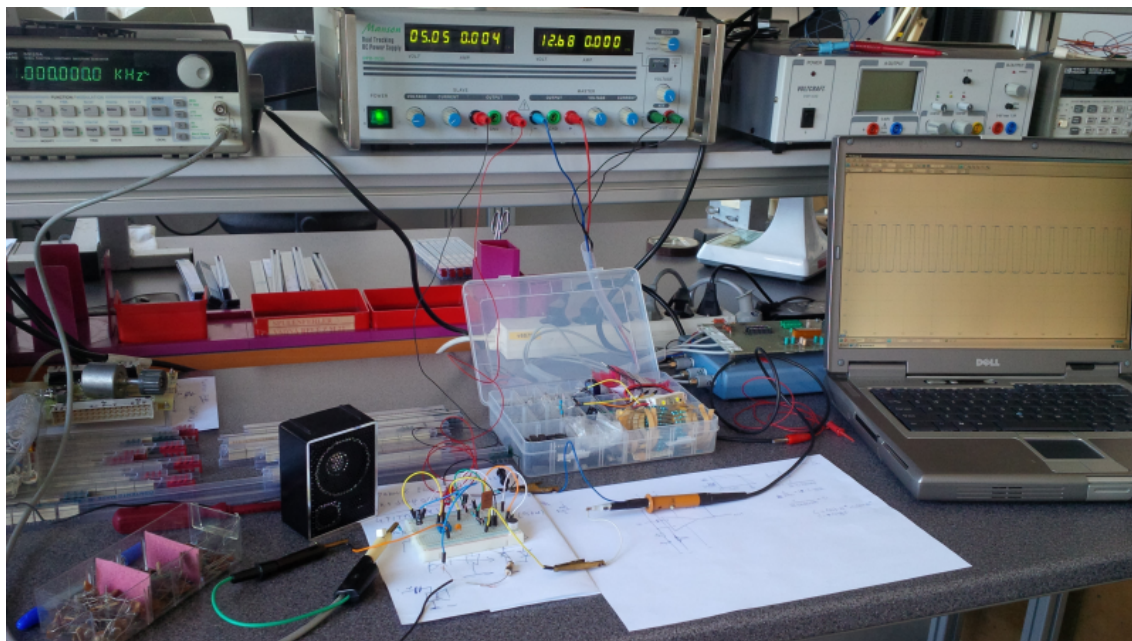
Obr. 3.3: Schéma aktivního filtru s operačním zesilovačem

Výpočet mezní frekvence kmitočtového filtru:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad , \quad C = \frac{1}{2\pi R f_c} = \frac{1}{2\pi \cdot 220000 \cdot 4000} \approx 180 \text{ pF} \quad (3.1)$$

Vstup signálu je nastaven odporovým děličem na co největší možný rozkmit tak, aby ještě nedocházelo k přebuzení a zkreslení signálu. Následně je přiveden přes kondenzátor C9 na neinvertující vstup operačního zesilovače. Tento signál zesílí podle poměru hodnot rezistorů R2 a R3, zde tedy na maximální zesílení. Výpočet hodnoty zpětnovazebního kondenzátoru pro omezení nežádoucích vysokých kmitočtů byl proveden tak, aby byl s rezervou splněn Shannonův teorém a nedocházelo k aliasingu a zkreslení signálu jak je patrné z výpočtu 3.1. Nejvyšší kmitočet přenášeného signálu je tedy s jistou rezervou menší než polovina vzorkovací frekvence A/D převodníku. V praxi se pro telekomunikační účely používají kmitočty 0,3 kHz až 3,4 kHz. Mezní

frekvence aktivního filtru byla tedy uvažována pro frekvenci 4 kHz, pro níž vychází hodnota zpětnovazebního kondenzátoru 180 pF. Na neinvertující vstup je spolu se vstupem signálu přivedena referenční hodnota napětí 2,5 V pro využití co nejširšího spektra A/D převodníku.



Obr. 3.4: Testování aktivního filtru s operačním zesilovačem

3.3 Zpracování a odeslání signálu

Po digitalizaci vstupního audiosignálu je třeba jej v binární podobě předat bezdrátovému modulu. Signál z výstupu zesilovacího filtru je přiveden na analogový vstup mikrokontroléru, kde se nachází 10-bitový analogově-digitální převodník. Ke zpracování vzorků signálu je v MCU se svolením autora použita knihovna RF24Audio, která je volně dostupná na internetu.[16] Program kontroléru tedy spočívá v základních proměnných, který udávají fyzické adresy jednotek, ovládací vstupy a výstupní časovací piny komunikačního rozhraní SPI.

3.3.1 Rozhraní SPI

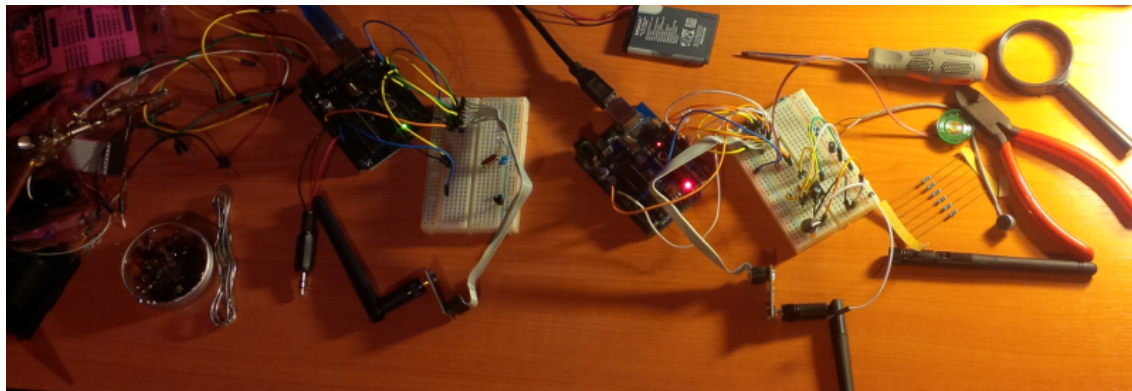
SPI (neboli Serial Peripheral Interface) je jedno ze sériových komunikačních rozhraní určených pro komunikaci dvou či více zařízení, kdy jedno je vždy master (obvykle mikrokontrolér jako v našem případě) a ostatní slave. Je běžně využíváno například u paměťových karet, displejů a různých senzorů.

Zařízení pracující jako master generuje hodinový signál (označený jako SCK), rozvedený paralelně ke všem ostatním slave zařízením, což umožňuje synchronní a obousměrný přenos dat po vodičích označených MOSI (Master out slave in) a MISO (Master in slave out). Čtvrtý a poslední vodič je označován jako CSN popř. SS (Slave select) a je využit k označení zařízení jako slave.

3.4 Návrh a konstrukce jednotky

Značnou roli při návrhu samotného zapojení hrála dostupnost použitých součástek. Všechny použité díly a součástky se dají sehnat od tuzemských dodavatelů. Jako pouzdro pro komunikační jednotky byly použity plastové krabičky KM26 od distributora GM Electronics, které jsou přímo navrženy pro použití 9V baterie, což je vzhledem k rozpětí napájecího napětí vyhovující. Krabička se skládá ze dvou dílů spojených vrutem a z boku disponuje vysouvacím krytem pro výměnu baterie. Rozměry krabičky jsou 25 mm x 60 mm x 110 mm.

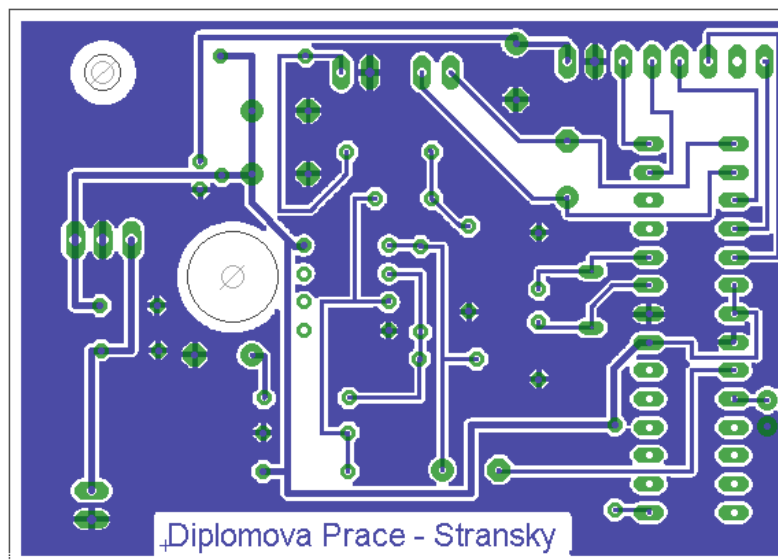
Prvotní návrh jednotek byl zhotoven v nepájivém poli pro otestování funkce a případné doplnění nebo změny hodnot součástek (viz obr. 3.5). Pro programování mikrokontrolérů byly použity vývojové desky Arduino Uno R3.



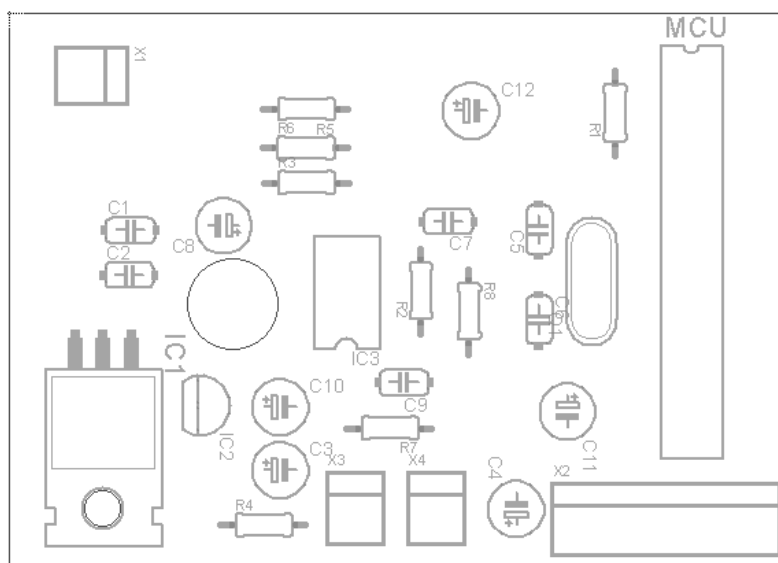
Obr. 3.5: Vývoj komunikačních jednotek v nepájivém poli

Celkové schéma zapojení a deska plošného spoje byla navržena v programu Eagle 5.11.0 Light Edition, který je pro neziskové účely dostupný zdarma. DPS (deska plošných spojů) byla navržena s ohledem na rozměry a konstrukci krabičky, tedy v rozměrech 50 mm x 70 mm včetně 8 mm otvoru pro průchod plastové nohy se závitem. Při návrhu desky byl kladen důraz na vhodné rozložení součástek vzhledem ke konstrukci krabičky a krátkými vzdálenostmi mezi kondenzátory a jim náležitou součástkou pro co největší možné potlačení rušení a šumu. Zemnicí spoj GND byl proveden rozlitím vrstvy na všechny nevyužitá místa desky, což jednak opět stíní

obvody proti rušení a dále šetří leptací roztok při samotné výrobě. Deska byla vyrobena fotocestou za použití cuprexitu FR4 o tloušťce 1,5 mm.



Obr. 3.6: Deska plošného spoje - strana spojů



Obr. 3.7: Deska plošného spoje - osazovací plán

Součástka	Hodnota	Typ/pouzdro	Počet
Krabička plastová	–	KM26 ABS	1
Vypínač páčkový	–	P-KNX1	1
Spínač tlačítkový	–	P-PB11	1
Konektor jack 3,5mm	–	SCJ-0351-1	2
Napájecí konektor 9V	–	006-PI	1
ATmega328	–	SDIP28	1
NE5532	–	DIL8	1
MAX756	–	DIL08	1
HT7533	–	TO92	1
XTAL	16MHz	QS	1
C1	0,33u	keramický	1
C2	0,1u	keramický	1
C3, C8, C12	10u	elektrolytický	3
C4, C10	100u	elektrolytický	2
C5, C6	22p	keramický	2
C7	150p	keramický	1
C9	10n	keramický	1
C11	0,1u	elektrolytický	1
R1, R4	10k	1206	2
R2	220k	1206	1
R3	1k	1206	1
R4	10k	1206	1
R5, R6	100k	1206	2
R7, R8	50k	1206	2

Tab. 3.1: Seznam součástek pro jednotlivé jednotky

Po zhotovení desky plošných spojů byly vyvrtány otvory pro součástky a pro plastový průchod krabičky. Následně byla deska osazena a zapájena podle osazovacího plánu (viz. obr. 3.7). Deska komunikačního modulu byla k hlavní DPS připojena pomocí vícežilového plochého kabelu. Následně byly do plastové krabičky vyvrtány ve vhodných místech čtyři otvory o průměru 6 mm pro vypínač, RP-SMA konektor antény, vstupní a výstupní 3,5 mm jack konektory. Pro spínač určený pro zahájení komunikace byl vyvrtán otvor o průměru 7 mm.



Obr. 3.9: Zhotovené komunikační jednotky

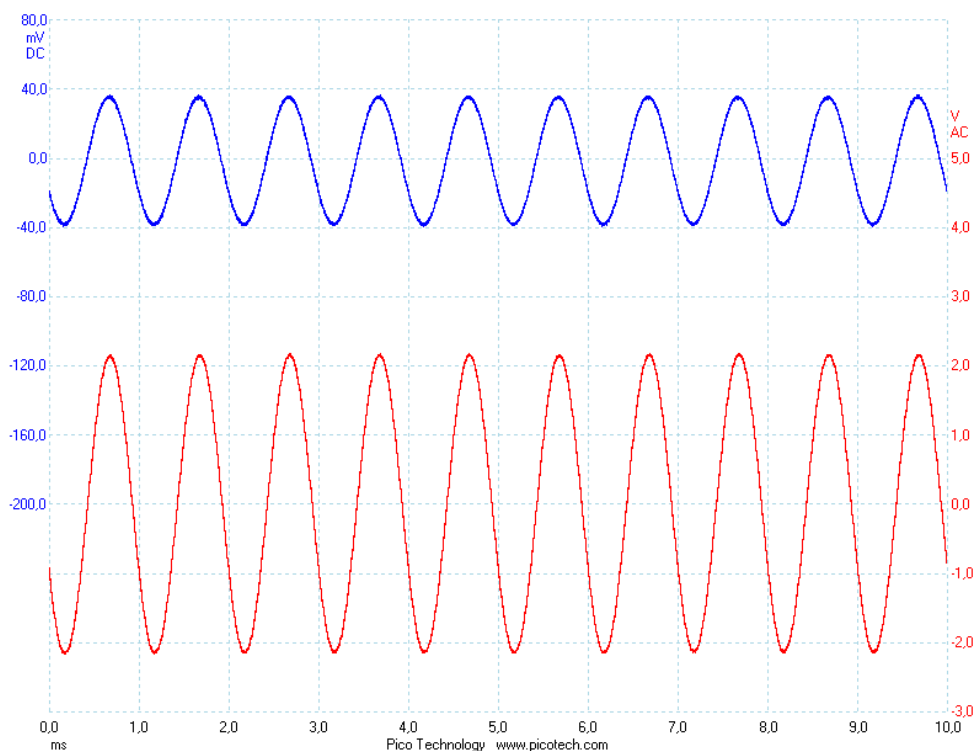
Po vložení hlavní desky plošných spojů byl na bok krabičky umístěn komunikační modul, konektory, spínač a vypínač. Konektory a ovládací prvky byly následně připojeny k předem připraveným vývodům desky. Do spodní části krabičky byla umístěna 9V baterie a připojena ke připravenému konektoru. Veškeré ovládací a výstupní prvky byly utaženy a deska plošných spojů spolu s komunikačním modulem byly zafixovány tavným lepidlem. Po sestavení a sešroubování krabičky je jednotka hotová a připravena k použití.

3.5 Měření a testování jednotek

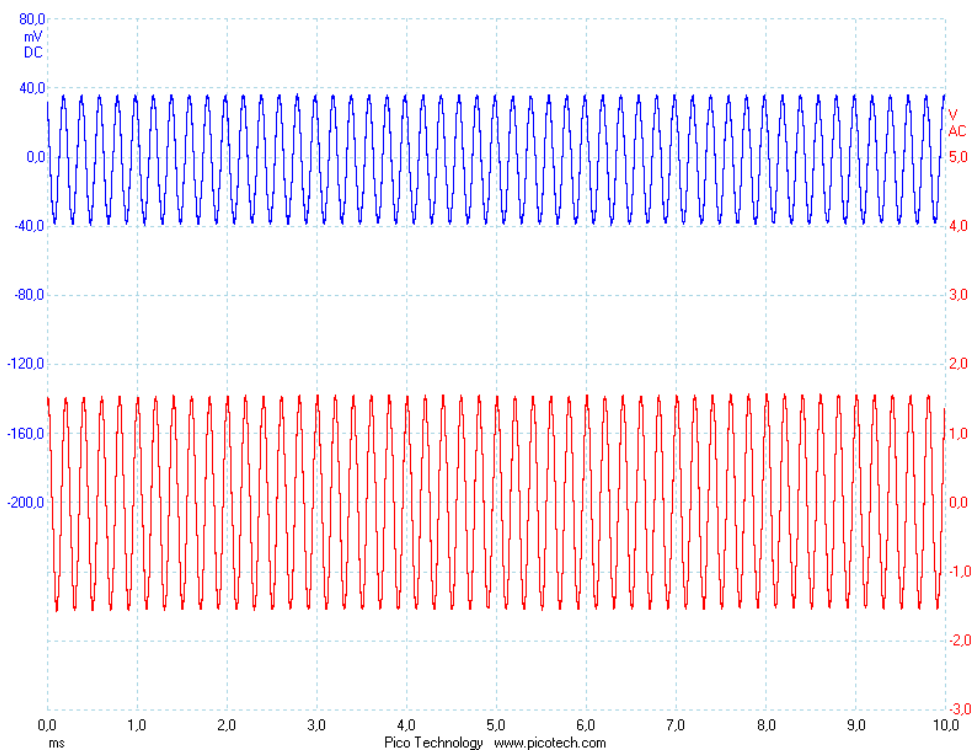
Po zhotovení obou jednotek následoval test jejich funkčnosti, jež se ověřila hned při prvním zapojení.

Při laboratorním testu aktivního filtru bylo využito generátoru signálu se sinusovým průběhem pro ověření funkce filtru. Na vstupech z osciloskopu (obr. 3.10, 3.11 a 3.12) je patrný úbytek zesílení při přibližování se a překračování mezní frekvence filtru f_c . Taktéž je patrné, že nejvyšší rozkmit výstupu je lehce pod hranicí 5 V, tedy ideální pro vstupní A/D převodník mikrokontroléru.

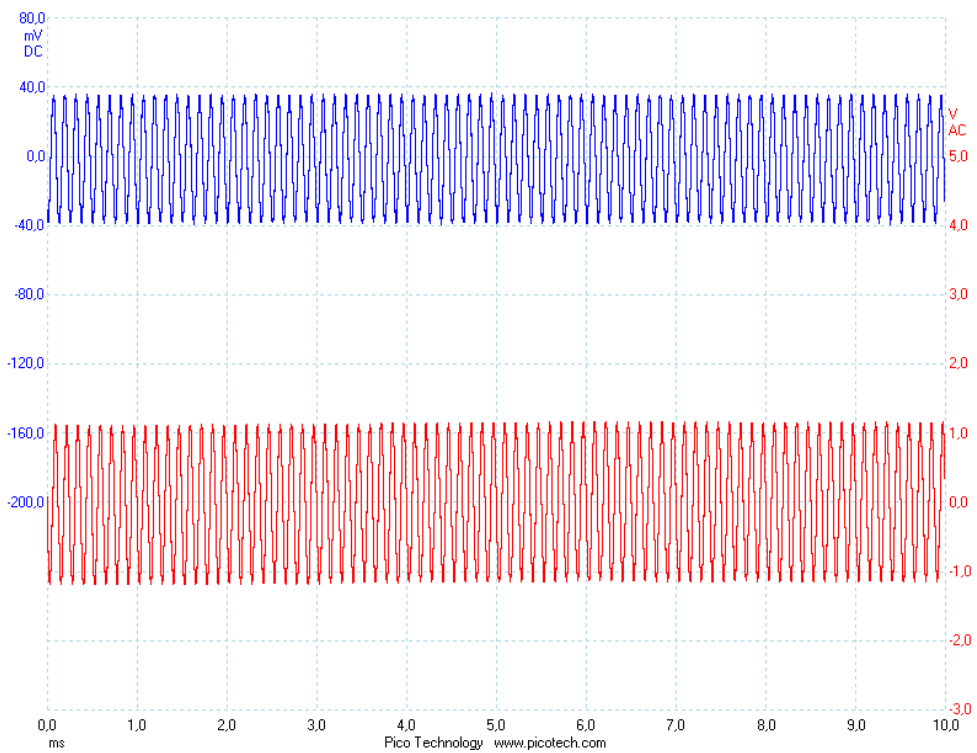
Zvolený bezdrátový modul nedisponuje RSSI (indikace síly přijatého signálu), nýbrž jen RDP (detekce přijatého vysílacího výkonu), což je pouze jeden bit, který nabyde hodnoty true, pokud je přijímaný výkon nad hranicí -64 dBm. Tento fakt bohužel znesnadňuje proveditelnost měření dosahu modulů.



Obr. 3.10: Přenos aktivního filtru při sinusovém signálu 1kHz

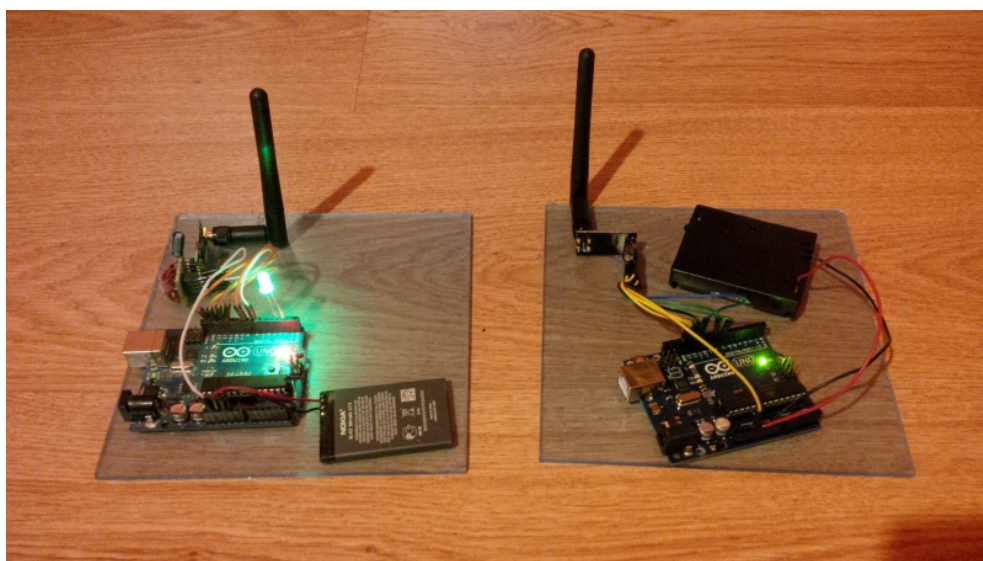


Obr. 3.11: Přenos aktivního filtru při sinusovém signálu 5kHz

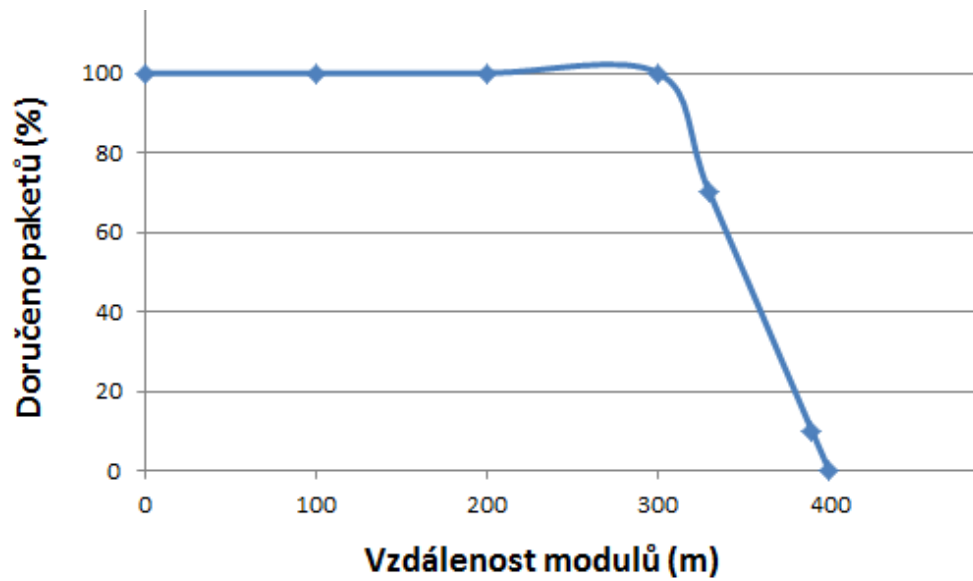


Obr. 3.12: Přenos aktivního filtru při sinusovém signálu 8kHz

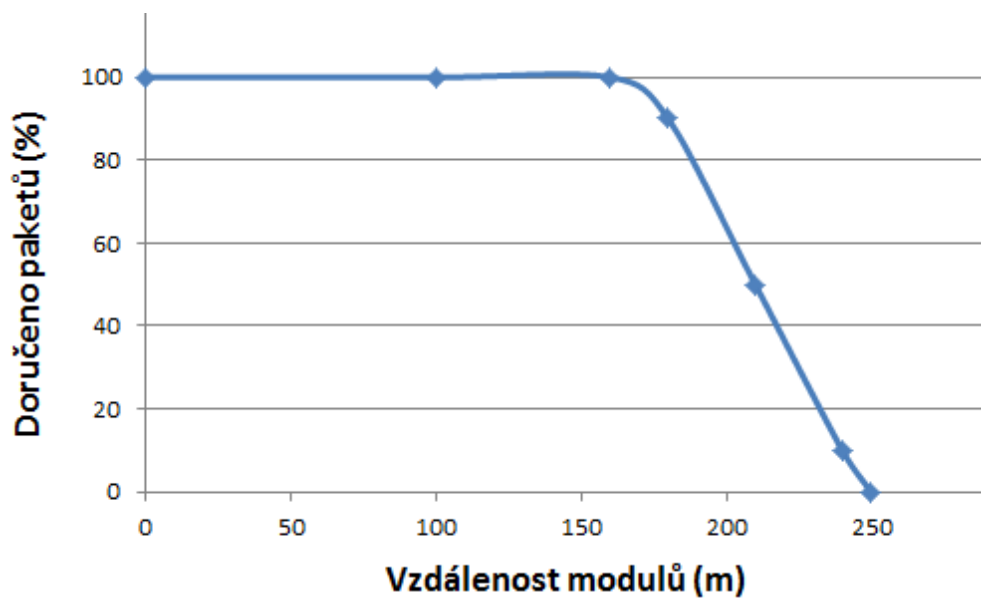
Pro přibližné měření byl použit jednoduchý kód, který zasílá druhému modulu paket a ten jej vrátí nezměněný zpět. Toto se opakuje každou vteřinu a úspěšný návrat paketu je signalizován rozsvícením zelené LED diody. V případě chyby nebo nepřijetí paketu v původní podobě LED zhasne. Touto metodou bylo tedy provedeno měření na volném prostranství s přímou viditelností a nepřímou viditelností (přes překážku). Výsledky tohoto měření jsou velice uspokojivé, jelikož moduly byly schopny bez ztráty paketů komunikovat až na 300 m a cca 150 m bez přímé viditelnosti, jak je znázorněno na obr. 3.13 a 3.14.



Obr. 3.13: Experimentální zapojení pro měření závislosti ztrátovosti paketů na vzdálenosti modulů



Obr. 3.14: Závislost ztrátovosti paketů na vzdálenosti modulů – přímá viditelnost



Obr. 3.15: Závislost ztrátovosti paketů na vzdálenosti modulů – nepřímá viditelnost

4 ZÁVĚR

Diplomová práce uvádí do problematiky digitální bezdrátové komunikace a technik s ní spjatých jako je digitalizace a modulace signálu. S ohledem na vyhlášky ohledně frekvenčních pásem bylo pro účely komunikační jednotky vybráno bezlicenční pásmo ISM. Při výběru mikroprocesoru řídicího jednotlivé jednotky jsem zvolil MCU AVR vzhledem k předchozím zkušenostem s jeho využitím. Při výběru RF modulu, který zajišťuje samotný přenos jsem se s ohledem na zadaná kritéria rozhodl pro modul s mikročipem nRF24L01+ od firmy Nordic Semiconductor. V praktické části práce jsou nejprve znázorněny prvotní návrhy zařízení, které jsou prvním krokem pro finální návrh jednotek. Ve finálním návrhu byly dále zahrnuty napájecí regulátory zvláště pro MCU i pro RF modul, jelikož mají různé rozpětí napájecích napětí. Pro zesílení a úpravu kmitočtového spektra vstupního signálu byl použit nízkošumový aktivní filtr založený na ovodu NE5532. Původně bylo uvažováno o komplexnějším filtru pro dosažení vyšší strmosti, ale z důvodu časové tísně a uspokojivého výsledku uvedeného zapojení bylo od tohoto upuštěno. Uvedená schémata vychází z doporučených zapojení z datového listu výrobce, upravená jak podle výpočtů, tak empiricky pro dosažení co nejlepších možných výsledků. Jednotky fungovaly velice uspokojivě na první zapojení, ačkoliv byl za regulátor LM7805 zařazen ještě filtrační kondenzátor řešící zkreslení signálu při slábnutí baterie.

V praktické části je dále zahrnuto měření charakteristiky aktivního filtru, kde je patrné klesající zesílení při přiblížení mezní frekvenci filtru f_c a rozkmit necelých 5 V přizpůsobený pro vstupní A/D převodník mikrokontroléru.

Posledním měřením jsou závislosti ztrátovosti paketů na vzdálenosti modulů, tedy praktické měření dosahu komunikačních jednotek.

LITERATURA

- [1] *A Brief History of Data Communication* [online]. 2004 [cit. 10. 11. 2014].
Dostupné z URL: http://www.comphist.org/computing_history/new_page_8.htm
- [2] *History of wireless communication* [online]. 2013 [cit. 10. 11. 2014].
Dostupné z URL: <http://www.slideshare.net/ajal4u/history-of-wireless-communication-15856035>
- [3] *Introduction and History of Communications Systems* [online]. 2014 [cit. 10. 11. 2014].
Dostupné z URL: <http://www.ni.com/white-paper/14797/en/>
- [4] *Báječný svět počítačových sítí, část V. - Základy datových komunikací* [online]. 2014 [cit. 15. 11. 2014].
Dostupné z URL: <http://www.earchiv.cz/b05/b0700001.php3>
- [5] *Šířka pásma a její dělení* [online]. [cit. 15. 11. 2014].
Dostupné z URL: <http://www.earchiv.cz/a91/a143c110.php3>
- [6] *Přenos informací elektromagnetickým vlněním* [online]. [cit. 22.11.2014].
Dostupné z URL: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/369-prenos-informaci-elektromagnetickym-vlnenim>
- [7] *Analog & digital modulation techniques: an overview* [online]. [cit. 22.11.2014].
Dostupné z URL: <http://techniajournal.com/attachments/article/128/ANALOG%20&%20DIGITAL%20MODULATION.pdf>
- [8] *Modulation: Making the Message Fit the Medium* [online]. 2008 [cit. 22.11.2014].
Dostupné z URL: <http://ironbark.xtelco.com.au/subjects/DC/lectures/7/>
- [9] *Sampling, quantizing, coding & multiplexing* [online]. [cit. 28.11.2014].
Dostupné z URL: <http://www.daenotes.com/electronics/communication-system>
- [10] *M. Ptáček, Digitální zpracování a přenos obrazové informace. Praha: Nadas, 1983. 454 s.*
- [11] *Fundamental Concepts and Techniques* [online]. 2003 [cit. 28.11.2014].
Dostupné z URL: http://ptgmedia.pearsoncmg.com/images/0134947908/samplechapter/0134947908_ch03.pdf

- [12] *Digitalizace analogového signálu* [online]. [cit. 28.11.2014].
Dostupné z URL: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1355-digitalizace-analogoveho-signalu>
- [13] *Využívání vymezených rádiových kmitočtů* [online]. [cit. 29.11.2014].
Dostupné z URL: <http://www.ctu.cz/ctu-informuje/jak-postupovat/radiove-kmitocty/vyuzivani-vymezenych-radiovych-kmitoctu.html>
- [14] *ITU – Radio Regulations* [online]. [cit. 6.12.2014].
Dostupné z URL: <http://www.itu.int/pub/R-REG-RR-2012>
- [15] *Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/05.2014-3 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu* [online]. [cit. 6.12.2014].
Dostupné z URL: http://www.ctu.cz/cs/download/oop/rok_2014/vo-r_10-05_2014-03.pdf
- [16] *RF24Audio - GitHub* [online]. [cit. 8.5.2015].
Dostupné z URL: <https://github.com/TMRh20/RF24Audio>

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Šířka pásma	12
1.2	Amplitudová modulace [8]	13
1.3	Frekvenční modulace [8]	14
1.4	Fázová modulace [8]	15
2.1	Blokové schéma komunikační jednotky	22
2.2	Schéma zapojení komunikační jednotky	23
3.1	Elektretový mikrofón	25
3.2	Závislost zesílení na frekvenci – aktivní dolní propust	25
3.3	Schéma aktivního filtru s operačním zesilovačem	26
3.4	Testování aktivního filtru s operačním zesilovačem	27
3.5	Vývoj komunikačních jednotek v nepájivém poli	28
3.6	Deska plošného spoje - strana spojů	29
3.7	Deska plošného spoje - osazovací plán	29
3.8	Celkové schéma zapojení komunikační jednotky	30
3.9	Zhotovené komunikační jednotky	32
3.10	Přenos aktivního filtru při sinusovém signálu 1kHz	33
3.11	Přenos aktivního filtru při sinusovém signálu 5kHz	34
3.12	Přenos aktivního filtru při sinusovém signálu 8kHz	34
3.13	Experimentální zapojení pro měření závislosti ztrátovosti paketů na vzdálenosti modulů	35
3.14	Závislost ztrátovosti paketů na vzdálenosti modulů – přímá viditelnost	36
3.15	Závislost ztrátovosti paketů na vzdálenosti modulů – nepřímá viditelnost	36

SEZNAM TABULEK

1.1	Jednotlivá ISM pásma podle ITU [14]	19
3.1	Seznam součástí pro jednotlivé jednotky	31

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

- GSM Globální systém pro mobilní komunikaci – původně Groupe Spécial Mobile
- AM Amplitude modulation – amplitudová modulace
- FM Frequency modulation – frekvenční modulace
- ASK Amplitude-shift keying – klíčování amplitudovým posuvem
- FSK Frequency-shift keying – klíčování frekvenčním posuvem
- PSK Phase-shift keying – klíčování fázovým posuvem
- GFSK Gaussian frequency-shift keying – klíčování frekvenčním posuvem s použitím gaussovske dolní propusti
- QAM Quadrature amplitude modulation – kvadrurní amplitudová modulace
- CD Compact disk – kompaktní disk
- ČTÚ Český telekomunikační úřad
- ITU International telecommunication union – mezinárodní telekomunikační organizace
- ISM Industrial, scientific and medical band – pásmo pro rádiové vysílání pro průmyslové, vědecké a zdravotnické využití
- DECT Digital enhanced cordless telecommunications – standart určený pro bezdrátové telefony
- NFC Near field communication – technologie rádiové komunikace na velmi krátkou vzdálenost
- RF Radio frequency – rádiové vysílání (bezdrátová komunikace)
- CRC Cyclic redundancy check – cyklický redundantní součet (metoda ověření správnosti dat)
- SPI Serial Peripheral Interface – sériové periferní komunikační rozhraní
- RSSI Received signal strength indication – indikace síly přijatého signálu
- RDP Received power detector – detekce přijatého vysílacího výkonu