

Ultrazvukové vidění pro robotické aplikace

Bc. Libor Smýkal

Diplomová práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Libor Smýkal**
Osobní číslo: **A13427**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Informační technologie**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Ultrazvukové vidění pro robotické aplikace**
Téma anglicky: **Ultrasound Imaging for Robotic Applications**

Zásady pro vypracování:

1. **Prostudujte a analyzujte stávající systémy pro ultrazvukové vidění.**
2. **Vytvořte schema zapojení a desku plošných spojů pro systém ultrazvukového vidění s více senzory.**
3. **Implementujte základní SW rutiny pro vysílání a příjem ultrazvukového signálu.**
4. **Ověřte funkci navržené desky na jednoduchých scénách s jednou překážkou.**
5. **Navrhněte algoritmus pro analýzu scén s více překážkami a proveďte experimentální ověření jeho funkce.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **VÁŇA, Vladimír. ARM pro začátečníky. Praha: BEN – technická literatura, 2009, 195 s. ISBN 978-80-7300-246-6.**
2. **CATSOULIS, John. Designing embedded hardware. 2nd ed. Sebastopol: O'Reilly, 2005, 377 s. ISBN 05-960-0755-8.**
3. **VEDRAL, Josef a Jan FISCHER. Elektronické obvody pro měřicí techniku. ČVUT, 1999, 340 s. ISBN 80-01-02966-2.**
4. **YIU, Joseph. The Definitive Guide to the ARM Cortex-M3, Second Edition. Newnes, 2009, 479 s. ISBN 978-1856179638.**
5. **OBRAZ, Jaroslav. Ultrazvuk v měřicí technice. 2. uprav. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984, 485 s.**
6. **MARTINEK, Radislav. Senzory v průmyslové praxi. 1. vydání. Praha : BEN – technická literatura, 2004. 199 s. ISBN 80-7300-114-4.**
7. **UHLÍŘ, Jan a Pavel SOVKA. Číslíkové zpracování signálů. Vydavatelství ČVUT, 2002, 327 s. ISBN 8001026132.**
8. **ŠONKA, Milan; HLAVÁČ, Václav; BOYLE, Roger. Image processing, analysis, and machine vision. 3rd ed. Toronto : Thomson, 2008. 829 s. ISBN 978-049-5082-521.**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Tomáš Dulík, Ph.D.

Ústav informatiky a umělé inteligence

Datum zadání diplomové práce:

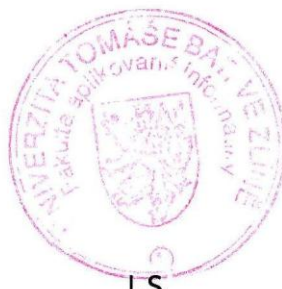
6. února 2015

Termín odevzdání diplomové práce:

15. května 2015

Ve Zlíně dne 6. února 2015

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
děkan



L.S.

doc. Mgr. Roman Jašek, Ph.D.
ředitel ústavu


Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové/bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně 14.5.2015


.....
podpis diplomanta

ABSTRAKT

Tato diplomová práce popisuje návrh a realizaci ultrazvukového vidění pro robotické aplikace. Nejprve je popsán princip šíření zvuku v prostředí a způsob odrazu zvuku od objektů. Následuje popis nejpoužívanějších druhů ultrazvukových měničů pro použití ve vzduchu a jejich základních vlastností. Dále jsou v krátkosti popsány některé stávající ultrazvukové systémy. V další části práce je proveden rozbor vybraných ultrazvukových měničů, použitého mikrokontroléru a dalších částí. Následně je popsáno schéma zapojení a deska plošného spoje. Předposlední část je zaměřena na programovou realizaci měřiče. Závěrem je provedeno měření s hotovým měřičem.

Klíčová slova: Ultrazvuk, ultrazvukový měnič, ultrazvukové vidění, mikrokontrolér, STM32F407, operační zesilovač

ABSTRACT

This thesis describes the design and implementation of ultrasound vision for robotic applications. First is described the principle of sound propagation in the environment and way of sound reflection from objects. The following describes the most frequently used types of ultrasonic transducers for use in air and their essential characteristics. Next are briefly described some current ultrasound systems. The next section describes the selected ultrasonic transducers, microcontroller and some other parts. Following part describes the circuit diagram and the PCB. Next part focuses on program implementation. Finally, a measurement is performed with the completed meter.

Keywords: Ultrasound, ultrasonic transducer, ultrasonic vision, microcontroller, STM32F407, operational amplifier

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Tomáši Dulíkovi, Ph.D. za vedení mé práce a dále za odbornou pomoc, rady a připomínky při jejím vypracování.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ZVUK A ULTRAZVUK	11
1.1 ZVUKOVÉ VLNY	12
1.2 ŠÍŘENÍ VLNĚNÍ.....	13
1.3 ODRAZ ZVUKU	13
1.4 RYCHLOST ŠÍŘENÍ ZVUKU.....	15
1.5 ÚTLUM VE VZDUCHU.....	16
1.6 ABSORPCE ZVUKU	17
2 ULTRAZVUKOVÉ MĚNIČE	19
2.1 PIEZOELEKTRICKÝ MĚNIČ.....	19
2.1.1 Piezoeletrický jev	20
2.2 KAPACITNÍ MĚNIČ	20
2.3 VLASTNOSTI MĚNIČŮ	21
2.3.1 Směrová charakteristika	21
2.3.2 Pracovní frekvence.....	22
3 STÁVAJÍCÍ ULTRAZVUKOVÉ SYSTÉMY	23
3.1 MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI	23
3.1.1 Jednoduchý a dvojitý systém	23
3.2 DETEKCE PŘEKÁŽEK S VYUŽITÍM KAMERY A ULTRAZVUKOVÉHO MĚNIČE.....	24
3.2.1 Navigace robota	25
3.3 ROZPOZNÁVÁNÍ OBJEKTU ULTRAZVUKEM.....	27
II PRAKTICKÁ ČÁST	30
4 ZPŮSOB MĚŘENÍ	31
4.1 VYSÍLÁNÍ A PŘÍJEM ULTRAZVUKOVÉHO SIGNÁLU.....	32
4.2 URČENÍ POLOHY OBJEKTU	32
5 NÁVRH SYSTÉMU	35
5.1 POUŽITÉ SOUČÁSTI.....	35
5.1.1 Ultrazvukové měniče	35
5.1.2 Mikrokontrolér	36
5.1.3 A/D převodník.....	38
5.1.4 DMA řadič	38
5.1.5 Časovače	41
5.2 SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	42
5.2.1 Napájení	42
5.2.2 Vysílací část	43
5.2.3 Přijímací část.....	44
5.3 DESKA PLOŠNÉHO SPOJE.....	45
6 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ	47

6.1	PROGRAM MIKROKONTROLÉRU	47
6.2	PROGRAM V POČÍTAČI	48
7	MĚŘENÍ.....	54
	ZÁVĚR	55
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	57
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	59
	SEZNAM OBRÁZKŮ	60
	SEZNAM TABULEK.....	62

ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá systémem ultrazvukového vidění pro robotické aplikace. Na začátek jsou uvedeny některé stávající systémy využívající ultrazvuk pro vidění nebo rozpoznávání objektů. Nejběžnější použití ultrazvuku je pro detekování objektu a změření vzdálenosti mezi tímto objektem a senzorem. Velké množství systémů využívá ultrazvuk v kombinaci s optickými senzory nebo kamerami. Systém pro detekci překážek potom pomocí ultrazvuku pouze určí přítomnost objektu a změří vzdálenost. Následně je kamerou získán obraz, ve kterém je nalezen detekovaný objekt a je vypočítána jeho velikost.

Součástí práce je vytvořit schéma zapojení a desku plošných spojů pro systém ultrazvukového vidění využívající více senzorů. Systém využívá čtyři dvojice, vždy jeden vysílač a jeden přijímač, ultrazvukových senzorů, které jsou umístěny do kříže ve vzdálenosti 7.5 cm od středu. Řídícím prvkem systému je mikrokontrolér STM32F407 od firmy ST Microelectronics.

Vysílání ultrazvukového signálu provádí v jednom okamžiku pouze jeden vysílač, který vyšle dávku 5 kmitů na frekvenci 40 kHz. Poté se čeká určitou dobu, po kterou je prováděno zpracování odraženého signálu A/D převodníkem. Uložený signál je potom přes sériovou komunikaci odeslán do počítače na zpracování. Celý postup je pak proveden pro další vysílače.

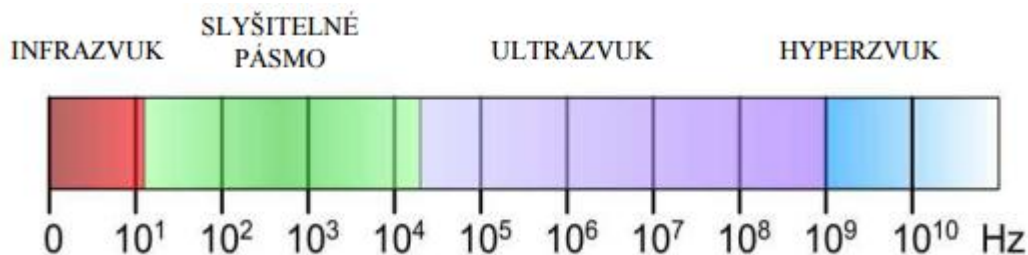
Pozice jednoho detekovaného objektu může být určena ze vzdáleností naměřených jednotlivými přijímači. Pokud vytvoříme okolo každého přijímače kulovou plochu s poloměrem naměřené vzdálenosti, je pozice objektu v místě, kde se kulové plochy protnou. Pro určení pozic více detekovaných objektů je použit stejný princip, jen je potřeba zajistit změření vzdálenosti od každého objektu.

Algoritmus provádí výše popsaný postup pro všechny přijaté hodnoty od všech senzorů. Nalezené pozice detekovaných objektů potom zobrazí.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZVUK A ULTRAZVUK

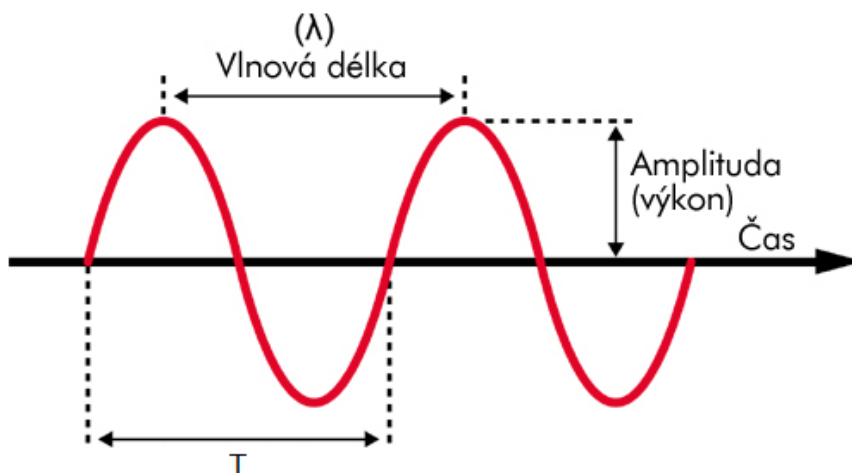
Člověkem vnímané zvukové vlnění je přibližně od frekvence 16 Hz do 16 kHz. Vlnění o frekvenci menší než 16 Hz nazýváme infrazvuk. Jako ultrazvuk uvažujeme vlnění o frekvenci větší než 16 kHz. Frekvenční rozsah ultrazvukových vln je přitom velmi široký, kde můžeme vytvářet ultrazvukové vlny s frekvencí až 1 GHz. [4]



Obr. 1. Dělení zvukových vln podle frekvence [2]

Ultrazvukové vlnění je, stejně jako zvukové vlnění, způsobeno mechanickým kmitáním (vibracemi), které se šíří vzduchem, pevnými látkami a kapalinami. Přenos mechanického kmitání umožňují molekuly obsažené v látce určitého skupenství, proto se zvuk nemůže šířit ve vakuu.

Mechanické vlnění se šíří jen pružným prostředím a jeho rychlost závisí na prostředí. Dráhu, kterou vlnění proběhne za jednu periodu T , nazveme vlnová délka λ . Vlnová délka je obecně vzdálenost kterýchkoli dvou nejbližších bodů, které kmitají se stejnou fází. [5]



Obr. 2. Mechanické vlnění [3]

1.1 Zvukové vlny

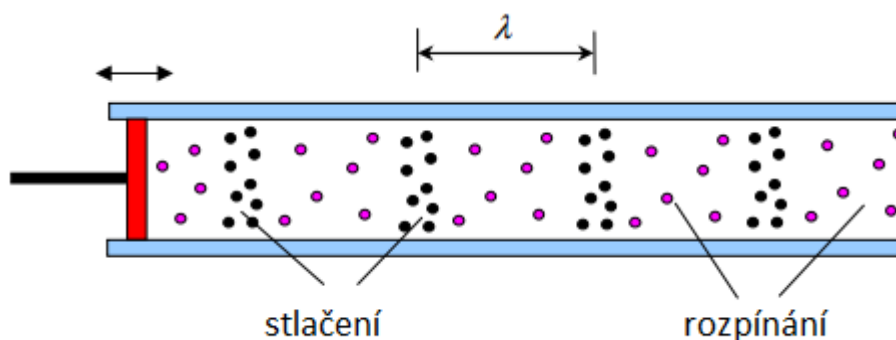
Zvukové vlny šířící se prostředím mohou být několika druhů, které se liší způsobem pohybu částic prostředí vzhledem ke směru postupu vlny. Nejběžnější a nejznámější jsou podélné zvukové vlny, kdy částice prostředí kmitají přímočaře ve směru šíření vlny (Obr. 3a). Tyto vlny se mohou šířit každým prostředím, tuhým, kapalným i plynným. Jedinou podmínkou, aby se v prostředí mohla podélná vlna šířit, jsou dostatečně velké rozměry prostředí vzhledem k vlnové délce vlny. [1]



Obr. 3. Kmitání částic prostředí při šíření vlny [1]

Příčné vlny, se opět mohou šířit prostředím s rozměry většími než je délka vlny a které odolává namáhání ve smyku tj. tuhé prostředí. Znakem těchto vln je kmitání částic kolmo na směr šíření vlny (Obr. 3b). V kapalinách a v plynech se tyto vlny nemohou vyskytnout, protože tato skupenství nekladou žádný odpor smykovému namáhání. [1]

Zvukové vlny jsou tedy podélné mechanické vlny šířící se v plynném prostředí, tj. např. vzduch.



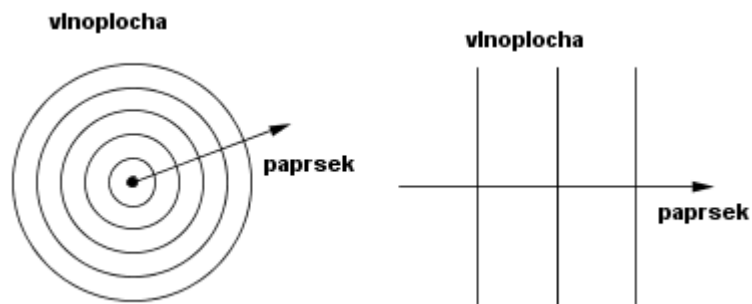
Obr. 4. Zvuková vlna šířící se v trubici [5]

V tomto případě (Obr. 4) je zvuková vlna vytvářena kmitáním pístu, který uzavírá trubici na levém konci. Při pohybu pístu doprava dochází k vychýlení částic vzduchu vedle něho,

příčemž dochází k stlačení tohoto vzduchu a tím k jeho zhuštění, a teda k nárůstu tlaku oproti původnímu. Naopak při pohybu pístu doleva se tento vzduch vrací zpět, protože se vedle pístu vytvoří prázdný prostor s nízkým tlakem – vzduch se rozpíná a dochází k jeho zředění a tlak vzduchu bude teda nižší než původní. Tyto vychýlené částice vzduchu budou narážet na sousední částice, takže se trubici bude šířit postupné zhuštění a zředění vzduchu – zvuková vlna. Samotné částice se neposouvají s tlakovou vlnou skrz médium, ale pouze oscilují kolem své výchozí pozice. [5]

1.2 Šíření vlnění

Pokud se určitý bod prostředí, např. vzduch, stane zdrojem kmitavého rozruchu, postupuje vlnění ze zdroje všemi směry rychlostí v a za dobu t dosáhne vzdálenosti $r = vt$. Všechny body vlnění z bodového zdroje ve stejnou dobu, leží na kulové ploše, která se nazývá vlnoplocha. Všechny body stejné vlnoplochy kmitají se stejnou fází. Směr šíření vlnění je určen přímkou zvanou paprsek, která vychází ze zdroje vlnění kolmo na vlnoplochu. V blízkosti bodového zdroje vlnění se vytvářejí kulové vlnoplochy. Ve větších vzdálenostech od zdroje je však zakřivení kulových vlnoploch tak malé, že můžeme jejich části nahradit rovinnými vlnoplochami. [8]



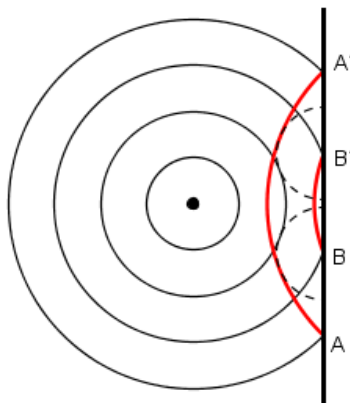
Obr. 5. Šíření vlnění [8]

1.3 Odraz zvuku

Pokud vlnění dorazí k překážce, nastane podle rozměrů překážky, některá ze dvou možností.

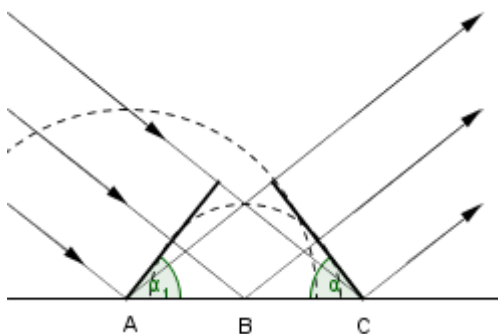
Překážka je větší než vlnové délka, dojde k odrazu vlnění. Princip odrazu vlnění lze vysvětlit pomocí Huygensova principu zobrazeno na Obr 6. V době, kdy vlnoplocha dorazila do bodu A, A', již vznikly kolem bodů B, B' elementární vlnoplochy vyvolané

předchozí vlnoplochou. Vnější obalová plocha elementárních vlnoploch potom tvoří výsledný tvar odražené vlnoplochy. [8]



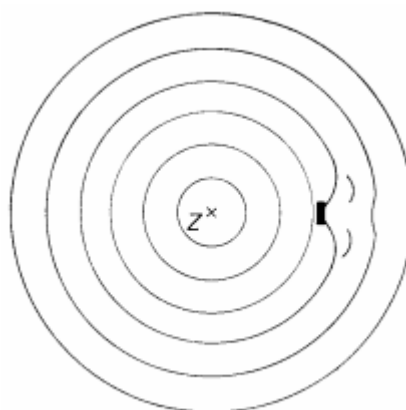
Obr. 6. Vznik odražené kulové vlnoplochy [8]

Podobně lze sestavit tvar odražené vlnoplochy v případě odrazu rovinné vlnoplochy Obr. 7. Rovinná vlnoplocha svírá s překážky úhel dopadu α . Vlnění dorazí k překážce postupně v bodech A, B, C. V době, kdy vlnění dorazilo do bodu C, vznikla kolem bodu A a B elementární vlnoplocha. Vnější obálka obou elementárních vlnoploch dává vlnoplochu odraženou, která je rovinná a svírá s překážkou úhel odrazu α' . Úhel odrazu vlnění se rovná úhlu jeho dopadu na překážku, platí tedy zákon odrazu vlnění. [8]



Obr. 7. Vznik odražené rovinné vlnoplochy[8]

Překážka je menší než vlnová délka, dochází tedy k ohybu vlnění Obr. 8. Princip ohybu vlnění lze také vysvětlit pomocí Huygensova principu. Okraje překážky, ke kterým vlnění dorazí, se stanou zdrojem elementárních vlnění, která se v případě blízkých okrajů, tj. malých rozměrů překážky, za překážkou spojí, čímž vytvoří souvislou výslednou vlnoplochu. [3]



Obr. 8. Ohyb vlnění [3]

1.4 Rychlost šíření zvuku

Rychlost zvuku závisí na druhu prostředí, hustotě prostředí a na teplotě t , dále na přítomnosti dalších látek, vodní páry a vlhkosti vzduchu. Pro rychlost zvuku ve vzduchu platí vztah (1)

$$v_t = v_0 + k \cdot t \quad (1)$$

kde v_t je velikost rychlosti zvuku při teplotě t , konstanta $k = 0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a $v_0 = 331,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je rychlost zvuku ve vzduchu při teplotě 0°C . Obvykle počítáme s hodnotou $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, která odpovídá teplotě vzduchu asi 20°C . V kapalných a pevných látkách je rychlost zvuku větší než ve vzduchu. [3]

Tab. 1. Rychlost šíření zvuku v různých látkách

Látka	Teplota ($^\circ\text{C}$)	Rychlost ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
Vodík	0	1270
Oxid uhličitý	25	259
Kyslík	25	316
Vzduch	0	331,4
Voda	25	1440
Led	-4	3250
Měď	20	3500
Ocel	20	5000

Vlastnost prostředí, která nejvíce ovlivňuje rychlost zvuku je teplota, proto můžeme pro výpočet rychlosti zvuku ve vzduchu použít zjednodušenou rovnici (1). Použití této rovnice

je dostatečně přesné pro teploty od -20°C do 50°C . Pro výpočet rychlosti zvuku pro vyšší teploty nebo jinací prostředí je nutné použít více obecnou rovnici. Závislost rychlosti zvuku ve vzduchu na teplotě je pro vybrané teploty zobrazeno v tabulce Tab. 2

Tab. 2. Závislost rychlosti zvuku ve vzduchu na teplotě [7]

Teplota ($^{\circ}\text{C}$)	Rychlost (m.s^{-1})
-20	319
-10	325
0	331
10	337
20	343
50	360
100	387
200	436

1.5 Útlum ve vzduchu

Při průchodu ultrazvukové vlny prostředím, klesá její energie, a tím i její akustický tlak v závislosti na vlastnostech prostředí. V plynech závisí útlum na ztrátách α_v způsobených viskozitou (vnitřním třením) a na ztrátách α_T vznikajících vlivem tepelné vodivosti a lze jej vyjádřit vztahem

$$\alpha = \alpha_v + \alpha_T = \frac{2\pi^2}{\rho c^3} \left[\frac{4}{3}\eta + \lambda_T \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right] f^2 = \alpha f^2 \quad (2)$$

kde ρ je hustota

c - rychlost ultrazvuku

η - dynamická viskozita

λ_T - tepelná vodivost

c_v, c_p - měrné teplo při stálém objemu a stálém tlaku

Z výrazu (2) je vidět, že útlum v plynech je úměrný čtverci frekvence. Tato rovnice má pouze informativní teoretickou hodnotu, protože obvykle vychází mnohem menší než hodnoty získané měřením. To lze vysvětlit relaxačními ztrátami zvuku, které způsobují odchylku od kvadratické závislosti útlumu na frekvenci. [1]

1.6 Absorpce zvuku

Při dopadu zvukového vlnění na překážku (např. stěna, dveře) část zvukové energie pronikne do druhého prostředí a zbytek se od překážky odrazí. Podle zákona odrazu, je intenzita odraženého (reflektovaného) vlnění I_r vždy menší než intenzita I_0 vlnění dopadajícího na stěnu. Část zvukové energie, která pronikla do překážky je z hlediska místnosti ztracená (pohlčená). Platí vztah:

$$I_0 = I_a + I_r \quad (3)$$

kde I_a je intenzita pohlceného (absorbovaného) vlnění. [9]

Na základě toho je možné zavést:

1. Koeficient odrazivosti (reflexe) zvuku při odrazu

$$r = \frac{I_r}{I_0} \quad (4)$$

2. Koeficient pohltivosti (absorpce) zvuku při odrazu.

$$\alpha = \frac{I_a}{I_0} \quad (5)$$

V tomto případě evidentně platí, že $r + \alpha = 1$ a je-li jeden ze sčítanců nulový, druhý má maximální hodnotu rovnou jedné. V tom případě se zvuk buď beze zbytku odráží ($r = 1$, v praxi nenastává) nebo beze zbytku absorbuje ($\alpha = 1$). [9]

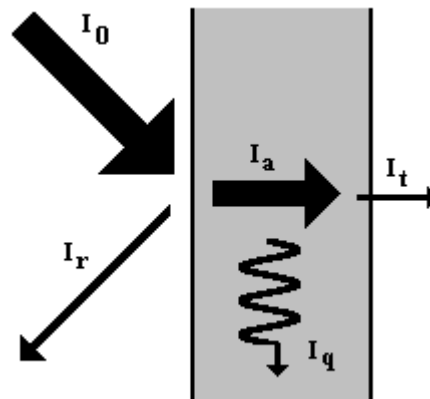
Zvuk absorbovaný stěnou z hlediska uvažované místnosti nemusí být zcela přeměněn vnitřními ztrátami v teplo, ale může ho část projít stěnou do místnosti druhé (např. dveřmi). Označíme-li I_q intenzitu vlnění přeměněného ve stěně v teplo a I_t intenzitu prošlou (transferovanou) do vedlejší místnosti, platí:

$$I_a = I_q + I_t \quad (6)$$

Pro relativní vyjádření se zavádí koeficient zvukové průzvučnosti (propustnosti) vztahem

$$\tau = \frac{I_t}{I_0} \quad (7)$$

Schematické rozdělení intenzity zvuku při dopadu na stěnu ukazuje Obr. 9.



Obr. 9. Rozdělení intenzity zvuku při dopadu na stěnu [9]

Koeficient pohltivosti závisí především na materiálu a charakteru jeho povrchu, ale mění se i s frekvencí zvukového vlnění - pro nižší frekvence je koeficient absorpce menší a pro vyšší frekvence je naopak o vyšší. Tento koeficient je větší u látek pórovitých (koberec, závěsy, děrované panely), velmi malý je potom u materiálů kompaktních a hladkých (kovy, dlaždice, sklo). [9]

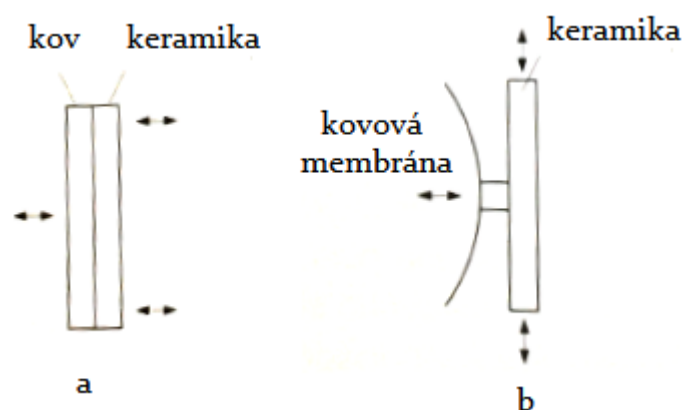
2 ULTRAZVUKOVÉ MĚNIČE

Jako měniče zvuku se pro ultrazvukové senzory používají nejčastěji piezoelektrické měniče. Ultrazvukové měniče, založené na magnetostrikci se používají hlavně v ultrazvukové svářecí technice a proto nebudou popsány. Elektrostatické měniče jsou rozšířené poměrně málo. [2]

2.1 Piezoelektrický měnič

Piezoelektrický měnič je elektronická součástka, která ke své činnosti využívá piezoelektrický jev, přičemž přemění mechanické kmity na elektrické a naopak. Materiálový základ většiny piezoelektrických měničů používaných v akustice je piezokeramika.

Při generování ultrazvuku ve vzduchu má velký význam materiálový přechod mezi zdrojem zvuku a okolím. Aby se dosáhlo účinného vyzáření zvuku do vzduchu, musí zdroj vybudit velkou povrchovou amplitudu. Znamená to, že velké síly a malé amplitudy, charakteristické pro piezokeramiku se musejí přetransformovat na pohyb s velkými amplitudami a malými silami. [2]



Obr. 10. Zjednodušené provedení měničů (a – rovná membrána, b – prohnutá membrána) [2]

V případě a) je piezokeramický kotouček slepen s kovovým kotoučkem. Přiložením napětí změní piezokotouček svůj průměr, vzniknou příčné síly a dojde k prohnutí celého systému s velkou amplitudou. Systém má širokou vyzařovací charakteristiku, je úzkopásmový protože se jedná o rezonanční systém má dlouhou dobu doznění. Celý systém je možné

uzavřít. V případě b) je elastická membrána buzena piezokeramickou destičkou. Systém má podobné vlastnosti jako a), ale nelze jej uzavřít a má tedy nízký stupeň krytí. [2]

2.1.1 Piezoelektrický jev

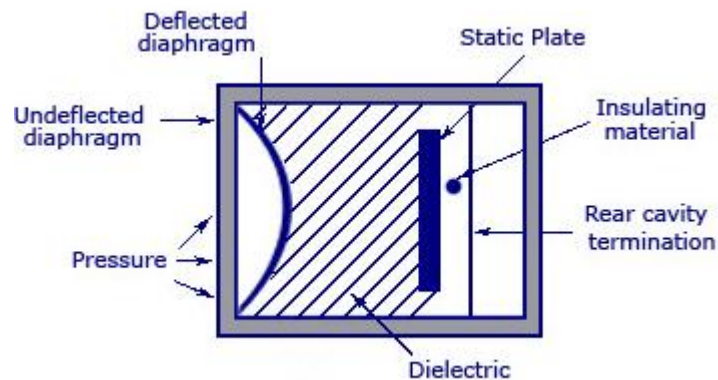
U krystalů, které nejsou středově souměrné, vzniká velmi intenzivní piezoelektrický jev. K výrobě takového krystalu se používá materiál, v jehož krystalické mříži jsou kladné i záporné ionty a destička se vybrousí ve vhodné orientaci tak, aby na jedné ploše byly soustředěny náboje kladné a na druhé záporné. Tím se z vnějšího pohledu stává výbrus zdrojem elektrostatického pole, jehož intenzita (a tedy i napětí) závisí na plošné povrchové hustotě nábojů a na vzdálenosti nábojů uvnitř materiálu.

Při stlačení resp. natažení této destičky, se budou kromě samotné destičky deformovat i molekuly, z nichž je destička složena. Tím se změní polohy částic s nábojem a na protilehlých plochách destičky tak vzniknou stejně velké opačné náboje. Umístíme-li na destičku elektrody, je možné měřit mezi nimi piezoelektrické napětí.

Piezoelektrický jev může nastat i opačně - při přivedení dostatečně velkého napětí k elektrodám piezokrystalu, se změní jeho tloušťka. Při zapojení krystalu na střídavé napětí lze tímto způsobem získat zdroj zvuku nebo ultrazvuku. Periodické změny tloušťky krystalu jsou totiž doprovázeny zvukem. Frekvenci zvuku (resp. změn tloušťky krystalu) lze ovlivnit materiálem krystalu a frekvencí připojeného střídavého napětí. [10]

2.2 Kapacitní měnič

Kapacitní měnič je založen na principu kondenzátoru, kde jedna elektroda je pokovená plastickou fólií a druhá drážkovaná kovová destička. Konstrukce je zobrazena na Obr. 11. Po přiložení střídavého napětí, podloženého stejnosměrným napětím se systém rozkmitá vysokou frekvencí. Výhodou tohoto systému je vyzařovací charakteristika blízká pístovému zářiči (rovinné vlnění). Nevýhodou je, že se jedná o otevřený systém s vysokým budícím napětím. [2]

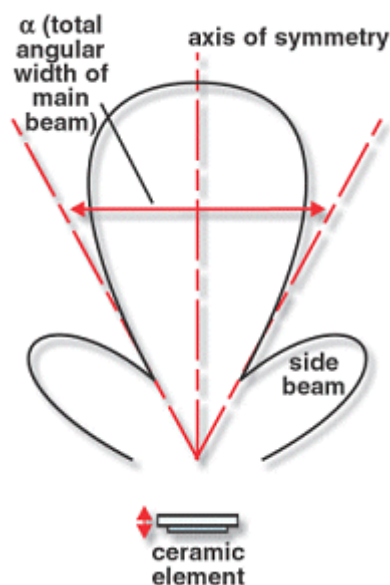


Obr. 11: Konstrukce kapacitního měniče [22]

2.3 Vlastnosti měničů

2.3.1 Směrová charakteristika

Směr vyzařování ultrazvukového měniče viz Obr. 12. závisí na vlnové délce vyslaného signálu, dále na průměru plochy vyzařující signál a na rovnoměrnosti vibrací po celém povrchu keramického prvku. Zmenšením vlnové délky, nebo zvětšením průměru plochy vyzařující signál, se úhel paprsku zužuje. Tím je dosaženo lepší směrovosti a většího dosahu. Naopak zvětšením vlnové délky nebo zmenšením průměru plochy do té míry, že je průměr plochy rovno nebo menší než je vlnová délka, dochází ke změně tvaru vysílací charakteristiky do podoby koule. [11]



Obr. 12. Směrová vyzařovací charakteristika [11]

2.3.2 Pracovní frekvence

Dosah ultrazvukového měniče je ovlivněn pracovní frekvencí a vysílacím výkonem. Pracovní frekvence je důležitým parametrem, protože odraz a absorpce signálu jsou na frekvenci závislé. Pro použití na větší vzdálenosti jsou vhodnější menší frekvence, protože podléhají menšímu útlumu než frekvence vyšší. Nicméně pro nejlepší směrovost signálu a rozlišení objektů by měla být frekvence co nevyšší. [11]

3 STÁVAJÍCÍ ULTRAZVUKOVÉ SYSTÉMY

3.1 Měření vzdálenosti

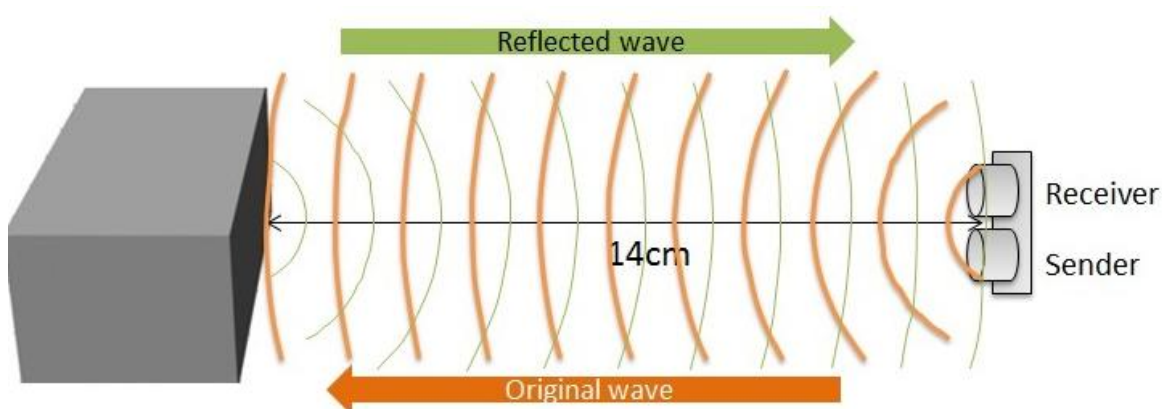
Měření vzdálenosti pomocí ultrazvuku je založeno na měření doby odezvy (echa) od měřeného objektu. Protože je vysílání a příjem signálu prováděn na stejném místě, jedná se o reflexní způsob snímání. Vysílač vyšle v časovém okamžiku t_0 několik impulzů, které se šíří prostředím rychlostí v . Pokud se v prostoru nachází nějaký objekt, signál se od něho odrazí a šíří se zpět. Odražený signál je potom v čase t_1 detekován přijímačem. Doba odezvy t se potom zjistí měřením času, kdy měření začne v čase t_0 a skončí v čase t_1 . [2]

Vzdálenost l , kterou zvuk urazil, potom vypočítáme podle rovnice

$$l = v \cdot t \quad (8)$$

Skutečná vzdálenost detekovaného objektu od vysílače je polovina vzdálenosti zvuku. Zvuk totiž tuto vzdálenost urazí dvakrát, jednou od vysílače k objektu a podruhé od objektu k přijímači. To lze vidět na Obr. 13. Rovnice pro výpočet vzdálenosti objektu je potom [12]

$$l = \frac{v \cdot t}{2} \quad (9)$$

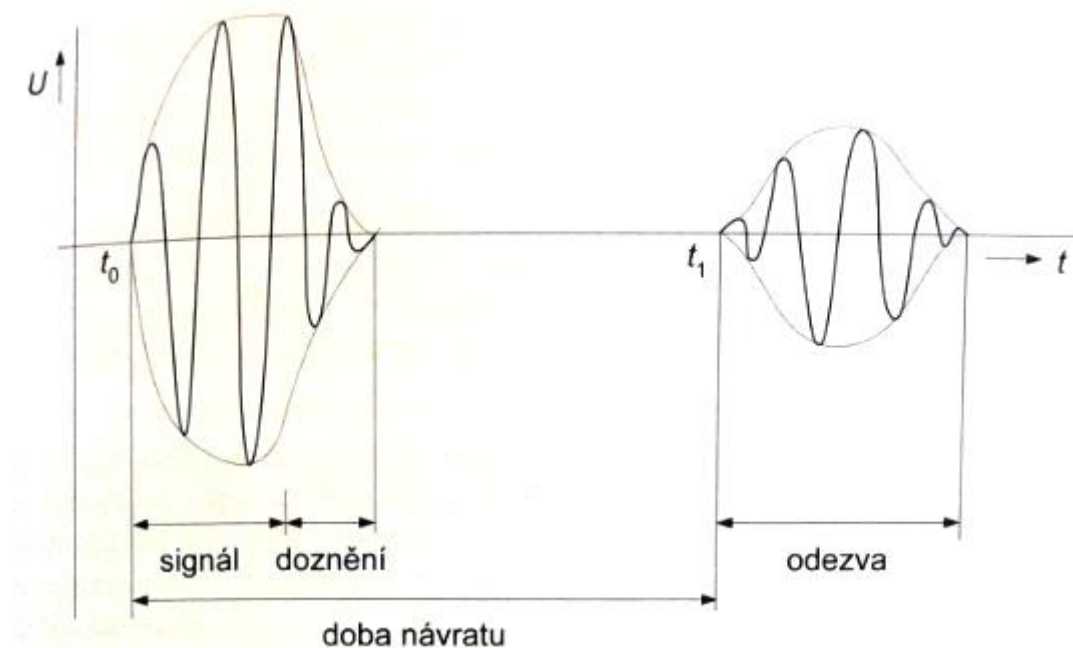


Obr. 13. Měření vzdálenosti ultrazvukem [12]

3.1.1 Jednoduchý a dvojité systém

Jestliže se pro vysílání a příjem používá jediný měnič, jedná se o tzv. jednoduchý systém. Pokud se pro vysílání a příjem používají dva samostatné měniče, jedná se o dvojité systém.

Jednoduchý systém má nevýhodu v tom, že po vyslání impulzu musí senzor nečinně čekat po dobu, kdy měnič dokmitává. Během této doby nemůže být odezva zjištěna. Teprve když hodnota přijaté odezvy je větší než amplituda dozívajícího měniče, můžeme odezvu zjistit. Ultrazvukové měniče s jednoduchým systémem mají proto těsně u senzoru nefunkční pásmo (mrtvou zónu), ve kterém nemůže být odezva detekována.[2] Příklad průběhu napětí jednosystémového měniče je na Obr. 14.



Obr. 14. Průběh napětí jednosystémového měniče [2]

Doba dozívání je ovlivňována faktory jako celková kmitající hmotnost, vnitřní tlumení materiálu. U měničů s dosahem 1 m je mrtvá zóna asi 20 cm. Při použití dvojitýho systému je mrtvá zóna snížena.[2]

3.2 Detekce překážek s využitím kamery a ultrazvukového měniče

Jedná se o systém detekce překážek a měření velikosti objektu pro autonomní mobilní roboty, který kombinuje informace získané z různých typů senzorů. V tomto případě je využit jeden ultrazvukový měnič pro měření vzdálenosti a jedna kamera pro určení velikosti objektu. Použití různých typů senzorů umožňuje využít silné stránky jednoho senzoru k překonání slabých stránek senzoru druhého. V případě autonomního mobilního robota, který pracuje samostatně, dochází k rozhodování o dalším postupu pouze na

základě informací získaných o okolí. Využití více senzorů umožňuje robotovi získávat informace podobně jako lidé. [20]

3.2.1 Navigace robota

V neznámém prostředí musí robot pro určení své polohy spoléhat pouze na informace ze svých senzorů. Získané informace z různých senzorů jsou využity pro nalezení pozice robota, detekování překážky a vyhnutí se této překážce.

Detekování překážky může být rozděleno na dva způsoby:

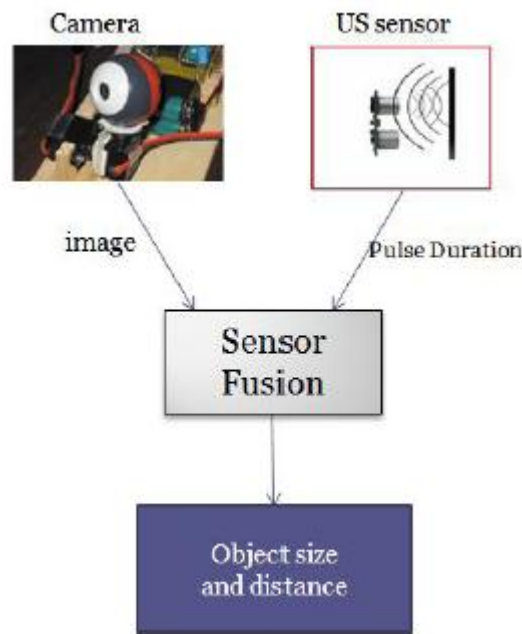
- Detekce na základě změřené vzdálenosti
- Detekce na základě tvaru objektu

V případě detekování pomocí měření vzdálenosti, senzor skenuje oblast a detekuje jakoukoli překážku v jeho dosahu a pro tuto překážku se pokusí vypočítat vzdálenost mezi robotem a překážkou.

V případě detekce na základě tvaru objektu, je objekt v prostředí nalezen na základě jeho fyzického tvaru, pomocí zpracování obrazu.

Kombinací dvou výše uvedených způsobů je dosaženo určení vzdálenosti překážky od robota a určení tvaru překážky.

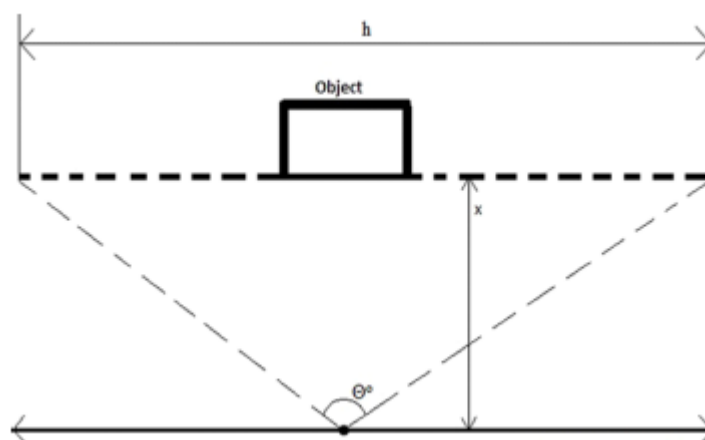
System využívá pro určení vzdálenosti ultrazvukový měnič a pro určení velikosti objektu kameru. Blokové schéma je znázorněno na Obr. 15 [20]



Obr. 15: Blokové schéma systému [20]

Měření vzdálenosti pracuje na stejném principu popsaném v kapitole 3.1. Změřená vzdálenost dále slouží pro určení velikosti objektu.

Zjištění velikosti objektu je provedeno ve dvou krocích. V prvním kroku je z obrazu pomocí různých technik zpracování obrazu nalezen detekovaný objekt. V druhém kroku je zjištěna velikost objektu s využitím změřené vzdálenosti pomocí ultrazvukového měniče. Pokud známe zorný úhel kamery a známe vzdálenost, můžeme vypočítat velikost plochy, kterou vidíme, viz Obr. 16. [20]

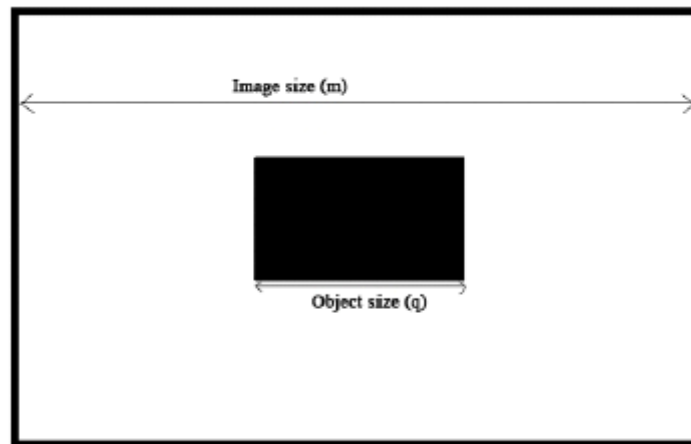


Obr. 16: Zorný úhel [20]

x je vzdálenost mezi kamerou a objektem

h je horizontální délka 2D roviny kolmé na x

Θ je zorný úhel



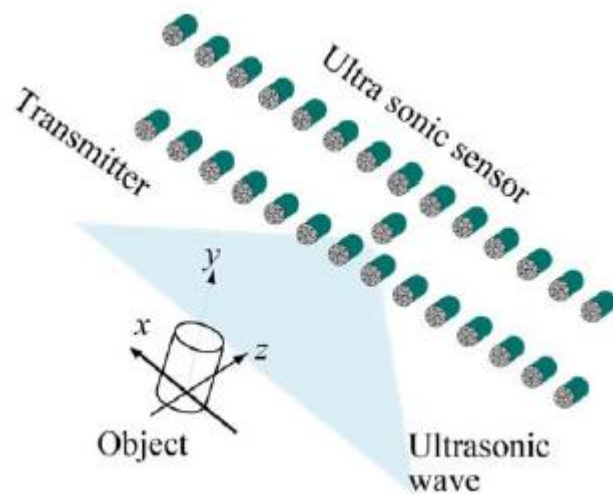
Obr. 17: Obraz zobrazený kamerou [20]

Z vypočítané velikosti obrazu a z naměřené vzdálenosti k objektu je potom možné vypočítat velikost objektu. Pro více informací viz [20].

3.3 Rozpoznávání objektu ultrazvukem

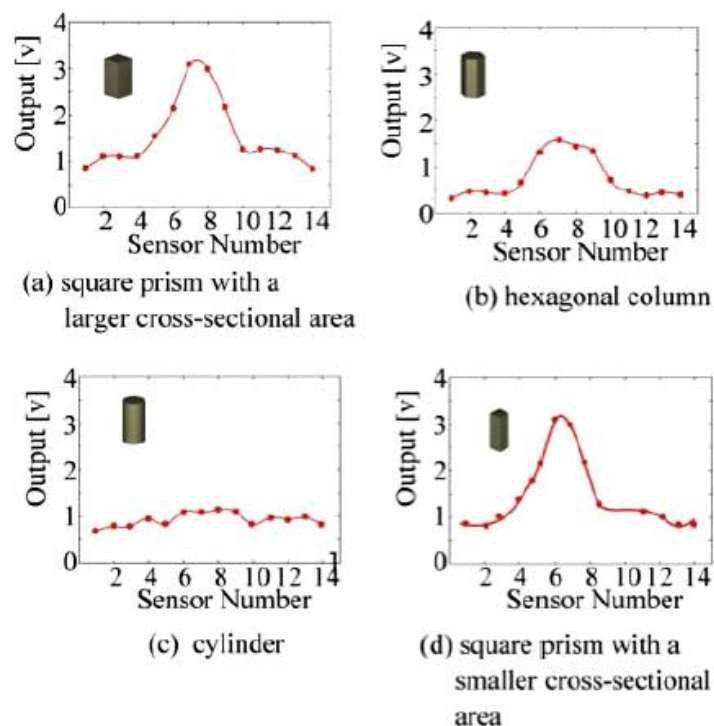
Rozpoznávání 3D objektů ultrazvukem má vzhledem k nízké ceně, malým rozměrům široké pole využití. Intenzita odraženého ultrazvukového signálu od objektu obsahuje informace o jeho tvaru. Pro identifikování objektů jsou použity algoritmy pro rozpoznávání vzorů jako je algoritmus k -nejbližších sousedů (k -NN), umělé neuronové sítě (ANN) nebo genetické algoritmy (GA).

System je na Obr. 18 a skládá se z ultrazvukového vysílače, několika ultrazvukových přijímačů uspořádaných do dvou řad, které detekují intenzitu odraženého signálu a jednotky vybavené rozpoznávacím algoritmem. [21]



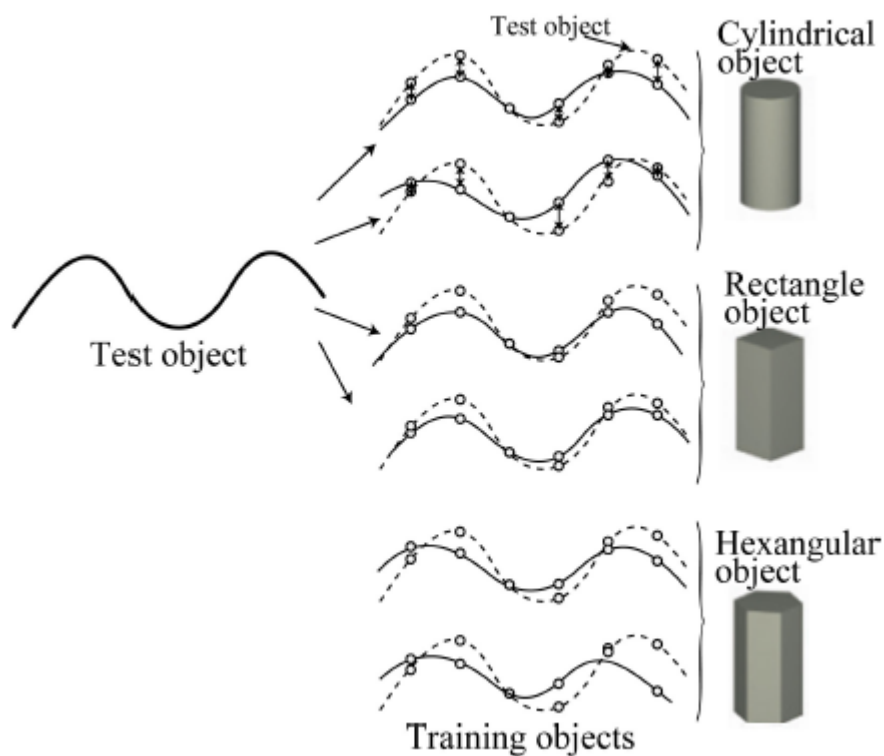
Obr. 18: Nástin ultrazvukového rozpoznávacího systému [21]

Na Obr. 19 jsou zobrazeny hodnoty intenzity detekované každým přijímačem pro čtyři typy objektů. Jedná se o dva kvádry (a) a (d), šestihranný hranol (b) a válec (c). Výška každého objektu je 100 mm a průměr je 50 mm. Objekty byly vždy umístěny před prostředním vysílačem. Změřená intenzita ultrazvukového signálu má pro všechny objekty symetrický tvar s vrcholem ve středu rozložení. Velikost hodnoty vrcholu je ovlivněna tvarem objektu. [21]



Obr. 19: Hodnoty intenzity detekovaného signálu každým přijímačem [21]

Algoritmus k-nejblížších sousedů je algoritmus strojového učení pro rozpoznávání vzorů. Je zjištěna vzdálenost všech prvků trénovací množiny od neznámého prvku. Následně je vybrán ten prvek trénovací množiny, který je nejbližší a neznámý prvek je klasifikován do stejné třídy. [21]

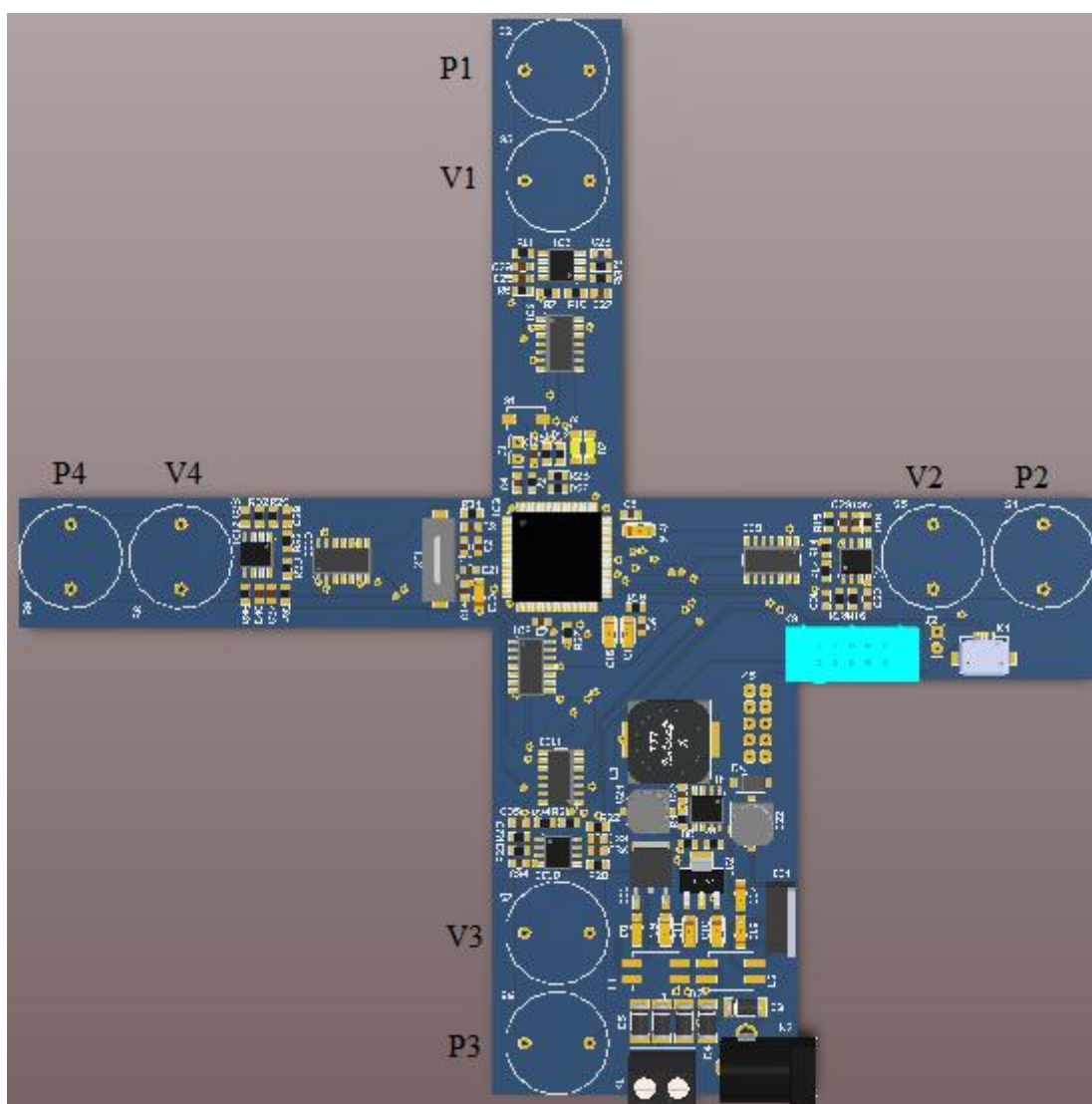


Obr. 20: Princip identifikace objektu pomocí k-NN [21]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 ZPŮSOB MĚŘENÍ

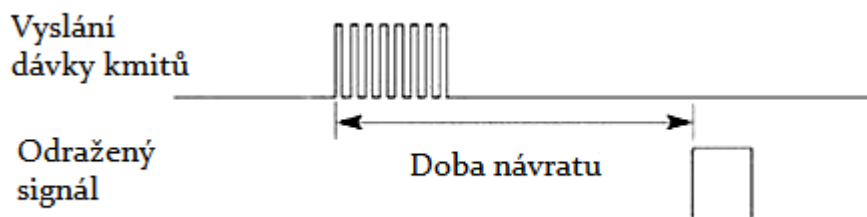
System ultrazvukového vidění využívá ultrazvukové měniče v tzv. dvojitém systému, ve kterém jsou pro vysílání a příjem signálu použity dva samostatné měniče. Rozmístění měničů je zobrazeno na Obr. 21. Vždy je umístěn jeden vysílač (V1 až V4) a jeden přijímač (P1 až P4) do každého ramena kříže. Přijímače jsou umístěny na okraj desky plošného spoje ve vzdálenosti 7.5 cm od středu desky.



Obr. 21: Rozmístění měničů ultrazvukového signálu

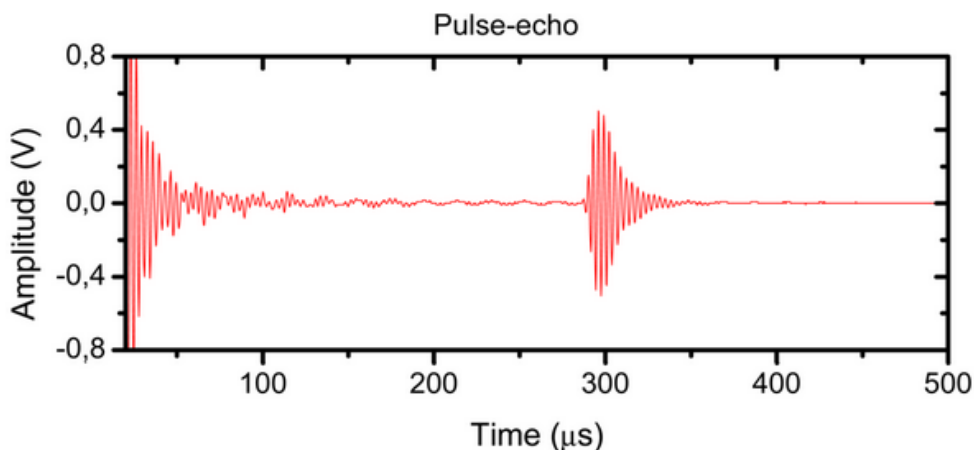
4.1 Vysílání a příjem ultrazvukového signálu

Vysílání ultrazvukového signálu na frekvenci 40 kHz probíhá postupně od vysílače P1 do P4. Po odeslání dávky signálu o pěti kmitotech z jednoho vysílače se čeká určitou dobu na příjem odraženého signálu. Princip vysílání a příjmu signálu je ukázán na Obr. 22. Po ukončení čekání na odražený signál začne vysílat další vysílač v pořadí.



Obr. 22: Vysílání dávky kmitů a příjem odraženého signálu

Na Obr. 23 je znázorněn typický průběh odraženého signálu od jednoho objektu. Od času 0 μs je detekován signál vyvolaný vysílačem, který se po dokončení vysílání ustálí. Toto platí pouze v případě, že je pro vysílání a příjem používán jeden měnič, nebo pokud je přijímač blízko u vysílače. V čase 300 μs je potom detekován signál odražený.

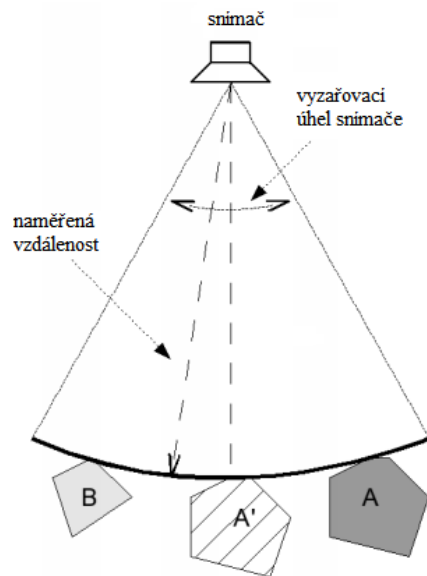


Obr. 23: Ukázka detekovaného signálu [1]

4.2 Určení polohy objektu

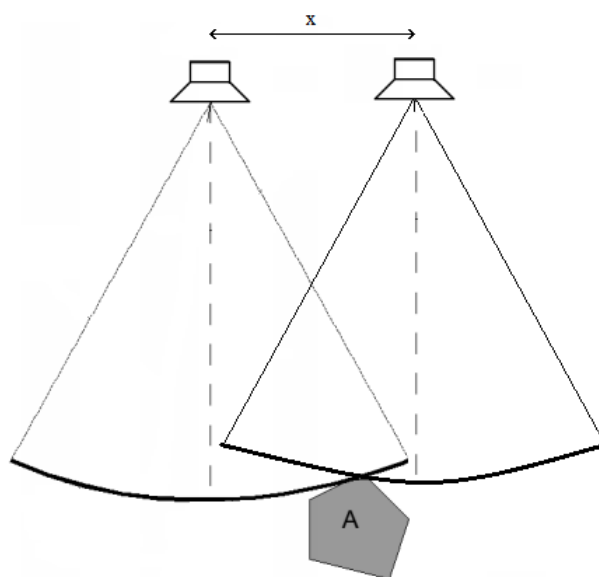
K určení polohy objektu je využit způsob šíření vlnění ve vzduchu, které se od vysílače šíří v kulových vlnoplochách. Při použití jednoho snímače, nelze určit polohu objektu A, a dokonce ani počet objektů odrážejících ultrazvukový signál. Objekt A může být totiž

umístěný kdekoli na kružnicovém oblouku s poloměrem naměřené vzdálenosti. Tato situace je znázorněna na Obr. 24. Vzniká tedy neurčitost polohy objektu odrážejícího ultrazvukový signál. [13]



Obr. 24: Neurčitost polohy objektu [13]

Tuto neurčitost polohy můžeme odstranit použitím více senzorů vzájemně posunutých o určitou vzdálenost Obr. 25. S využitím dvou senzorů dokážeme určit polohu objektu ve 2D prostoru, který je v místě, kde se kružnicové oblouky od jednotlivých snímačů protnou.



Obr. 25: Určení polohy objektu ve 2D prostoru

Pro určení polohy objektu ve 3D prostoru potřebujeme minimálně 3 snímače, další snímače navíc tuto polohu pouze zpřesňují. Princip je úplně stejný jako ve 2D s tím rozdílem, že poloha detekovaného objektu je někde na povrchu koule o poloměru naměřeného času.

5 NÁVRH SYSTÉMU

Celý systém je možné rozdělit do tří částí. První část je schéma zapojení a deska plošného spoje s ultrazvukovými měniči, mikrokontrolérem a další elektronikou. Druhá část je program vykonávaný mikrokontrolérem, který zajišťuje vysílání a příjem ultrazvukového signálu a odeslání naměřených dat do počítače. Třetí část je program v počítači, který naměřená data zpracuje a zobrazí.

Pro návrh elektrického schéma zapojení a desky plošného spoje byl použit software Altium Designer. Program mikrokontroléru byl napsán v jazyce C ve vývojovém prostředí Eclipse s GNU ARM rozšířením. Program pro zpracování a zobrazení dat byl napsán v jazyce C++ ve vývojovém prostředí Qt.

5.1 Použité součásti

5.1.1 Ultrazvukové měniče

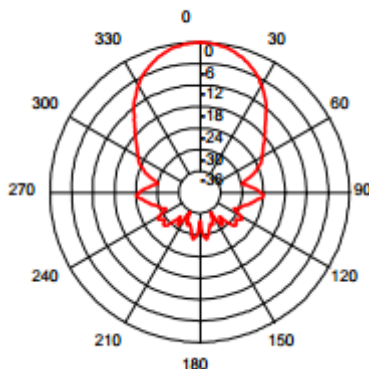
Měřicí systém využívá vždy dvojici ultrazvukových měničů, kde jeden slouží pro generování ultrazvukového signálu a druhý pro příjem odraženého signálu. Existuje velké množství ultrazvukových měničů, které se liší kmitočtem, intenzitou generovaného signálu, citlivostí, směrovými charakteristikami apod. Při výběru přijímače a vysílače je důležité dodržet to, aby oba pracovali na shodné frekvenci. Je tedy vhodné vybrat senzory stejného typu a od stejného výrobce.



Obr. 26. Ultrazvukový měnič 400ST/R160

Pro realizaci měřiče byly vybrány ultrazvukové měniče v hliníkovém pouzdře od firmy Pro-Wave Electronics přesněji typ 400ST160 pro vysílač a typ 400SR160 pro přijímač. Jedná se o piezoelektrické měniče, pracující na frekvenci 40 kHz. Intenzita generovaného ultrazvukového signálu vysílačem je 120 dB a citlivost přijímače je -65 dB. Citlivost

měníče je nejlepší na frekvenci 40 kHz, při změně frekvence citlivost velmi rychle klesá. Provozní teplota se pohybuje od -30°C do 80°C . Na Obr. 27 je znázorněna směrová vyzařovací charakteristika měniče, s úhlem vyzařování na 55° .



Obr. 27. Směrová vyzařovací charakteristika

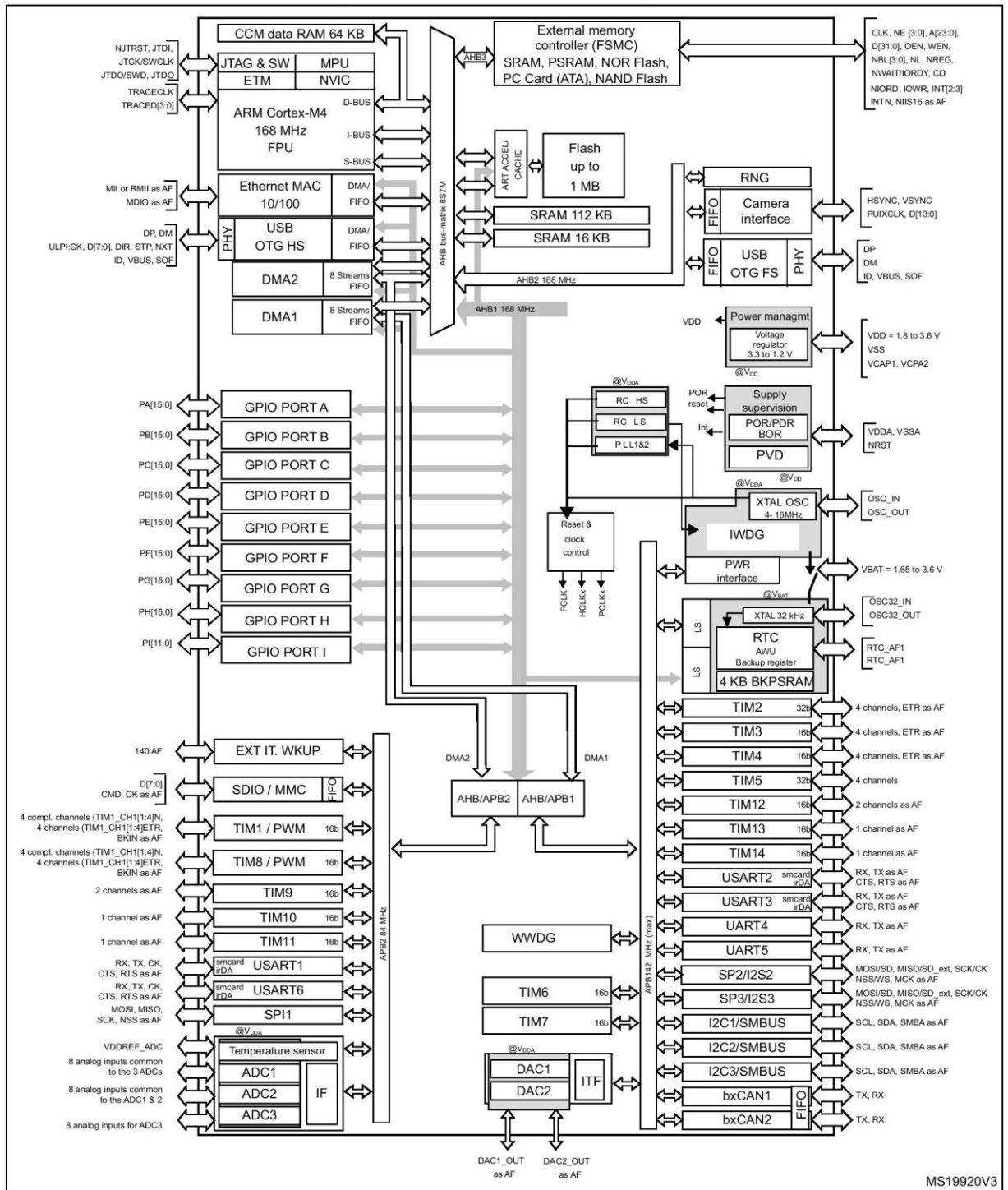
5.1.2 Mikrokontrolér

Jako mikrokontrolér byl vybrán typ STM32F407 od firmy ST Microelectronics založený na jádře ARM Cortex-M4. Toto jádro patří do rodiny procesorů Cortex-M, která jsou určena pro použití ve vestavěných (embedded) systémech. Jedná se o 32 bitový mikrokontrolér pracující na frekvenci až do 168 MHz s flash pamětí až do 1 MB. Vestavěná systémová paměť SRAM má velikost 192 kB.

Mikrokontrolér obsahuje řadu vstupně/výstupních portů a periférií. Tyto periférie jsou tři 12 bitové A/D převodníky, dva D/A převodníky, obvod reálného času, dvanáct 16 bitových časovačů, dva 32 bitové časovače a generátor náhodných čísel. Obsahují taky standardní komunikační protokoly:

- 3x I²C
- 3x SPI
- 4x USART a 2x UART
- USB OTG
- 2x CAN
- SDIO/MMC
- Ethernet

Napájecí napětí může být v rozsahu od 1,8 do 3,6 V. Je dodáván v pouzdře LQFP100 a nabízí 82 vstupně/výstupních vývodů. Blokové schéma je na Obr. 28.



Obr. 28: Blokové schéma mikrokontroléru STM32F407

5.1.3 A/D převodník

Mikrokontrolér obsahuje tři vestavěné A/D převodníky, které mají nastavitelné rozlišení na 6, 8, 10 nebo 12 bitů a mohou využívat až 16 externích kanálů. Výsledek převodu je uložen do 16 bitového datového registru.

A/D převodník může pracovat v následujících módech:

Single – A/D převodník vykoná pouze jeden převod. Převod může být zahájen programově nebo externím impulsem. Po ukončení převodu je výsledek uložen a je nastaven příznak ukončení převodu a je vyvoláno přerušení, pokud je povoleno.

Continuous – V tomto módu je nový převod zahájen okamžitě po dokončení předchozího převodu. Vše ostatní je stejné jako v single módu.

Scan – Tento mód slouží pro převod ze skupiny kanálů. Převod je prováděn postupně pro každý kanál ve skupině ve zvoleném pořadí. Po dokončení převodu prvního kanálu, stejně jako v single módu, automaticky začne převod dalšího kanálu. Po převedení všech kanálů může být převod zastaven nebo jako v continuous módu začít znovu.

Discontinuous – Tento mód umožňuje provést n převodů ($n \leq 8$) z vybraných kanálů na jeden impuls.

5.1.4 DMA řadič

DMA (Direct Memory Access) znamená přímý přístup do paměti. DMA řadič, dále jen DMA, umožňuje přenos dat na pozadí bez zásahu procesoru. Během přenosu dat vykonává procesor jiná úkoly, a jakmile je celý blok přenášených dat připraven na zpracování vyvolá se přerušení. Je tedy možná přenášet velké množství dat bez většího dopadu na výkon.

DMA přenos je definován těmito vlastnostmi:

- DMA stream/channel
- Priorita streamu
- Zdrojová a cílová adresa
- Mód přenosu
- Šířka slova

- Typy přenosu
- FIFO mód
- Double-buffer mód
- Flow control

DMA stream/channel

Mikrokontrolér ze série STM32F4 obsahují dva DMA řadiče, s celkem 16 streamy (8 na řadič), každý vyhrazený pro správu paměti jedné nebo více periférií. Každý stream má až 8 volitelných kanálů, ale aktivní může být pouze jeden. V tabulce 3 je pro řadič DMA1 ukázáno možné nastavení streamů a kanálů pro obsluhu periférií. V tabulce 4 je potom řadič DMA2

Tab. 3: DMA1 - nastavení streamů a kanálů pro periferie

Peripheral requests	Stream 0	Stream 1	Stream 2	Stream 3	Stream 4	Stream 5	Stream 6	Stream 7
Channel 0	SPI3_RX	-	SPI3_RX	SPI2_RX	SPI2_TX	SPI3_TX	-	SPI3_TX
Channel 1	I2C1_RX	-	TIM7_UP		TIM7_UP	I2C1_RX	I2C1_TX	I2C1_TX
Channel 2	TIM4_CH1	-	I2S3_EXT_RX	TIM4_CH2	I2S2_EXT_TX	I2S3_EXT_TX	TIM4_UP	TIM4_CH3
Channel 3	I2S3_EXT_RX	TIM2_UP TIM2_CH3	I2C3_RX	I2S2_EXT_RX	I2C3_TX	TIM2_CH1	TIM2_CH2 TIM2_CH4	TIM2_UP TIM2_CH4
Channel 4	UART5_RX	USART3_RX	UART4_RX	USART3_TX	UART4_TX	USART2_RX	USART2_TX	UART5_TX
Channel 5	UART8_TX ⁽¹⁾	UART7_TX ⁽¹⁾	TIM3_CH4 TIM3_UP	UART7_RX ⁽¹⁾	TIM3_CH1 TIM3_TRIG	TIM3_CH2	UART8_RX ⁽¹⁾	TIM3_CH3
Channel 6	TIM5_CH3 TIM5_UP	TIM5_CH4 TIM5_TRIG	TIM5_CH1	TIM5_CH4 TIM5_TRIG	TIM5_CH2	-	TIM5_UP	-
Channel 7	-	TIM6_UP	I2C2_RX	I2C2_RX	USART3_TX	DAC1	DAC2	I2C2_TX

Tab. 4: DMA2 - nastavení streamů a kanálů pro periferie

Peripheral requests	Stream 0	Stream 1	Stream 2	Stream 3	Stream 4	Stream 5	Stream 6	Stream 7
Channel 0	ADC1	SAI1_A ⁽¹⁾	TIM8_CH1 TIM8_CH2 TIM8_CH3	SAI1_A ⁽¹⁾	ADC1	SAI1_B ⁽¹⁾	TIM1_CH1 TIM1_CH2 TIM1_CH3	-
Channel 1	-	DCMI	ADC2	ADC2	SAI1_B ⁽¹⁾	SPI6_TX ⁽¹⁾	SPI6_RX ⁽¹⁾	DCMI
Channel 2	ADC3	ADC3	-	SPI5_RX ⁽¹⁾	SPI5_TX ⁽¹⁾	CRYP_OUT	CRYP_IN	HASH_IN
Channel 3	SPI1_RX	-	SPI1_RX	SPI1_TX	-	SPI1_TX	-	-
Channel 4	SPI4_RX ⁽¹⁾	SPI4_TX ⁽¹⁾	USART1_RX	SDIO	-	USART1_RX	SDIO	USART1_TX
Channel 5	-	USART6_RX	USART6_RX	SPI4_RX ⁽¹⁾	SPI4_TX ⁽¹⁾	-	USART6_TX	USART6_TX
Channel 6	TIM1_TRIG	TIM1_CH1	TIM1_CH2	TIM1_CH1	TIM1_CH4 TIM1_TRIG TIM1_COM	TIM1_UP	TIM1_CH3	-
Channel 7	-	TIM8_UP	TIM8_CH1	TIM8_CH2	TIM8_CH3	SPI5_RX ⁽¹⁾	SPI5_TX ⁽¹⁾	TIM8_CH4 TIM8_TRIG TIM8_COM

Priorita streamu

Priorita streamu se dělí na softwarovou, kterou je možné nastavit na některou ze čtyř úrovní a na prioritu hardwarovou, která je určena číslem streamu. Pokud má jeden nebo více DMA streamů stejnou úroveň softwarové priority, je použita priorita hardwarové, kde stream 0 má prioritu před streamem 1 atd.

Mód přenosu

DMA může pracovat v některém ze tří přenosových módů:

- Přenos z periférií do paměti
- Přenos z paměti do periférií
- Přenos z paměti do paměti (pouze pro DMA2)

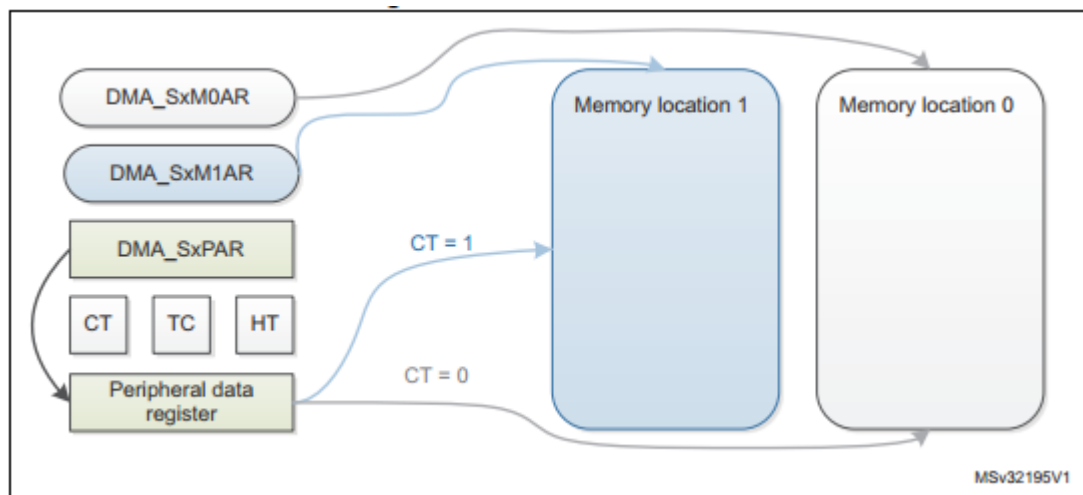
Šířka slova

Šířka slova může být pro zdroj a cíl definována jako:

- Byte (8 bitů)
- Half-word (16 bitů)
- Word (32 bitů)

Double-buffer mód

Stream s dvojitou vyrovnávací pamětí funguje stejně jako stream s jednou vyrovnávací pamětí, jediný rozdíl je v tom, že má dva ukazatele do paměti. Když je tento mód aktivní, jsou na konci převodu ukazatele do paměti prohozeny a DMA pracuje s druhou pamětí. To umožňuje programu zpracovávat jednu paměť, zatímco DMA naplňuje druhou.



Obr. 29: Princip dvojité vyrovnávací paměti.

5.1.5 Časovače

Mikrokontrolér STM32F407 obsahuje osm univerzálních časovačů, dva základní časovače a dva časovače s pokročilým ovládním.

Univerzální časovače jsou použitelné v libovolné aplikaci pro porovnávání výstupu (časování a generování zpoždění), pro generování jednoho impulsu zadané délky nebo pro měření externího signálu (měření frekvence).

Časovače s pokročilým ovládním mají navíc k funkcím univerzálního časovače komplementární PWM výstupy s programovatelným vložením mrtvého času.

Základní časovače nemají vstup ani výstup a jsou využívány jako časová základna pro spínání D/A převodníku.

Přehled časovačů je zobrazen v tabulce 5.

Tab. 5: Přehled časovačů

Timer type	Timer	Counter resolution	Counter type	Prescaler factor	DMA request generation	Capture/compare channels	Complementary output	Max interface clock (MHz)	Max timer clock (MHz)
Advanced-control	TIM1, TIM8	16-bit	Up, Down, Up/down	Any integer between 1 and 65536	Yes	4	Yes	84	168
General purpose	TIM2, TIM5	32-bit	Up, Down, Up/down	Any integer between 1 and 65536	Yes	4	No	42	84
	TIM3, TIM4	16-bit	Up, Down, Up/down	Any integer between 1 and 65536	Yes	4	No	42	84
	TIM9	16-bit	Up	Any integer between 1 and 65536	No	2	No	84	168
	TIM10, TIM11	16-bit	Up	Any integer between 1 and 65536	No	1	No	84	168
	TIM12	16-bit	Up	Any integer between 1 and 65536	No	2	No	42	84
	TIM13, TIM14	16-bit	Up	Any integer between 1 and 65536	No	1	No	42	84
Basic	TIM6, TIM7	16-bit	Up	Any integer between 1 and 65536	Yes	0	No	42	84

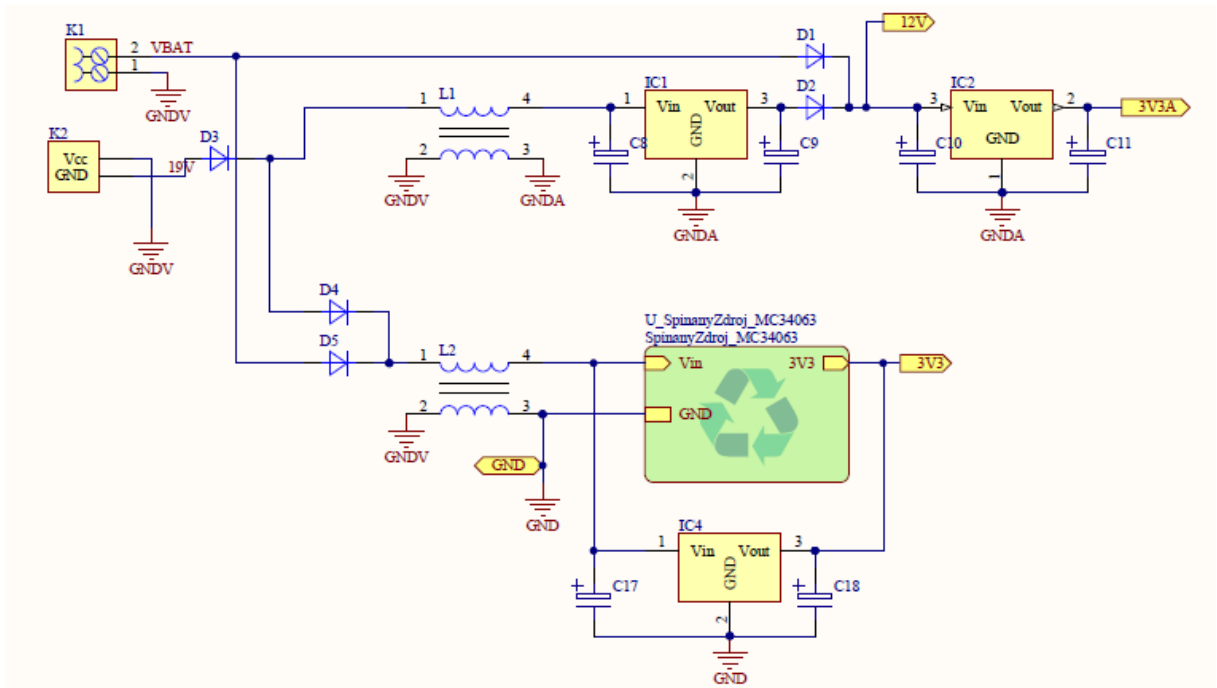
5.2 Schéma zapojení

5.2.1 Napájení

Při návrhu celého systému ultrazvukového vidění se uvažovalo se dvěma způsoby napájení. Schéma zapojení je zobrazeno na Obr 30. Systém je tedy možné napájet některým z následujících způsobů. První způsob je přivést přes konektor K1 napětí 12 V z externího akumulátoru. Druhým způsobem je napájet systém přes konektor K2 ze síťového adaptéru s výstupním napětím, které může být v rozsahu 13 V až 25 V. Z tohoto napětí je pomocí lineárního stabilizátoru IC1 získáno napětí 12 V.

Napětí 12 V je využito pro napájení výkonové části sloužící pro buzení ultrazvukových měničů a dále je z tohoto napětí vytvořeno napájecí napětí 3,3 V pro elektroniku.

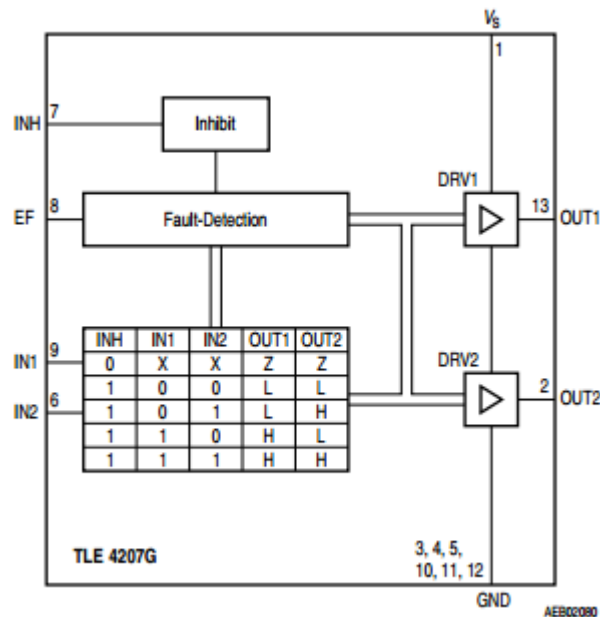
System využívá dvě oddělená 3,3 V napětí. Napětí 3V3 získané ze spínaného zdroje MC34063 slouží pro napájení mikrokontroléru a dalších obvodů. Toto napětí lze získat i pomocí lineárního stabilizátoru IC4, jeho použití je pouze pro vývoj a ve výsledné verzi systému se s ním nepočítá. A napětí označené 3V3A, získané pomocí lineárního stabilizátoru IC2, které slouží pro napájení analogové části systému. To jsou analogově digitální převodníky mikrokontroléru a operační zesilovače v přijímací části.



Obr. 30: Schéma zapojení napájecí části

5.2.2 Vysílací část

Ultrazvukový měnič je buzen signálem o kmitočtu 40 kHz, který je generován mikrokontrolérem pomocí čítače/časovače. Tento generovaný signál má malé napětí, pouze 3,3 V, kterým není vhodné ultrazvukový měnič budit. Při buzení měniče vyšším napětím totiž dosáhneme většího vyzařovacího výkonu. K tomuto účelu je použit H-můstek TLE4207G napájený napětím 12 V. Na Obr. 31 je zobrazeno blokové schéma můstku. Generovaný signál je přiveden na jeden vstup H-můstku (IN1) a na druhý (IN2) je přiveden invertovaný signál. Výstupy h-můstku jsou připojeny na vývody ultrazvukového měniče. Ultrazvukový měnič je tak buzen 12 V napětím v protifázi, amplituda napětí na měniči potom bude 24 V.



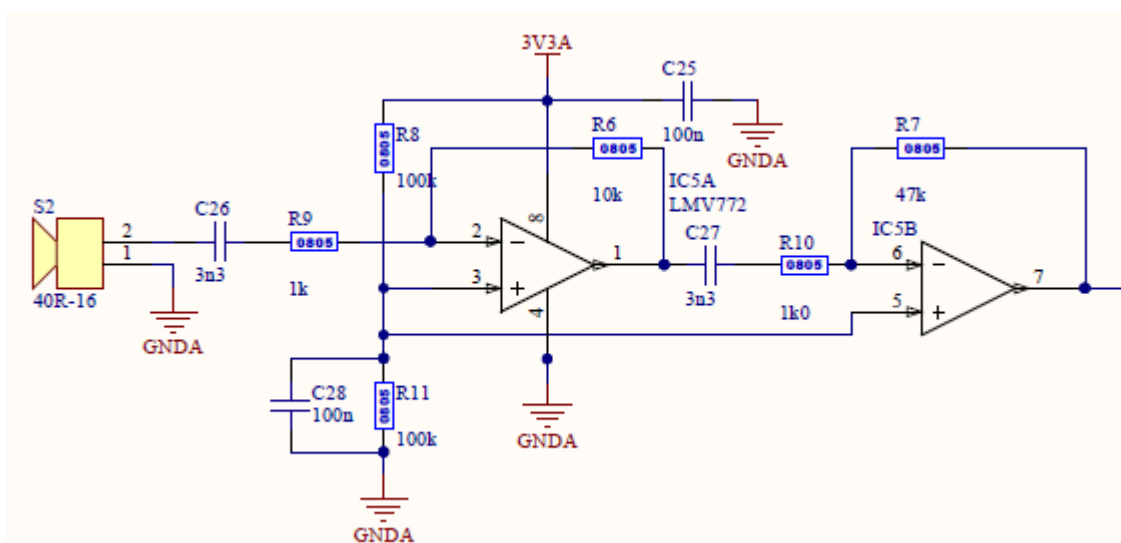
Obr. 31: Blokové schéma H-můstku

5.2.3 Přijímací část

Vzhledem k tomu, že přijatý signál z ultrazvukového měniče je velmi slabý (řádově jednotky mV), je signál zesílen pomocí operačního zesilovače. Je použit nízko šumový dvoustupňový operační zesilovač LVM772MA. Pro minimalizaci rušení jsou u zesilovačů použity keramické blokovací kondenzátory.

Oba stupně zesilovače jsou zapojeny jako invertující. Zesílení prvního stupně je -10 (20 dB) a zesílení druhého stupně je -47 (33 dB). Celkové zesílení je potom 470 (53 dB).
Příklad výpočtu zesílení pro první stupeň

$$A = -\frac{R_6}{R_9} = -\frac{10 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} = -10 \Rightarrow 20 \cdot \log(10) = 20 \text{ dB} \quad (10)$$

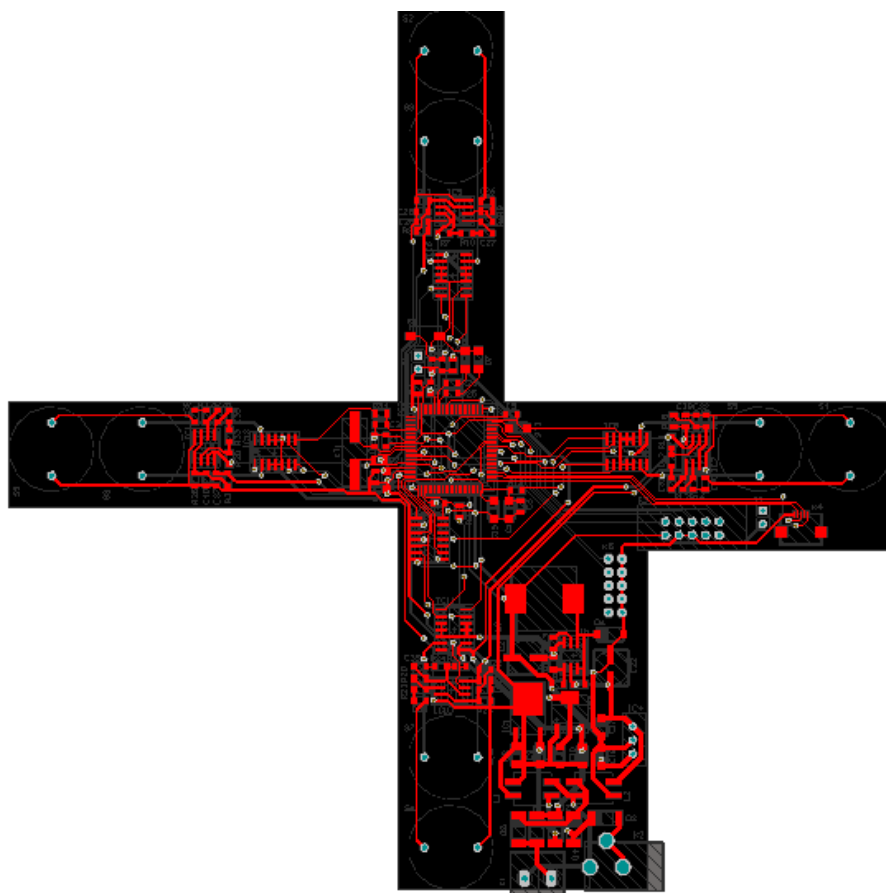


Obr. 32: Zapojení přijímací části – dvoustupňový zesilovač

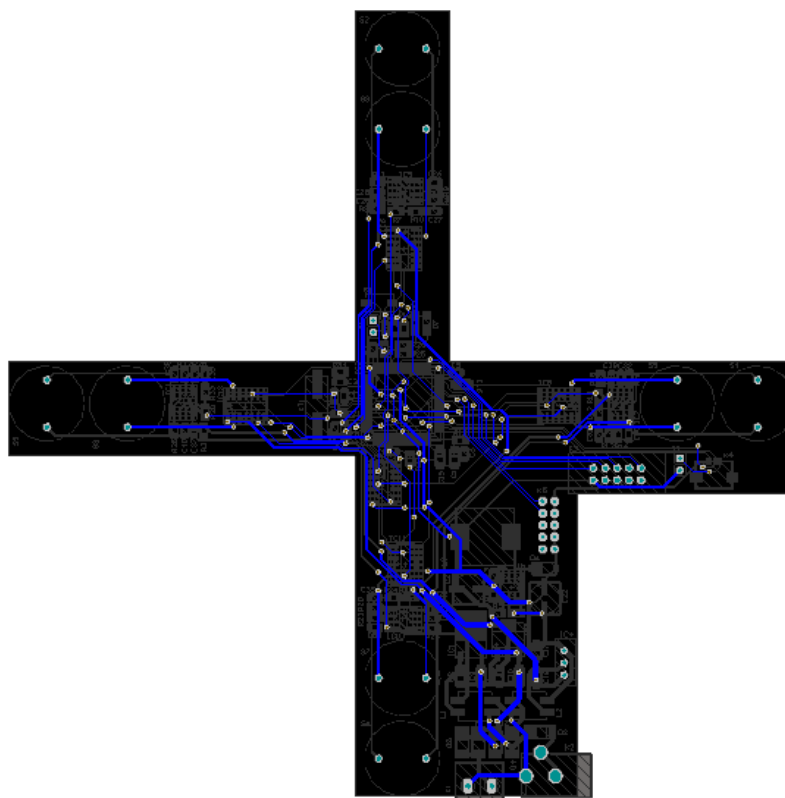
5.3 Deska plošného spoje

System byl navržen se součástkami pro povrchovou montáž a byla použita oboustranná deska s plošnými spoji. Všechny součástky, kromě konektorů a ultrazvukových měničů jsou v pouzdrech pro povrchovou montáž. Rezistory a keramické kondenzátory jsou v pouzdrech 0805, integrované obvody v pouzdrech SOIC a mikroočítač v LQFP100.

Při návrhu desky plošného spoje bylo hlavním požadavkem vhodné rozmístění měničů. Z tohoto důvodu má deska tvar kříže, kde je vždy na konci umístěn přijímač a blíže ke středu je vysílač. Ve středu desky je umístěn mikrokontrolér a mezi ním a měniči jsou umístěny vysílací a přijímací obvody. Spodní a pravá část desky potom obsahuje napájení a konektory. Na Obr. 33 je zobrazena deska plošných spojů ze strany součástek a na Obr. 34 je zobrazena deska ze strany spojů.



Obr. 33: Deska plošných spojů ze strany součástek



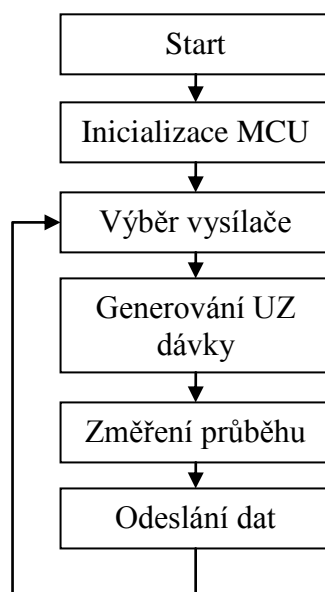
Obr. 34: Deska plošných spojů ze strany spojů

6 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ

6.1 Program mikrokontroléru

Řídící program pro mikrokontrolér byl napsán v jazyce C ve vývojovém prostředí Eclipse s rozšířením GNU ARM, které poskytuje vývojové prostředky pro mikrokontrolér od firmy STM. Mikrokontrolér je hlavním řídicím prvkem celého měřicího procesu. Jeho hlavním úkolem je vyslání dávky ultrazvukového signálu a jeho následné snímání A/D převodníkem a uložení do paměti. Posledním úkolem je odeslat uložená data do počítače.

Vývojový diagram pro mikrokontrolér je uvedený na Obr. 35. Po spuštění programu je jako první vykonána inicializační fáze. V této fázi jsou nastaveny vstupně/výstupní porty, čítače/časovače, A/D převodník a UART sběrnice. Celou funkci programu zajišťují celkem 4 časovače (časovač 2 až 5). Časovač 2 řídí frekvenci, s jakou jsou vysílány jednotlivé dávky ultrazvukového signálu.



Obr. 35: Vývojový diagram pro mikrokontrolér

V dalším kroku je vybrán vysílač, který bude vysílat dávku ultrazvukového signálu. Pro výběr vysílačů slouží proměnná *sensor*, jejíž hodnota udává právě aktivní vysílač a nabývá hodnot 1 až 4. Po každém dokončeném cyklu programu je tahle proměnná inkrementována o 1 a tím je zajištěn výběr dalšího vysílače.

Pro generování dávky ultrazvukového signálu je použit časovač 3, který generuje frekvenci 40 kHz. V okamžiku, kdy je spuštěn časovač 3 a je zahájeno generování signálu, je spuštěn i časovač 5. Ten je nastaven tak, aby zastavil časovač 3 po vygenerování dávky 5 kmitů.

Zpracování odraženého ultrazvukového signálu A/D převodníkem je spuštěno současně při zahájení vysílání. Převod je prováděn s frekvencí 160 kHz, která je získána z časovače 4. Rozlišení převodníku je nastaveno na 8 bitů, přestože převodník podporuje 10 nebo 12 bitů. Rozlišení 8 bitů je vybráno z důvodu rychlejšího převodu a taky proto že pro uložení hodnoty stačí pouze 1 byte. Další výhodou je, že data nevyžadují žádnou další úpravu pro přenos pomocí sériové komunikace, která je 8 bitová. Mikrokontrolér neprovádí žádné další zpracování dat, jako je převod na napětí. Veškeré práce s naměřenými daty je prováděna v programu v počítači.

Přenos dat z A/D převodníku do paměti je realizován pomocí DMA, kde je mód přenosu nastaven z periferie do paměti a šířka slova je na jeden byte.

Posledním krokem je odeslání dat do počítače pomocí sériové komunikace UART. K samotným datům jsou přidány navíc 3 byty, kde první a druhý byte má hodnotou 255 a slouží pro identifikaci začátku přenášených dat. Třetí byte nabývá hodnoty 1 až 4 a určuje číslo přijímače, kterým byla data přijata. Parametry přenosu jsou v tabulce Tab. 6

Tab. 6: Parametry sériové komunikace

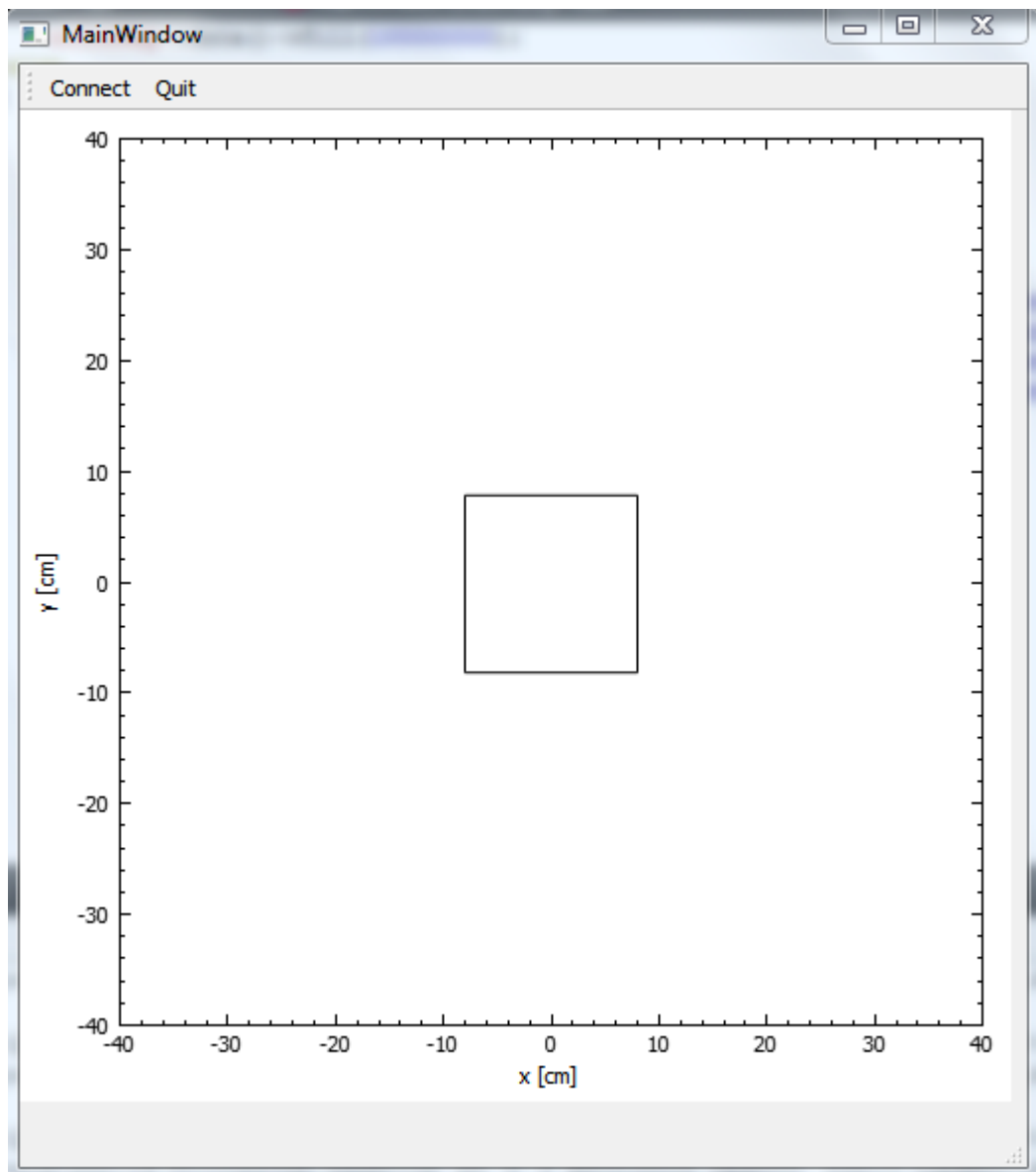
Baud Rate	115200
Datové bity	8
Stop bity	1
Paritní bity	0
Flow control	žádný

6.2 Program v počítači

Program pro zpracování a zobrazení dat byl napsán v jazyce C++ ve vývojovém prostředí Qt s využitím knihovny QCustomPlot pro kreslení grafů.

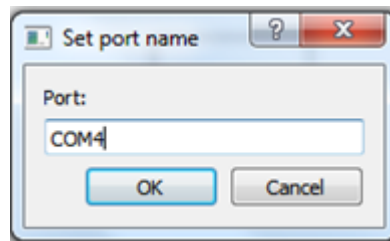
Na Obr. 36 je zobrazeno hlavní okno programu, které obsahuje toolbar a zbylou plochu zaplňuje oblast pro zobrazení polohy detekovaného objektu. Oblast pro zobrazení je realizována dvou dimenzionální barevnou mapou, která je popsána třídou QColorMap

z knihovny QCustomPlot. Jedná se o dvou dimenzionální matici, kde je každá buňka podle své hodnoty reprezentována barvou. Pozice buňky v matici je určena x a y hodnotou a v tomto případě představuje jedna buňka 1 cm. Velikost matice je 80 x 80 a určuje oblast, ve které je prováděna detekce objektů. Uprostřed této oblasti je vykreslen čtverec, který představuje velikost a pozici měřicího systému.



Obr. 36: Hlavní okno programu

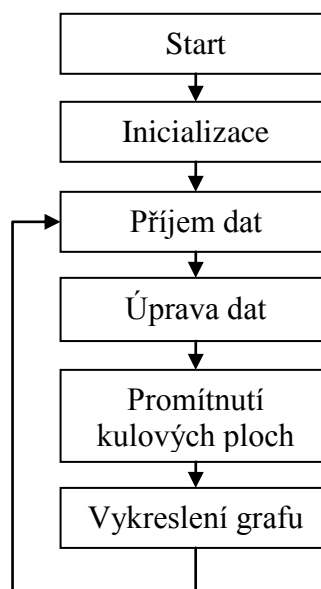
Toolbar obsahuje tlačítko Connect, které slouží pro otevření sériové komunikace. Po stisknutí tohoto tlačítka je uživatel vyzván k zadání portu, přes který má komunikace probíhat viz Obr. 37. Dále toolbar obsahuje tlačítko Quit, které program ukončí.



Obr. 37: Okno pro zadání portu

Vývojový diagram programu je uvedený na Obr. 38. Po spuštění programu je jako první provedena inicializace proměnných, nastavení parametrů zobrazovaného pole a dalších grafických prvků a jsou nastaveny parametry sériové komunikace.

Aby mohl program začít pracovat, je nejprve nutné přijmout data odeslaná mikrokontrolérem. Komunikace mezi počítačem a mikrokontrolérem je prováděna pomocí sériové komunikace, která je ve vývojovém prostředí Qt popsána třídou QSerialPort. Tato třída poskytuje veškeré nástroje pro práci se sériovou komunikací. Parametry komunikace jsou nastaveny stejně, jako pro mikrokontrolér viz Tab. 6. Po otevření sériové komunikace jsou příchozí data ukládána do vnitřního zásobníku třídy QSerialPort. Jakmile jsou v zásobníku nová data připravena ke čtení, je vyvolána funkce ReadReady. V této funkci jsou data načtena ze zásobníku a uložena do pole bytů.



Obr. 38: Vývojový diagram programu

Před zpracováním dat je nejdříve nutné najít identifikační byty, které určují začátek skutečných dat. Všechna data před identifikačními byty jsou smazána, protože nelze určit,

k čemu patří. Po identifikačních bytech následuje číslo přijímače, které je uloženo do proměnné pro další použití. Tato úprava zajišťuje vždy správný formát dat pro zpracování a umožňuje zahájit příjem dat ve kterékoliv fázi vysílání.

Dále jsou data převedena na napětí podle rovnice

$$U = \frac{U_{REF}}{2^8} \cdot N = \frac{3300}{256} \cdot 128 = 1650 \text{ mV} \quad (11)$$

kde U_{REF} je referenční napětí A/D převodníku.

Pro další použití jsou data zprůměrována vždy za dobu 25 μ s. Tato doba odpovídá 1 periodě signálu na frekvenci 40 kHz a současně odpovídá vlnové délce λ , které určuje minimální rozlišovací schopnost. Výpočet vlnové délky je proveden podle rovnice

$$\lambda = v \cdot T = 340 \cdot 0.000025 = 0.0085 \text{ m} \quad (12)$$

Vlnová délka ultrazvukového signálu s frekvencí 40 kHz je ve vzduchu při rychlosti šíření zvuku 340 m/s rovna 8,5 mm. Protože je použita vzorkovací frekvence A/D převodníku 160 kHz jsou za jednu periodu udělány 4 vzorky. Proto jsou každé 4 hodnoty zprůměrovány a uloženy do pole hodnot. Z indexu hodnoty v poli lze potom jednoduše dopočítat vzdálenost, kde velikost hodnoty udává intenzitu odraženého signálu z této vzdálenosti. Jinak řečeno hodnota v poli představuje odraz od objektu umístěného někde na kulové ploše s poloměrem $i \cdot 8.5 \text{ mm}$, kde i je pořadí hodnoty v poli. Toto je provedeno pro každý přijímač.

Následně jsou jednotlivé kulové plochy promítnuty do trojrozměrného pole představující oblast, ve které jsou objekty detekovány. K tomu je použita rovnice koule (13) se středem v bodě $[x_0, y_0, z_0]$ a poloměrem r .

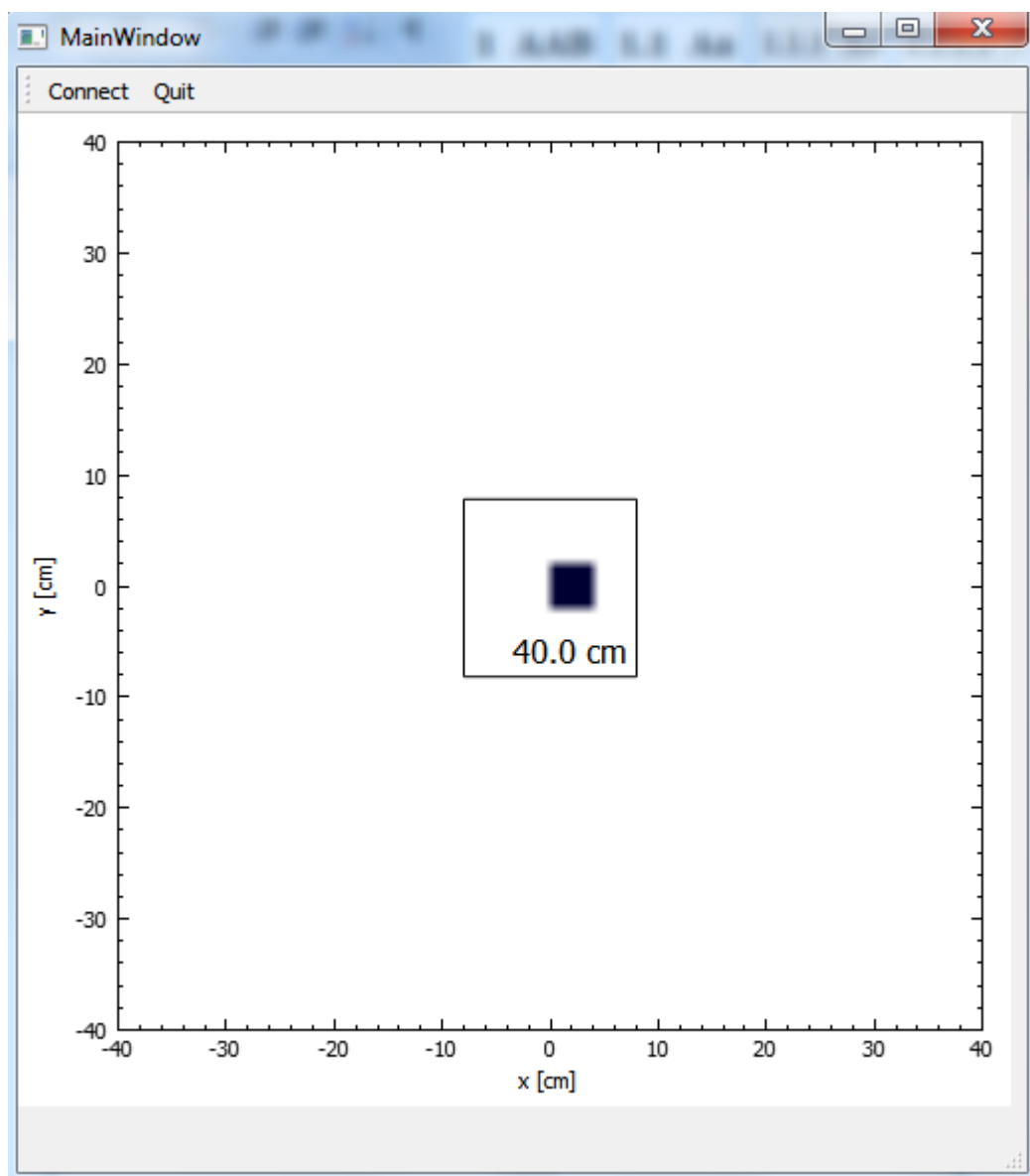
$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2 \quad (13)$$

Z rovnice koule je znám pouze poloměr, ale protože je výpočet prováděn jen v prostoru definovaným trojrozměrnou maticí je možné pro každou hodnotu x , y a r dopočítat hodnotu z . Výsledná rovnice pro výpočet zda bod leží na kulové ploše potom je

$$\sqrt{r^2 - (x - x_0)^2 - (y - y_0)^2} = z \quad (14)$$

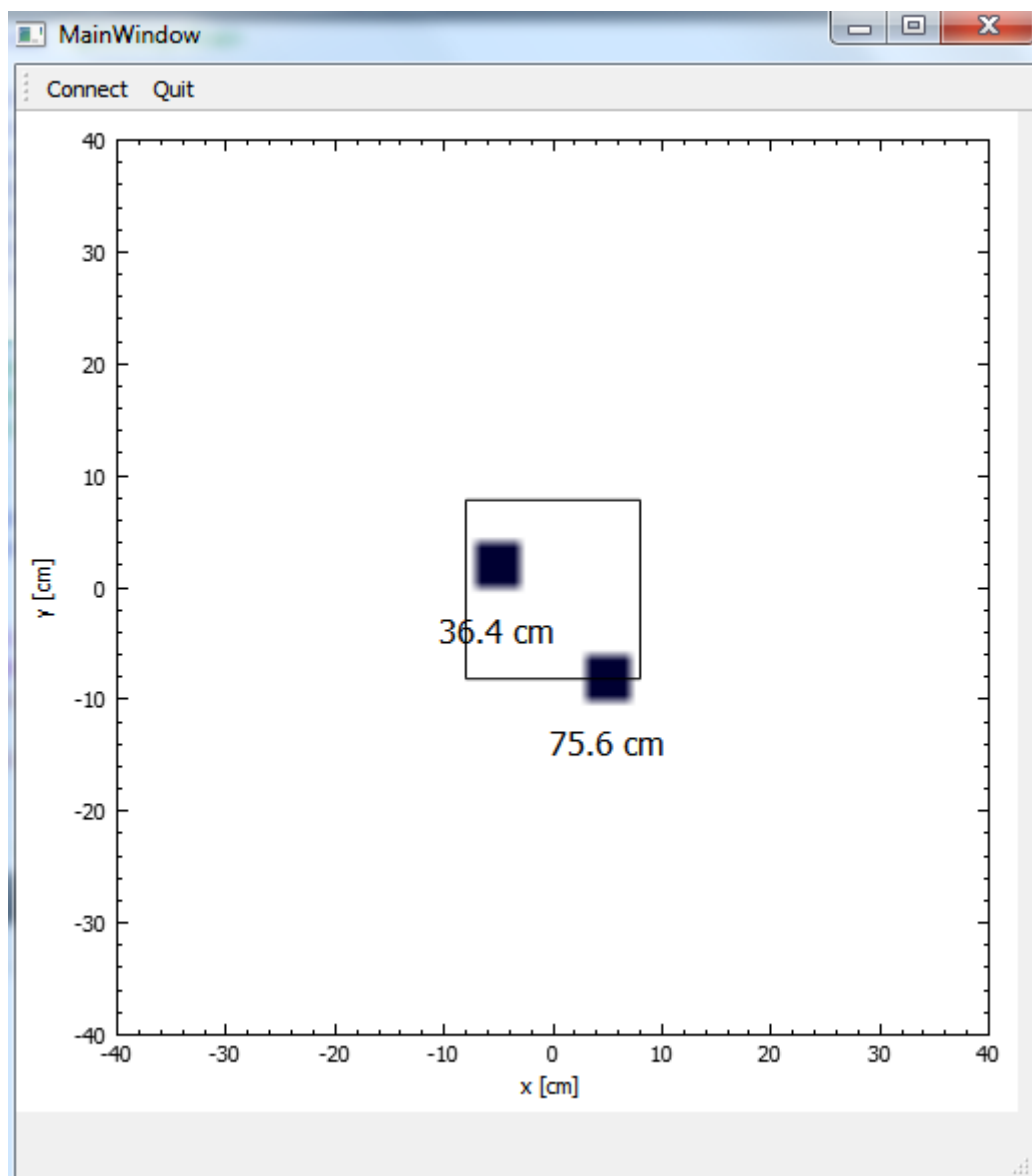
Do prostoru jsou kulové plochy od všech přijímačů promítnuty vynásobením hodnoty kulové plochy s hodnotou každého bodu v matici, který na dané kulové ploše leží. V případě detekovaného objektu má kulová plocha o poloměru vzdálenosti k tomuto objektu větší hodnotu než ostatní kulové plochy. Po promítnutí do matice vznikne na pozici, ve které se jednotlivé kulové plochy protnou maximum, jehož pozice udává pozici detekovaného objektu. Právě toto maximum je poté nalezeno.

Posledním krokem programu je vykreslení pozice detekovaného objektu do 2D grafu, který udává x a y pozici objektu vzhledem k poloze celého měřiče. Vzdálenost objektu je textově zobrazena u každého detekovaného objektu viz Obr 39.



Obr. 39: Zobrazení pozice detekovaného objektu

Pro určení polohy více objektů, je v nutné v matici nalézt další maximum, které vzniklo promítnutím kulových ploch od dalších objektů. V případě že jsou objekty blízko u sebe, budou detekovány pouze jako jeden objekt. Ukázka detekce dvou objektů je na Obr. 40.



Obr. 40: Zobrazení pozice dvou detekovaných objektů

7 MĚŘENÍ

Bylo provedeno měření vzdálenosti jednoho objektu umístěného přímo nad měřičem. Vzdálenost měřeného objektu se měnila od 25 cm do 80 cm. Jako měřený objekt byla použita kartonová krabice o rozměrech 15x20 cm. Změřené hodnoty jsou v tabulce 7.

Tab. 7: Změřené vzdálenosti a relativní chyba

Skutečná vzdálenost [cm]	Změřená vzdálenost [cm]	Absolutní chyba [%]
25	24.7	1.2
30	29.3	2.3
35	34.5	1.4
40	40.2	0.5
45	45.4	0.9
50	50.1	0.2
55	55.2	0.4
60	60.7	1.2
65	64.1	1.4
70	68.9	1.6
75	73.5	2.0
80	77.1	3.6

Maximální vzdálenost, ve které je současný systém schopný detekovat objekt je 80 cm. Jak lze vidět z tabulky naměřená vzdálenost do 65 cm téměř odpovídá vzdálenosti skutečné. Nad touto hodnotou ale začíná přesnost klesat.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo vytvořit schéma zapojení a desku plošných spojů pro systém ultrazvukového vidění pro robotické aplikace, který bude využívat více senzorů.

V první části práce je popsáno, co to je ultrazvuk a rychlost jakou se šíří v prostředí, která je závislá na teplotě. Bylo popsáno zeslabení zvuku ve vzduchu s rostoucí vzdáleností. Zeslabení zvuku je závislé na frekvenci, pro nižší frekvence je menší. Dále byl popsán způsob, jakým se zvukové vlny odráží od objektů a jak jsou pohlcovány. Byly také popsány piezoelektrické ultrazvukové měniče a jejich základní vlastnosti.

Dále byly uvedeny některé stávající systémy ultrazvukového vidění a byl rozebrán princip měření vzdálenosti ultrazvukem. Byl popsán systém pro detekci překážky a určení velikosti objektu využívající ultrazvukový snímač a kameru. Kde byla ultrazvukem zjištěna přítomnost objektu a vzdálenost a velikost objektu byla vypočítána z obrazu získaného kamerou. Další systém využíval jeden ultrazvukový vysílač a více přijímačů pro identifikaci objektu, která byla prováděna z intenzity detekovaného signálu využitím algoritmů pro klasifikaci vzorů.

Další kapitola se zabývala návrhem systému, kde byly uvedeny použité součásti, schéma zapojení a deska plošného spoje. Byl popsán zvolený ultrazvukový měnič 400ST/R160 a taky použitý mikrokontrolér STM32F407. Byly také uvedeny základní vlastnosti A/D převodníku, časovačů a DMA řadiče. Schéma zapojení se skládá ze tří hlavních částí, z napájení, vysílací části a přijímací části. Vysílací část je realizována pomocí H-můstku, kde jsou výstupy z můstku připojeny na vývody vysílače, který je tak buzen napětím v protifázi. Napětí na měniči má potom dvojnásobnou amplitudu. V přijímací části je signál z přijímačů zesílen pomocí dvoustupňového operačního zesilovače. Při návrhu desky plošného spoje bylo hlavním požadavkem vhodné rozmístění senzorů, které jsou umístěny do kříže ve vzdálenosti 7.5 cm od středu desky.

Vysílání ultrazvukového signálu probíhá postupně po jednotlivých vysílačích. Vysílač vyšle dávku 5 kmitů na frekvenci 40 kHz a potom se určitou chvíli čeká na odražený signál. Přijatý signál je zpracován AD převodníkem mikrokontroléru a data jsou přes sériovou komunikaci odeslána do počítače na zpracování. Tento postup je opakován pro všechny vysílače.

Algoritmus potom určí polohu objektu ze vzdáleností naměřených jednotlivými přijímači, které jsou umístěné v určité vzdálenosti od sebe. Při vytvoření kulové plochy o poloměru naměřené vzdálenosti okolo jednotlivých snímačů, je pozice objektu v místě, kde se kulové plochy protnou. Pro určení pozic více detekovaných objektů je použit stejný princip, jen je potřeba zajistit změření vzdálenosti od každého objektu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] OBRAZ, Jaroslav. *Ultrazvuk v měřicí technice. 2. uprav. vyd.* Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984, 485 s.
- [2] MARTINEK, Radislav. *Senzory v průmyslové praxi. 1. vydání.* Praha : BEN - technická literatura, 2004. 199 s. ISBN 80-7300-114-4.
- [3] VLACHOVÁ, Magda. *Mechanické kmitání a vlnění* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z:
<http://is.muni.cz/el/1431/podzim2012/F1141/um/superzabavnejucebнитext.pdf>
- [4] BERNAT, Petr. *Akustika, vznik a šíření zvuku, frekvenční analýza a syntéza, sluchový vjem zvukového signálu* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z:
http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm
- [5] TRPIŠOVÁ, Beáta. *Zvukové vlny* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z:
<http://fyzika.utc.sk/sk/zaklady/merania/video/ZvukTeoria.pdf>
- [6] *The Speed of Sound* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z:
<http://www.physicsclassroom.com/class/sound/Lesson-2/The-Speed-of-Sound>
- [7] *Calculation of the Speed of Sound in Air* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z:
<http://www.sengpielaudio.com/calculator-speedsound.htm>
- [8] Odraz a ohyb vlnění. *Fyzika v pozadí* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z:
http://techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika
- [9] *Odraz zvuku, pohlcování zvuku* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z:
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/197-odraz-zvuku-pohlcovani-zvuku>
- [10] *Piezoelektrický jev* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z:
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/419-vysvetleni-jevu>
- [11] *Ultrasonic Air Transducers* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z:
<https://www.americanpiezo.com/standard-products/air-transducers/ultrasonic.html>
- [12] IGEL, Irina. *Measuring Distance with Sound Waves* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z:
https://www.teachengineering.org/view_activity.php?url=collection/nyu_/activities/nyu_soundwaves/nyu_soundwaves_activity1.xml
- [13] HANZEL, Jaroslav a Ladislav JURIŠICA. *Experimentálna identifikácia parametrov ultrazvukového diaľkomeru* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z:

http://www.idbjournal.sk/buxus/docs/casopisy/atp_plus/plus_2006_2/plus23_31.pdf

- [14] UHLÍŘ, Jan a Pavel SOVKA. *Číslicové zpracování signálů*. Vydavatelství ČVUT, 2002, 327 s. ISBN 8001026132.
- [15] ŠONKA, Milan; HLAVÁČ, Václav; BOYLE, Roger. *Image processing, analysis, and machine vision. 3rd ed.* Toronto : Thomson, 2008. 829 s. ISBN 978-049-5082-521.
- [16] VÁŇA, Vladimír. ARM pro začátečníky. Praha: BEN - technická literatura, 2009, 195 s. ISBN 978-80-7300-246-6.
- [17] CATSOULIS, John. *Designing embedded hardware. 2nd ed.* Sebastopol: O'Reilly, 2005, 377 s. ISBN 05-960-0755-8.
- [18] VEDRAL, Josef a Jan FISCHER. *Elektronické obvody pro měřicí techniku*. ČVUT, 1999, 340 s. ISBN 80-01-02966-2.
- [19] YIU, Joseph. *The Definitive Guide to the ARM Cortex-M3, Second Edition*. Newnes, 2009, 479 s. ISBN 978-1856179638.
- [20] SHAHDIB, Fayaz, Wali Ullah BHUIYAN, Kamrul HASAN a MAHMUD. *Obstacle Detection and Object Size Measurement for Autonomous Mobile Robot using Sensor* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z:
<http://research.ijcaonline.org/volume66/number9/pxc3886074.pdf>
- [21] T. Ugajin, K. Ohtani, M. Baba: "Evaluation of recognition algorithms in ultrasonic object recognition" Proc. of SICE Annual Conference, Akita, Aug 2012, pp. 1252-1255.
- [22] *Capacitive Transducers* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z:
<http://www.instrumentationtoday.com/capacitive-transducers-2/2011/07/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A/D převodník	Analogově digitální převodník
SRAM	Static Random Acces Memory
UART	Universal Asynchronous Reciever and Transmitter
USART	Universal Synchronous and Asynchronous Reciever and Transmitter
SOIC	Small-Outline Integrated Circuis
TQFP	Thin Quad Flat Pack
PCB	Printed Circuit Board
DMA	Direct Memory Access
GA	Genetický Algoritmus
ANN	Artificial Neural Network
USB	Universal Seriál
SPI	Seriál Peripheral Interface

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Dělení zvukových vln podle frekvence [2].....	11
Obr. 2. Mechanické vlnění [3].....	11
Obr. 3. Kmitání částic prostředí při šíření vlny [1].....	12
Obr. 4. Zvuková vlna šířící se v trubici [5].....	12
Obr. 5. Šíření vlnění [8].....	13
Obr. 6. Vznik odražené kulové vlnoplochy [8]	14
Obr. 7. Vznik odražené rovinné vlnoplochy[8]	14
Obr. 8. Ohyb vlnění [3].....	15
Obr. 9. Rozdělení intenzity zvuku při dopadu na stěnu [9]	18
Obr. 10. Zjednodušené provedení měničů (a – rovná membrána, b – prohnutá membrána) [2]	19
Obr. 11: Konstrukce kapacitního měniče [22].....	21
Obr. 12. Směrová vyzářovací charakteristika [11]	21
Obr. 13. Měření vzdálenosti ultrazvukem [12].....	23
Obr. 14. Průběh napětí jednosystémového měniče [2]	24
Obr. 15: Blokové schéma systému [20].....	26
Obr. 16: Zorný úhel [20].....	26
Obr. 17: Obrázek zobrazený kamerou [20]	27
Obr. 18: Nástin ultrazvukového rozpoznávacího systému [21].....	28
Obr. 19: Hodnoty intenzity detekovaného signálu každým přijímačem [21].....	28
Obr. 20: Princip identifikace objektu pomocí k-NN [21].....	29
Obr. 21: Rozmístění měničů ultrazvukového signálu.....	31
Obr. 22: Vyslání dávky kmitů a příjem odraženého signálu	32
Obr. 23: Ukázka detekovaného signálu [1]	32
Obr. 24: Neurčitost polohy objektu [13].....	33
Obr. 25: Určení polohy objektu ve 2D prostoru	33
Obr. 26. Ultrazvukový měnič 400ST/R160	35
Obr. 27. Směrová vyzářovací charakteristika.....	36
Obr. 28: Blokové schéma mikrokontroléru STM32F407	37
Obr. 29: Princip dvojité vyrovnávací paměti.....	41
Obr. 30: Schéma zapojení napájecí části	43
Obr. 31: Blokové schéma H-můstku.....	44

Obr. 32: Zapojení přijímací části – dvoustupňový zesilovač.....	45
Obr. 33: Deska plošných spojů ze strany součástek	46
Obr. 34: Deska plošných spojů ze strany spojů	46
Obr. 35: Vývojový diagram pro mikrokontrolér	47
Obr. 36: Hlavní okno programu.....	49
Obr. 37: Okno pro zadání portu	50
Obr. 38: Vývojový diagram programu	50
Obr. 39: Zobrazení pozice detekovaného objektu	52
Obr. 40: Zobrazení pozice dvou detekovaných objektů	53

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Rychlost šíření zvuku v různých látkách	15
Tab. 2. Závislost rychlosti zvuku ve vzduchu na teplotě [7]	16
Tab. 3: DMA1 - nastavení streamů a kanálů pro periferie	39
Tab. 4: DMA2 - nastavení streamů a kanálů pro periferie	39
Tab. 5: Přehled časovačů	42
Tab. 6: Parametry sériové komunikace.....	48
Tab. 7: Změřené vzdálenosti a relativní chyba	54