

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2018**

**KUBICA  
JIŘÍ**

**České vysoké učení technické v Praze**

**Fakulta strojní**

Ústav přístrojové a řídicí techniky

Obor: Informační a automatizační technika

**Model samo-řiditelného kufříku**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Kubica Jiří  
Vedoucí práce: Doc. Ing. Martin Novák Ph.D.  
Rok: 2018

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kubica** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **438349**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**  
Studijní program: **Strojírenství**  
Studijní obor: **Informační a automatizační technika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Self-driving suitcase - model**

Název bakalářské práce anglicky:

**Self-driving suitcase - model**

Pokyny pro vypracování:

- 1) konstrukční návrh řešení s využitím 3D tisku.
- 2) specifikace snímačů pro vyhledávání a sledování vlastníka kufru.
- 3) návrh elektroniky, říditelné Arduinem.
- 4) návrh programového řešení.

Seznam doporučené literatury:

Arduino. Arduino Mega2560 [online]. <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>  
Helipal. Tarot 4114 [online]. Dostupné z:  
<http://www.helipal.com/tarot-4114-high-power-brushless-motor-320kv.html>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Martin Novák, Ph.D., odbor elektrotechniky FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.06.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

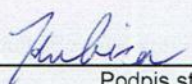
  
\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

19.4 2018  
Datum převzetí zadání

  
\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pouze s pomocí vedoucího práce Doc. Ing. Martina Nováka Ph.D. Souhlasím také s případnou publikací výsledků bakalářské práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako spoluautor.

V Praze dne .....

Podpis .....

**Poděkování:**

Děkuji Doc. Ing. Martinu Novákovi Ph.D. za jeho odborné konzultace, rady a podněty, které mi během vypracování této práce poskytl.

Děkuji své rodině, přátelům a přítelkyni za stále trvající podporu během celého studia.

**Název práce:** Model samo-řiditelného kufříku  
**Autor:** Kubica Jiří  
**Obor:** Informační a automatizační technika  
**Druh práce:** Bakalářská práce  
**Vedoucí práce:** Doc. Ing. Martin Novák Ph.D.  
Ústav přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní  
České vysoké učení technické v Praze

**Abstrakt:** Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí prototypu samo-řiditelného zavazadla, tedy robota, schopného následovat svého uživatele.  
Po prozkoumání různých možností realizace takového systému je zvoleno řešení pomocí ultrazvukového vysílače a série ultrazvukových mikrofonů na kufříku.  
Pro tento systém je dále navrženo a realizováno elektrické zapojení a programové řešení.

**Klíčová slova:** Samo-řiditelný kufřík, Sledovací zařízení, Inteligentní zavazadlo, Ultrazvuk

**Title:** Self-driving suitcase - Model  
**Author:** Kubica Jiří  
**Abstract:** This thesis deals with the design and construction of a self-driving suitcase prototype i.e. a robot capable of following its user.  
After examining the various possibilities of realizing such a system, a solution is chosen using an ultrasonic transmitter and a series of ultrasonic microphones placed on a suitcase. Electric schematics and programmes have been designed for this system.

**Keywords:** Self-driving suitcase, Tracking system, Intelligent luggage, Ultrasound

# Obsah

1. Úvod .....	7
2. Existující roboti .....	8
2.1. Cowarobot R1 .....	8
2.2. Travelmate .....	10
2.3. CX-1 .....	11
3. Možné způsoby řešení.....	12
3.1. GPS.....	12
3.2. Infračervené záření.....	13
3.3. Anténové pole .....	14
3.4. Ultrazvuk.....	15
3.5. Kamera .....	16
3.6. Výběr řešení .....	17
4. Ultrazvuk.....	17
4.1. Charakteristiky.....	17
4.2. Ultrazvukové vysílače a přijímače .....	19
4.3. Dosah ultrazvukových senzorů.....	20
5. Návrh robota .....	25
5.1. Určení polohy.....	26
5.2. Návrhové schéma .....	27
5.3. Vysílací jednotka .....	28
5.3.1. Radiový vysílač.....	28
5.3.2. Ultrazvukový vysílač.....	28
5.3.3. Řídící jednotka.....	30
5.4. Přijímací jednotka .....	30
5.4.1. Radiový přijímač.....	30
5.4.2. Ultrazvukový přijímač.....	32
5.5. Řídící jednotka.....	36
5.6. Šasi.....	36
6. Výsledné zapojení a program .....	38
6.1. Elektrické schéma vysílače.....	38
6.2. Elektrické schéma kufříku .....	39
6.3. Program pro vysílač.....	41
6.4. Program pro kufřík .....	42
7. Odzkoušení.....	45
7.1. Přesnost měření polohy.....	45
7.1.1. Měření úhlu .....	46
7.1.2. Měření vzdálenosti.....	48
7.2. Provoz a chování prototypu samo-řiditelného kufříku .....	49
8. Závěr .....	50

# 1. Úvod

Trendem dnešní doby je nahrazovat lidskou pracovní sílu roboty a automaty, a to nejen ve strojním průmyslu. S automatizovanými stroji se setkáváme stále častěji i v běžném životě. Snad každá domácnost vlastní automatickou pračku, ledničku nebo myčku na nádobí. Společnosti, zabývající se výrobou těchto přístrojů, hledají stále další člověkem vykonávané činnosti a možnosti, jak je člověku usnadnit. Po takovýchto strojích je velká poptávka a vlastnění patentu na takový přístroj znamená velice lukrativní záležitost.

Jednou z činností, kterou každý člověk pravidelně vykonává, je nošení zavazadel. I tahání kufru s kolečky je pro většinu lidí namáhavá práce. Přístrojů, které toto lidem zjednodušují je velice málo a nejsou příliš populární. V ideálním případě by takový stroj měl být zcela automatizovaný, to znamená, že po zapnutí už by ke své správné funkci nevyžadoval lidský element. Samostatně by se orientoval v prostoru a doprovázel svého majitele. Konstrukce takového robota je nesnadná, což je jistě důvodem, proč tyto roboty nevidáme na každém kroku.

Návrh a konstrukce prototypu takového robota je cílem této práce. Prototyp by měl být schopný lokalizovat svého majitele s dostatečnou přesností a demonstrovat správnou funkci sledovacího systému tím, že se k majiteli přemístí. Vzhledem kufříku, jeho zabezpečením a dalšími vedlejšími systémy se tato práce nezabývá.



## 2. Existující roboti

### 2.1. Cowarobot R1

V současné době existuje na trhu jen pár zavazadel, které by se daly označit slovem „samo-řiditelné“. První společností, která začala komerčně prodávat takovýto produkt, je společnost Cowarobot. I když se její zaměstnanci vývojem autonomního zavazadla zabývali už od roku 2013, finální produkt byl představen až v roce 2016 a nesl označení Cowarobot R1. [1][2]

Kufřík Cowarobot R1 váží 4,8 kg. Jeho rozměry jsou 55x37x20 cm, což podle většiny dopravních společností splňuje rozměry příručního zavazadla. Elektronika a další vybavení kufříku tvoří jen 4 % jeho celkového objemu. Kufřík je schopen vyvinout rychlost 7,6 km/h. Na jedno nabití baterie ujede až 20 km. Vybitá baterie se nabije na plnou kapacitu za 4,5 hodiny a má kapacitu 96Wh. Kufřík je schopen překonat menší povrchové nerovnosti a zvládá svahy se sklonem do 15°. Lze jej objednat za cenu v přepočtu kolem 16 000 Kč. [1]



Obr. 1 Cowarobot R1 [3]

Kufřík sleduje svého majitele díky elektronickému náramku, který je dodáván spolu s kufříkem. Pokud se kufr od majitele vzdálí na více jak 5 metrů, začne náramek vibrovat a tím svého nositele upozorní. Náramek slouží také jako elektronický klíč, kterým lze kufřík odemknout. Kufřík je poháněn dvěma

krokovými motory, které se při zapnutí automatického módu vysunou zespod kufříku. Pro orientaci v prostoru slouží senzor Co-Eye, který si společnost sama vytvořila a patentovala. Co-Eye senzor se skládá z řady dalších senzorů, mezi které patří senzory hloubky, ultrazvukové senzory na detekci schodů a jiných nepřekonatelných překážek a GPS senzoru, který umožní lokalizaci kufříku v případě ztráty nebo odcizení. [2]



Obr. 2 Co-Eye senzor [1]

Jakékoli bližší specifikace Co-Eye senzoru si společnost chrání. Z polohy a popisu jednotlivých částí hloubkového senzoru na kufříku lze předpokládat, že se pravděpodobně jedná o sérii infračervených projektorů a kamer citlivých na infračervené světlo. Infračervený projektor promítá do prostoru nepravidelný rastr infračervených, pro člověka neviditelných, bodů. Kamera citlivá na infračervené světlo tyto body zachytí. Díky dostatečné vzdálenosti mezi projektorem a kamerou je natočený rastr odlišný od rastru promítaného. Výpočetní jednotka poté pomocí těchto rozdílů spočítá hloubkovou mapu okolí. Na stejném principu funguje populární herní platforma X-box kinect. [1][4]

Pokud je tato hypotéza správná, sledovací náramek nejspíše obsahuje také nějaký prvek, který lze vidět na IR kameře a podle jeho polohy na obrazu (a znalosti jeho vzdálenosti, díky hloubkovému senzoru) určí polohu svého majitele.

## 2.2. Travelmate

V červnu roku 2017 uvedla společnost Travelmate Robotics na trh svou verzi autonomního zavazadla s názvem Travelmate. [5]

Travelmate je k dostání hned ve třech různých velikostech a několika barevných provedeních. Kufřík lze používat v poloze „na výšku“, tedy stejně jako to umí Cowarobot R1, nebo v poloze „na ležato“, což umožňuje umístění dalších zavazadel na víko kufříku. Maximální rychlost kufříku přesahuje hodnotu 10 km/h. Kufřík vydrží na jedno nabití 4 hodiny kontinuálního provozu. Travelmate je k dostání za cenu v přepočtu kolem 28 000 Kč. [5]

Ke správnému fungování kufříku je nutné, aby si jeho majitel nainstaloval na svůj mobilní telefon aplikaci Travelmate a kufřík se svým mobilním zařízením spároval. Kufřík potom sleduje telefon pomocí kombinace bluetooth a GPS signálu. O správnou interpretaci těchto signálů se stará systém Follow Me, který společnost Travelmate Robotics vyvinula. To, jak konkrétně tento systém funguje, není veřejně přístupná informace. [6][7]



Obr. 3 Travelmate [7]

Kufřík je vybaven řadou ultrazvukových senzorů vzdálenosti, díky kterým je schopen detekovat překážky a navrhnout alternativní trasu k majiteli. Informace o datech ze senzorů a pohybech kufříku jsou přes mobilní zařízení posílána

společnosti Travelmate Robotics, kde pomáhají vývojářům zlepšit chování jejich systému. Společnost nyní pracuje na systému, který by umožnil kufříku se učit, a tvrdí, že čím více lidí bude jejich produkt používat, tím inteligentněji se bude Travelmate chovat. [5]

### 2.3. CX-1

Společnost ForwardX představila na konci února na veletrhu CES 2018 autonomní zavazadlo s označením CX-1. Vstup robota CX-1 na trhy je plánovaný na léto téhož roku. [8]

Kufřík je schopen vyvinout rychlost 10,5km/h. ForwardX se chlubí tím, že CX-1 je nejinteligentnějším zavazadlem na světě, což se projeví na jeho ceně, která je odhadovaná mezi třemi a čtyřmi tisíci dolary. [9]



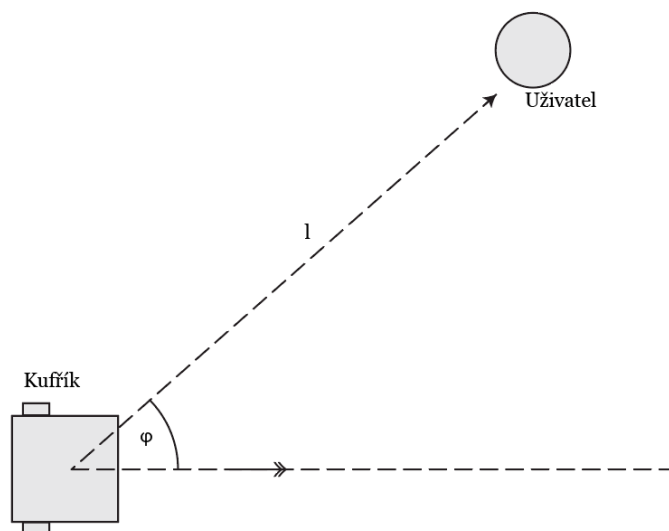
Obr. 4 ForwardX CX-1 [8]

Ke sledování majitele kufřík potřebuje jedinou širokoúhlou kameru. Pomocí systému detekce obrazu kufřík identifikuje všechny osoby v okolí a mezi nimi pomocí systémů rozpoznávání obličejů a tvarů najde svého majitele. S kufříkem

bude dodáván i elektronický náramek, který vibracemi upozorní na příliš velkou vzdálenost mezi majitelem a jeho zavazadlem. [9]

### 3. Možné způsoby řešení

Jak je vidět, stěžejním a nejsložitějším systémem celého zařízení je systém sledování uživatele. Způsobů, jak tuto funkci realizovat, je celá řada. Kufřík nemusí znát svou absolutní polohu, stačí relativní poloha vůči uživateli. Nejsnáze lze popsat relativní polohu kufříku pomocí polárních souřadnic. Úhel mezi osou kufříku a spojnicí mezi kufříkem a uživatelem je označen písmenem  $\varphi$ , vzdálenost mezi kufříkem a uživatelem písmenem  $l$ . O určení polohy se tedy mohou starat dva na sobě nezávislé systémy, jeden pro určení směru a druhý pro určení vzdálenosti.

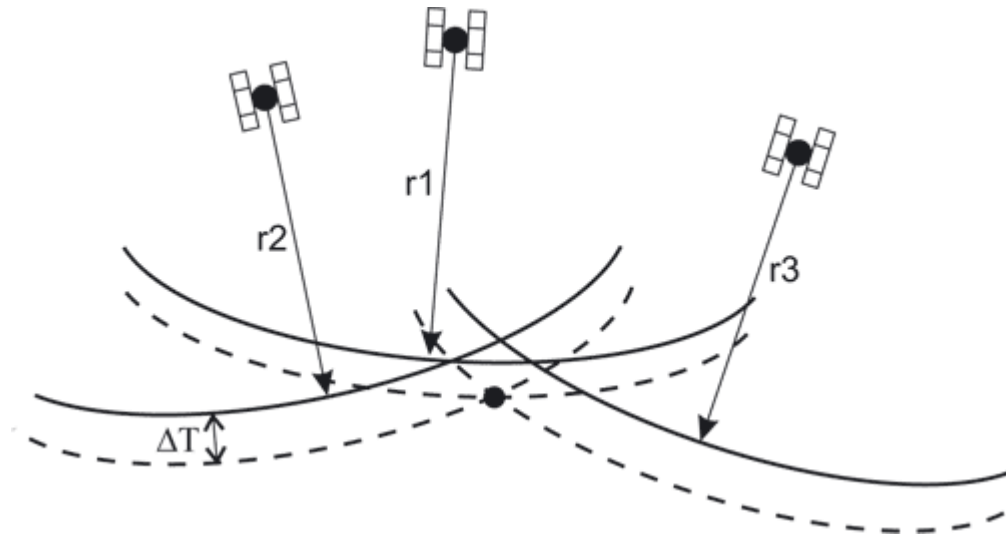


Obr. 5 Poloha uživatele vůči kufříku

#### 3.1. GPS

Nejznámější z řady pozičních systémů je globální poziční systém GPS. GPS družice vysílají přesná data o své aktuální poloze a aktuálním času. Přijímač GPS signálu tuto zprávu zachytí a z rozdílu časů vyslání a přijetí signálu určí vzdálenost od dané družice. Jelikož nejsou vnitřní hodiny družice a přijímacího zařízení synchronizovány, bude zjištěná vzdálenost zatížena chybou. Protože všechny GPS družice mají mezi sebou své hodiny sladěny s přesností 3 ns, bude tato chyba stejná pro určené vzdálenosti od všech družic. Díky tomu musí

přijímač zachytit signál ze čtyř družic, aby byl schopen určit svou polohu. Z každého místa na zemském povrchu lze zachytit signál ze šesti GPS družic. Každá další družice v dosahu napomáhá ke zpřesnění určené polohy. [10]



Obr. 6 Určení polohy pomocí GPS [10]

Přesnost pozice získané pomocí GPS je ovlivněna kvalitou přijímače, odchylkami drah družic a atmosférickými jevy, které mohou způsobit refrakci a zpoždění signálu. Chyba se pohybuje nejčastěji v jednotkách metrů. Při použití GPS, pro zjištění absolutní polohy kufříku a jeho majitele, se dá předpokládat, že obě měření budou zatížena stejnou, nebo alespoň podobnou, chybou, protože se kufřík i majitel budou nacházet ve stejných podmínkách a přijímat signál pravděpodobně ze stejných satelitů. Chyba relativní vzdálenost mezi kufříkem a jeho uživatelem se bude pohybovat řádově v menších jednotkách a tato technologie by se mohla ukázat jako dostatečně přesná. Výrazně horší přesnosti dosáhneme v hustě urbanizovaných oblastech a interiérech budov, což jsou právě místa, kde se zavazadla používají nejčastěji. [10]

### 3.2. Infračervené záření

Jak již bylo nastíněno, navigaci pomocí infračerveného signálu nejspíše využívají zavazadla Cowarobot, která díky němu nejenže lokalizují svého majitele, ale vytvoří si i hloubkovou mapu okolí. Zjednodušenou verzi tohoto systému využívají robotické vysavače s dokovací stanicí. Dok vysílá kuželový paprsek infračerveného světla, robot je vybaven fotodiodou citlivou na

infračervené světlo. Podle charakteru záření je robot schopen určit, zda se nachází v levé či pravé části kuželového paprsku a díky tomu posléze dokovací stanici lokalizovat. [11]

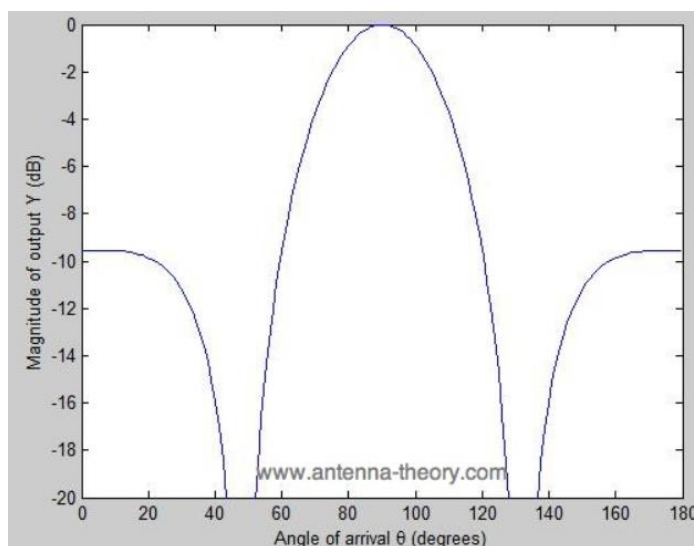
Podobnou technologii je možné použít pro účely autonomního zavazadla. Uživatel by byl vybaven vysílačem infračerveného záření. Kufřík by disponoval řadou fotodiód, z čehož by každá pokrývala určitou část zorného pole kolem robota. Podle toho, které diody by byly aktivní, by robot určil přibližný směr ke svému majiteli. Pro zjištění vzdálenosti by kufřík musel disponovat ještě dalším systémem. [12] [13]

Pokud by kufřík jako přijímač infračerveného signálu používal kameru, lze určit směr ke zdroji signálu na základě znalosti polohy signálu na snímku z kamery. Po instalaci dvou kamer na tělo robota, lze získat i údaj o vzdálenosti. [4]

Nevýhodou tohoto řešení je požadavek na přímou viditelnost mezi kufříkem a zdrojem signálu. Problémy by mohly způsobovat lesklé povrchy, které budou signál odrážet. Měření polohy bude ovšem přesné a za předpokladu přímé viditelnosti velice odolné vůči rušení.

### **3.3. Anténové pole**

Zařízení, které kufřík sleduje, bude vybaveno generátorem sinusových radiových vln o vlnové délce řádově v desítkách centimetrů. Přijímač kufříku se bude skládat z pole radiových antén. Jelikož budou antény vůči sobě posunuty o známé vzdálenosti, bude každá anténa přijímat signál s jinou fází. Amplituda signálu, který vznikne součtem signálů ze dvou antén, se bude měnit v závislosti na fázovém rozdílu. Na základě znalosti fázového rozdílu mezi různými dvojicemi antén se lze dopočítat směru, ze kterého se signál šíří. [14][15]

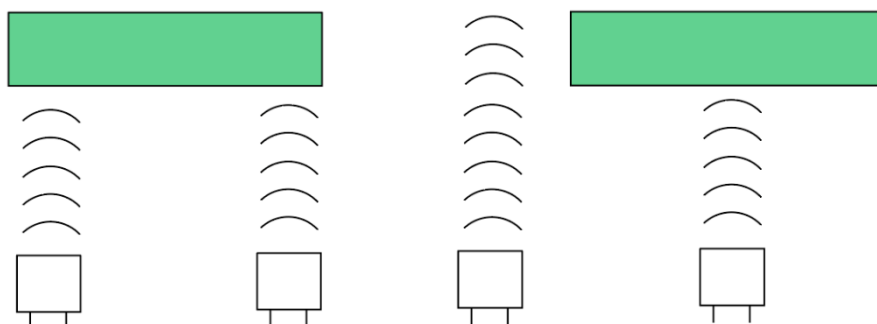


Obr. 7 Příklad přijetí rádiového signálu pomocí anténového pole [16]

Tento způsob lokalizace je energeticky náročný a náchylný na rušení, nevyžaduje ovšem přímou viditelnost mezi uživatelem a kufříkem. Díky této technologii je kufřík schopen zjistit jenom směr k uživateli, na zjištění vzdálenosti je nutné kufřík vybavit dalším systémem. [14][16]

### 3.4. Ultrazvuk

Velice jednoduchý způsob sledování uživatele pomocí ultrazvuku používá ke své funkci golfový vozík Caddytek. Vozík je osazen dvěma ultrazvukovými senzory vzdálenosti, které směřují do směru pohybu. Ve chvíli, kdy vozík jede za uživatelem, detekují oba senzory přibližně stejnou vzdálenost (viz levá část obr. 8). Pokud uživatel změní směr, jeden z ultrazvukových senzorů ztratí signál a vozík adekvátně upraví svou dráhu. [17]



Obr. 8 Schéma funkce vozíku Caddytek



Jakmile vozík jednoho majitele ztratí z dosahu, už ho není schopen najít. Tudíž toto řešení není vhodné do míst, kde se pohybuje více lidí. Pro účely samoregulovatelného zavazadla se tento způsob řešení nehodí.

Lepších výsledků lze dosáhnout, pokud zdrojem ultrazvukového signálu bude zařízení, které u sebe bude mít majitel kufříku. Zavazadlo bude vybaveno řadou ultrazvukových přijímačů. Jelikož se zvuk ve vzduchu šíří rychlostí, která je snadno měřitelná běžnými elektrickými obvody, je možné měřit časy příjmu ultrazvukového signálu jednotlivými přijímači. Z rozdílů těchto časů lze dopočítat úhel, pod kterým byl zvuk vyslán. Pokud bude znám i čas vyslání signálu, lze určit i vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem.

Jelikož je signál přenášen pomocí zvukových vln, systém není závislý na přímé viditelnosti. Protože se signál po přímé dráze dostane k přijímači vždy dříve než signál odražený, nebudou odražené vlny při správném nastavení ovlivňovat funkčnost systému. Díky tomu, že se zvuk bude převážně šířit kolem překážek, a ne skrz ně, bude mít i kufřík tendence tyto překážky objíždět.

### **3.5. Kamera**

Kufřík CX-1 společnosti ForwardX využívá pro orientaci v prostoru jednu kameru a komplexní systém detekce obrazu. Prototyp robota společnosti Piaggio Fast Forward využívá systému dvou kamer. Jedna kamera je umístěna na těle robota podobně jako v případě CX-1. Druhá kamera je integrována do opasku, který musí majitel kufříku nosit. Data z obou kamer jsou posílána do výpočetní jednotky robota, která vyhodnocuje podobnosti a rozdíly na jednotlivých snímcích. Porovnáním těchto dvou snímků robot určí svou polohu vůči nositeli opasku. Snímky z kamery opasku jsou v paměti robota uchovávány, dokud nedojde k jejich upotřebení. Robot tudíž může projíždět trasu, kudy uživatel prošel, i s velkým časovým odstupem. Díky tomu, že se snímky pouze porovnávají, není nutná tak důkladná analýza obrazu a samotný algoritmus bude subtilnější a jednodušší než v případě CX-1. [9][18][19]

Systém detekce obrazu je závislý na světelných podmínkách. Při použití dvou kamer systém nebude vyžadovat přímou viditelnost. Spolehlivost systému bude nižší v často se měnících prostředích jako jsou například davy lidí.

### 3.6. Výběr řešení

Výhody a nevýhody jednotlivých způsobů řešení jsou shrnuty v následující tabulce.

	Výhody	Nevýhody
GPS	Nevyžaduje přímou viditelnost Jednoduché na realizaci	Nevhodné do měst a interirérů Méně přesné
Infračervený signál	Jednoduché na realizaci Přesné určení polohy Odolné proti rušení	Vyžaduje přímou viditelnost Problém s odrazem signálu
Anténové pole	Nevyžaduje přímou viditelnost Signál prochází překážkami Dlouhý dosah	Zjistí pouze směr Náchylné na rušení Energeticky náročné
Ultrazvuk	Nevyžaduje přímou viditelnost Velice levné řešení Signál se šíří kolem překážek	Kratší dosah Nutnost eliminace rušení
Kamera	Uživatel nepotřebuje nosit další zařízení Odolné vůči rušení	Závislé na světelných podmínkách Náročné na realizaci Vyžaduje přímou viditelnost

Tab. 1 Srovnání možných způsobů řešení

Na základě výše uvedené tabulky bylo zvoleno řešení pomocí ultrazvukového signálu. Ultrazvukové vysílače a přijímače jsou cenově dostupné a vyrábí se v různých výkonech a provedeních. Řešení nevyžaduje přímou viditelnost. V případě rušení signálu lze do přijímacího zařízení vložit frekvenční filtr nebo nežádoucí vlivy eliminovat softwarově.

## 4. Ultrazvuk

### 4.1. Charakteristiky

Ultrazvuk je mechanické podélné vlnění, jehož frekvence je vyšší, než je horní mez slyšitelnosti člověka, tedy 20 kHz. Ultrazvuk se šíří prostředím pomocí pružných deformací, přičemž každá částice média kmitá ve směru šíření zvuku kolem své rovnovážné polohy. Jelikož částice ve stejné vzdálenosti od zdroje kmitají se stejnou fází, vyvolává jejich pohyb lokální změny hustoty a tím i tlaku.

Přístroje pracující se zvukem měří právě místní fluktuaci tlaku, tedy odchylku od absolutního tlaku v prostředí. [20]

Rychlost zvuku závisí na skupenství média, ve kterém se zvuk šíří. Pro účely autonomního zavazadla je směrodatná rychlost šíření v plynech, konkrétně ve vzduchu. Pro ideální tekutiny lze rychlost zvuku spočítat podle vztahu [21]

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} . \quad (4-1)$$

Za předpokladu, že šíření zvuku je adiabatický děj, je modul objemové pružnosti  $K$  dán rovnicí

$$K = \kappa \cdot p . \quad (4-2)$$

Použitím rovnice pro ideální plyn lze vyjádřit rychlost zvuku v plynech vztahem

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{\kappa \cdot p}{\rho}} = \sqrt{\kappa \cdot r \cdot T} . \quad (4-3)$$

Poissonova konstanta  $\kappa$  pro vzduch nabývá při běžných podmínkách hodnoty 1,4. Plynová konstanta suchého vzduchu  $r$  je rovna 287,1 J/kg·K.

$$c_{vzduch} = \sqrt{\kappa_{vzduch} \cdot r_{vzduch} \cdot T} = \sqrt{1,4 \cdot 287,1 \cdot T} = \sqrt{401,94 \cdot T} \quad (4-4)$$

Pro teplotu 20 °C je rychlost šíření v suchém vzduchu

$$c_{vzduch} = \sqrt{401,94 \cdot T} = \sqrt{401,94 \cdot (273,15 + 20)} = 343,26 \frac{m}{s} . \quad (4-5)$$

Rychlost zvuku je závislá na teplotě a vlhkosti vzduchu. Pro aplikaci sledovacího systému kufříku není nutné znát vzájemnou polohu uživatele a zavazadla s přesností na centimetry. Kufřík tedy nemusí být vybaven přístroji na měření teploty a vlhkosti vzduchu. [21][22]

Pro další výpočty bude uvažována střední hodnota rychlosti zvuku

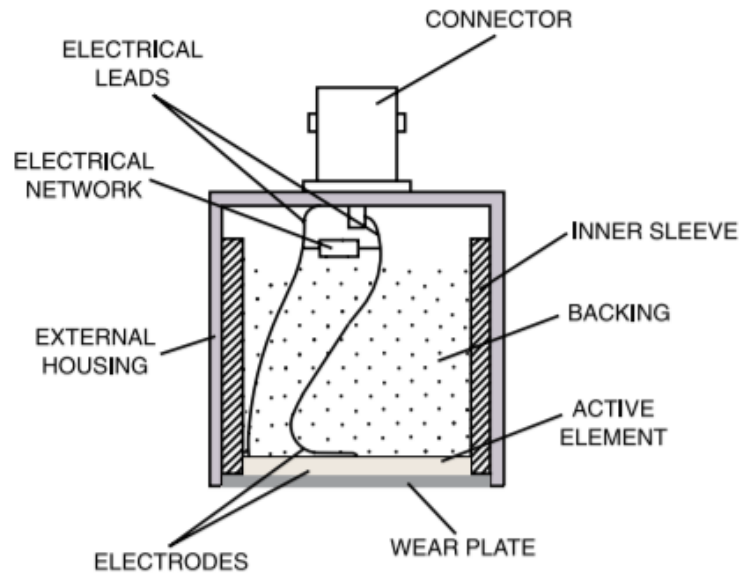
$$\bar{c}_{vzduch} = 344 \text{ m/s} . \quad (4-6)$$

## 4.2. Ultrazvukové vysílače a přijímače

Ultrazvukové vysílače a přijímače využívají ke své funkci piezoelektrický jev. Piezoelektrický jev je schopnost látky vytvářet na svém povrchu elektrické napětí v závislosti na mechanické deformaci. Piezoelektrický jev se vyskytuje u krystalů, které nemají střed souměrnosti a skládají se ze záporných a kladných iontů. V klidovém stavu těžiště záporných a kladných iontů v krystalu navzájem splývají. Vlivem deformace se záporné a kladné ionty nepřemístí stejně, krystal se jeví jako polarizovaný. Tento princip platí i obráceně. Pokud je na piezoelektrický krystal přivedeno napětí, patřičným způsobem se zdeformuje. Obrácený piezoelektrický jev se nazývá elektrostrikce. [23]

Pokud je na piezoelektrický krystal přivedeno střídavé napětí o frekvenci, která je přibližně stejná jako vlastní frekvence krystalu, začne krystal oscilovat a tím vytvářet mechanické vlnění, které se může dále šířit prostorem ve formě zvukových vln. Pokud je frekvence střídavého napětí větší než 20 kHz, jedná se o ultrazvuk. Analogicky platí, že pokud na piezoelektrický krystal působí mechanické vlnění o podobné frekvenci jako je jeho vlastní frekvence, vznikne na povrchu krystalu střídavé napětí. Konstrukce ultrazvukového vysílače a přijímače je tedy stejná. [23]

Ultrazvukový vysílač/přijímač se skládá z piezoelektrického krystalu, jehož vlastní frekvence určuje ideální provozní podmínky. Ke krystalu jsou připojeny elektrody, které z druhé strany zařízení vystupují z pouzdra. Krystal chrání před poškozením ochranná mřížka. Aby se signál šířil pouze žadoucím směrem, je vnitřek senzoru vyplněn absorpční látkou, která zabrání případným odrazům signálu a rušení. [24]



Obr. 9 Schéma ultrazvukového transduktoru [24]

### 4.3. Dosah ultrazvukových senzorů

Dosah senzoru je omezen rozptylem výkonu na jednotku plochy a absorpcí zvuku médiem, kterým se šíří. V prototypu samo-řiditelného zavazadla budou použity ultrazvukové transduktory TCT40-16T/R, které mají v režimu vysílače s frekvencí 40 kHz hladinu akustického tlaku 120 dB při efektivní hodnotě napájecího napětí 10 V, měřeno 30 cm od zdroje ultrazvuku [25]. V režimu přijímače jsou schopny zachytit signál -65 dB/V/μBar [25]. Jelikož se zvuk šíří prostorem po kulové ploše, bude hustota energie na jednotku plochy klesat s obsahem této plochy, tedy s kvadrátem vzdálenosti od zdroje. Tato závislost vyjádřená pomocí hladiny akustického tlaku v decibelech má tvar [26]

$$L_2 = L_1 - \left| 10 \cdot \log \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right| = L_1 - \left| 20 \cdot \log \left( \frac{r_1}{r_2} \right) \right| . \quad (4-7)$$

Vlivem disipace energie třením v plynech dojde k útlumu amplitudy podle Stokesova zákona o útlumu zvuku [27]

$$A_1 = A_0 \cdot e^{-\alpha_{stokes} \cdot t} , \quad \alpha_{stokes} = \frac{8\pi^2 \mu}{3\lambda^2} . \quad (4-8)$$

Koeficient útlumu  $\alpha_{Stokes}$  podle Stokese je platný pro model ideálního plynu. Jak je vidět, koeficient  $\alpha_{Stokes}$  závisí nepřímo úměrně na kvadrátu vlnové délky, tudíž

přímo úměrně na kvadrátu frekvence. Zatímco pro slyšitelný rozsah frekvencí je útlum hladiny akustického tlaku vlivem absorpce v atmosféře relativně malý a zanedbatelný, pro velké kmitočty má zásadní vliv na dosah signálu. V reálné atmosféře udává vztah pro útlum hladiny akustického tlaku v závislosti na vzdálenosti od zdroje norma ISO 9613-1 jako

$$A_{abs} = \frac{\alpha}{100} \cdot r \quad [dB]. \quad (4-9)$$

Koeficient útlumu  $\alpha$  udává pokles hladiny akustického tlaku na 100 m délky v decibelech v závislosti na frekvenci zvuku  $f$  [Hz] a teplotě  $T$  [K] při standardním atmosférickém tlaku 101325 Pa a je dán vztahem [28]

$$\alpha = 869 \cdot f^2 \cdot \left\{ 1,84 \cdot 10^{-11} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\frac{5}{2}} \left[ 0,01275 \frac{e^{-\frac{2239,1}{T}}}{F_{r,O} + \frac{f^2}{F_{r,O}}} + 0,1068 \frac{e^{-\frac{3352}{T}}}{F_{r,N} + \frac{f^2}{F_{r,N}}} \right] \right\}. \quad (4-10)$$

Členy  $F_{r,O}$  a  $F_{r,N}$  představují frekvence, při kterých dojde k ustálení útlumu na konstantní hodnotě, v plynném kyslíku respektive dusíku. [28]

$$F_{r,O} = 24 + 4,04 \cdot 10^4 \cdot h \cdot \frac{0,02 + h}{0,391 + h} \quad (4-11)$$

$$F_{r,N} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\frac{1}{2}} \left( 9 + 280 \cdot h \cdot \exp \left( -4,17 \left[ \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\frac{1}{3}} - 1 \right] \right) \right) \quad (4-12)$$

Teplota  $T_0$  je výchozí teplota 20 °C vyjádřená v kelvinech.

$$T_0 = 293,15K \quad (4-13)$$

Molární koncentraci vodních par  $h$  lze spočítat pomocí parciálního tlaku vodních par  $p_w$  a absolutního atmosférického tlaku  $p_a$ . [29]

$$h = \frac{p_w}{p_a - p_w} \quad (4-14)$$

Relativní vlhkost  $\varphi$  udává poměr mezi parciálním tlakem a nasyceným tlakem vodních par. [29]

$$\varphi = \frac{p_w}{p_{ws}} \cdot 100\% \quad , \quad p_w = \frac{\varphi}{100} \cdot p_{ws} \quad (4-15)$$

Tlak nasycených par ve vzduchu  $p_{ws}$  je exponenciálně závislý na teplotě  $t$  [°C] a je popsán empirickým vztahem [29]

$$p_{ws} = A \cdot 10^{\left(\frac{m \cdot t}{t + T_n}\right)} \quad [hPa]. \quad (4-16)$$

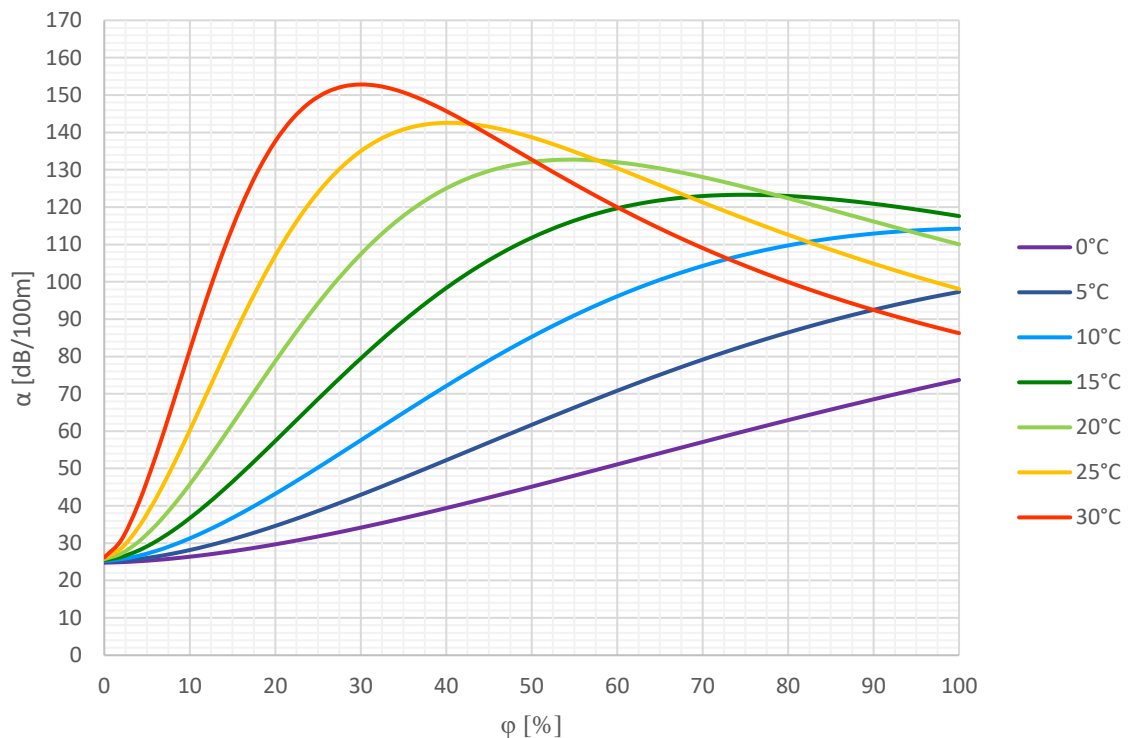
Podle termodynamických tabulek nabývají konstanty pro rozsah teplot <-20 °C, 50 °C > hodnoty [29]:

$$A = 6,116441 \text{ hPa}$$

$$m = 7,591386$$

$$T_n = 240,7263 \text{ K}$$

Dosažením vztahů (4-11)-(4-16) a frekvence 40 kHz do (4-10) byla získána závislost koeficientu útlumu na teplotě a relativní vlhkosti.



Obr. 10 Závislost útlumu na vlhkosti a teplotě

S rostoucí teplotou roste hodnota maxima útlumu v závislosti na relativní vlhkosti. Pokud budou uvažovány nejhorší podmínky pro provoz kufříku, které

byly stanoveny při teplotě 30 °C a relativní vlhkosti 30 %, dojde k poklesu hladiny akustického tlaku o 153 dB na 100 m délky trasy signálu.

Výsledný vzorec pro výpočet hladiny akustického tlaku v závislosti na vzdálenosti od zdroje má tvar

$$L_2 = L_1 - \left| 20 \cdot \log \left( \frac{r_1}{r_2} \right) \right| - A_{abs} = L_1 - \left| 20 \cdot \log \left( \frac{r_1}{r_2} \right) \right| - \frac{\alpha}{100} \cdot r_2 . \quad (4-17)$$

Hladina akustického tlaku vysílače je podle katalogových hodnot 120 dB při efektivním napětí  $U_{120dB} = 10$  V. Pokud bude vysílač napájen přímo z mikrokontroleru obdélníkovými pulzy o velikosti 5 V, zmenší se i akustický tlak produkovaný vysílačem. Napájecí napětí je přímo úměrné emitovanému akustickému tlaku. Akustický tlak lze pomocí hladiny akustického tlaku určit z rovnice

$$p = p_0 \cdot 10^{\frac{L}{20}} . \quad (4-18)$$

Tlak  $p_0$  je referenční tlak hranice slyšitelnosti lidského ucha, stanovený na hodnotu  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ .  $L$  je odpovídající hladina akustického tlaku pro tlak  $p$ , tedy  $L = 120$  dB. [26]

$$p_{120dB} = 20 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{\frac{120}{20}} = 20 \text{ Pa} \quad (4-19)$$

Efektivní hodnota napětí obdélníkových pulzů je polovina výšky těchto pulzů, tedy  $U_{ef5V} = 2,5$  V. Akustický tlak pro obdélníkové pulzy je dán vztahem

$$p_{5V} = \frac{U_{ef5V}}{U_{120dB}} \cdot p_{120dB} = \frac{2,5}{10} \cdot 20 = 5 \text{ Pa} . \quad (4-20)$$

Tomu odpovídá hladina akustického tlaku

$$L_{5V} = 20 \cdot \log \left( \frac{p_{5V}}{p_0} \right) = 20 \cdot \log \left( \frac{5}{20 \cdot 10^{-6}} \right) = 108,0 \text{ dB} . \quad (4-21)$$

Požadovaná vzdálenost, na kterou bude možné samo-řiditelný kufřík provozovat, byla stanovena na 5 m. Dosazením hodnot  $r_2 = 5$  m,  $r_1 = 0,3$  m,



$\alpha = 153 \text{ dB}/100 \text{ m}$ ,  $L_1 = L_{5V} = 108 \text{ dB}$  lze vypočítat hladinu akustického tlaku na přijímači.

$$L_2 = L_{\text{přijímač}} = 108 - \left| 20 \cdot \log \left( \frac{0,3}{5} \right) \right| - \frac{153}{100} \cdot 5 = 75,9 \text{ dB} \quad (4-22)$$

Citlivost přijímače je podle katalogu dána jako  $-65 \text{ dB}/\text{V}/\mu\text{Bar}$  ( $0 \text{ dB} = 1 \text{ V}/\mu\text{Bar}$ ) [25]. Při akustickém tlaku  $1 \mu\text{Bar}$  se na výstupu přijímače objeví napětí odpovídající hodnotě  $-65 \text{ dB}$  vůči referenčnímu napětí  $1 \text{ V}$ . Kvůli vlastnímu šumu ultrazvukového přijímače, který se pohybuje v jednotkách  $\mu\text{V}$  a teplotní závislosti offsetu použitého operačního zesilovače, který má hodnotu  $1,1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , byla stanovena minimální požadovaná hodnota velikosti získaného napětí přijímačem  $U_{\min} = 100 \mu\text{V}$ . Citlivost ve  $\text{V}/\mu\text{Bar}$  lze určit pomocí vztahu

$$K = 10^{\frac{-65}{20}} = 0,562 \frac{\text{mV}}{\mu\text{Bar}} . \quad (4-23)$$

Akustický tlak odpovídající napětí  $U_{\min}$  je

$$p_{\min} = \frac{U_{\min}}{K} = \frac{0,1}{0,562} = 0,178 \mu\text{Bar} = 0,0178 \text{ Pa} , \quad (4-24)$$

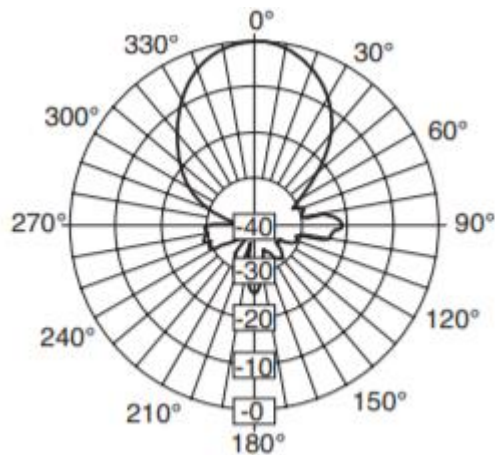
což odpovídá hladině akustického tlaku

$$L_{\min} = 20 \cdot \log \left( \frac{p_{\min}}{p_0} \right) = 20 \cdot \log \left( \frac{0,0178}{20 \cdot 10^{-6}} \right) = 59,0 \text{ dB} . \quad (4-25)$$

Pro stanovené podmínky má přijímač výkonovou rezervu

$$L_{\text{rezerva}} = L_{\text{přijímač}} - L_{\min} = 75,9 - 59,0 = 16,9 \text{ dB} . \quad (4-26)$$

Ultrazvukový moduly nevysílají/nepřijímají stejně silný signál ve všech směrech. Závislost poklesu hladiny akustického tlaku na odklonu od osy ultrazvukového transduktoru lze najít v katalogovém listu. [25]



Obr. 11 Příjímací charakteristika ultrazvukového senzoru [25]

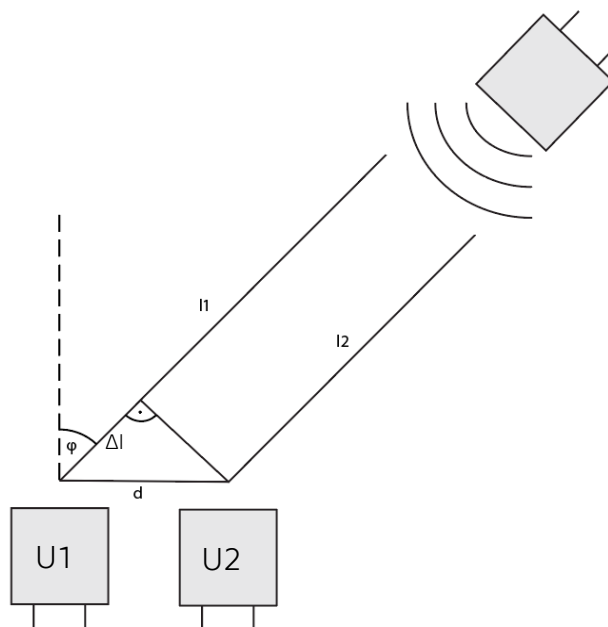
S rezervou 16,9 dB bude přijímač schopen detekovat signál pod maximálním úhlem zhruba 45° od osy ultrazvukového modulu. Jeden ultrazvukový přijímač pokryje úhel 90°. Požadavku, aby byl každý bod kolem kufříku detekovatelný alespoň dvěma ultrazvukovými přijímači, vyhovuje minimální počet 8 senzorů. Pro zlepšení úhlového rozsahu senzoru je ultrazvukový vysílač napájen obdélníkovým signálem s amplitudou 18 V, čemuž odpovídá efektivní hodnota napětí 9 V. Po dosazení těchto nových parametrů do rovnic (10)-(15) byla získána rezerva  $L_{rezerva} = 28$  dB, která je schopná pokrýt úhel 60° od osy přijímače. Jeden přijímač je tedy schopen pokrýt úhel 120°, díky čemuž je teoreticky možné snížit minimální počet senzorů z 8 na 6. Ve výpočtu ovšem nebylo uvažováno akustické rušení z okolí, které může výrazným způsobem zhoršit výslednou funkčnost sledovacího zařízení. Z těchto důvodů je vhodnější přiklonit se k variantě s 8 ultrazvukovými přijímači po obvodu kufříku.

## 5. Návrh robota

Pro účely prototypu samo-řiditelného zavazadla budou zkonstruovány 2 ultrazvukové přijímače, nasměrované do směru pohybu. Kufřík bude fungovat spolehlivě, pokud se bude majitel kufříku pohybovat před přední částí zavazadla. Pokud se toto řešení ukáže jako spolehlivé, nebude těžké robota v budoucnu rozšířit o dalších 6 přijímacích jednotek a tím pokrýt celý prostor kolem něj.

## 5.1. Určení polohy

Pomocí dvou ultrazvukových přijímacích jednotek lze určit úhel mezi osou robota a spojnicí robota s uživatelem  $\varphi$ .



Obr. 12 Schéma určení polohy pomocí ultrazvukových senzorů

Ultrazvukový přijímač U2 zachytí signál z vysílače dříve než přijímač U1. Časy příjmů signálu přijímači U1 a U2 jsou označeny  $t_1$  respektive  $t_2$ . Rozdíl časů příjmů je

$$\Delta t = t_1 - t_2 \quad . \quad (5-1)$$

Vzdálenost  $\Delta l$  lze určit pomocí rychlosti zvuku.

$$\Delta l = \bar{c}_{vzduch} \cdot \Delta t = \bar{c}_{vzduch} \cdot (t_1 - t_2) \quad (5-2)$$

Ze vzdálenosti  $\Delta l$  a známé rozteče ultrazvukových přijímačů  $d$  je možné spočítat orientovaný úhel  $\varphi$  pomocí vztahu

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{\Delta l}{d}\right) = \arcsin\left(\frac{\bar{c}_{vzduch} \cdot (t_1 - t_2)}{d}\right) \quad . \quad (5-3)$$

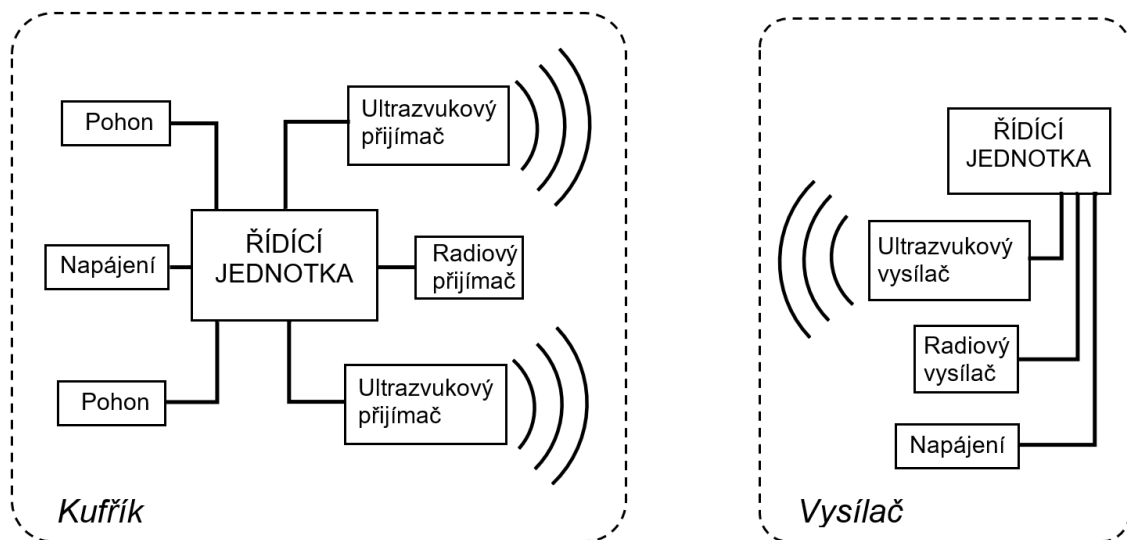
Vzdálenost kufříku od zdroje ultrazvuku  $l$  je zvolena jako průměrná vzdálenost vysílače od jednotlivých přijímačů.

$$l = \frac{l_1 + l_2}{2} = \frac{\bar{c}_{vzduch} \cdot (t_1 + t_2)}{2} \quad (5-4)$$

Pro určení absolutní hodnoty časů  $t_1$  a  $t_2$  je nutné určit čas vyslání ultrazvukového signálu. Jelikož lze rychlost šíření elektromagnetických vln (299 792 458 m/s) v porovnání s rychlostí zvuku (344 m/s) považovat za nekonečně velkou, tedy dobu potřebnou k překonání vzdálenosti jednotek metrů za nulovou, lze pro synchronizaci časů použít radiový signál a časy  $t_1$  a  $t_2$  odměřovat od okamžiku přijetí tohoto signálu.

Pomocí souřadnic  $\varphi$  a  $l$  je jednoznačně definovaná poloha vysílače vůči kufříku.

## 5.2. Návrhové schéma



Obr. 13 Návrhové schéma samo-řiditelného zavazadla

Vysílací jednotka se skládá z ultrazvukového vysílače, který v daných časových intervalech vysílá krátké pulzy o frekvenci 40kHz. Ve stejný okamžik je vyslán signál i radiovým vysílačem. O správnou funkci vysílače se stará řídicí jednotka vysílače.

Kufřík je vybaven dvěma ultrazvukovými přijímači směřujícími do směru pohybu a radiovým přijímačem. Informace z těchto senzorů jsou vyhodnoceny v řídicí jednotce kufříku, která na základě časů  $t_1$  a  $t_2$  určí souřadnice  $\varphi$  a  $l$ . Podle zjištěné polohy zdroje signálu řídicí jednotka upraví směr a rychlost kufříku pomocí dvou na sobě nezávislých pohonů.

## 5.3. Vysílací jednotka

### 5.3.1. Radiový vysílač

Pro radiovou komunikaci byl použit vysílač FS1000A o frekvenci 433 MHz s dosahem 20 – 200 m. Vysílač je možné napájet napětím 3 – 12 V. Pokud bude pro napájení použito napětí 5 V, dá se očekávat, že se dosah vysílače bude pohybovat u spodní hranice dosahu signálu, což je pro účely samo-řiditelného zavazadla pořád postačující. Při potřebě většího výkonu lze zařízení napájet pomocí 9V baterie.



Obr. 14 Vysílač FS1000A [30]

Pro zlepšení výkonu byla k vysílacímu modulu připájena anténa pro frekvenci 433MHz.

### 5.3.2. Ultrazvukový vysílač

Aby bylo dosaženo lepšího výkonu vysílače a tím i většího dosahu signálu a širšího úhlového pokrytí jedním přijímačem, je vhodné ultrazvukový transduktor napájet co největším napětím. Při použití 9V baterie pro napájení ultrazvukového transduktoru lze dosáhnout obdélníkových pulzů o amplitudě 9 V, čemuž odpovídá efektivní hodnota napětí 4,5 V. Výkon vysílače lze i nadále zvýšit použitím H-můstku, který bude přepínat polaritu napětí na elektrodách transduktoru. Tím je možné dosáhnout vlny v rozsahu napětí od -9 V do 9 V, tedy při obdélníkových pulzech efektivního napětí 9 V.

Pro zapojení H-můstku byly použity NPN tranzistory BC547B. Maximální napětí mezi kolektorem a emitorem je 60 V, což je více než postačující. Úbytek napětí

mezi kolektorem a emitorem  $U_{KE}$  je 0,4 V, úbytek mezi bází a emitorem  $U_{BE}$  je 0,65 V. Minimální hodnota proudového zesílení  $H_{FE}$  je 40 [31]. Podle katalogového listu ultrazvukového transduktoru ho lze při 40 kHz nahradit impedancí 900  $\Omega$  [25]. Při napájení z 9V baterie je možné spočítat proud tekoucí transduktorem z Ohmova zákona.

$$I_{transduktor} = \frac{U_{napájení} - 2 \cdot U_{KE}}{R_{transduktor}} = \frac{9 - 2 \cdot 0,4}{900} = 9,1 \text{ mA} \quad (5-5)$$

Tento proud teče i tranzistory. Návrhový proud báze tranzistoru je zvolen jako trojnásobek minimálního proudu potřebného na plné otevření tranzistoru.

$$I'_B = \frac{I_{transduktor}}{H_{FE}} \cdot 3 = \frac{9,1}{40} \cdot 3 = 0,68 \text{ mA} \quad (5-6)$$

Jelikož je báze tranzistoru napájena řídicím napětím desky Arduino, je nutné před ni zařadit odpor velikosti

$$R'_B = \frac{U_{Arduino} - U_{BE}}{I'_B} = \frac{5 - 0,65}{0,68} = 6365,9 \Omega \quad (5-7)$$

Po zaokrouhlení na nejbližší hodnotu odporu, která je běžně k dostání, byl  $R_B$  stanoven na 6,8 k $\Omega$ .

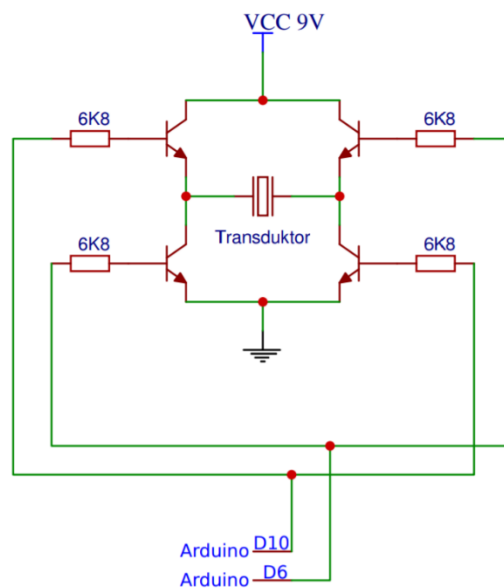
Tepelné ztráty na tranzistoru jsou

$$\begin{aligned} P_{ztráty} &= U_{KE} \cdot I_{transduktor} + U_{BE} \cdot I_B = \\ &= U_{KE} \cdot I_{transduktor} + U_{BE} \cdot \frac{U_{Arduino} - U_{BE}}{R_B} = \\ &= 0,4 \cdot 0,0091 + 0,65 \cdot \frac{5 - 0,65}{6800} = 4,1 \text{ mW} \quad (5-8) \end{aligned}$$

Maximální povolený disipovaný výkon na tranzistoru je 625 mW [31]. Zapojení tudíž vyhovuje.

Jelikož je na výstupních pinech Arduina vždy definované napětí, není nutné do obvodu zařazovat rezistor mezi bází tranzistoru a zem. [32]

Schéma zapojení H-můstku je znázorněno na následujícím obrázku.



Obr. 15 Schéma zapojení H-můstku (vytvořeno v EasyEda [33])

### 5.3.3. Řídící jednotka

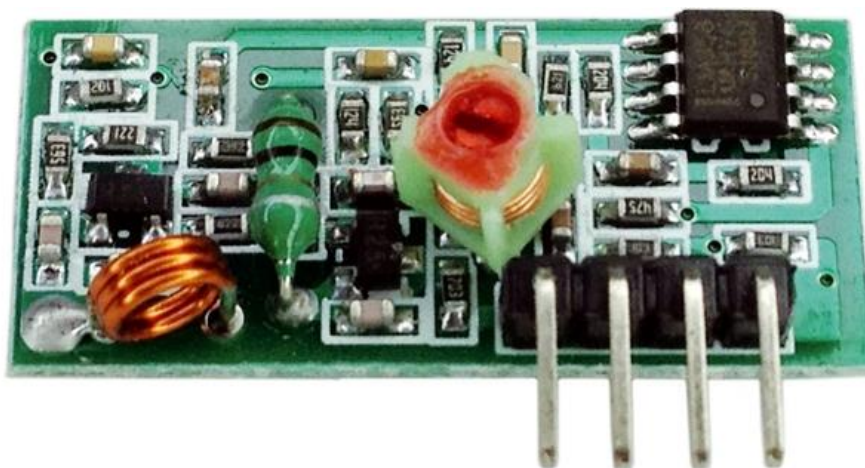
Pro řízení radiového a ultrazvukového vysílače byla zvolena vývojová deska Arduino Nano. Vývojová deska Arduino je vybavena vlastním DC-DC převodníkem, který vstupní napětí v rozsahu 7-12 V mění na pracovní napětí desky 5 V. Desku je možné též napájet napětím 5 V z externího regulátoru nebo přes rozhraní USB. Použitý procesor ATmega328p pracuje s taktovací frekvencí 16MHz, což je jistě postačující pro generování 40kHz pulzů. [34]

Pro napájení desky byla zvolena 9V baterie, jejíž vyšší napětí je s výhodou použito pro větší výkon radiového i ultrazvukového vysílače.

## 5.4. Přijímací jednotka

### 5.4.1. Radiový přijímač

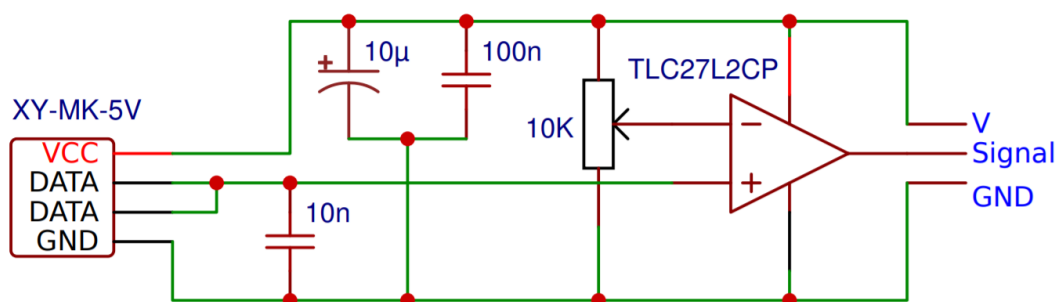
Spolu s radiovým vysílačem FS1000A je k dostání přijímač XY-MK-5V. Cívka přijímače je naladěná na 433 MHz. Pro lepší přijímací výkon byla k zařízení připojena anténa o stejné frekvenci. Přijímací modul je nutné napájet napětím 5 V, které poskytne mikrokontroler kufříku.



Obr. 16 Radiový přijímač XY-MK-5V [30]

Po zapojení a odzkoušení radiového přijímače a vysílače bylo zjištěno, že výstup z přijímače nemá charakter digitálního signálu. Hodnota napětí na výstupu z XY-MK-5V při přijímání signálu závisí na intenzitě přijímaného signálu a nepřekračuje hodnotu 3,5 V. Z těchto důvodů byl pro zpracování signálu za přijímač zařazen komparátor.

Použitý operační zesilovač TLC27L2CP je možné napájet napětím 5 V, které je schopný dodat mikrokontroler kufříku [35]. Jelikož se jedná o unipolární zesilovač, není nutné vytvářet zápornou hodnotu napětí. Podle doporučení na diskuzních fórech byl mezi piny DATA a GND modulu XY-MK-5V zařazen kondenzátor [36]. Potenciometr 10k byl nastaven na základě experimentu.



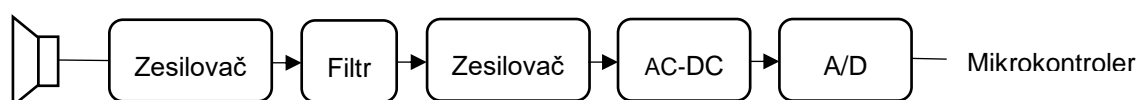
Obr. 17 Schéma zapojení komparátoru pro radiový přijímač (vytvořeno v EasyEda [33])



## 5.4.2. Ultrazvukový přijímač

Po přijetí ultrazvukového signálu bude transduktor generovat střídavé napětí s amplitudou řádově jednotek milivoltů. Aby byl signál zpracovatelný mikrokontrolerem, je nutné jej převést na signál digitální další přidanou elektronikou. Výstup z přijímacího modulu nabyde hodnoty logická „1“ ve chvíli, kdy zařízení detekuje ultrazvuk o frekvenci 40 kHz. V ostatních případech bude mít výstup hodnotu logická „0“.

Ultrazvukový přijímač se bude skládat ze zesilovačů, frekvenčního filtru s pásmovou propustí, usměrňovače a převodníku na digitální signál. Schematicky je přijímací modul znázorněn na následujícím obrázku.

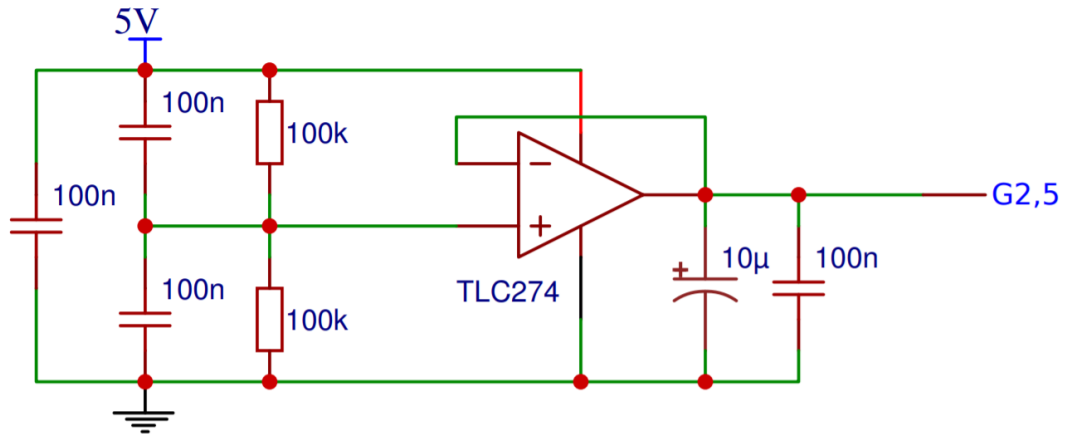


Obr. 18 Návrhové schéma ultrazvukového přijímače

Zesilovače a frekvenční filtr budou realizovány pomocí operačních zesilovačů. Aby bylo zajištěno kladné i záporné napětí vůči zemi na napájecích svorkách operačního zesilovače, bude v obvodu použita jiná hodnota napětí země, a to  $G_{2,5} = 2,5 \text{ V}$  vůči zemi mikrokontroleru. Operační zesilovač poté může být připojen na napájecí napětí 5 V a zem 0 V.

### 5.4.2.1. Umělá zem

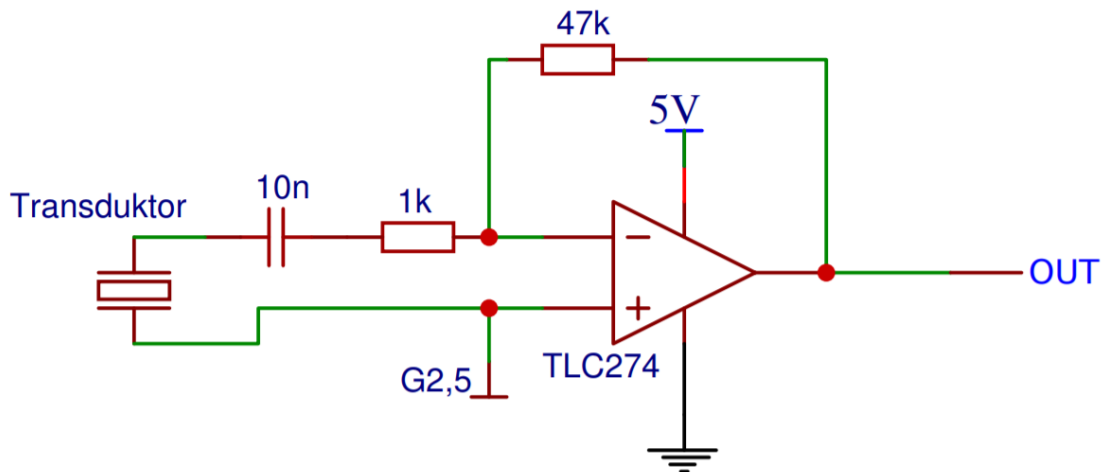
Umělá zem je realizována pomocí napěťového děliče s poměrem 1:1 a operačního zesilovače, který funguje jako sledovač napětí. Výkyvy napětí jsou částečně schopny kompenzovat kondenzátory.



Obr. 19 Schéma zdroje napětí 2,5 V (vytvořeno v EasyEda [33])

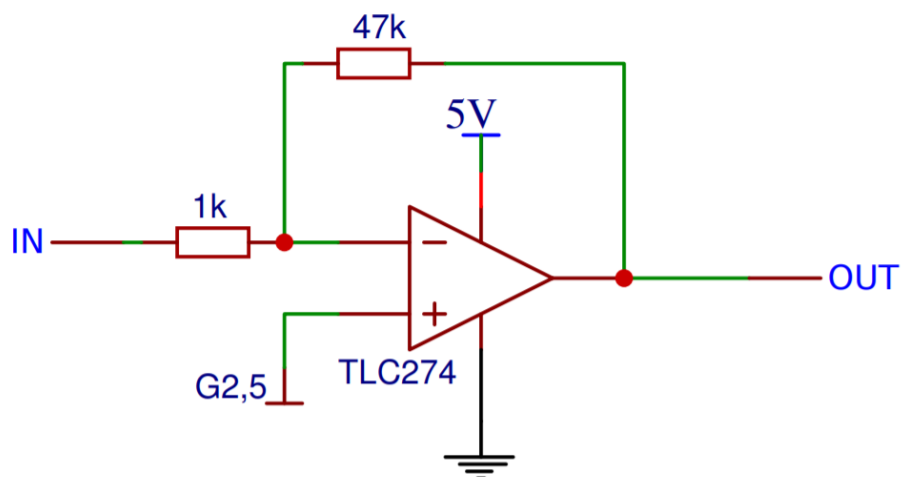
#### 5.4.2.2. Zesilovače

Pro zesílení signálu byly použity operační zesilovače TLC274 v zapojení jako invertující zesilovač. Na vstupu prvního operačního zesilovače je navíc sériově zařazen kondenzátor, zesilovač tím získává derivační charakter a dále zesiluje jen střídavou složku vstupního signálu. Po prvotním sestavení přijímače a jeho odzkoušení bylo původní zesílení prvního zesilovače změněno z 10x na 47x, přijímač má po úpravě lepší citlivost a stále minimální, ne-li nulovou, chybovost.



Obr. 20 Schéma prvního zesilovače (vytvořeno v EasyEda [33])

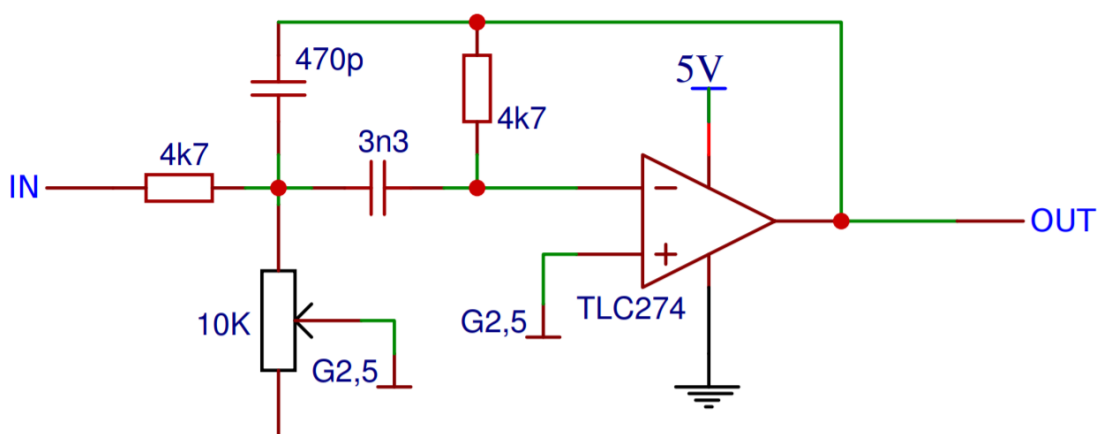
Zesílení druhého operačního zesilovače bylo rovněž upraveno z původní hodnoty 20x na konečné zesílení 47x.



Obr. 21 Schéma druhého zesilovače (vytvořeno v EasyEda [33])

#### 5.4.2.3. Filtr

Pro filtraci signálu byl zvolen filtr typu pásmová propust s centrální frekvencí  $f_c = 40$  kHz s vícenásobnou zpětnou vazbou. Hodnoty jednotlivých součástí byly navrženy pomocí kalkulátoru na webových stránkách OKAWA Electric Design. [37]

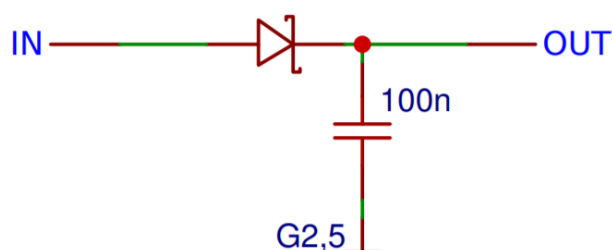


Obr. 22 Schéma frekvenčního filtru (vytvořeno v EasyEda [33])

Jeden z rezistorů v zapojení (který měl mít hodnotu  $4037 \Omega$ ) byl nahrazen potenciometrem, díky tomu se filtr stává laditelným a hodnotu  $f_c = 40$  kHz lze tedy nastavit přesně.

#### 5.4.2.4. Usměrňovač

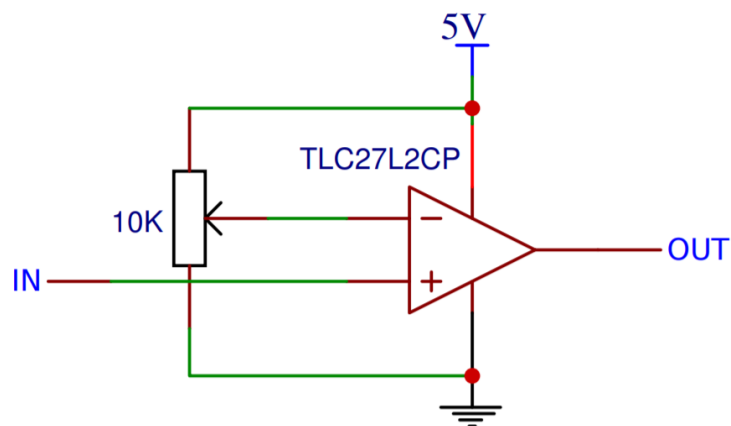
Křemíkové diody mají úbytek napětí v propustném směru přibližně 0,7 V. Aby byla výtěžnost signálu co největší, jsou v usměrňovači použity Schottkyho diody, které mají úbytek napětí 0,3 V. Původně obsahoval usměrňovač diodový můstek, tedy 4 Schottkyho diody. Jako výhodnější z hlediska zisku signálu se však ukázalo zapojení pouze s jednou diodou a kondenzátorem. [38]



Obr. 23 Schéma usměrňovače (vytvořeno v EasyEda [33])

#### 5.4.2.5. Komparátor

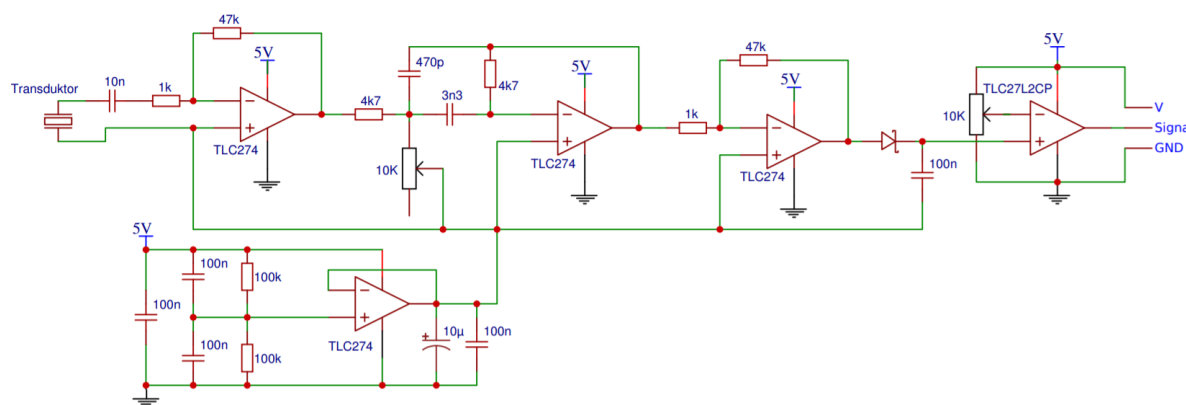
Vstup do komparátoru má hodnotu 2,5 V, pokud ultrazvukový transduktor nepřijímá signál, v opačném případě je na vstupu vyšší hodnota než 2,5 V. Po sestavení hotového přijímacího zařízení byl potenciometr 10k experimentálně seřízen.



Obr. 24 Schéma komparátoru pro ultrazvukový přijímač (vytvořeno v EasyEda [33])

#### 5.4.2.6. Výsledné elektrické schéma

Výsledné schéma zapojení ultrazvukového přijímače je znázorněno na následujícím obrázku. S mikrokontrolerem je přijímač spojen třemi vodiči: napájením 5 V, zemí a výstupním signálem, který nabývá hodnoty logické „1“, pokud přijímač zachytí ultrazvukový signál.



Obr. 25 Schéma ultrazvukového přijímače (vytvořeno v EasyEda [33])

### 5.5. Řídicí jednotka

Pro řízení prototypu kufříku byla zvolena vývojová deska Arduino Mega 2560. Provozní napětí desky je 5 V. Deska disponuje PWM výstupy, které se mohou použít na řízení rychlosti motorů. Funkce přerušení procesoru je dostupná na 6 pinech, z čehož minimálně 3 budou potřeba na obsluhu radiového přijímače a dvou ultrazvukových přijímačů. Zbýlé 3 piny je možné použít na budoucí vylepšení kufříku a přidání dalších ultrazvukových přijímačů. Arduino Mega je možné napájet napětím 7-12 V, napětím 5 V z externího regulátoru napětí nebo pomocí USB. [39]

### 5.6. Šasi

Pro účely této práce bylo použito šasi s komutátorovými motory, které navrhl student Emile Pollier v rámci svého oborového projektu při své stáži na FS ČVUT.



Obr. 26 Šasi kufříku

Jelikož měl kufřík v této konfiguraci velice nízkou manévrovací schopnost, byla dvě malá kolečka nahrazena jedním kolečkem otočným. Robot dále trpěl na nízké tření mezi hnanými koly a podlahou, proto byla na hnaná kola nanesena gumová vrstva ve formě izolační pásky na rámy dvěří.



Obr. 27 Přidané otočné kolečko

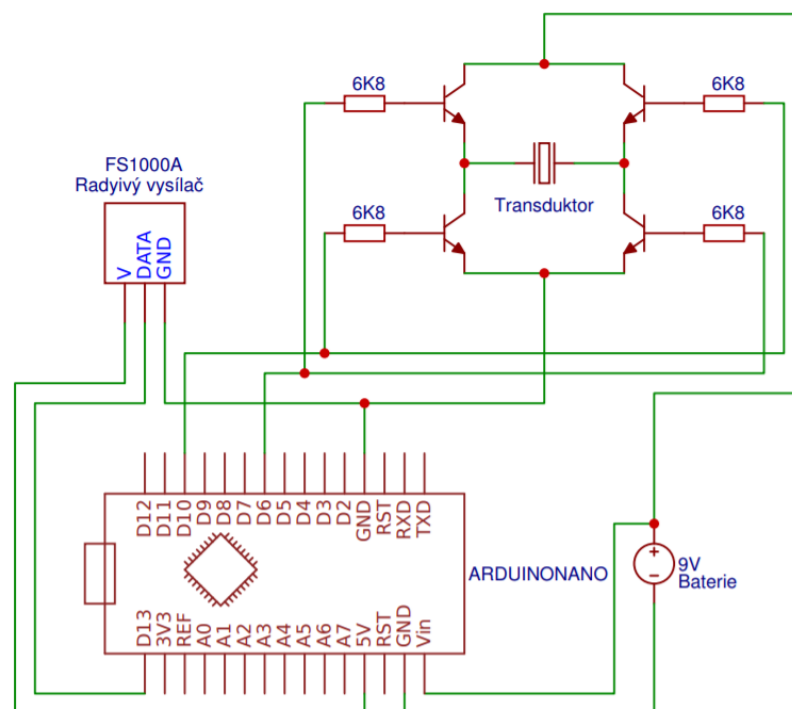
Pro ovládání motorů byl použit ovladač motorů s H-můstkem L298. Provozní napětí ovladače je až 24 V. Ovladač má zabudovaný vlastní regulátor napětí a může sloužit jako zdroj 5V napětí. L298 umožňuje řídit 2 motory pomocí 6 vstupních pinů. Vstupy EnA a EnB povolují řízení motorů dalšími vstupy *In1*, *In2* resp. *In3*, *In4*, pomocí kterých lze řídit směr otáčení motorů. Na vstupy *In1*-*In4* lze také použít PWM, tím se adekvátně sníží proud tekoucí do daného motoru, tedy i jeho rychlost při stejném zatížení. [40]



Obr. 28 L298 ovladač motorů [40]

## 6. Výsledné zapojení a program

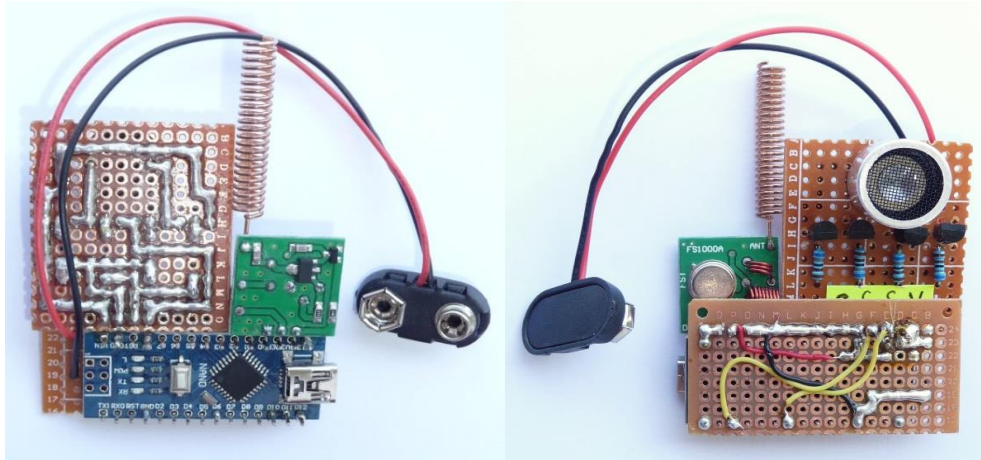
### 6.1. Elektrické schéma vysílače



Obr. 29 Schéma vysílače (vytvořeno v EasyEda [33])

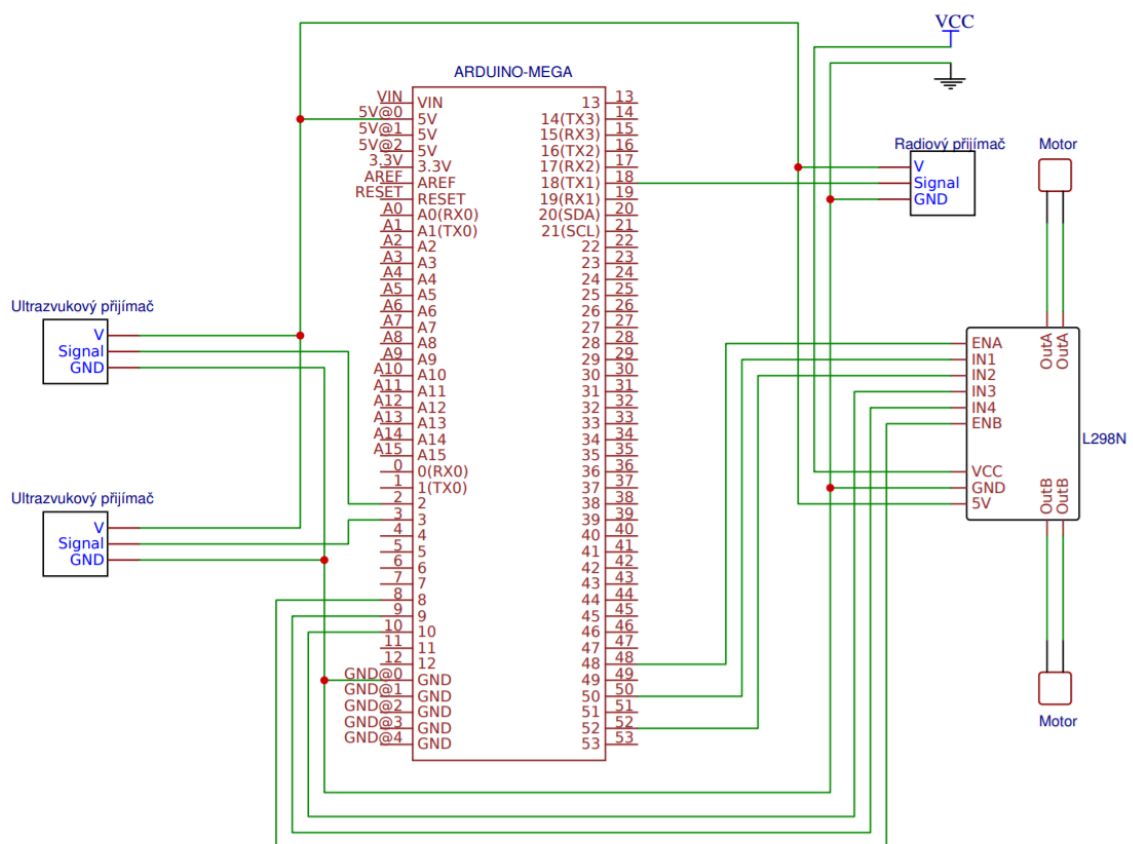
Vysílací jednotka je napájena pomocí 9V baterie. Regulaci napětí na hodnotu 5 V zajišťuje vnitřní regulátor desky Arduino Nano, jehož vstupem je pin  $V_{in}$  [34]. Jelikož je dosah vysílače limitován spíše ultrazvukovou jednotkou než rádiovou jednotkou, je rádiový vysílač napájen napětím 5 V.

Vysílací zařízení bylo zkonstruováno na univerzálním plošném spoji pomocí pájky.



Obr. 30 Vysílací zařízení

## 6.2. Elektrické schéma kufříku



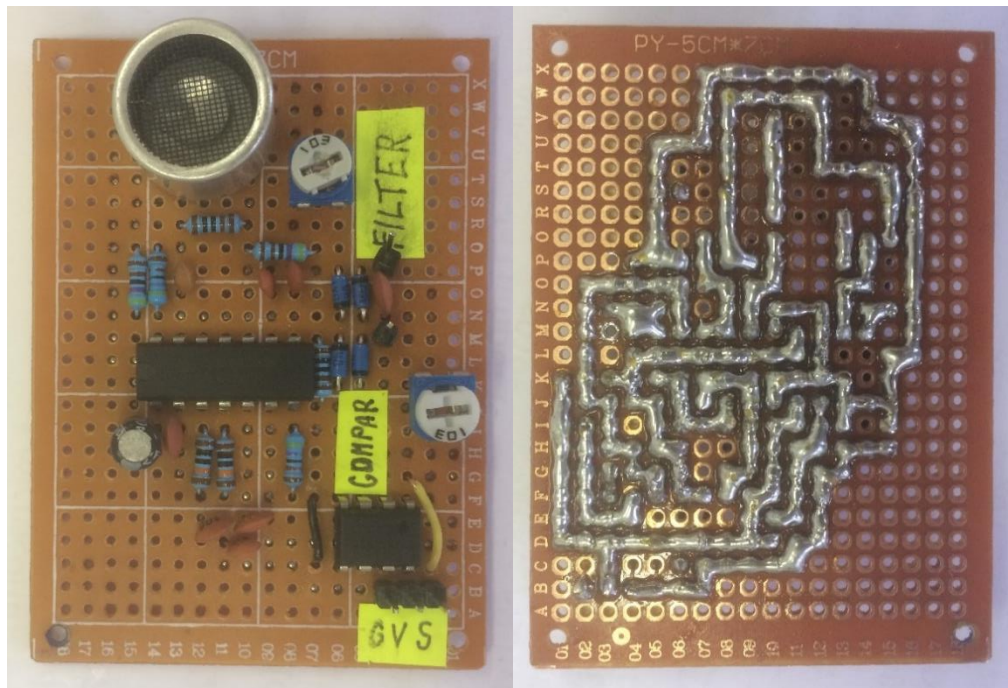
Obr. 31 Elektrické schéma kufříku (vytvořeno v EasyEda [33])



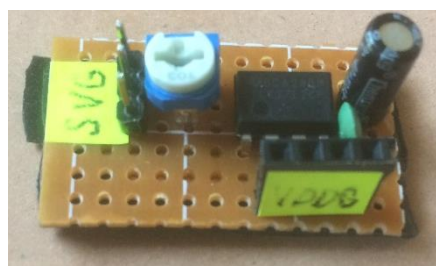
Celý prototyp kufříku bude pro demonstrační účely této práce napájen laboratorním zdrojem napětí 12 V. V praxi bude vhodné k napájení použít dobíjecí 12V baterii. Regulátor ovladače motorů transformuje napájecí napětí na hodnotu 5 V. Toto napětí je poté použito k napájení desky Arduino Mega přes port 5V. Tím se přemostí regulátor napětí v Arduino, jehož vstup je napojen na vstupní port Vin [39].

Všechna přijímací zařízení kufříku jsou připojena ke vstupům umožňujícím vyvolání přerušení procesoru. Arduino Mega disponuje touto funkcí na pinech 2, 3, 18, 19, 20, 21, z čehož byly použity první 3. [41]

Zapojení radiového a obou ultrazvukových přijímačů bylo realizováno na univerzálním plošném spoji pomocí pájky podle schémat obr. 16 resp. Obr. 24.

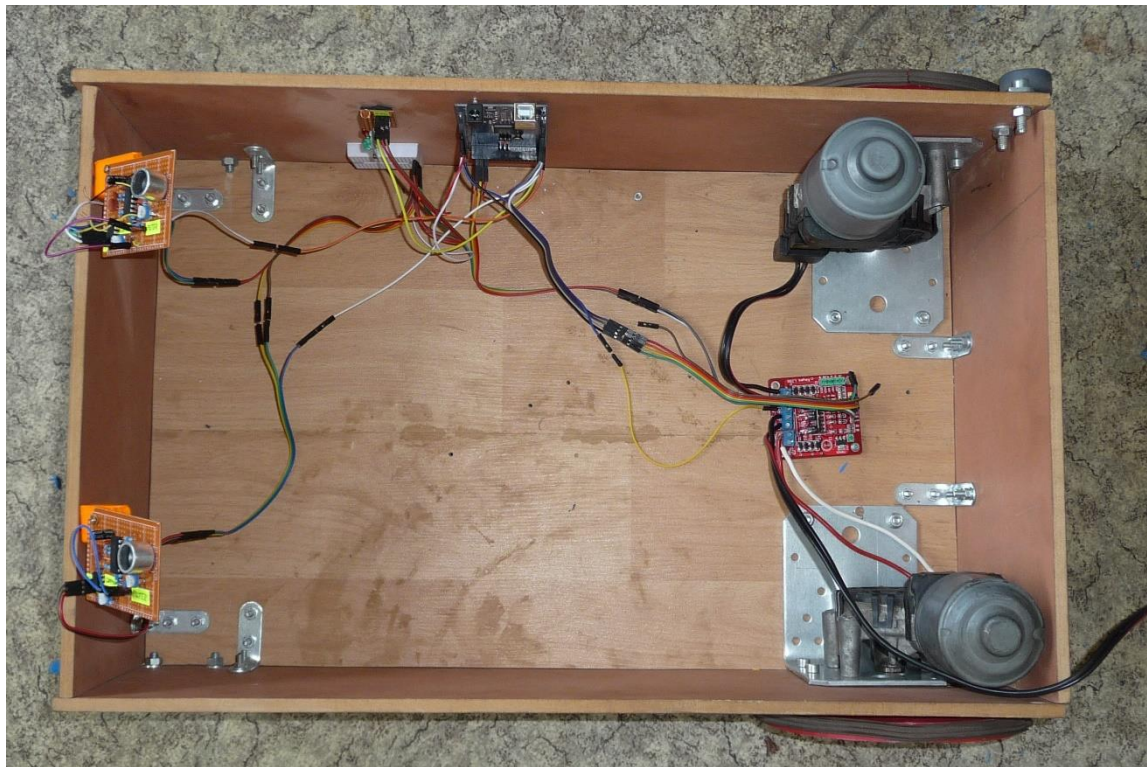


Obr. 32 Ultrazvukový přijímač



Obr. 33 Radiový přijímač

Reálné zapojení celého kufříku je zachyceno na fotografii.



Obr. 34 Kufřík

### 6.3. Program pro vysílač

```
1. #define transmit 13 //radiovy vysilac
2. #define pol1 6 // vstup H-mustku ultrazvukoveho vysilace
3. #define pol2 10 // vstup H-mustku ultrazvukoveho vysilace
4. #define freq 90000 // ve skutečnosti zařízení produkuje 40kHz,
5. // způsobeno dlouhou dobou zpracování digitalWrite
6. #define opoz 500 // [ms] doba mezi jednotlivými ultrazvukovými pulzy
7.
8. long i=0;
9.
10. void setup(){
11.   pinMode(transmit, OUTPUT);
12.   pinMode(pol1, OUTPUT);
13.   pinMode(pol2, OUTPUT);
14. }
15.
16. void loop(){
17.   digitalWrite(transmit,HIGH); //vyslání radiového signálu
18.   for(i=0;i<500;i++){ //vyslání 500 period ultrazvukového signálu
19.     digitalWrite(pol1,LOW);
20.     digitalWrite(pol2,HIGH);
21.     delayMicroseconds(500000/freq);
22.     digitalWrite(pol2,LOW);
23.     digitalWrite(pol1,HIGH);
24.     delayMicroseconds(500000/freq);
25.   }
26.   digitalWrite(transmit,LOW);
27.   delay(opoz); //čekání před dalším vyslaným signálem
28. }
```

Program v nekonečné smyčce vysílá pulz radiového signálu spolu s 500 periodami ultrazvukového signálu. Poté zařízení čeká na další cyklus pomocí funkce delay(opoz), která v tomto nastavení trvá 500 ms. Zapisování hodnot na výstupní piny Arduina obstarává funkce digitalWrite(), jejíž vykonání trvá nezanedbatelně dlouhou dobu. Proto nelze při tomto způsobu zapsání kódu nastavit přímo požadovanou frekvenci 40 kHz a zpoždění od funkce digitalWrite() je nutno kompenzovat například nastavením vyšší frekvence. Experimentální metodou bylo zjištěno, že při nastavení frekvence 90 kHz, odpovídá výsledná frekvence signálu na výstupu požadované hodnotě 40 kHz.

## 6.4. Program pro kufřík

```

1. #define Radio 18      // radiový přijímač
2. #define Ultra1 2     // ultrazvukový přijímač
3. #define Ultra2 3     // ultrazvukový přijímač
4. #define roztec 18.5  // rozteč ultrazvukových senzorů v cm
5. #define zastav 120   // maximální vzdálenost v cm, kterou bude udržovat
6. #define couvej 80    // minimální vzdálenost v cm, kterou bude udržovat
7. #define tolerance 10 // úhel ve stupních, který ještě považuje za směr rovně
8. #define enL 48       // zapojení motorů
9. #define L1 50
10. #define L2 52
11. #define enP 8
12. #define P1 9
13. #define P2 10
14.
15.
16. long cas,cas1,cas2, spoust; // čas příjmu radiového signálu, signálu z prvního u
ltrazvukového senzoru, signálu z druhého ultr. senzoru, čas poslední korekce směru
17. int zmer=0, zmer1=0, zmer2=0; // nabývají hodnotu jedna, pokud zachytím signál z r
adiového přijímače, ultrazvuku1, ultrazvuku2
18. float delta=0,fi=0,l; //delta = rozdíl časů příjmu signálu první a druhým ul
trazvukovým přijímačem, přepočtený na vzdálenost
19. //fi = úhel mezi osou robota a přijímačem
20. //l = vzdálenost uživatele od kufříku
21. void setup() {
22.   pinMode(Radio, INPUT);
23.   pinMode(Ultra2, INPUT);
24.   pinMode(Ultra1, INPUT);
25.
26.   pinMode(P1, OUTPUT);
27.   pinMode(P2, OUTPUT);
28.   pinMode(L1, OUTPUT);
29.   pinMode(L2, OUTPUT);
30.   pinMode(enL, OUTPUT);
31.   pinMode(enP, OUTPUT);
32.
33.   digitalWrite(enL,HIGH);
34.   digitalWrite(enP,HIGH);
35.
36.   Serial.begin(9600);
37.   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(Radio),rad_f,RISING);
38.   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(Ultra1),ult1_f,RISING);
39.   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(Ultra2),ult2_f,RISING);
40. }

```

Vstupy ovladače motorů *enableA* a *enableB*, které jsou ovládány výstupy z Arduina *enL* resp. *enP* jsou nastaveny na hodnoty „HIGH“, tedy logická „1“. Díky tomu je možné ovládat motory pomocí pinů *L1*, *L2*, *P1* a *P2*. Vstupům z přijímačů jsou přiřazeny funkce přerušení procesoru, které zaznamenají čas jejich zavolání a nastaví indikační proměnné *zmer*, *zmer1*, *zmer2* na hodnotu 1.

```

41. void rad_f(){ // funkce přerušení pro radiový přijímač
42.   cas = micros();
43.   zmer = 1;
44. }
45.
46. void ult1_f(){ // funkce přerušení pro první ultrazvukový senzor
47.   cas1 = micros();
48.   zmer1=1;
49. }
50.
51. void ult2_f(){ // funkce přerušení pro druhý ultrazvukový senzor
52.   cas2 = micros();
53.   zmer2=1;
54. }

```

Kuřřík nejprve čeká, až pomocí funkce přerušení procesoru zachytí signál z radiového a obou ultrazvukových přijímačů. Poté podle vztahu (5-3) a (5-4) určí úhel  $\varphi$  resp. vzdálenost  $l$ . Jestliže by měla být absolutní hodnota argumentu funkce  $\text{asin}()$  větší než 1, úhel  $\varphi$  nabyde hodnoty  $\pm 100$  (podle směru, ze kterého přichází signál). Pokud zjištěné hodnoty nebudou ležet v očekávaných intervalech  $\varphi \in \langle -90^\circ; 90^\circ \rangle$  a  $l \in (0; 3000)$ , bude měření vyhodnoceno jako chybné a kuřřík bude čekat na další hodnoty.

```

55. void loop() {
56.   if(zmer==1 && zmer1==1 && zmer2==1){
57.     delta=((cas1-cas)*0.037)-((cas2-cas)*0.037);
58.     if(delta < roztec && delta > -roztec){
59.       fi = (asin(delta/roztec))*180/PI;
60.     }
61.     else{
62.       fi = (delta/abs(delta))*100; // při chybě vypočítá úhel větší než +-100°
63.     }
64.
65.     l=(((cas1-cas)*0.037) + ((cas2-cas)*0.037))/2;
66.
67.     Serial.print(l);
68.     Serial.print(" ");
69.     Serial.println(fi);
70.
71.     zmer=0; //vynulování proměnných pro přerušení
72.     zmer1=0;
73.     zmer2=0;
74.
75.     if(l<3000 && l>0){
76.       if(abs(fi)<=90){
77. // pokud naměřil nesmyslné hodnoty, čeká na další měření

```

Pokud kufřík vyhodnotí, že se nachází ve větší vzdálenosti od vysílače, než je hodnota *zastav* (nastavená na 120 cm), pojedete směrem ke zdroji signálu. Pokud bude úhel  $\varphi$  ležet v intervalu  $\langle -10^\circ; 10^\circ \rangle$  pojedete kufřík rovně, v ostatních případech upraví během jízdy adekvátně svůj kurz.

```
80. if(min(((cas1-cas)*0.037),((cas2-cas)*0.037))>zastav){
81. // je daleko od vysílače, jede dopředu
82.     if(fi<tolerance && fi >-tolerance){ //jede dopředu
83.         digitalWrite(P1,HIGH);
84.         digitalWrite(L1,HIGH);
85.         digitalWrite(P2,LOW);
86.         digitalWrite(L2,LOW);
87.     }
88.     if(fi>=tolerance){ // jede vlevo
89.         digitalWrite(P1,HIGH);
90.         digitalWrite(L2,LOW);
91.         digitalWrite(P2,LOW);
92.         digitalWrite(L1,LOW);
93.     }
94.     if(fi<=-tolerance){ // jede vpravo
95.         digitalWrite(P2,LOW);
96.         digitalWrite(L1,HIGH);
97.         digitalWrite(P1,LOW);
98.         digitalWrite(L2,LOW);
99.     }
100. }
```

Jestliže bude kufřík blíže, než je vzdálenost *zastav*, a současně dále, než je hodnota *couvej*, bude se pouze na místě otáčet směrem ke zdroji signálu.

```
101. else if(min(((cas1-cas)*0.037),((cas2-cas)*0.037))>couvej){
102. // je vzdálený "akorát" od vysílače (jen se otáčí na místě směrem k vysílači)
103.     if(fi<tolerance && fi >-tolerance){
104.         // čeká (vysílač je směrem rovně)
105.         digitalWrite(P1,LOW);
106.         digitalWrite(L1,LOW);
107.         digitalWrite(P2,LOW);
108.         digitalWrite(L2,LOW);
109.     }
110.     if(fi>=tolerance){ // otáčí se vlevo
111.         digitalWrite(P1,HIGH);
112.         digitalWrite(L2,HIGH);
113.         digitalWrite(P2,LOW);
114.         digitalWrite(L1,LOW);
115.     }
116.     if(fi<=-tolerance){ // otáčí se vpravo
117.         digitalWrite(P2,HIGH);
118.         digitalWrite(L1,HIGH);
119.         digitalWrite(P1,LOW);
120.         digitalWrite(L2,LOW);
121.     }
122. }
```

Pokud se zdroj signálu přiblíží ke kufříku na menší vzdálenost, než je vzdálenost *couvej*, začne se kufřík pohybovat směrem od zdroje signálu.

```

123.  else{                                     //je moc blízko vysílači, kufr couvá
124.      digitalWrite(P2,HIGH);
125.      digitalWrite(L1,LOW);
126.      digitalWrite(P1,LOW);
127.      digitalWrite(L2,HIGH);
128.  }
129.      spoust = millis();
130.  }
131.  }
132.  }

```

Kufřík setrvává ve svém pohybu, dokud není díky dalšímu měření aktualizována jeho poloha vůči majiteli. Pokud kufřík ztratí signál na delší dobu (nastaveno 1,5 s), zastaví a čeká na další platné měření.

```

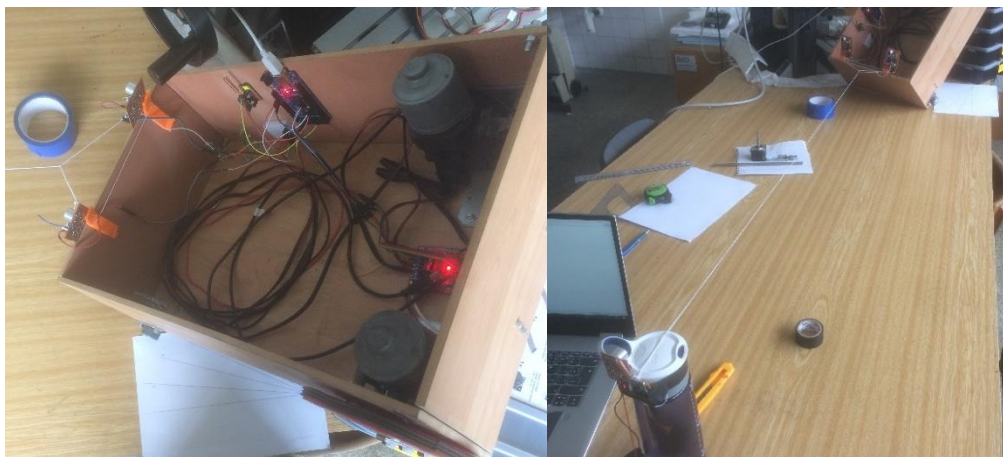
131.  if(millis()>(spoust+1500)){
132.      //ztráta signálu, kufr stojí (poslední korekce směru byla před více jak 1,5s)
133.      digitalWrite(P2,LOW);
134.      digitalWrite(L1,LOW);
135.      digitalWrite(P1,LOW);
136.      digitalWrite(L2,LOW);
137.      spoust = millis();
138.      zmer=0;
139.      zmer1=0;
140.      zmer2=0;
141.  }
142.  }

```

## 7. Odzkoušení

### 7.1. Přesnost měření polohy

Pro získání představy o přesnosti a spolehlivosti přijímacího zařízení kufříku byla provedena série měření. Vysílač byl vždy umístěn do vzdálenosti 150 cm od středu ultrazvukových přijímačů v kufříku pod úhlem  $\varphi$  od osy ultrazvukových transduktorů v přijímačích.



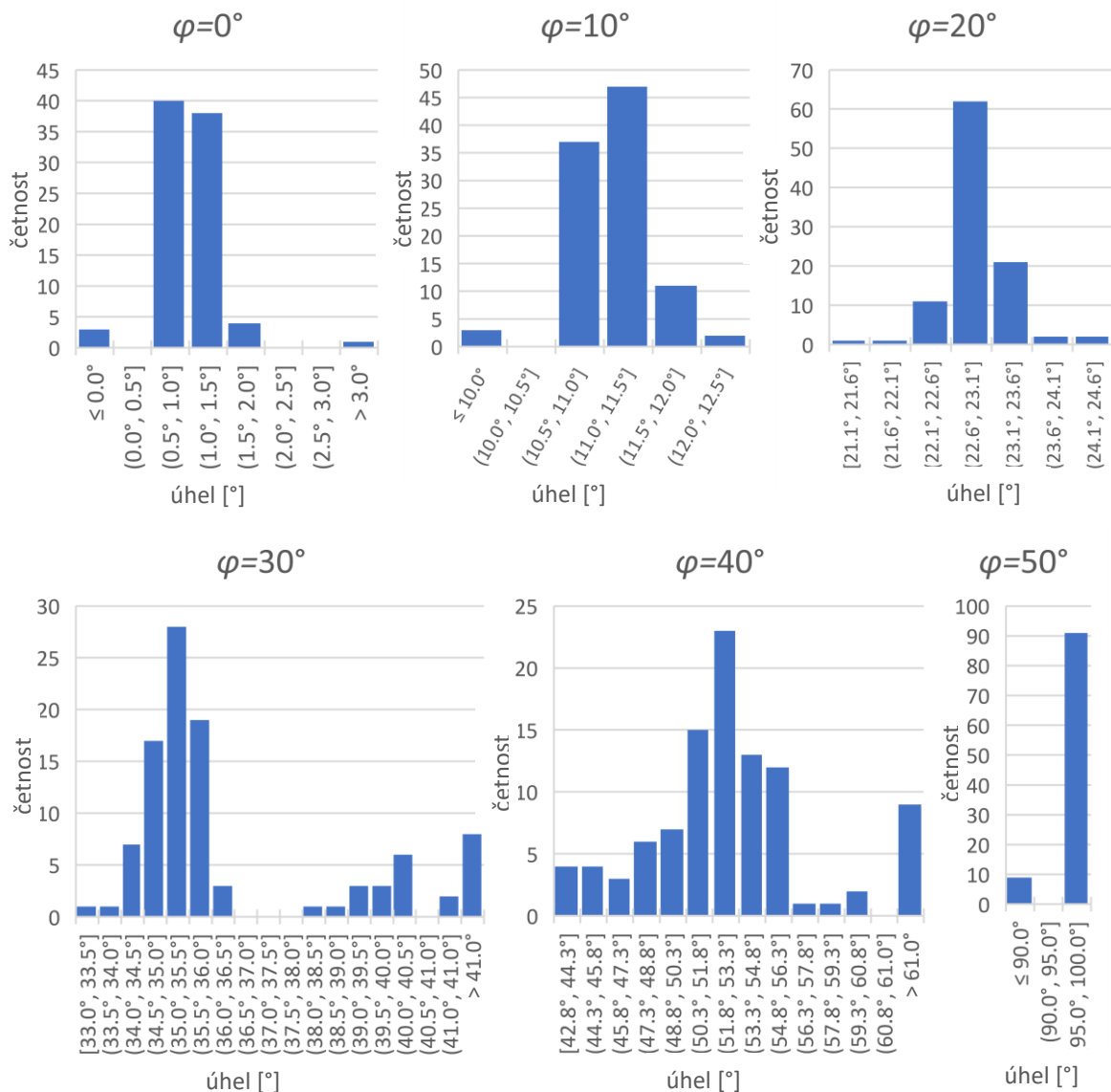
Obr. 35 Měření polohy

Za úhel  $\varphi$  byly postupně dosazovány hodnoty  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  a  $50^\circ$ . Pro každý úhel bylo provedeno 100 měření úhlu a vzdálenosti. Výsledky těchto měření jsou zobrazeny pomocí histogramů.

Měření bylo prováděno v hlučném prostředí v laboratoři robotů na FS ČVUT. V době měření v místnosti hrála hudba, bylo zapnuto několik stolních počítačů, páječka a střídavě vrtačka.

### 7.1.1. Měření úhlu

Následující série histogramů ukazuje četnosti hodnot jednotlivých měření úhlu.



Obr. 36 Histogramy měření úhlu

Průměrné hodnoty měření a jejich směrodatnou odchylku zachycuje tabulka.

Měřený úhel	Průměr měření	Směrodatná odchylka
0°	1.07°	0.82°
10°	10.82°	0.91°
20°	23.15°	0.43°
30°	36.81°	4.22°
40°	56.24°	14.17°
50°	91.62°	28.90°

Tab. 2 Výsledky měření úhlu

Jak je vidět, měření je zatíženo systematickou chybou, díky které kufřík naměří větší úhel, než je úhel skutečný. Tento druh chyby lze eliminovat pomocí vhodně odhadnuté korekční funkce. Jelikož ovšem kufřík není vybaven spojitou regulací směru a funguje spíše na principu tří-stavového regulátoru (rovně, doleva, doprava), odstranění této chyby by nepřineslo žádné významné zlepšení funkčnosti.

Při rostoucím úhlu značně roste směrodatná odchylka měření. Pro úhly přesahující 30° má směrodatná odchylka hodnotu větší než 4°, měření tudíž není přesné ani precizní, pro potřeby kufříku ovšem stále dostačující.

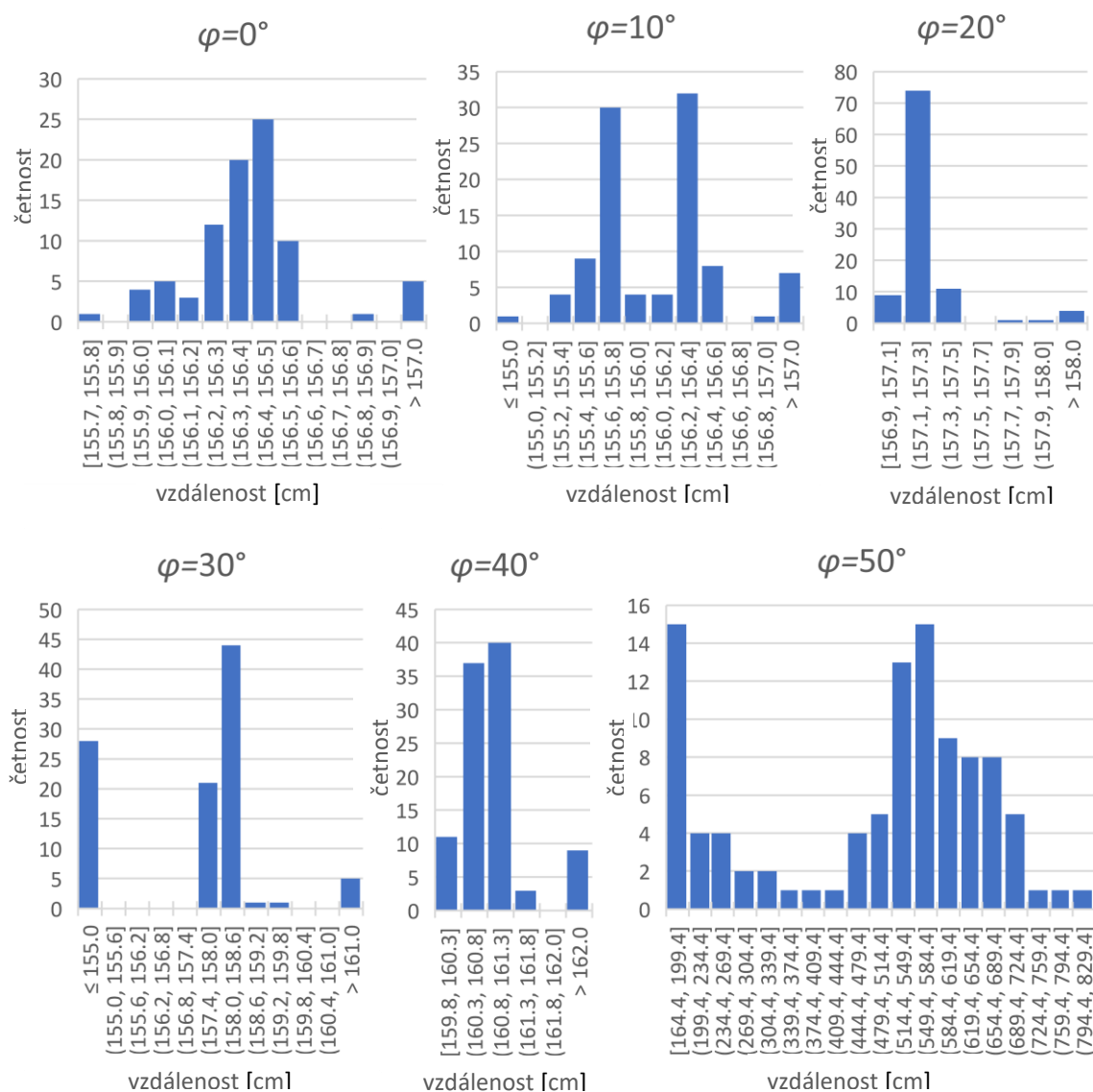
Soudě podle delšího trvání experimentu při měření úhlu 50°, nebylo znatelné množství vyslaných ultrazvukových pulzů vůbec detekováno a zaznamenáno. Většina platných měření nabývala hodnoty 100°. To podle použitého programu znamená, že rozdíl časů příjmu signálu ultrazvukovými přijímači odpovídá větší vzdálenosti, než je jejich rozteč, což reálně nastat nemůže.

Z těchto důvodů nelze zařízení spolehlivě provozovat při konfiguraci, kdy na jeden ultrazvukový přijímač připadá větší úhel, než je 100° (50° na obě strany kolem osy přijímače). Toto zjištění je v souladu s poznatky uvedenými v závěru kapitoly 4. Aby byl každý bod kolem robota detekovatelný alespoň 2 přijímači, je nutné jej vybavit 8 ultrazvukovými přijímacími moduly.



## 7.1.2. Měření vzdálenosti

Následujících 6 histogramů přiřazuje jednotlivým naměřeným hodnotám vzdálenosti v [cm] jejich četnosti.



Obr. 37 Histogramy měření vzdálenosti

Průměrné hodnoty měření a jejich směrodatnou odchylku zachycuje tabulka.

Měřený úhel	Průměr měření	Směrodatná odchylka
0°	156.48 cm	0.58 cm
10°	156.63 cm	4.12 cm
20°	157.33 cm	0.76 cm
30°	155.21 cm	5.31 cm
40°	162.55 cm	6.20 cm
50°	484.41 cm	182.35 cm

Tab. 3 Výsledky měření vzdálenosti

Měření vzdálenosti je rovněž zatíženo systematickou chybou. Aritmetické průměry měření vždy leží nad skutečně měřenou hodnotou. Tato chyba je opět pro správné fungování kufříku nepodstatná, a proto nebude odstraňována.

V průběhu měření vzdálenosti při  $\varphi = 10^\circ$  došlo pravděpodobně ke většímu rušení než při ostatních měřeních. Jak je vidět z histogramu, výsledky měření jsou rozděleny na 2 části, rušení zřejmě ovlivnilo jen zhruba polovinu měřených hodnot. I tak dává měření velice uspokojivé výsledky, zvláště pro účely sledovacího zařízení kufříku, kde není potřeba velká přesnost.

Měření se ukázalo jako nepoužitelné pro úhly větší než  $50^\circ$ . Pro  $40^\circ$  jsou naměřené hodnoty stále ještě použitelné. Stejně jako při měření úhlu, vyplývá z měření vzdálenosti stejný doporučený počet ultrazvukových přijímačů, tedy 8.

## **7.2. Provoz a chování prototypu samo-řiditelného kufříku**

Prototyp samo-řiditelného kufříku byl vyzkoušen v laboratoři robotů na FS ČVUT.

Robot velice dobře sleduje vysílací zařízení, to však musí po celou dobu provozu alespoň zhruba mířit na kufřík a nelze jej například schovat do kapsy nebo batohu. Další zdokonalené verze kufříku by měly být vybaveny vysílačem, který bude vysílat signál rovnoměrně do všech směrů, nebo jiným způsobem zajistí, aby se ultrazvuk šířil ke kufříku.

Kufřík se pohybuje velice pomalu, což není díky použitým elektromotorům překvapující. V dalších prototypech bude jistě vhodnější použít motory s jiným převodovým poměrem a většími otáčkami.

## 8. Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a zkonstruovat prototyp samo-řiditelného zavazadla. Z několika možných způsobů realizace sledovacího zařízení, které jsou podrobněji rozepsány ve stati *Možné způsoby řešení*, bylo vybráno řešení pomocí ultrazvukových signálů, které je levné, jednoduché a nevyžaduje přímou viditelnost. Kufřík, pomocí série speciálně navržených ultrazvukových senzorů a jednoho radiového přijímače, zaznamenává krátké pulzy radiových a ultrazvukových signálů, které vysílá vysílací zařízení uživatele. Díky rozdílným rychlostem elektromagnetických a zvukových vln, je kufřík schopen určit vzdálenost od uživatele. Směr k vysílači kufřík určí na základě různých časů příjmu ultrazvukového signálu několika různými ultrazvukovými přijímači, které jsou rozmístěny na kufříku ve známých polohách. Prototyp kufříku je vybaven dvěma ultrazvukovými přijímači, pomocí kterých je demonstrována správná funkčnost systému. Jelikož má každý přijímač omezený úhel příjmu signálu, je zapotřebí 8 přijímačů rovnoměrně rozmístěných po obvodu robota na pokrytí plného úhlu kolem kufříku.

O řízení vysílací jednotky a kufříku se stará vývojová deska Arduino Nano resp. Arduino Mega. Signály z přijímacích jednotek jsou zpracovány pomocí funkce přerušení procesoru. Kufřík je poháněn pomocí dvou komutátorových motorů ovládaných pomocí ovladače s čipem L298. Napájení prototypu je řešeno pomocí laboratorního zdroje. Finální verzi zařízení je vhodné napájet dobíjecí baterií.

Řídící program kufříku, na základě časů jednotlivých přerušení z přijímacích jednotek, spočítá úhel a vzdálenost k uživateli. Kufřík se poté natočí patřičným směrem a upraví svou vzdálenost od vysílače tak, aby ležela v nastaveném intervalu <zastav;couvej>, který má nyní velikost <120 cm; 80 cm>.

Chyba měření polohy se pohybuje, pro úhly menší než 45° od osy přijímače, v přijatelných mezích, což potvrzuje potřebu 8 ultrazvukových senzorů pro pokrytí 360°. Nad touto hranicí nedává měření použitelné výsledky a není ani opakovatelné.

Kufřík je schopen i v rušném prostředí sledovat vysílací zařízení. Metoda ultrazvukových přijímačů se ukázala jako vhodná, v současném stavu je však omezená malým vysílacím úhlem a výkonem vysílacího zařízení a malým počtem přijímacích jednotek v kufříku.

Další verze tohoto kufříku by kromě výše uvedeného měly vyřešit rozpoznávání a vyhýbání se překážkám. V časových prodlevách mezi jednotlivými pulzy vysílače, může ultrazvukový pulz vyslat i kufřík a pomocí již navržených ultrazvukových přijímačů zachytit odražené vlny od překážek.

## Seznam použité literatury

- [1] Cowarobot [online]. ShangHai, China: COWAROBOT CO, 2017 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://en.cowarobot.com/en/page/50.htm>
- [2] KILIÁN, Karel. COWAROBOT R1: chytrý kufr, který vám nezmizí z dohledu. *Svět Androida* [online]. 2016 [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <https://www.svetandroida.cz/cowarobot-r1-chytry-kufr/>
- [3] Cowarobot R1. *Not any gadgets* [online]. [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <http://notanygadgets.com/product/cowarobot-the-suitcase-that-follows-you/>
- [4] CONG, Robert a Ryan WINTERS. How Does The Xbox Kinect Work. *Jameco* [online]. [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <https://www.jameco.com/jameco/workshop/howitworks/xboxkinect.html>
- [5] *Travelmate Robotics* [online]. California, USA: Travelmate Robotics, 2016 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://travelmaterobotics.com/>
- [6] Travelmate: a Fully Autonomous Suitcase and Robot. *Indiegogo* [online]. 2017 [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <https://www.indiegogo.com/projects/travelmate-a-fully-autonomous-suitcase-and-robot#/>
- [7] VON STAMM, Peter. TRAVELMATE IS YOUR ELECTRONIC LUGGAGE WHICH MOVES BY ITSELF. *Peter von Stamm: Travelblog & Travel News* [online]. [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <http://petervonstamm-travelblog.com/travelmate-is-your-electronic-luggage-which-moves-by-itself/>
- [8] SPOONAUER, Mark. Self-Driving Luggage Just Followed Me Around at CES 2018. *Tom's guide* [online]. 2018 [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <https://www.tomsguide.com/us/forward-x-cx-1-self-driving-luggage,news-26348.html>
- [9] *ForwardX* [online]. 2018 [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <https://www.forwardx.com/>
- [10] BABČANÍK, Jan. Jak funguje GPS?. *Vývoj.hw.cz* [online]. 2006 [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/jak-funguje-gps.html>
- [11] WOODFORD, Chris. Roomba® robot vacuum cleaners. *Explain that stuff* [online]. 2018 [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/how-roomba-works.html>
- [12] KOBILAROV, M., G. SUKHATME, J. HYAMS a P. BATAVIA. People tracking and following with mobile robot using an omnidirectional camera and a laser. In: *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006* [online]. IEEE, 2006, s. 557-562 [cit. 2017-03-27]. DOI: 10.1109/ROBOT.2006.1641769. ISBN 0-7803-9505-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1641769/>
- [13] DIGIACOMCANTONIO, Mirko. *Motorized Luggage or Luggage Platform with Wired or Wireless Guidance and Distance Control*. US20140107868A1.
- [14] Radiation pattern. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation\\_pattern](https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation_pattern)

- [15] *Antenna arrays* [online]. antenna-theory, 2013 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.antenna-theory.com/arrays/main.php>
- [16] ROYEN, Abi. ANTENA ARRAY (PENGERTIAN, DASAR DAN RUMUS). *Abi blog* [online]. [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <http://abi-blog.com/antena-array-pengertian-dasar-dan-rumus/>
- [17] Caddytrek: User Manual. [https://www.caddytrek.com/pdf/caddytrek\\_user\\_manual.pdf](https://www.caddytrek.com/pdf/caddytrek_user_manual.pdf) [online]. Las Vegas [cit. 2017-03-27].
- [18] KNIGHT, Will. This Robot Will Carry Your Stuff and Follow You Around. *MIT Technology Review* [online]. 2017, 1 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <https://www.technologyreview.com/s/603558/this-robot-will-carry-your-stuff-and-follow-you-around/>
- [19] LEADEM, Rose. This Robot Will Carry Your Stuff and Follow You Everywhere: Meet Gita, the cargo-carrying robot. *Entrepreneur* [online]. 2017, 1 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <https://www.entrepreneur.com/article/289552>
- [20] FEJFAR, Zdeněk. *Ultrazvuk a jeho využití*. Plzeň, 2011. Diplomová práce. Západočeská Univerzita v Plzni.
- [21] IBORRA, Helia. *CHARACTERIZATION OF ULTRASOUND TRANSDUCERS*. Madrid, 2014. Disertační práce. Universidad Autónoma de Madrid.
- [22] VACHUTKA, Jaromír. *Ověření tepelných účinků ultrazvukového diagnostického přístroje prostřednictvím modelu tkáně*. Brno, 2007. Bakalářská práce. MASARYKOVA UNIVERZITA.
- [23] MAŠEK, Stanislav. *Piezoelektrické transformátory*. Plzeň, 2017. Bakalářská práce. Západočeská Univerzita v Plzni.
- [24] *Ultrasonic Transducers Technical Notes*. Olympus NDT, 2006. Dostupné z: <https://mbi-ctac.sites.medinfo.ufl.edu/files/2017/02/ultrasound-basics.pdf>
- [25] *TCT40-16R/T RT senzor probe*. LxxTECH. Dostupné z: <http://www.lxxtech.com/tct40-16rt-rt-split-ultrasound-ultrasonic-sensor-ultrasonic-probe-center-frequency-40khz-dia-p433.html>
- [26] *Tontechnik rechner* [online]. [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <http://www.sengpielaudio.com/calculator-SoundAndDistance.htm>
- [27] STOKES, George Gabriel. *On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums*. 1850. Dostupné z: <http://mural.uv.es/daroig/documentos/stokes1850.pdf>
- [28] LAMANCUSA, J. S. *Outdoor sound propagation*. 2009. Dostupné z: [http://www.mne.psu.edu/lamancusa/me458/10\\_osp.pdf](http://www.mne.psu.edu/lamancusa/me458/10_osp.pdf)
- [29] LAMPINEN, Markku. *Thermodynamics of humid air*. Dostupné z: [https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/132918/mod\\_resource/content/3/Thermodynamics\\_of\\_humid\\_air.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/132918/mod_resource/content/3/Thermodynamics_of_humid_air.pdf)
- [30] RAWASHDEH, Mohannad. Transmitter FS1000A. In: *Instructables* [online]. 2013 [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <http://www.instructables.com/id/RF-315433-MHz-Transmitter-receiver-Module-and-Ardu/>
- [31] *BC546B, BC547A, B, C, BC548B, C: Amplifier Transistors*. 2012. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/75204/MICRO-ELECTRONICS/BC537.html>

- [32] Digital Pins. *Arduino* [online]. 2018 [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/DigitalPins>
- [33] EasyEDA: Navrhovací prostředí elektronických schémat a plošných spojů. EasyEDA - Online PCB Design & circuit simulator [online]. China: EasyEDA, 2018 EasyEDA [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: <https://easyeda.com/>
- [34] Arduino Nano. *Arduino* [online]. 2018 [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-nano>
- [35] TLC27L2, TLC27L2A, TLC27L2B, TLC27L7 [online]. Texas Instruments, 2005 [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc27l2m.pdf>
- [36] FS1000A / XY-MK-5V 433Mhz TX/RX Module. In: *Arduino* [online]. 2012 [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <https://forum.arduino.cc/index.php?topic=129749.0>
- [37] Multiple Feedback Band-pass Filter Design Tool. *OKAWA Electric Design* [online]. 2004 [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <http://sim.okawa-denshi.jp/en/OptazyuBakeisan.htm>
- [38] BEZDĚK, Miloslav. *Elektronika: [učebnice]*. 3. vyd. České Budějovice: Kopp, 2008. ISBN 978-80-7232-365-4.
- [39] Arduino Mega. *Arduino* [online]. 2018 [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3>
- [40] L298 H-Bridge Dual Motor Driver. *Anodas* [online]. [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <https://anodas.lt/en/l298-h-bridge-dual-motor-driver>
- [41] AttachInterrupt(). *Arduino* [online]. 2018 [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/external-interrupts/attachinterrupt/>

## Seznam obrázků

Obr. 1 Cowarobot R1 [3].....	8
Obr. 2 Co-Eye senzor [1].....	9
Obr. 3 Travelmate [7].....	10
Obr. 4 ForwardX CX-1 [8] .....	11
Obr. 5 Poloha uživatele vůči kufříku .....	12
Obr. 6 Určení polohy pomocí GPS [10].....	13
Obr. 7 Příjem radiového signálu pomocí anténového pole [16].....	15
Obr. 8 Schéma funkce vozíku Caddytrek.....	15
Obr. 9 Schéma ultrazvukového transduktoru [24].....	20
Obr. 10 Závislost útlumu na vlhkosti a teplotě .....	22
Obr. 11 Příjímací charakteristika ultrazvukového senzoru [25].....	25
Obr. 12 Schéma určení polohy pomocí ultrazvukových senzorů .....	26
Obr. 13 Návrhové schéma samo-řiditelného zavazadla .....	27
Obr. 14 Vysílač FS1000A [30] .....	28
Obr. 15 Schéma zapojení H-můstku (vytvořeno v EasyEda [33]) .....	30
Obr. 16 Radiový přijímač XY-MK-5V [30] .....	31
Obr. 17 Schéma zapojení komparátoru pro radiový přijímač (vytvořeno v EasyEda [33]).....	31
Obr. 18 Návrhové schéma ultrazvukového přijímače .....	32
Obr. 19 Schéma zdroje napětí 2,5 V (vytvořeno v EasyEda [33]) .....	33
Obr. 20 Schéma prvního zesilovače (vytvořeno v EasyEda [33]) .....	33
Obr. 21 Schéma druhého zesilovače (vytvořeno v EasyEda [33]) .....	34
Obr. 22 Schéma frekvenčního filtru (vytvořeno v EasyEda [33]).....	34
Obr. 23 Schéma usměrňovače (vytvořeno v EasyEda [33]) .....	35
Obr. 24 Schéma komparátoru pro ultrazvukový přijímač (vytvořeno v EasyEda [33]).....	35
Obr. 25 Schéma ultrazvukového přijímače (vytvořeno v EasyEda [33]) .....	36
Obr. 26 Šasi kufříku .....	37
Obr. 27 Přidané otočné kolečko.....	37
Obr. 28 L298 ovladač motorů [40] .....	38
Obr. 29 Schéma vysílače (vytvořeno v EasyEda [33]).....	38
Obr. 30 Vysílací zařízení .....	39
Obr. 31 Elektrické schéma kufříku (vytvořeno v EasyEda [33]).....	39
Obr. 32 Ultrazvukový přijímač .....	40
Obr. 33 Radiový přijímač .....	40
Obr. 34 Kufřík.....	41
Obr. 35 Měření polohy .....	45
Obr. 36 Histogramy měření úhlu .....	46
Obr. 37 Histogramy měření vzdálenosti.....	48



## Seznam tabulek

Tab. 1 Srovnání možných způsobů řešení.....	17
Tab. 2 Výsledky měření úhlu .....	47
Tab. 3 Výsledky měření vzdálenosti.....	48