



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

**ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ**

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

**RADAROVÝ VÝŠKOMĚR PRO ULTRALEHKÉ  
LETECTVÍ**

RADAR ALTIMETER FOR ULTRAMICRO AIRCRAFT

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**QUIDO HUBA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. Dr. Ing. PAVEL ZEMČÍK, dr. h. c.**

BRNO 2024

## Zadání bakalářské práce



155419

Ústav: Ústav počítačové grafiky a multimédií (UPGM)  
Student: **Huba Quido**  
Program: Informační technologie  
Název: **Radarový výškoměr pro ultralehké letectví**  
Kategorie: Mobilní aplikace  
Akademický rok: 2023/24

### Zadání:

1. Prostudujte literaturu na téma provoz ultralehkých letounů, aplikace radarového výškoměru pro výcvik pilotů a provoz letounů, prostudujte také možnosti mikrovlnných radarů a jejich využití ve spojení s "embedded systémy".
2. Navrhněte po konzultaci s vedoucím práce vhodnou konfiguraci mikrovlnného radaru pro radarový výškoměr v ultralehkém letadle/vrtulníku se zaměřením na snadnou instalaci, nízké pořizovací náklady a snadné použití.
3. Navrhněte způsob implementace a uživatelské rozhraní radarového výškoměru, pokud možno se zvukovou indikací výšky s využitím palubního audiosystému.
4. Implementujte radarový výškoměr a demonstруйте jeho funkčnost vhodným způsobem na reálném letadle/vrtulníku.
5. Diskutujte dosažené výsledky a možnosti pokračování práce.

### Literatura:

- Dle pokynů vedoucího

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:  
Body 1-3 zadání

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Zemčík Pavel, prof. Dr. Ing., dr. h. c.**  
Vedoucí ústavu: Černocký Jan, prof. Dr. Ing.  
Datum zadání: 1.11.2023  
Termín pro odevzdání: 9.5.2024  
Datum schválení: 13.2.2024

## Abstrakt

Cielom tejto bakalárskej práce bolo vytvoriť radarové zariadenie, ktoré je cenovo dostupné, jednoduché na výrobu a má pomáhať pilotom ultralight lietadiel s monitorovaním výšky počas letu a pri pristávaní. Zariadenie sa skladá z milimetrového radarového modulu od firmy Texas Instruments, z mikropočítača, audio zariadenia a taktiež tlačidla s kontrolnou diódou. Pomocou radaru sa získavajú dáta, ktoré mikropočítač spracováva v reálnom čase. Tieto dáta prenáša pomocou technológie bluetooth do audio zariadenia, kde sú dáta reprezentované ako signál, ktorý sa mení podľa výšky lietadla. Tlačidlá slúžia na ovládanie zariadenia, ktoré má pomáhať s pristátím najmä letcom začiatočníkom.

## Abstract

The purpose of this bachelor thesis was to create a radar device with reasonable price and simple construction, that would help pilots of ultralight aircrafts with altitude monitoring during the flight and during landing. Radar device consists of a millimeter wave radar module produced by Texas Instruments company, of a microcomputer, audio device and a control diode button. Radar receives data, that are processed by a microcomputer in actual time. These data are transferred via bluetooth technology to audio device. Here data is presented in the form of a signal, that changes according to the aircraft's altitude. Buttons control the device that is supposed to be helpful to beginning pilots during landing.

## Klíčové slová

ultralight lietadlo, milimetrový radar, generovanie zvuku

## Keywords

ultralight aircraft, millimeter wave radar, sound generation

## Citácia

HUBA, Quido. *Radarový výškoměr pro ultralehké letectví*. Brno, 2024. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce prof. Dr. Ing. Pavel Zemčík, dr. h. c.

# Radarový výškoměr pro ultralehké letectví

## Prehlásenie

Vyhlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením pána prof. Dr. Ing. Pavla Zemčíka dr. h. c. Uviedol som všetky literárne pramene, publikácie a iné zdroje, z ktorých som čerpal.

.....  
Quido Huba  
14. mája 2024

## Podakovanie

Chcel by som poďakovať môjmu vedúcemu bakalárskej práce prof. Dr. Ing. Pavlovi Zemčíkovi dr. h. c., Ing. Lukašovi Maršíkovi a leteckému inštruktorovi Zdeňkovi Moravcovi.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Radarové systémy</b>	<b>4</b>
2.1	Charakteristika radarových systémov . . . . .	4
2.2	Klasifikácia a fungovanie radarových systémov . . . . .	5
2.3	Milimetrové vlny . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Ultralhké lietadlá a výškometre</b>	<b>14</b>
3.1	Charakteristika ultralhkých lietadiel . . . . .	14
3.2	Pristávanie ultralhkých lietadiel . . . . .	15
3.3	Pristávacie manévry pri silnom vetre . . . . .	17
3.4	Chyby pri pristávaní a ich opravy . . . . .	17
3.5	Letecké výškomery . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Zhodnotenie súčasného stavu</b>	<b>22</b>
4.1	Letecké výškomery . . . . .	22
4.2	Ciel práce . . . . .	23
4.3	Popis zariadenia . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Implementácia</b>	<b>26</b>
5.1	Základný popis zariadenia . . . . .	26
5.2	Fungovanie klávesnice . . . . .	28
5.3	Použitá technológia . . . . .	28
<b>6</b>	<b>Testovanie</b>	<b>30</b>
6.1	Testovacie metódy . . . . .	30
6.2	Experiment v miestnosti . . . . .	31
6.3	Testovanie výšky . . . . .	33
6.4	Testovanie na lietadle . . . . .	34
<b>7</b>	<b>Záver</b>	<b>37</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>38</b>
<b>A</b>	<b>Obsah priloženého pamäťového média</b>	<b>40</b>

# Zoznam obrázkov

2.1	„Chirp“signál, kde sa mení šírka rádiových vln v čase $t$ . . . . .	9
2.2	Zmena frekvencie v čase . . . . .	9
2.3	Schéma milimetrového radaru . . . . .	10
2.4	Grafická prezentácia fungovania mixéru . . . . .	10
3.1	Barometrický výškomer <sup>1</sup> . . . . .	19
3.2	Radarový výškomer <sup>2</sup> . . . . .	20
3.3	Laserový výškomer pre poľnohospodárske lietadlá <sup>3</sup> . . . . .	21
4.1	Barometrický <sup>1</sup> . . . . .	23
4.2	Radarový <sup>2</sup> . . . . .	23
4.3	Laserový <sup>3</sup> . . . . .	23
5.1	Schéma zariadenia . . . . .	26
5.2	Vyhotovené zariadenie . . . . .	27
6.1	Jednotlivé experimenty skúšané v miestnosti . . . . .	32
6.2	Testovanie výšky na 70 metrov vysokej vyhliadke . . . . .	33
6.3	Letisko Tri sudy Kotvrdovice . . . . .	34
6.4	Testovacie lietadlo Aeroprakt A-22 Foxbat . . . . .	35
6.5	Železná konštrukcia radarového modulu pripojená na lietadlo . . . . .	35
6.6	Pristávanie lietadla so zapnutým radarovým výškomerom . . . . .	35

# Kapitola 1

## Úvod

Radarová technológia je pomerne nová technológia, ktorá slúži na detekciu objektov. Jej objav je datovaný na začiatok 20. storočia. Po niekoľkých dekádach vývoja bolo jej prvotné dôležité využitie počas druhej svetovej vojny. Po vojne sa radarová technológia rozšírila do ďalších odvetví priemyslu. V dnešnej dobe sa s ňou stretol takmer každý. Najväčšie využitie má však v leteckom priemysle a je neoddeliteľnou súčasťou takmer celej aviatiky.

Komerčné lietadlá potrebujú vedieť údaje o svojej výške kvôli bezpečnosti. S týmto účelom sa štandardne využíva barometrický výškomer, ale barometrický výškomer nedokáže určiť správnu výšku včas. Z hľadiska bezpečnosti sa využíva aj radarový výškomer pre včasné upozornenie pilota na nízku výšku. Komerčné lietanie nie je jediný spôsob ako letieť. Za posledných 50 rokov sa rozšírilo športové a rekreačné lietanie, ktoré každým rokom získava stále viac prívržencov. A tu nastáva problém. Množstvo technológií je príliš drahých, aby ich bolo možné využiť pre rekreačné lietanie. Pomôcť rekreačným pilotom s meraním výšky pri pristávaní je cieľom mojej práce.

Cieľom mojej práce je vytvoriť cenovo dostupný a najmä presný rádiový výškomer, ktorý bude čo najpresnejšie merať vzialenosť lietadla od zeme a bude pilota informovať o name-ranej výške. Tak mu bude pomáhať s bezpečným pristávaním, aby sa predišlo zbytočným nehodám a haváriám.

Téma ma zaujala najmä z hľadiska vytvorenia niečoho nového. Keďže v poslednej dobe sa niekoľko ľudí z môjho okolia rozhodlo stať sa rekreačnými pilotmi, inšpirovalo ma to pracovať s radarovou technológiou.

V nasledujúcej kapitole sú predstavené radarové systémy, ich charakteristika, klasifikácia a taktiež milimetrová technológia pre radary, ktorá sa vo vzniknutom zariadení využíva. Následná kapitola sa sústreďuje na lietadlo a s ním spojené výškomery a manéver pristátia. Manéver je popísaný a zároveň sú špecifikované možné problémy počas jednotlivých pristávacích manévrov. V štvrtej kapitole sa stanovujú ciele danej práce a tiež dôvod zvolenia jednotlivých technológií. Posledné dve kapitoly predstavujú vytvorené zariadenie a experimenty, počas ktorých bolo zariadenie testované. Charakteristika zariadenia popisuje príklady fungovania výškomeru a aj jednotlivé technológie využité na dosiahnutie správneho fungovania zariadenia. V závere práce je výskum vyhodnotený a sú navrhnuté prípadné možné rozšírenia, ktoré by mohli zlepšiť zariadenie a hlavne jeho využiteľnosť.

## Kapitola 2

# Radarové systémy

Táto kapitola popisuje charakteristiku radarových systémov, ich fungovanie, členenie, ďalej vysvetlí rozdiel medzi pulzným radarom a FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) radarovým systémom. Cieľom kapitoly je vysvetliť, čo je radarový systém a ako sa používa. Cieľom je tiež ukázať príklady rôznych typov radarov. V kapitole ďalej rozvediem tému milimetrového radarového systému a popíšem konkrétny milimetrový radarový systém, ktorý sa využíval na vypracovanie tejto práce. Táto kapitola neslúži ako encyklopedický prehľad na tému radarových systémov.

### 2.1 Charakteristika radarových systémov

Slovo RADAR vzniklo z anglického „**radio detection and ranging**“ (rádio detekcia a vzdialenosť) v štyridsiatych rokoch 20. storočia v Spojených štátoch amerických [10]. Slovo rádio je v radarových systémoch spájané s rádiovými vlnami, ktoré radar využíva hlavne na detekciu a lokáciu. Súčasné radary však dokážu pomocou rádiových vln nielen detekovať ciele, ale dokonca ich aj klasifikovať, vytvárať obraz či mapovať objekty. Výhodou radarových systémov od ďalších detekčných systémov je ich presnosť lokalizovať objekt aj v nepriaznivých poveternostných podmienkach.

Radar je aktívne zisťovacie zariadenie, čo znamená, že vysiela signál. Vďaka tomu dokáže detekovať objekty ako sú lietadlá, mraky, lode, motorové vozidlá, vesmírne telesá alebo aj fauna a flóra. Existujú aj pasívne zisťovacie zariadenia, napríklad systémy pre zisťovanie búrok, ktoré namiesto vlastných rádiových vln využívajú blesky. Radar funguje v mikrovlnnom pásme od 400 megahertzov až do 40 gigahertzov [11]. Existujú aj radary, ktoré fungujú na krátkom vlnnom pásme (pár desiatok megahertzov) na diaľkové vyhľadávanie. Radar sa po svojom vynájdení používal najmä vo vojenskom priemysle. Jeho využitie pri bitke o Britániu bolo kľúčové. V dnešnej dobe sa radarové systémy používajú aj v civilnej sfére. Sú významnou súčasťou najmä vo vzdušnom priestore. Používajú sa aj v lietadlových systémoch pre navádzanie, ako aj na kontrolu leteckej dopravy či v meteorológii. Ďalším významným využitím je napríklad zisťovanie rýchlosti áut, kde radarový systém využíva Dopplerov efekt, vďaka ktorému dokáže radar merať aj rýchlosť.

Princíp fungovania radarového systému je pomerne priamočiary. Skladá sa z dvoch častí, a to z vysielača a prijímača. Vysielač vyšle rádiový signál, ktorý sa odrazí od všetkého, čo mu príde do cesty. Časť odrazeného signálu (ozvena) je zachytená prijímačom. V prijímači sa signál zosilní a začne sa čistiť od „šumu“ pomocou špeciálnych softwarov. Podobným princípom funguje aj sonar, kde sa namiesto vysielať rádiových vln využíva zvuk [10].



Najznámejší typ radarového systému je pulzný radar. Vyznačuje sa tým, že anténa na prijímanie a vysiela radarových pulzov je rovnaká, ale jeho funkčnosť sa strieda. Striedanie sa deje opakovane, ale nie rovnomerne. Napríklad v jednej milisekunde vysiela radar iba jednu mikrosekundu, zvyšný čas signály prijíma. Zvyčajne sa vysiela sínusový typ rádiových vln. V jednom takom pulze by sa vyskytlo 1000 periód sínusového signálu. Zaujímavosťou rádiových vln, ktoré anténa prijíma a vysiela, je ich výkonostný rozdiel. Radarové systémy majú priemerný výkon rádiových vln od pár miliwattov až po jeden a viac megawattov (priemerný výkon sa počíta z celkového použitia antény, čiže výkon pulzu je niekoľkonásobne väčší), pričom signál odrazený od detekovaného objektu môže byť tak nízky ako 1, picowatt ( $10^{-12}$  watt). Rádiové vlny dosahujú rýchlosť svetla (300 000 km/s). Vzdialenosť detekovaného objektu sa dá vypočítať podľa rýchlosti rádiových vln a času, ktorý určuje, ako dlho trvalo rádiovéj vlne prísť k cieľu a odraziť sa naspäť do antény. Rovnica by teda vyzerala takto:

$$R = \frac{cT}{2} \quad (2.1)$$

Kde:

$R$  : Vzdialenosť radarového systému od detekujúceho objektu

$C$  : Rýchlosť svetla (rádiové vlny)

$T$  : Čas, ktorý rádiovéj vlne trvá na ceste od antény k objektu a späť.

## 2.2 Klasifikácia a fungovanie radarových systémov

Táto časť kapitoly prezentuje klasifikáciu jednotlivých typov radarových systémov a popisuje ich fungovanie. V radarovom svete neexistuje jediné správne rozradenie. Väčšinou záleží na určitom faktore, podľa ktorého sa rozradujú dané systémy, ako sú: prostredie v ktorom sa používajú; prostredie, pre ktoré sa používajú; technológie, ktorú využívajú alebo na čo slúžia. Rozradenie posledných dvoch kategórií bolo prebraté zo zdroja [13].

### Klasifikácia podľa technológie

- **Primárny radar:** Radar vysiela vysokofrekvenčné signály smerom k objektu, od ktorého sa dané vlny odrazia späť k radaru. Tam sú vyhodnotené a je zistená vzdialenosť daného objektu od radaru. Na rozdiel od sekundárneho radaru, signál, ktorý radar prijal, bol vygenerovaný daným radarom.

- **Pulzný radar** je najstarší a najzákladnejší radar, aký existuje. Posiela vysokofrekvenčné pulzy, a potom čaká určitú dobu na návrat ozveny. Následne sa celý proces opakuje. Dosah a rozlíšenie vie radar upravovať podľa frekvencie opakovania pulzov. Vie zistiť najzákladnejšie údaje, ktoré radar zistiť dokáže, a to je vzdialenosť a relatívne miesto, kde sa nachádza objekt od radaru. Vie to zistiť podľa času, ako dlho trvalo pulzu vrátiť sa späť do radaru a podľa natočenia antény. Ďalšie rozdelenie pulzných radarov je na **Pulzné modulované** a **Intrapulzné modulované**.

**Pulzné modulované radary** vysielaajú veľmi krátke a vysoko energetické pulzy. Vďaka vysoko energetickým pulzom sa zlepšuje dosah a krátka dĺžka pulzov, ktoré sú vysoko frekvenčné a majú široké pásmo. Slúžia na zlepšenie rozlíšenia daného dosahu, čiže dokážu detekovať aj malé objekty. Ich využitie je rôznorodé

- od leteckých výškomerov až po vojenské radarové systémy. Ich nevýhodou sú vysoká spotreba elektrickej energie, nepresnosť načasovania, veľká citlivosť na počasie a hlavne cenová nedostupnosť.

**Intrapulzné modulované radary** využívajú nižšiu energetickú spotrebu na generovanie pulzov, ale dokážu zmeniť frekvenciu svojich signálov. Nižšie energetické pulzy spôsobujú nižší dosah, ten si ale vie radarový systém kompenzovať frekvenciou jednotlivých pulzov. Spravidla funguje, že čím väčšia frekvencia, tým kratšia vlnová dĺžka, čo pomáha rozlíšeniu detekovaného objektu. Nižšia frekvencia má zase dlhšiu vlnovú dĺžku, čo má za následok lepšiu detekciu radaru. Tento typ nie je až taký efektívny ako pulzný modulovaný radar, ale je energeticky aj cenovo výhodnejší a taktiež aj dostupnejší.

- **Kontinuálny radar (CW radar):** Základnou charakteristikou takéhoto typu radarového systému je konštantné vysielanie signálov z odosielajúcej antény. Spracovávaná odozva sa taktiež nepretržite spracováva. Prijímacia anténa môže byť tá istá ako odosielacia. Vtedy sa radar nazýva monostatický. Existujú aj bistatické radarové systémy, kde sa využívajú dve antény, jedna na odosielanie a druhá na prijímanie. V tomto prípade antény nemusia byť pri sebe, môžu byť od seba vzdialené. Detekcia vtedy vie byť pomocou porovnania priameho signálu a signálu odrazeného od objektu. Pri použití troch antén by sa dala určiť presná poloha nameraného objektu. Táto stratégia sa využíva pri pasívnych radaroch (radarový systém, ktorý vie iba prijímať). Ďalej sa delí na **Modulovaný** a **Nemodulovaný** radar.

**Modulovaný radar** alebo aj **radar s kontinuálnou frekvenčou moduláciou (FMCW-Radar)** je podobný ako vyššie spomínaný intrapulzný modulovaný radar v tom, že vie počas vysielania signálov meniť frekvenciu alebo fázový posun, ale amplitúda zostáva konštantná. Vďaka tejto vlastnosti vie zistiť vzdialenosť alebo výšku, ktoré sú určené podľa času medzi odoslaním a prijímaním alebo fázovým posunom. Taktiež sa vedia použiť pri počítaní rýchlosti pomocou Dopplerového frekvenčného posunu. Tento typ radarového systému sa využíva ako radarový výškomer. Takto bol využitý aj v tejto práci.

**Nemodulovaný radar** je unikátny v tom, že nedokáže určiť vzdialenosť a ani detekovať objekty. Napriek tomu, že nemení ani amplitúdu a ani frekvenciu, je užitočný pri detekovaní rýchlosti pomocou Doppleroveho javu. Najčastejšie sa radar využíva na meranie rýchlosti.

- **Sekundárny radar:** Pri sekundárnom radare musí objekt, ktorý je detekovaný, mať aj takzvaný transpondér. Hlavným rozdielom oproti primárnemu radaru je, že sekundárny radar dostáva aktívne odpovede z transpondéra. Radar posiela zakódované signály, ktoré transpondér dekoduje a odošle vlastnú správu, ktorú zase zachytí radar. V odoslanom signále nám transpondér vie poslať informácie ako sú meno objektu, typ objektu, kde sa nachádza a tak ďalej. Dáta, ktoré transpondér zasiela, definuje sekundárny radar.

## Klasifikácia podľa použitia

Keďže radarové systémy slúžili v minulosti najmä vo vojenskom priemysle, tak aj rozdelenie podľa použitia sa delí na **Vojenské radarové systémy** a **Civilné radarové systémy**. Jedným z vojenských radarov je napríklad **Multifunkčný Radar (MFRs)**

Ide o zbraňový systém schopný detekcie útokov veľkého počtu rakiet alebo delostreleckých granátov, ktoré majú pomerne malú odrazovú plochu. Okrem detekcie vedia na takéto hrozby aj reagovať, na to však potrebuje množstvo kanálov na riadenie palby. Musia byť schopné odlíšiť nepriateľské ciele od tých obranných a taktiež pracovať s kurzom týchto obranných striel. Tieto systémy majú špeciálne aktívne fázové antény, ktoré vytvárajú detailný radarový obraz. Fázové antény pozostávajú z plochých sensorových panelov, ktoré sa skladajú z malých vyžarovacích prvkov napájaných špeciálnym typom polovodičových zosilovačov z Arzenidu galitného. Jeden panel sa skladá aj z 2000 takýchto polovodičov. Pri použití štyroch statických antén tohto typu sa vie zaručiť 360° panoramatický radarový obraz.

Ďalším rozdelením vojenských radarov je na vzdušné a bojové sledovacie. Vzdušné slúžia na prieskum, riadenie a navádzanie. Protivzdušné radary slúžia hlavne na varovanie pred blížiacimi sa útokmi, majú ďaleký dosah a pokrytie 360°. Ich úlohou je taktiež pomáhať pri riadení rakiet alebo navádzať stíhačky na zachytenie nepriateľského objektu. Využívajú na to zvuk alebo dátový prenos. Takýto typ radaru musí byť schopný sledovať objekt. Väčšinou sú prepojené, aby fungovali čo najefektívnejšie a tvorili integrovanú a prvú líniu obrany. Bojové radary majú nižší dosah a sú hlavne úzko špecializované. Predstavujú prakticky lacnejšiu variantu pre multifunkčné radary. Väčšina týchto radarov je kompaktná pre použitie pozemných jednotiek, ale používajú sa aj v námorníctve. Ich najväčšou výhodou je, že sú prenosné. Okrem vlastností ako prieskum a navigácia môžu mať vlastnosť protihúfnicovej obrany, kde je vďaka húfnicovej strelbe schopný danú húfnicu lokalizovať. V poslednom rade môžu mať vlastnosť na navádzanie rakiet. Takýto radar môže byť priamo v rakete alebo statický na mieste.

Pri civilných radarových systémoch je rozdelenie na **riadenie letovej prevádzky** a **priemyselné využitie**. Pre riadenie letovej prevádzky sa používa niekoľko druhov radarov. Jedným z nich je **trasový radar**. Jeho úlohou je monitorovať lietadlá mimo špeciálne zóny, ako sú letiská a iné monitorované priestory. Využíva frekvenčné pásmo L (1GHz - 2GHz), dosah daného radaru vie byť okolo 450 km. Ďalším typom radarov je **Prehľadový radar**, ktorý funguje v strednej vzdialenosti. Prakticky nahrádza trasový radar. Mal by vedieť rozpoznať lietadlo a naviesť ho na začiatok pristávacej sekvencie. Využíva nižšie frekvencie, aby dokázal pracovať aj v zlých poveternostných podmienkach a stále dokáže používať vysoko presné antény. Je dôležitý a väčšina problémov, ktoré môžu nastať, neohrozujú jeho dosah. **Presný približovací radar** slúži pri nulovej viditeľnosti. Jeho úlohou je detekovať a navádzať pri posledných úkonoch pri približovaní dokonca aj pri pristávaní. Navádzanie prebieha pomocou rádia alebo cez inštrukcie vo forme pulzových signálov, ktoré slúžia autopilotovi. V súčasnosti najpoužívanejším radarom na monitorovanie pohybu lietadiel alebo aj motorových vozidiel je **Radar pre riadenie pohybu na letiskovej ploche (SMR)**. Je to označenie pre primárny radar letiska, ktorý slúži na kontrolu manévrovacieho priestoru, ktorý je určený pri odlietaní, či pristávaní ale aj pohyb (rolovanie) na letiskovej ploche. Do tejto manévrovacej plochy nepatria odbavovacie plochy. Tieto radary majú veľmi krátku odozvu a často sú pripevnené na vyvýšené miesta pre lepšiu viditeľnosť. Letisko môže mať niekoľko takýchto radarov. Bežným pravidlom je jeden radar pre terminál, ale všetko závisí od vzdialenosti medzi terminálmi a premávky na danom letisku. Radar pre riadenie

pohybu na leteckej ploche, na rozdiel od ostatných spomenutých radarov, slúži najmä na monitorovanie pohybujúcich sa objektov na zemi. Kde sú podmienky horšie ako vo vzdušnom priestore a zväčšuje sa intenzita rušenia a ďalších fyzikálnych vplyvov, tak kvalita obrazu je horšia a na identifikáciu objektov sa využíva vizuál. Anténa pre tieto radary býva spravidla točivá s trvaním otočenia (skenovanie celej plochy) jednej sekundy. Využívajú vysoké frekvencie od 8 GHz až po 12 GHz (pásmo X a K) a spolupracujú s ostatnými radarmi na letisku, ktoré ich dopĺňajú či už v identifikácii objektov, alebo aj na možnú detekciu kolízie.

**Civilné radary** majú v komerčnom priestore množstvo využitia, od meteorologických radarov, cez stacionárne radary až k tempomatu. Takisto slúžia aj k vedeckým účelom, ako je detekcia materiálu, či pozemný radar. No využitií existuje omnoho viac.

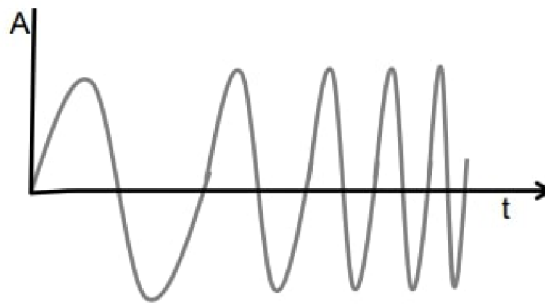
## 2.3 Milimetrové vlny

V tejto sekcii sú predstavené radary na báze milimetrových vln, ktoré predstavujú špeciálnu kategóriu vo svete radarov. Sekcia bude poukazovať na ich charakteristiku, unikátne vlastnosti a využitie. Dôvodom tejto sekcie je skutočnosť, že milimetrový radar bol využitý pri vytváraní tejto bakalárskej práce na vytváranie bodového mračna. To slúžilo na vypočítanie vzdialenosti od povrchu. Informácie boli prevzaté zo zdrojov od firmy Texas Instruments [8] a [9].

Milimetrové radary su špeciálne využívaním milimetrových elektromagnetických vln. Tie dosahujú pomocou vysokých frekvencií (40-300GHz), čo je ich hlavnou výhodou. Tento typ radarov dokáže určiť vzdialenosť, uhol a hlavne rýchlosť objektov. Ďalšou výhodou milimetrových radarov je veľkosť komponentov, ktorá je malá. Ďalšou výhodou je presnosť až na zlomok milimetra. Štandardný milimetrový radar sa skladá z vysielacích, prijímacích, rádiových, analógových a digitálnych komponentov. Problémom pri vytváraní takéhoto radarového systému je dizajn, a to kvôli zložitosti spojenej s vysokými frekvenciami a spotrebou energie na systém. Tieto problémy sa podarili vyriešiť firme Texas Instruments pomocou doplnkových polovodičov na báze oxidu kovu (CMOS), vďaka ktorým sa integrujú vyššie spomenuté komponenty. Na to, aby technológia milimetrových vln využila svoj plný potenciál, používa sa v frekvenčne modulovaných kontinuálnych radaroch (keby radar nebol modulovaný, ale kontinuálny, nedokázal by určiť vzdialenosť od objektu).

### Výpočet vzdialenosti

Pri FMCW radaroch sa generuje špeciálny signál zvaný „chirp“. Tento signál je unikátny v menení frekvencie lineárne s časom, ako je ukázané na obrázku. Vďaka tomu vedia FMCW radary určiť vzdialenosť



Obr. 2.1: „Chirp“ signál, kde sa mení šírka rádiových vln v čase  $t$

Táto zmena sa deje, pretože sa zvyšuje frekvencia signálu, a šírka vlny sa tým pádom musí zmenšiť. Rovnica na vypočítanie dĺžky rádiových vln je jednoduchá:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.2)$$

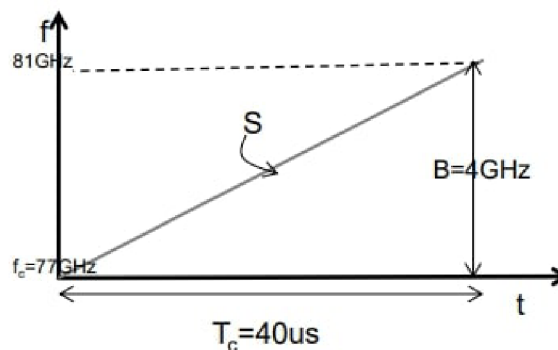
Kde:

$\lambda$  : Šírka vlny

$c$  : Rýchlosť svetla

$f$  : Frekvencia

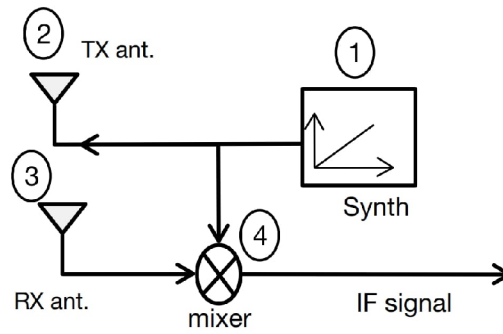
Podobný graf ako 2.1 sa dá lepšie ukázať pomocou zmeny frekvencie v čase, kde vlastne vzniká lineárny graf, čo naznačuje, že zmena v 2.1 prebieha taktiež lineárne.



Obr. 2.2: Zmena frekvencie v čase

Tento graf znázorňuje špecifiká „chirp“ signálu o trochu lepšie. Je jasná zmena frekvencie v čase. V 2.2 pracuje radar vo frekvenčnej šírke 4 GHz. Chirp je charakterizovaný začiatkom frekvencie, čo je v tomto prípade 77 GHz, šírkou pásma ( $B$ ) a časom zvyšovania frekvencie ( $T_c$ ). Sklon ( $S$ ) signálu chirp definuje, ako rýchlo sa zvyšuje frekvencia signálu. V danom prípade to je 100 MHz/us.

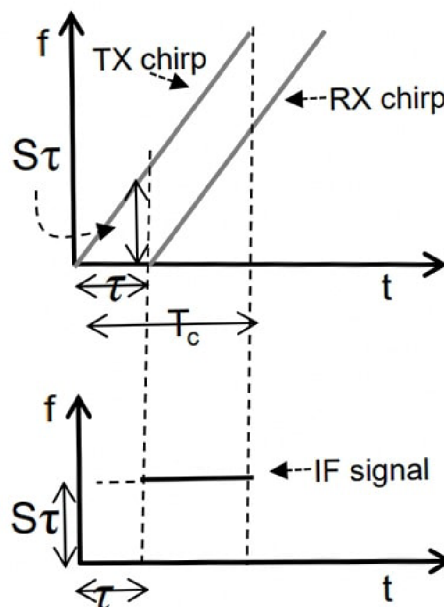
Najzaujímavejšiou časťou je, ako prebieha výpočet vzdialenosti od objektu. V grafe 2.3 je znázornená schéma milimetrového radaru s jednou prijímacou anténou (RX) a jednou odosielajúcou anténou (TX).



Obr. 2.3: Schéma milimetrového radaru

1. Syntetizátor, ktorý vytvára signál.
2. Anténa TX, ktorou sa chirp signál vysiela.
3. Anténa RX, ktorou sa prijíma odrazený signál od objektu alebo objektov.
4. Mixér, ktorý kombinuje signál z TX a RX a vytvára medzifrekvenčný signál (IF signál)

Mixér je najdôležitejším komponentom, pretože jeho úlohou je pomocou zmiešavania prijatého a odosielaného signálu detekovať objekt. Je to komponent, ktorý má dva vstupy a jeden výstup. Jeho funkčnosť by sa dala prezentovať ako dve sinusové funkcie, ktoré vstupujú do mixéra a vytvoria sínusoid. Tá má frekvenciu rovnajúcu sa rozdielu vstupov a taktiež fázou rovnajúcu sa rozdielu vstupných sínusoid. Funkčnosť takého mixéra sa dá jednoducho pochopiť gragicky. Podobne ako na obrázku 2.2.



Obr. 2.4: Grafická prezentácia fungovania mixéru

Na prvom grafe sú znázornené frekvencie dvoch signálov v čase, vysielajúci chirp signál (TX) a aj prijímajúci chirp signál (RX), ktorý sa odrazil naspäť od objektu do prijímajúcej antény. Tieto signály sú vstupom pre mixér. Pomocou  $\tau$  sa vie určiť vzdialenosť podľa rovnice 2.1, keďže značí čas od začiatku vysielania až po detekovanie odrazeného signálu. Tieto signály vytvárajú IF signál, ktorý predstavuje rozdiel medzi nimi v čase. A pretože oba signály sú rovnaké, len posunuté v čase, frekvencia IF signálu je konštantná a môže byť detekovaná iba v čase, v ktorom je zachytený prijímací a vysielajúci signál. Táto frekvencia sa dá odvodiť pomocou vzorca:

$$S\tau = S * \tau \quad (2.3)$$

Kde:

$S\tau$  : Frekvencia výstupného IF signálu

$S$  : Sklon, podľa ktorého stúpa frekvencia signálu, znázornený v grafe 2.2

$\tau$  : Čas, počas ktorého signál cestuje k objektu a naspäť

Samotný signál je sínusoida, ako je ukázané na obrázku 2.1. Začiatková fáza IF sínusoidy sa odvodzuje podľa rozdielu medzi sínusoidou vysielacieho signálu a sínusoidou prijímacieho signálu. Dá sa však vyjadriť matematicky ako:

$$\phi_0 = 2 * \pi * f_c * \tau \quad (2.4)$$

Kde:

$\phi_0$  : Začiatková fáza sínusoidy

$2\pi$  : Perióda sínusoidného signálu

$f_c$  : Začiatková frekvencia vysielacieho signálu

$\tau$  : Čas, počas ktorého signál cestuje k objektu a naspäť

Ďalej sa dá táto funkcia upraviť na:

$$\phi_0 = \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (2.5)$$

Avšak táto funkcia je len aproximáciou a platí iba vtedy, ak je sklon vzrastu signálu a vzdialenosť objektu dostatočne malý. Stále ale platí, že fáza je lineárne úmerná sklonu a vzdialenosti.

Pri detekovaní viacerých objektov má každý signál rôznu statickú frekvenciu. Ako už bolo povedané, určuje sa podľa vzdialenosti daného objektu respektíve podľa jeho  $\tau$ . Čím ďalej sa nachádza objekt, tým väčšiu frekvenciu má. No keďže v takomto prípade sa IF signál skladá z niekoľkých sínusoid, musí sa spracovať Fourierovou transformáciou. Výsledkom je spektrum ukazujúce na vrcholy, ktoré reprezentujú objekty úmerne vzdialené od radarového systému.

## Rozlíšenie vzdialenosti

Je to schopnosť radarového systému rozlíšiť objekty od seba a nemýliť si ich ako jeden objekt. Podľa teórie Fourierovej transformácie sa dá zlepšiť rozlíšenie pomocou zväčšením dĺžky IF signálu. Na zväčšenie dĺžky je potrebné úmerne širšie pásmo. Čo znamená, že čím širšie pásmo, tým lepšie rozlíšenie. Teória Fourierovej transformácie taktiež hovorí: Pozorovacie okno ( $T$ ) dokáže rozlíšiť frekvenciu, pokiaľ je väčšia ako  $1/THz$ . To znamená, že dva signály sa dajú rozlíšiť, pokiaľ je rozdiel ich frekvencií dostatočne veľký. Matematické vyjadrenie:

$$\Delta f > \frac{1}{T_c} \quad (2.6)$$

Kde  $T_c$  je pozorovací interval. Pomocou danej rovnice sme schopní odvodiť aj rovnicu na vypočítanie dosahu radarového systému, kde radar dokáže identifikovať jednotlivé objekty.

$$\Delta f > \frac{1}{T_c} \implies \frac{S2\Delta d}{c} > \frac{1}{T_c} \implies \Delta d > \frac{c}{2ST_c} \quad (2.7)$$

Z toho vieme vyvodiť rovnicu na vypočítanie maximálnej vzdialenosti schopnej rozlíšiť objekty.

$$D_{res} = \frac{c}{2ST_c} \quad (2.8)$$

A hlavne, že rozlíšenie závisí od šírky pásma, v ktorom sa pohybuje chirp signál.

## Meranie rýchlosti

Pre milimetrové radarové systémy s kontinuálne modulovaným pulzom sa využívajú dva signály na meranie rýchlosti objektu. Tieto signály sú od seba vzdialené určitým časom. Každý odrazený signál je spracovávaný Fourierovou transformáciou (range-FFT), ktorá detekuje vzdialenosť objektu od radaru. Vrcholy oboch signálov budú v spektre na rovnakom mieste, avšak s rôznou fázou. Fáza v tomto prípade korešponduje s pohybom objektu v meracom okne. Matematická rovnica na výpočet fázového posunu sa dá odvodiť pomocou rovnice 2.5 ako:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi v T_c}{\lambda} \quad (2.9)$$

Z danej rovnice sme schopní odvodiť rovnicu na výpočet rýchlosti ako:

$$v = \frac{\lambda\Delta\phi}{4\pi T_c} \quad (2.10)$$

Rovnica na výpočet rýchlosti objektu je založená na fázovom posune. Pokiaľ nie je splnená podmienka  $|\Delta\phi| < \pi$ , vznikajú vo výpočtoch nepresnosti. Rovnica na výpočet najvyššej relatívnej rýchlosti počítaná pomocou dvoch signálov od seba vzdialených časom  $T_c$ . Vyššia maximálna rýchlosť vyžaduje kratší vysielací čas medzi signálmi.

$$v_{max} = \frac{\lambda}{4T_c} \quad (2.11)$$

Pri detekovaní rýchlosti viacerých objektov sa nevyužívajú dva signály, pretože pokiaľ sa množina objektov pohybuje počas merania, môžu sa ocitnúť v rovnakej vzdialenosti od objektu. Po spracovaní signálu Fourierovou transformáciou vznikne iba jeden vrchol, ktorý má reprezentovať všetky objekty. Fázový posun je tým pádom znehodnotený. A práve preto musí radar vyslať viac signálov ako len dva. Pre detekciu rýchlosti viacerých objektov sa



využíva  $N$  signálov s časovým rozdielom konštantným  $T_c$ . Tejto skupine sa hovorí **chirp rámeč**. Technika spracovania týchto signálov sa dá jednoducho vysvetliť pomocou dvoch objektov v rovnakých vzdialenostiach od radaru, ale s rôznymi rýchlosťami. Ako prvé sa odrazené signály spracovávajú pomocou Fourierovej transformácie na vypočítanie vzdialenosti (range-FFT). Výsledkom v spektre je  $N$  vrcholov, ale každý s rôznou fázou zahŕňajúcou fázy oboch objektov. Následne výsledný signál prejde druhou Fourierovou transformáciou (Dopler-FFT), ktorá rozdelí  $N$  vrcholov na samostatné objekty so svojimi fázami.

## Kapitola 3

# Ultralahké lietadlá a výškometre

Predošlá kapitola sa sústredila na kľúčovú časť celej tejto práce, ktorou sú radarové systémy. Ich použitie, klasifikácia, charakteristika a užšie vysvetlenie milimetrových radarov. Nasledujúca kapitola sa venuje použitiu zariadenia vytvoreného v tejto práci. Zariadenie má byť použité pre ultralahké lietadlá a má fungovať ako výškomer. Práve preto sú v tejto kapitole stručne popísané ultralahké lietadlá a taktiež charakteristika a klasifikácia výškomerov. Rovnako sú tu vysvetlené letecké manévry, pre ktoré by malo byť použitie zostaveného výškomeru účinné a prospešné.

### 3.1 Charakteristika ultralahkých lietadiel

Cielom aviatiky bolo už od začiatku vytvoriť lietadlo, ktoré by bolo cenovo dostupné a jednoduché na lietanie. Avšak už od doby bratov Wrightovcov bol trend na budovanie väčších a komplexnejších lietadiel. Lietadlo podobne ako radar zožalo svoj prvý úspech vo vojenskom priemysle, kde bolo významnou súčasťou prvej svetovej vojny. Moderné ultralahké lietadlá sú v rámci aviatiky pomerne mladé. Avšak prvé pokusy vznikli ešte pred bratmi Wrightmi už koncom 19. storočia v Nemecku, kde Otto Lilenthal nalietať okolo 2000 hodín na strojoch, ktoré by sa dali nazvať rogalom. Ďalšími dôležitými osobami v oblasti aviatiky ešte pred Wrightovcami sú Austráľčan Lawrence Hargrave, ktorý vymyslel krabicového draka (typ trupu, ktorý bol používaný väčšinou nasledujúcich dvojplošníkov) a Američan Octave Chanute. Ten spojil draka a pripojil krídla s trupom lietadla pomocou metódy Pratt truss (metóda na vystužovanie železničných mostov). Nasledovalo samotné lietadlo bratov Wrightovcov, ktoré je priamym predkom dnešných ultralahkých lietadiel. Po skončení prvej svetovej vojny existovali pokusy o vytvorenie ultralahkých lietadiel pre širokú verejnosť. Ide najmä o anglické stroje ako **English Electric Wren**, **White Monoplane** alebo francúzsky stroj **Pou-duCiel**. No ani jeden model sa neujal [7].

Za otca ultralahkých lietadiel (ultralightov) sa považuje John Moody, ktorý v Spojených štátoch pridal na svoj závesný klzák Icarus II motor z motokáry. Cieľom bola možnosť dostať sa do výšky, kde by sa dalo lietať s klzákom bez motora a neskôr motor zapnúť na získanie vyššej výšky. No po tom, ako tento spôsob začalo používať viac ľudí, stalo sa z ultralahkého lietadla nový druh leteckého dopravného prostriedku. Pred ultralightmi boli lietadlá dizajnované a stavané len pre komerčné použitie alebo pre vojenský priemysel. Neboli určené pre rekreáciu a šport. Dokonca aj na kúpu ľahkého lietadla na rekreáciu sa bežne pracujúci človek musel zložiť s ďalšími záujemcami, aby si ho mohol dovoliť. Taktiež

náklady spojené s lietadlami sú pomerne finančne náročné, a preto nie sú vhodné pre víkendového letca.

Ultralighty sú takmer výlučne športovo-rekreačné lietadlá. Výnimku predstavujú vo vojenskom priemysle, keďže ultralighty sú pre radarové systémy prakticky neviditeľné. Dôvodom ich využitia v rekreácii je ich cena a dostupnosť. Podľa vyhlášky Ministerstva dopravy a spojov Českej republiky je definícia nasledovná: „Motorový ultralehký kluzák je maximálne dvomiestne ultralehké lietadlo vybavené pohonnou jednotkou, jehož maximální vzletová hmotnost nepřevyšuje 600 kg“ [1]. Ultralighty sa delia do troch kategórií „P“, „A“ a „Z“. Do kategórie „P“ patria lietadlá vyrobené a postavené výrobcami daných lietadiel. Tieto lietadlá sú najdrahšie. Keďže ako už názov uvádza, ultralighty sú pomerne ľahké. Maximálna hmotnosť prázdneho jednomiestneho lietadla je 225 kg. S nádržou naplnenou na 30 minút letu a s pilotom by nemala presiahnuť 300 kg. Pri dvojmiestnom lietadle je to 305 kg a 450 kg s naplnenou nádržou na 30 minút letu a pilotom. Pokiaľ je použitý integrovaný systém záchrany, je možné horný limit prekročiť o 5% svojej hmotnosti. Práve preto sa pri luxusnejších modeloch využívajú najmodernejšie ľahké zliatiny, aby sa do nich zmestilo čo najviac technológií. Do kategórie „A“ patria lietadlá postavené amatérsky, ale podľa schválenej dokumentácie. Jedná sa o strednú cestu cenovo, ale aj kvalitatívne. Do kategórie „Z“ patria lietadlá postavené amatérsky ako prototypy. Táto kategória je pomerne populárna aj vďaka existencii firiem, ktoré sa špecializujú na výrobu daných lietadiel. Jedinou nevýhodou tejto kategórie je, že obnova preukazu v Českej republike je oproti ostatným kategóriám nevyhnutná každý rok [6].

## 3.2 Pristávanie ultralehkých lietadiel

V tejto stati sa rozoberajú manévry využívané na pristávanie, ako aj priebeh pristávania a taktiež problémy spojené s ním, keďže zostrojený radarový výškomer má za úlohu eliminovať spomínané problémy. Ďalej tu budú popisované faktory, ktoré ovplyvňujú pristávanie. Všetky informácie z tejto state vrátane obrázkov boli prevzaté z učebnice pilota z roku 2016 [5].

Pristávanie je manéver, ktorý sa začína okamihom, kedy je lietadlo 15 alebo 25 metrov nad pristávacou plochou. Trvá až do úplného zastavenia lietadla na pristávacej ploche. Proces pozostáva z 5 fáz, ktorými sú kĺzanie, prechodový oblúk, výdrž, dosadnutie a dojazd. **Kĺzanie** je začiatok celej fázy pristávania lietadla, pričom klesá konštantnou rýchlosťou, má vysunutý podvozok a vztlačové klapky. Výkon motora sa nastavuje tak, aby lietadlo dodržovalo rýchlosť a uhol zostupu. Pri **prechodovom oblúku** lietadlo klesá na dostatočnú výšku a začína sa dostávať do vodorovného letu. Uhol klesania sa vyrovná a motor beží už len na voľnobežných otáčkach. Táto fáza začína okolo piatich metrov a končí meter nad zemou, kedy nastupuje fáza **výdrže**. Ide o strácanie rýchlosti z prvej fázy tesne nad zemou, pokiaľ lietadlo nedosiahne optimálnu rýchlosť na **dosadnutie**. Je to fáza medzi výdržou a dosadnutím, kedy sa pilot musí pokúsiť dotknúť sa lietadlom pristávacej dráhy, ktorá sa označuje ako bod dosadnutia a znamená ukončenie tejto fázy. Poslednou fázou je **dojazd**, počas ktorej lietadlo zastavuje.

Tieto fázy generálne platia pre všetky typy lietadiel. Avšak konkrétne pri fáze dosadnutia sa využívajú rozmanité princípy podľa typu podvozku lietadla. Podvozky sa delia podľa toho, či sú hlavné dve kolesá podvozku za ťažiskom, vtedy sa jedná o predný podvozok, alebo pred ťažiskom. Vtedy hovoríme o zadnom podvozku. Pri zadnom podvozku sa pri normálnych okolnostiach dosadá na všetky 3 kolesá naraz. Pri tomto druhu podvozku sa v bode dosadnutia vyskytuje fenomén, kedy sa zadné kolesá zdvihnú. Pilot musí vzniknutú

situáciu riešiť pritiahnutím riadiacej páky čo najviac k sebe a opatrným brzdením, aby nedošlo k zdvihnutiu a prípadnému prevráteniu lietadla. Navyše, v takomto prípade má lietadlo vysoký odpor vzduchu a dĺžka dojazdu sa skracuje. Pri prednom podvozku sa dosadá najprv na hlavné kolesá, čiže na predné, inak by mohlo dôjsť k odskočeniu lietadla kvôli pružnosti podvozku. Toto odskočenie je veľmi nebezpečné a môže viesť k havárii. Po dosadnutí prednými kolesami môže pilot začať brzdiť intenzívne, pretože nehrozí odskočenie lietadla. Pri tomto type podvozku sa odporúča držať predné kolesa čo najdlhšie zdvihnuté, keďže napomáhajú odporu vzduchu rýchlejšie brzdiť. Pilotovi neskôr stačí riadiacu páku len pustiť a lietadlo pristane samo. No položenie musí byť jemné, preto musí byť lietadlo v čo najnižšej možnej výške. V inom prípade hrozí rozkmitanie lietadla, čo ho môže poškodiť. Výhoda predného podvozku je počas brzdienia pri dosadnutí, kde sa už nemá čo stať. Na rozdiel od zadného podvozku, kedy môže nastať vážna nehoda.

### **Faktory ovplyvňujúce pristávanie**

Faktory, ktorých si musí byť pilot vedomý, je mnoho. Niektoré naväzujú na lietadlo, iné zase na podmienky na pristávacej dráhe. Samozrejme musí pilot brať do úvahy aj atmosférické podmienky. Tieto faktory spolu často súvisia a vzniká množstvo nepredvídateľných situácií, kde neskúsený pilot dokáže spraviť chybu.

Jedným z hlavných faktorov je hmotnosť samotného lietadla. Všeobecne platí, že čím väčšia hmotnosť, tým dlhšia pristávacia dráha. To je dôvodom, prečo sa komerčné lietadlá počas núdzového pristátia zbavujú paliva. Maximálna hmotnosť pre pristátie musí byť dodržaná, inak môže dôjsť k poškodeniu lietadla. Výrobcovia všetkých lietadiel musia stanoviť maximálnu hmotnosť podľa konštrukcie lietadla.

Medzi atmosférické javy spadá najmä teplota a rýchlosť vzduchu (vietor), ktoré dokážu ovplyvniť pristávanie. Pri rastúcej teplote klesá hustota vzduchu, čo zapríčiňuje odchýlku v ukazovateli rýchlosti, ktorý ukazuje menšiu rýchlosť, aká je v skutočnosti. Toto predlžuje pristávaciu dĺžku. Pri vetre treba dbať na jeho rýchlosť a smer. Predný vietor skracuje pristávaciu dĺžku, zadný zase predlžuje. No najväčším problémom je ovládateľnosť lietadla, ktorá je pri vetre významne ovplyvnená. Riešenie je podobné ako pri hmotnosti, čiže výrobca musí určiť každému typu lietadla limity rýchlosti nielen v smere pozdĺžnej osi, ale aj ohľadom bočného smeru.

Pristávacia dráha má tiež niekoľko vlastností, na ktoré si musia dávať piloti pri pristávaní pozor. Najdôležitejšia je dĺžka dráhy, kde proces pristávania musí byť kratší alebo aspoň rovnaký ako samotná dráha. Taktiež dôležité je, či je dráha spevnená alebo nespevnená. Pri nespevnených dráhach môže hroziť lietadlu zapadnutie a kontaminácia dráhy. Kontaminácia dráhy je znečistenie dráhy, ktoré môže predĺžiť alebo naopak skrátiť dĺžku dojazdu. Napríklad krátka suchá tráva predlžuje dojazd o 20%, pri mokrej trávě je to až 30%. V neposlednom rade je faktorom aj sklon dráhy, delí sa na kladný a záporný. Kladný sklon znamená znižovanie výšky v smere dojazdu, čiže ide lietadlo z kopca, a tým pádom sa predlžuje dojazd a aj celkové pristávanie. Pri zápornom sklone sa zase skracuje dojazd a tým aj pristávanie. Na väčšinu faktrov musí výrobca vydať povolené hodnoty, pri ktorých sa môže na daných letiskách pristávať s konkrétnym lietadlom.

### 3.3 Pristávacie manévry pri silnom vetre

Ako už bolo spomínané pri faktoroch ovplyvňujúcich let, vietor je jedným z najproblematičnejších faktorov, pretože obmedzuje ovládateľnosť lietadla. Pri smeroch vetrov, ktoré sú rovnobežné s pristávaciou dráhou a sú svojou rýchlosťou blízko k limitu lietadla, sa doporučuje pristávať s nižšou výchylkou klapiek. To zapríčiňuje pomalšie klesanie rýchlosti, ale zato lepšiu ovládateľnosť a nižšie turbulencie. Pokiaľ ale smer vetra nie je rovnobežný s osou pristávania, odporúča sa pilotovi využiť techniku určenú pre tieto prípady.

#### Pristávanie s bočným vetrom

**Kurzová metóda** Táto metóda eliminuje odchýlku bočného vetru tak, že pilot mení kurz lietadla, pokým nie je rovnobežný s osou dráhy. Os lietadla v tomto prípade ale nie je rovnobežná s osou dráhy a v bode dosadnutia nastáva bočný náraz. Pri náraze lietadla trpí jeho integrita a hlavne podvozok. Náraz je nepríjemný pre posádku lietadla. Po dosadnutí je potrebné zrovnať os lietadla a os dráhy. V tomto prípade má lietadlo tendenciu nakláňať sa v smere vetra a pilot musí tento fenomén eliminovať smerovým kormidlom. Bočný náraz sa dá eliminovať, no má to svoje riziká. Jeho eliminácia spočíva v zrovnaní osi lietadla s osou dráhy tesne pred bodom dosadnutia. Vzniká pritom riziko náklonu lietadla v smere vetra, čo bočnému nárazu nezabráni, práve naopak. Situácia sa zhorší, pretože hrozí riziko výjazdu mimo dráhu.

**Sklzová metóda** Eliminácia odchýlky spočíva v náklone lietadla proti vetru a vychýlenie smerového kormidla na opačnú stranu. V bode dosadnutia sú osi lietadla a dráhy rovnobežné. Nevzniká bočný náraz. Pomocou náklonu lietadla sa snaží pilot eliminovať bočný vietor, no vzniká pritom zatáčivý moment, ktorý sa eliminuje pomocou kormidla na opačnú stranu. No vzniká ďalší problém, ktorým je efekt eliminujúci náklon lietadla. Pretože bez náklonu by sa nedalo pristáť, pilot musí vychýliť krídla proti vetru. Pri dosadnutí pilot položí na zem aj druhé koleso a dojazd má rovnaký princíp ako pri kurzovej metóde. Nevýhodou tejto metódy je, že náklon lietadla môže lietadlo poškodiť v prípade, že má nízko položené krídla.

Existuje ešte kombinovaná metóda, kde sa začína kurzovou metódou už vo väčšej výške a neskôr sa pokračuje metódou sklzovou až do bodu dosadnutia.

### 3.4 Chyby pri pristávaní a ich opravy

Pristávanie je jednou z najrizikovejších častí letu. Hovorí sa, že najnebezpečnejšie minúty letu sú 3 minúty od vzletu a 6 minút do pristátia lietadla. Existuje množstvo chýb, ktorých sa môže pilot dopustiť. Niektoré môžu poškodiť lietadlo, iné môžu ohroziť aj samotnú posádku. Na chyby vzniknuté pri pristávaní reaguje pilot včasným vychylovaním kormidla. Aj pri opravách chýb si pilot musí dávať pozor na rýchle zmeny polohy riadiacej páky, čo môže celú situáciu ešte zhoršiť.

Preťažené pristávanie je pristávanie, kde je uhol nábehu nebezpečne veľký. V praxi to znamená dosadnutie pri menšej rýchlosti, ako je ideálna. Sklon lietadla je príliš veľký a k dotyku so zemou môže dojsť buď zadným podvozkovým kolesom alebo chvostom lietadla. To sa však týka iba lietadiel s predným podvozkom, keďže pri lietadlách so zadným podvozkom sa na zadné kolesá pristáva štandardne. Na druhej strane nemá lietadlo dostatočnú rýchlosť a pri odskočení hrozí prekročenie uhlu nábehu a pád.

Ďalšie nebezpečné situácie hrozia pri vyrovnávaní lietadla, a to ako aj pri vysokom vyrovnávaní, tak aj pri nízkom. Pri nízkom vyrovnávaní sa jedná o situáciu, kde pilot premešká ideálny čas na vyrovnanie lietadla a k vyrovnaniu dochádza neskôr, ako by malo. Pilot to vie vyriešiť radikálnejším prítahovaním riadiacej páky. No často má nízke vyrovnanie za následok odskočenie alebo odplávanie od pristávacej dráhy. Pri vysokom vyrovnaní pilot zase vyrovnáva lietadlo príliš skoro a hrozí strata rýchlosti a prepadnutie. Pilot situáciu rieši dvoma spôsobmi. Buď zvýšením výkonu motora, alebo jemne potlačí riadiacu páku a prevedie lietadlo do klesania. V takom prípade môže nastať problém, ak by sa pilot snažil jemne dosadnúť. Rieši sa to pritiahnutím riadiacej páky, čím sa zníži rýchlosť klesania.

V neposlednom rade hrozí k odskočeniu lietadla. V takom prípade sa lietadlo dotklo pristávacej plochy, a pokračovalo do stúpania. Taktiež na odskočenie pôsobí na akumulovaná energia v tlmičoch podvozku. Pilot v tom prípade musí znova previesť lietadlo do stavu výdrže a zvýšiť výkon motora v prípade nedostatočnej rýchlosti. Opakované odskočenia sú veľmi nebezpečným javom a často končia haváriou. Často sú zapríčinené neskorými reakciami pilota pri pristávaní, kde odskoky zostávajú rovnaké alebo sa zväčšujú, no rýchlosť sa znižuje. Najlepšie riešenie je prerušiť manéver pristávania, začať stúpať a snažiť sa zopakovať pristátie. Pri pristávacích manévroch, ktoré sa nedajú prerušiť (vetrone), je doporučené s riadiacou pákou nehýbať a nechať ju v neutrálnej polohe.

### 3.5 Letecké výškomery

Výškomer je zariadenie, ktoré slúži na meranie nadmorskej výšky. Je kľúčovým komponentom leteckého priemyslu, ale taktiež je využívaný horolezcami a parašutistami na určovanie vertikálnej polohy. Výškomer je jedným z najdôležitejších komponentov lietadla. Pre väčšinu typov lietadiel je už uzákonnený ako povinná výbava. Existuje množstvo rôznych druhov výškomerov. Hlavné tri sú barometrický výškomer (tlakový výškomer), radarový výškomer a optický výškomer (laserový výškomer) [12].

**Barometrický výškomer** má zistiť výšku na základe atmosferického tlaku. Čím je vonkajší tlak nižší, tým je väčšia nadmorská výška, a naopak. Tlakový výškomer je však náchylný na zmenu počasia, keďže tlak počas búrok klesá, čo by naznačovalo vyššiu výšku. Tieto výškomery sú najviac populárne medzi lietadlami, sú ideálne najmä pre veľké komerčné lietadlá. Takéto lietadlá lietajú vo veľkých výškach, kde by radarový výškomer nebol ideálny. Hlavné komponenty tlakového výškomeru predstavuje skupina zapečatených aneroidných doštičiek. Zapečatená aneroidná doštička má vnútorný tlak 29,92 palcov ortuti [2]. Tieto doštičky sa pri zmene výšky zmršťujú alebo napínajú podľa toho, či je vonkajší tlak vyšší alebo naopak nižší ako tlak daný v zapečatených doštičkách. Doštičky sú spojené mechanicky s ihlou na indikátore. Zmrštenie doštičiek predstavuje zníženie letovej výšky a napínanie predstavuje zvýšenie letovej výšky. Nevýhody barometrických výškomerov sú už vyššie spomínaná nepresnosť pri náhlych zmenách, taktiež potrebná kalibrácia pomocou zapečatených doštičiek a presnosť, ktorá je závislá na niekoľkých faktoroch, akými sú teplota a kvalita doštičiek [2].



Obr. 3.1: Barometrický výškomer<sup>1</sup>

Letová výška sa dá odmerať rôznymi spôsobmi. Ďalší spôsob, ktorý využívajú zariadenia ako radar, laser, sonar (ktorý je odlišný od barometrických výškomerov) [14], je pomocou merania času odrazenia ich vyselania od povrchu zeme alebo iných vesmírnych telies.

Za **radarový výškomer** sa bežne považuje typ radaru, ktorý smeruje na zemský povrch a dokáže odmerať relatívnu nadmorskú výšku a tým určiť výšku nad povrchom. Hoci funkčnosťou pripomína štandardný výškomer, zameranie radarového výškomera je iné. Nedokáže určiť nadmorskú výšku, iba relatívnu výšku nad plochou, cez ktorú objekt práve prechádza. Využíva sa ako podporné zariadenie so zariadeniami, ktoré absolútnu výšku dokážu určiť. Jeden z príkladov využitia je na kozmických lodiach, kde je vzdialenosť lode od zeme známa a radarový výškomer slúži skôr na zistenie reliéfu krajiny, nad ktorou sa vyskytuje, a to pomocou odrazených vln. Pre radarový výškomer sú vhodné nielen pulzné, ale aj kontinuálne radarové vlny. V oboch prípadoch je potrebná modulácia, aby bolo možné zmerať čas odrazu. Pulzné radary sú však preferované pre vyššie výšky a kvalitné meranie je približne do 1500 metrov. Na druhej strane kontinuálne radary sú efektívnejšie pri použití v nižších výškach (niekoľko stoviek metrov). Tento fakt však nie je pravidlom, vždy záleží na frekvencii signálu. Pri použití radaru s frekvenciou 44 Ghz nezáleží na spôsobe vysielania. Takýto radar by sa dal použiť rovnako na vysoké, tak aj nízke výšky. Frekvencia v radare záleží od rôznych technických možností a od hlavnej úlohy daného radarového výškomera. Ak by Zem bola dokonalo plochá hladká zemeguľa, tak by sa signál odrazil iba z najbližšieho bodu k lietadlu. A výpočet výšky by bol pomerne jednoduchý. Bohužiaľ Zem nie je dokonalo hladká, a tak sa naspäť odráža množstvo rôznych bodov z povrchu. Aby bol radarový výškomer schopný vypočítať čo najpresnejšiu výšku, je potrebné, aby výškomer dokázal rozdeliť body medzi vzdialené a tie, čo sú takmer kolmé k lietadlu. Pre výškomer by bola vhodná anténa s čo najužším rozsahom. No anténa je limitovaná obmedzenými možnosťami v priestore lietadla a jej osvetlená plocha býva často pomerne široká. Výškomer ale dokáže okrem výšky získavať informácie aj o šikmých vzdialenostiach ako na obrázku.

<sup>1</sup>Prevzaté z [www.aircraftspruce.eu](http://www.aircraftspruce.eu)



Obr. 3.2: Radarový výškomer <sup>2</sup>

Geometrické vlastnosti radarového výškomeru využívajúceho či už pulzné alebo kontinuálne vlny, sa dajú spracovávať dvoma metódami. Jednou z nich je lokálna, kedy sa snaží o spracovanie osvetlenej plochy, ktorá je blízko ku kolmici. A integrálna, kde sa spracováva celá osvetlená plocha. V takom prípade sa merajú rôzne parametre, aby sa získali čo najužitočnejšie údaje, ktoré sú závislé od použitej modulácie radaru. Táto úloha sa potýka z rôznymi problémami, ktoré musí radar riešiť. Ide napríklad o obraz prijatý z antény, kde rôzne odrazené body majú rôznu váhu. Tento problém ale dokáže radar zvládnuť, keďže samotný výškomer vie, o aký obraz sa jedná. Ak by výškomer obraz nepoznal, mohol by nastať problém s údajmi. Nameraná výška by napríklad mohla byť menšia, pretože nebola nameraná od správneho povrchu. Jeden z najväčších problémov je samotný povrch a jeho zloženie, kde sa sila odrazu mení podľa zloženia povrchu, ako voda, les, pole alebo budovy. Pri využívaní výškomeru nie je jasné, o aký povrch sa jedná a pri menení povrchov sú hodnoty často náhodné a nedajú sa použiť. Ďalšia vec, ktorá môže skreslovať nameranú výšku, sú manévry letového zariadenia, kedy sa lietadlo nakláňa alebo spodok lietadla nesmeruje k ploche. Manévry môžu zapríčiniť časové oneskorenie reflektovaného signálu. Pokiaľ výškomer nie je vyzoomený o týchto manévroch, môže použiť šikmé body zachytené výškomerom namiesto kolmých.

Ďalším znakom radarových výškomerov sú slepé body. Takto môže výškomer vyhodnotiť dáta, ktoré boli úspešne spracované, ako odrazené vlny. Tieto body sa objavujú v najnižších výškach, ktoré výškomer dokáže zmerať. Tento úsek býva zvyčajne od 30 cm do 500 cm od povrchu. Tento interval sa dá zmenšiť v pulznych výškomeroch pomocou skrátenia dĺžky pulzu, popri prípade zvýšením frekvencie v kontinuálnych radaroch.

V praxi sa využívajú oba typy radarových výškomerov, či už pulzné alebo kontinuálne. Často majú aspoň dve antény, obe sú multifunkčné na vysielanie ale aj na prijímanie. Dve antény taktiež pomáhajú pri zmenšení intervalu slepých bodov. Antény by mohli mať charakter mikropásikov, ktoré operujú vo frekvenčnom pásme C. Antény by boli na stranách lietadla, aby sa znížila strata reflektovaných signálov. Výškomery bežne majú reguláciu rozsahu citlivosti, ktorá obmedzuje citlivosť prijímača v závislosti od nadmorskej výšky, najmä v malých výškach, aby sa zachytili odrazené vlny a nie únik z radaru.

**Laserový výškomer** je typ výškomeru, ktorý sa podobným fungovaním ako radarový výškomer využíva najmä na presné diaľkové merania. Operuje podobne ako radarový výškomer v zmysle merania času doby odrazu svetla od povrchu. Laserové výškomery sa používajú pri geodézii. Vo vzdušnom priestore vedia tieto výškomery priamo zmerať topografiu terénu, korytá toku, merať objemy lesov [3]. Takisto dokážu rýchlo a presne vymerať vlastnosti zemského povrchu a môžu byť užitočným nástrojom na diaľkové snímanie po-

<sup>2</sup>Prevzaté z [www.freerightsystems.com](http://www.freerightsystems.com)



vodí a vodných zdrojov. Laserové výškomery používajú tri techniky merania. Pri všetkých troch je princíp rovnaký, a to meranie času doby odrazu. Interferometrická metóda sa používa na krátke vzdialenosti do 100 m. Ďalší spôsob je pomocou telemetrie s amplitúdovo modulovaným lúčom, ktorého efektívnosť je do 50 km. Posledná metóda sa volá metóda pulzného laserového radaru, ktorá je presná pre výšky a vzdialenosti nad 10 km. Využitie týchto metód závisí na rôznych faktoroch, ako je lom vzduchu, uhol odrazeného lúča a techník spracovania. Existuje široká škála komerčných laserových výškomerov a závisí na aplikačných požiadavkách [4].



Obr. 3.3: Laserový výškomer pre poľnohospodárske lietadlá <sup>3</sup>

---

<sup>3</sup>Prevzaté z [www.mindrmlasers.com](http://www.mindrmlasers.com)

## Kapitola 4

# Zhodnotenie súčasného stavu

Táto kapitola má za úlohu popísať existujúce výškomery pre ultralightové lietadlá, ktoré sú používané v dnešnej dobe. Taktiež má za úlohu vysvetliť a predstaviť ciele zhotoveného zariadenia týkajúce sa danej práce.

### 4.1 Letecké výškomery

V kapitole vyššie boli podľa spôsobu fungovania popísané 3 druhy výškomerov, a to barometrické, radarové a laserové. K týmto trom typom výškomerov sa môžu priradiť výškomery na báze GPS. Preto v tejto stati budeme rátať aj s výškomerom, ktorý využíva GPS signál.

Pre ultralightové lietadlá (ultralighty) existuje množstvo výškomerov z rôznych cenových kategórií. Základným typom výškomera je barometrický. Barometrický výškomer je najstarší typ výškomera. Má niekoľko benefitov, ako napríklad skutočnosť, že sa jedná o analógové zariadenie. Tým pádom pre svoje fungovanie nepotrebuje elektrickú energiu, čo je pre lietadlo veľkou výhodou. Ďalšou výhodou je jeho dostatočná reprezentácia nadmorskej výšky, ktorú určuje podľa tlaku, v ktorom sa lietadlo nachádza. No hlavným cieľom tejto bakalárskej práce je vytvoriť zariadenie, ktoré dostatočne pomáha pilotom pri pristávaní. V tomto prípade však barometrický výškomer zaostáva svojou presnosťou a rýchlosťou zmeny ukazovateľa. Taktiež dokáže merať iba nadmorskú výšku a nie relatívnu výšku k najbližšiemu povrchu, čo je pre cieľ tejto práce rovnako nedostatočné. Nasledujúcou kategóriou sú výškomery na báze GPS. Tie taktiež nevyhovujú zadaniu, a to najmä z dôvodu závislosti na GPS družici. Oproti ostatným typom, ktoré dokážu zistiť výšku samostatne, GPS výškomery vyžadujú signál z GPS družíc. Tých je síce na obežnej dráhe dostatok, no presnosť merania je priamo úmerná počtu družíc, ktorých signál bol výškomerom zachytený. Samotná odchýlka GPS meraní je príliš veľká. Primárne slúžia na výpočet nadmorskej výšky, no dokážu vypočítať aj relatívnu výšku, hoci nie sú také presné ako radarové alebo laserové výškomery. Pri radarových výškomeroch sú najväčším problémom vysoké výšky lietadla, ktoré by takýto výškomer dokázal zachytiť. No cena by bola v stovkách tisícov až v miliónoch korún českých. Čo by taktiež šlo proti zmyslu danej práce. Najväčším rozdielom medzi radarovým výškomerom a laserovým výškomerom je pomer ceny výškomera a jeho dosahu. V tabuľke sú ukázané 3 výškomery, každý s iným štýlom merania výšky, taktiež ich cena, dosah a najmä odchýlka. Chýba tu výškomer na báze GPS signálu, keďže jeho použitie v leteckom priemysle je zriedkavé.



Obr. 4.1: Barometrický <sup>1</sup>



Obr. 4.2: Radarový <sup>2</sup>



Obr. 4.3: Laserový <sup>3</sup>

	<b>Barometrický výškomer</b>	<b>Radarový výškomer</b>	<b>Laserový výškomer</b>
Názov	Winter Instruments EBH	Garmin GRA 5500	Haglöf Laser Geo
Dosah	3000 metrov	762 metrov	1000 metrov
Odchýlka	± 10 m	± 45 cm	± 30 cm
Spôsob merania výšky	Meranie nadmorskej výšky	Meranie od najbližšieho povrchu	Meranie od najbližšieho povrchu
Cena	11 156,32 Kč	332 520,63 Kč	58 067,90 Kč

Tabuľka 4.1: Porovnanie rôznych druhov výškomerov

Z tabuľky vyplýva, že žiaden z vybraných výškomerov nevyhovuje tejto práci. Barometrický má príliš veľkú odchýlku. Cena u radarového a laserového je nevyhovujúca. Práve preto bolo potrebné vymyslieť výškomer, ktorý by riešil problém ceny a odchýlky na úkor výšky.

## 4.2 Cieľ práce

Cieľom práce je pomáhať pilotom, najmä začiatočníkom, s pristávaním rekreačných lietadiel. Keďže podľa tabuľky 4.1 je najlepšou možnosťou práve radarový výškomer a jeho najväčší problém je cena. Práve preto bolo najlepšie riešenie využiť radarovú technológiu na meranie povrchu a pomocou zistených bodov vypočítať výšku. Takéto zariadenie by malo dokázať vypočítať nameranú výšku s podobnou odchýlkou no len pre nižšie výšky niekoľko desiatok metrov. Takýto radarový výškomer by mal problémy vysoké výšky detekovať. Čo značí problém pre primárny výškomer lietadla. Avšak radarové zariadenie nie je určené ako primárny výškomer, skôr ako pomôcka pre pristátie. Ďalším problémom radarového výškomeru z tabuľky 4.1 je jeho veľkosť, ktorá nemusí byť problémom pre niektoré lietadlá. No pre menšie lietadlá a najmä ultralighty predstavuje vážny problém. Palubná doska je výrazne limitovaná svojou veľkosťou a hlavne celkovou hmotnosťou ultralightu. Bezpečne vložiť daný výškomer do palubnej dosky môže predstavovať neprekonateľný problém. Tento problém sa týka aj napájania elektrickou energiou, čo je pri malých lietadlách, akými sú

<sup>1</sup>Prevzaté z [www.airteam.eu](http://www.airteam.eu)

<sup>2</sup>Prevzaté z [www.seaerospace.com](http://www.seaerospace.com)

<sup>3</sup>Prevzaté z [www.geoobchod.cz](http://www.geoobchod.cz)

ultralighty, značne limitované. Radarové zariadenie vyrobené práve pre účely tejto práce by ich mohlo vyriešiť svojou veľkosťou.

### 4.3 Popis zariadenia

Pri výbere radarovej technológie na meranie výšky mi bolo vedúcim práce odporúčané využiť radarový modul od firmy Texas instruments. Jedná sa o firmu so zameraním na výskum polovodičov a radarovej technológie. Firma disponuje širokou škálou radarových modulov. Rovnako bolo potrebné vybrať aj komponent na spracovanie dát získaných z radarového modulu. Rozhodol som sa pre mikropočítač od firmy Raspberry Pi Foundation. Mikropočítač od danej firmy by mal mať dostatočnú výpočetnú kapacitu pre spracovanie dát, ale aj pripojenie na audio zariadenie či generovanie zvuku. Najlepší spôsob pripojenia audio zariadenia je cez bluetooth, ale pripojenie pomocou 3,5 konektora je vítanou alternatívou. Pre prácu a ovládanie výsledneho zariadenia bola taktiež po konzultácii vybraná jednoduchá lacná klavesnica s tromi klávesami, ktoré su programovateľné. Posledným problémom je napájanie. Práve preto som sa rozhodol využiť power banku, aby bolo zariadenie mobilné a dalo sa testovať aj v podmienkach bez možnosti využitia štandardných elektrických zásuviek.

#### Splnitelné body práce

Zariadenie musí spĺňať niekoľko podcieľov, ktoré zaručia jeho správne fungovanie. Tieto body sú zhromaždené do jednotlivých okruhov podľa spoločných znakov.

- **Získavanie dát:** Zostavené zariadenie by malo byť schopné získavať dáta z čo najväčšej nožnej výšky a pri čo najväčšej nožnej rýchlosti. Pri radarových výškomeroch treba brať ohľad aj na rýchlosť daného lietadla, keďže predpokladané použitie zariadenia sa vzťahuje na fázu pristávania. Rýchlosť predstavuje o niečo nižšiu prioritu, ale je taktiež dôležitá.
- **Práca s dátami:** Z dát by sa mala získať čo najpresnejšia výška a pokiaľ je možné, tak aj uhol bočného náklonu. Táto skutočnosť by mala byť aj výhodou daného zariadenia. A to že dokáže zistiť aj ďalšie dodatočné informácie z bodového mračna na rozdiel od výškomerov, ktoré disponujú iba s informáciami výšky. Vyrobené zariadenie by mohlo byť okrem výšky a uhlu bočného náklonu lietadla schopné určiť aj rýchlosť. Ale tá je pre danú prácu nepodstatná.
- **Reprezentácia dát:** Informácie získané z prácou dát by mali byť reprezentované pomocou signálu. Keďže problém s palubnou doskou postihuje aj danú prácu. Je dobré využiť takú reprezentáciu, ktorá by pilotovi najmenej prekážala, nerozptyľovala ho a aby bola prospešná. Použitie zvukovej signalizácie má benefity vo vneme, ktorý nie je potrebný pre pristátie a práve preto je výhodný na využitie pre zariadenie. Tým sa odlišuje od zraku, ktorý sa využíva na sledovanie pristávacej plochy a hmatu, ktorým sa riadi lietadlo. Zariadenie by malo podporovať aj bezdrôtové bluetooth zariadenia, aj zariadenia s drôtom.
- **Práca so zariadením:** Zariadenie by malo spĺňať všetky body vysvetlené vyššie, no taktiež musí byť jeho ovládanie užívateľsky príjemné. Vďaka nedostatku miesta musí byť ovládanie malé a jednoduché, aby s ním dokázala pracovať široká škála pilotov.

Taktiež by malo mať jednoduché funkcie, ako je zapnúť zariadenie, spárovať bluetooth slúchadlá, prepnúť bluetooth pripojenie na drôtové a taktiež zníženie alebo zvýšenie zvuku tak, aby zariadenie pilotovi pomáhalo a zbytočne mu neprekážalo.

Popis finálneho zariadenia sa vyskytuje v najbližšej kapitole.

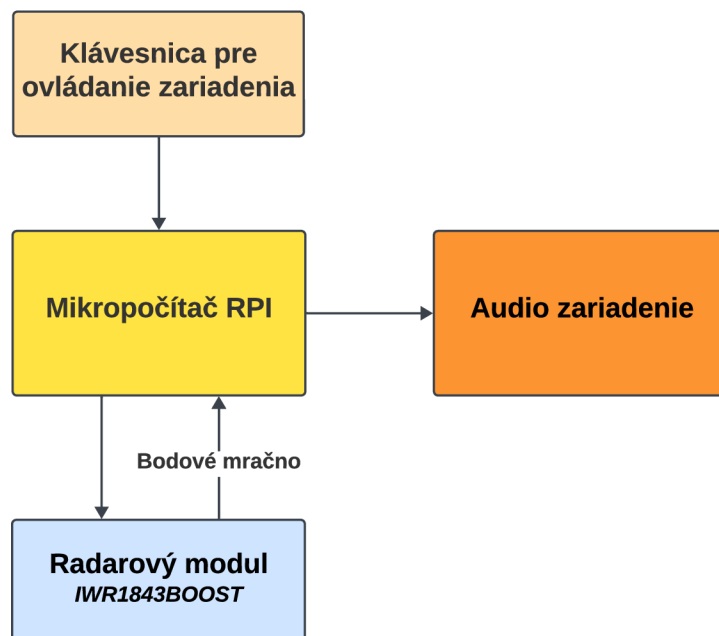
# Kapitola 5

## Implementácia

V tejto kapitole sa popisuje vzniknuté zariadenie. Zariadenie bolo vytvorené tak, aby čo najlepšie spĺňalo požiadavky z kapitoly 4. Popisuje sa tu ako aj hardvérová časť, tak aj kód vytvorený pre správne fungovanie zariadenia.

### 5.1 Základný popis zariadenia

Zariadenie by malo slúžiť ako rádiový výškomer. Skladá sa z niekoľkých častí, no za najdôležitejšie sa považujú samotný radarový modul a mikropočítač. Následne je potrebné audio zariadenie a ovládacie tlačítka (klávesnica). Taktiež netreba zabudnúť na káble, ktoré prepoja celé zariadenie. Napájať sa musí aj mikropočítač, radarový modul a tiež prepojenie dátového portu radarového modulu do mikropočítača pre správne fungovanie rádiového výškomera.

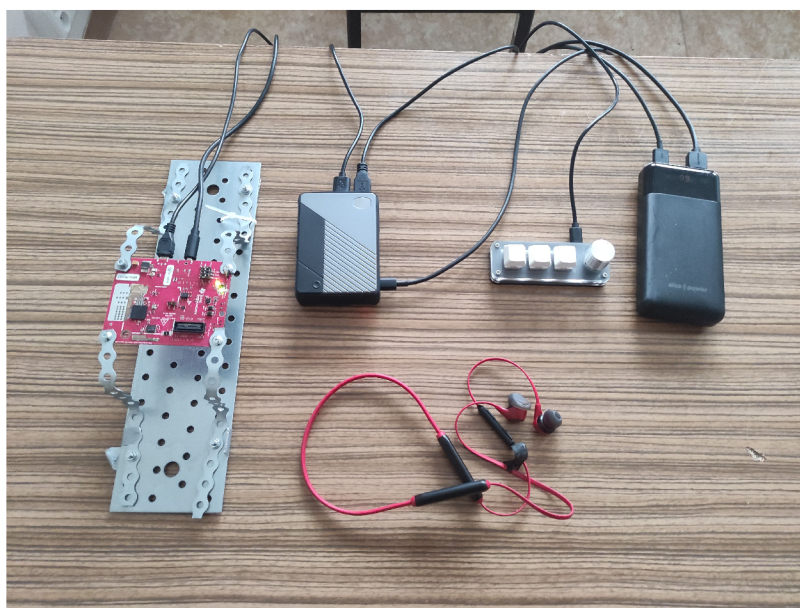


Obr. 5.1: Schéma zariadenia

Na lietadle je dôležité jedine umiestnenie radarového modulu, ktorý je limitovaný napájaním. Jeho ideálne miesto je na spodnej časti trupu. Aby výškomer fungoval, musí byť radarový modul umiestnený tak, aby mu neprekážal podvozok alebo iné časti lietadla. Tak tiež musí smerovať kolmo k zemskej povrchu, aby bolo zaručené jeho správne fungovanie. Umiestnenie mikropočítača je menej podstatné, ale poloha tlačítok musí vyhovovať pilotovi. Systém bol postavený na myšlienke bluetoothového zariadenia, hoci mikropočítač je vybavený aj vstupom klasickým 3,5 mm jack, čiže je možný aj prenos zvuku po drôte.

## Jednotlivé komponenty

V tejto časti sú popísané jednotlivé elementy, z ktorých sa rádiový výškomer skladá, a úlohy, ktoré v ňom zohrávajú.



Obr. 5.2: Vyhotovené zariadenie

„Mozgom“ celého zariadenia je mikropočítač Raspberry Pi 4 s 2 GB RAM, čo je viac ako dostatočné pre úkony, ktoré zabezpečuje. Jeho hlavnou úlohou je spracovávanie a reagovanie na jednotlivé príkazy, ktoré sú zadané pomocou kláves na klávesnici. Medzi jeho úlohy patrí generovanie zvuku, zapnutie a vypnutie bluetooth signálu, registrovanie bluetooth zariadenia a v neposlednom rade spracovanie a zbieranie dát z radarového modulu.

Radarový modul využívaný v tejto práci je od firmy Texas Instruments, ktorá vyrába milimetrové radary. Jedná sa o model IWR1843BOOST. Má 7 antén, z toho sú 3 vysielajúce a 4 prijímacie. Modul začína vysielat rádiové vlny v momente, keď mu mikropočítač vyšle konfiguračný súbor. Akonáhle sa súbor načíta, radar začína skenovať a posiela dáta cez sériový port naspäť mikropočítača, ktorý ich spracúva.

Na vstup do zariadenia sa využíva jednoduchá lacná programovateľná klávesnica s tromi mechanickými klávesami a s jedným otočným tlačidlom. Každý kláves má preddefinovaný symbol, ktorý reprezentuje. Pri stlačení mikropočítač dokáže rozpoznať, o ktorú klávesu sa jedná a reaguje naň.

Výškomer bol vytvorený tak, aby k nemu bolo možné pripojiť široku škálu audio zariadení. Pre bluetooth zariadenie je jediná požiadavka, aby bolo zariadenie viditeľné aj pri

prvom použití, aj v stave párovania. Pre pripojenia s drôtom stačí zapojiť 3,5 mm konektor do mikro počítača a zvuk by mal fungovať. Pre upravenie hlasitosti slúži otočné tlačidlo na klávesnici.

## 5.2 Fungovanie klávesnice

V tejto stati sa popisuje fungovanie diela ako celku. Celý proces sa začína zapnutím mikropočítača a končí sa jeho vypnutím. Keďže má zariadenie aj niekoľko kláves, táto stať predstavuje aj ich funkčnosť.

Pôvodný skript sa automaticky spustí pri zapnutí mikropočítača. Tento skript je zodpovedný za monitorovanie klávesníc pripojených k mikropočítaču prostredníctvom USB rozhrania. Po spustení skriptu sa najprv ozvú dva tóny, ktoré je možné počuť, ak je k systému pripojené audio zariadenie. Ak audio zariadenie nie je pripojené, stlačením prvej klávesy na mikropočítači je možné aktivovať ďalší skript. Tento skript overí funkčnosť bluetooth pripojenia a zároveň spustí proces vyhľadávania viditeľných zariadení. Skript v prvom bode skontroluje, či je už pripojené nejaké zariadenie. Pokiaľ nie je, filtruje viditeľné zariadenia, ktoré nie sú vhodné, a snaží sa nájsť, spárovať a pripojiť k správnu zariadeniu. Ak takéto zariadenie nie je nájdené, predpokladá sa, že zariadenie, ktoré sa malo pripojiť, je už spárované a preto nie je viditeľné. Skript potom identifikuje všetky spárované zariadenia a pokúša sa k nim pripojiť. Celý proces trvá necelú pol minútu. Po jeho skončení sa ozve jeden z dvoch odlišných signálov. Signály značia úspech a neúspech. Líšia sa počtom tónov, ich dĺžkou a najmä výškou. Úspešný signál sa spustí aj v situácii, pokiaľ na začiatku už zariadenie bolo pripojené. Pri zrušení bluetooth spojenia stačí stlačiť rovnaké tlačidlo, ktoré vypne mikropočítaču bluetooth. Pri drôtových zariadeniach slúži otáčacie tlačidlo na zmenu zvuku. Pilot si teda vie upraviť hlasitosť tak, ako mu vyhovuje.

Pri stlačení stredného klávesu sa najprv spustí dlhý tón. Ten má upozorniť pilota, že pri ďalšom stlačení toho istého klávesa sa spustí skript, ktorý bude merať výšku. Výška sa vyhodnocuje každú sekundu, a to zároveň aj s uhlom bočného náklonu lietadla. Skript informuje pilota pomocou tónu, ktorý mení svoju dĺžku v závislosti od nameranej výšky lietadla.

Otočné tlačidlo slúži na zmenu hlasitosti. Okrem toho je možné ho stlačiť. Pri stlačení sa vypne algoritmus na výpočet výšky, celé zariadenie sa zresetuje a je možné ho zapnúť znova. Hlavné využitie tohto tlačidla je práve pre zrušenie monitorovania výšky, keďže pri vysokých výškach nedokáže zariadenie správne merať výšku, nie je potrebné výšku merať. Reštartovaním sa celý program pripraví na opätovné spustenie merania, ktoré vie pilot spustiť pred pristátím a tak opätovne použiť algoritmus na meranie výšky

Posledný kláves má výhradne testovací charakter. Pri jeho stlačení zaznie tón. Pilot si tak vie overiť nielen správnu funkčnosť zariadenia, ale aj pripojenie na slúchadlá.

## 5.3 Použité technológie

V tejto kapitole sú vysvetlené jednotlivé časti riešenia z pohľadu kódu, ale aj princípy fungovania jednotlivých fyzických častí.

Celý program je spúšťaný automaticky pri štarte mikropočítača. Skript je takto nastavený pomocou Cronu. Jedná sa o unixový nástroj, ktorý dokáže plánovať spustenie programov automaticky. Takéto spúšťanie je užitočné, pretože stačí zapojiť mikropočítač



a program sa sám spustí. Na monitorovanie kláves sa využíva knižnica Python-Evdev<sup>1</sup>. Táto knižnica poskytuje rozhranie pre prácu so vstupnými zariadeniami v Linuxe, umožňuje čítať a interpretovať udalosti generované týmito zariadeniami. Python-Evdev je využívaný pre zachytávanie a spracovanie vstupov z klávesnice a iných vstupných zariadení pripojených k mikropočítaču. Po zachytení vstupu a odpovedí na jednotlivé klávesy sa najviac využíva knižnica subprocess. Knižnica má na starosti spúšťať podprocesy, vie zasielať argumenty, čítať vstupy a výstupy. Pôvodne nahrádzala časti iných knižníc. Je súčasťou štandardnej knižnice, a tým pádom nepotrebuje inštaláciu

Pre komunikáciu s radarom sa využíva skript od Ing. Maršíka s firmy CAMEA, spol. s r.o.<sup>2</sup> Skript slúži ako vizualizér pre získane dát. Program vie cez sériový port pripojený na radar poslať konfiguračný súbor a rovnako pomocou dátového seriového portu získavať dáta z radaru, ktoré dokáže spracovať a vytvoriť z dát bodové mračno. Pre výsledné zariadenie je podstatné prijímanie a vysielanie dát zo sériových portov a následné preloženie binarneho kódu do bodového mračna. Taktiež užitočná časť bolo nahrávanie bodových mračiem, podľa ktorých sa neskôr mohol algoritmus, ktorý bodové mračna spracovával, upraviť a testovať.

Na spracovanie bodového mračna z radaru sa využíva metóda vlastných čísel a vlastných vektorov. Tie slúžia na vytvorenie 2D plochy v 3D priestore, z ktorého sa získava vzdialenosť medzi radarom a bodovým mračnom. Pre zabezpečenie hustého mračna sa jednotlivé mračná vzniknuté za dobu jednej sekundy spájajú do jedného mračna, z ktorého sa vypočítava vzdialenosť od povrchu zeme. Pre získanie vzdialenosti sa využíva metóda vlastných čísel a vlastných vektorov. Na vytvorenie týchto špeciálnych vektorov a ich čísel je potrebná kovariančná matica vytvorená z bodového mračna z radaru. Vzniknuté vektory sa zoradia podľa váhy ich vlastných čísel, ktoré určujú mieru variancie jednotlivých vektorov. Dva najväčšie vektory slúžia na vytvorenie roviny. Pomocou vlastných čísel sa kontroluje aj správnosť týchto vektorov, a to podľa čísla s najnižším vlastným číslom. Pokiaľ je jeho hodnota dostatočne veľká, hrozí, že výsledná vytvorená rovina nezahŕňa dostatok bodov z bodového mračna. Najlepšie riešenie tohto problému je nájsť problematické a vzdialené body a odstrániť ich. Tieto body sa hľadajú podľa ich vzdialenosti do vytvorenej plochy. Takýchto bodov nesmie byť veľa, inak hrozí znehodnotenie bodového mračna. Následne sa nevhodné body odstránia a výpočet vlastných vektorov sa zopakuje. Tento proces sa opakuje, kým nie je najmenšie vlastné číslo dostatočne malé, alebo pokiaľ nebudú nájdené nevyhovujúce body. Pokiaľ neboli nájdené žiadne vzdialené body a miera variancie najmenšieho vlastného čísla je príliš veľká, výpočet sa musí zrušiť, pretože body sú príliš vzdialené na určenie správnej vzdialenosti. Do vzniknutej plochy sa následne premietajú body bodového mračna a zisťuje sa vzdialenosť od nich, ktorá je neskôr použitá na informovanie pilota.

Pre pripojenie bluetooth zariadení sa využíva knižnica python-bluezero s dodatočným použitím nástroja bluetoothctl prostredníctvom už spomínanej knižnice subprocess. Python-bluezero je multiplatformová knižnica, ktorá poskytuje rozhranie pre komunikáciu s bluetooth zariadeniami. Problémom je však pripojenie zariadení, ktoré už spárované boli, keďže python-bluezero nepodporuje prácu s párovanými zariadeniami. Na to sa využíva knižnica subprocess, ktorá špúšťa nástroj bluetoothctl. Jedná sa o interaktívny príkazový nástroj, s ktorým sa dá pracovať pri správe bluetooth zariadení. Disponuje funkciami pre skenovanie, párovanie, pripájanie zariadení. Bluetoothctl je natívnou súčasťou oficiálneho Linuxového bluetooth protokolu. Práca s ním prostredníctvom knižnice subprocess je jednoduchá a priamočiara.

---

<sup>1</sup>dokumentácia pre [Python-Evdev](#)

<sup>2</sup>webstránka [www.camea.cz](http://www.camea.cz)

# Kapitola 6

## Testovanie

Táto kapitola popisuje jednotlivé testovacie metódy ako aj reálne vytvorené experimenty, ktoré boli na vytvorenom zariadení otestované a odskúšané.

### 6.1 Testovacie metódy

Táto časť popisuje jednotlivé testovacie metódy, ktoré je možno aplikovať pre testovanie zostaveného výskomeru a taktiež odvodňuje jednotlivé vybrané testovania.

#### Testovanie elektrickej bezpečnosti

Podľa firmy TÜV Süd <sup>1</sup> Je potrebné testovať zariadenie na elektrickú bezpečnosť z dôvodu zistenie problémov a prevencie rizík úrazu elektrickým prúdom pri používaní výstupného zariadenia. Dôvodom testovania elektrickej bezpečnosti je najmä zistenie chýb spojených s elektrickou energiou. Hlavné štyri metódy, ktoré testujú elektrickú bezpečnosť, sú:

- **Skúška vysokého napätia** (skúška dielektrickej odolnosti) – meria schopnosť elektrického výrobku odolať vysokému napätiu medzi elektrickým obvodom výrobku a zemou.
- **Test unikajúceho prúdu**– vyhodnocuje, či prúd tečúci medzi zdrojom striedavého prúdu a zemou, prekračuje stanovený limit.
- **Test izolačného odporu**– kalibruje kvalitu použitej elektrickej izolácie.
- **Test vodivosti uzemnenia** – zabezpečuje, aby bola k dispozícii voľná cesta medzi všetkými exponovanými kovovými povrchmi a uzemnením napájacieho systému.

#### Testy odolnosti

Pri testoch odolnosti sa podľa ASTM<sup>2</sup> testujú jednotlivé komponenty, a to najmä ich dlhotrvajúce fungovanie a taktiež aj schopnosť zvládať rôzne vplyvy. Účelom týchto testov je odhaliť slabé miesta včas a odstrániť ich.

- **Testy voči nárazom a vibráciám** – zisťujú správnosť fungovania zariadenia v simulovaných reálnych podmienkach

---

<sup>1</sup>webstránka: [www.tuvsud.com](http://www.tuvsud.com)

<sup>2</sup>webstránka [www.astm.org](http://www.astm.org)

- **Testy voči korózii** – zisťuje sa stav zariadenia pri vystavení korozívnym materiálom, ako sú soli či chemikálie, ktoré majú za úlohu simulovať dlhodobé vystavenie.
- **Testy voči prachu a vode** – úloha je overiť zabezpečenie prevádzky v náročných prostrediach najmä overením pomocných ochranných obalov a puzdier.

## Testovanie funkčnosti

Pri testovaní funkčnosti zariadenia ako celku, ale aj jeho jednotlivých častí, je potrebné porovnať namerané a očakávané výsledky. Taktiež je potreba zmeny prostredia pre správne overenie fungovania.

Nanešťatie kvôli nedostatku času a prostriedkov nie je možné spraviť rozsiahly počet testov. Niektoré typy testov ako testy odolnosti alebo testy elektrickej bezpečnosti nie sú v tomto prípade možné. Práve preto boli vykonané najmä testy funkčnosti, ktoré boli vykonané a popísané v najsledujúcich sekciách.

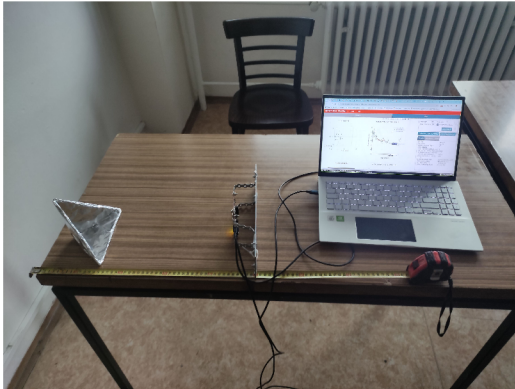
Testovanie výsledného výskomera a jeho častí by sa dalo rozdeliť do dvoch etáp na testovanie jednotlivých častí a testovanie v reálnom prostredí. Táto kapitola taktiež zahŕňa zoznámenie sa s jednotlivými hardwarovými časťami, a to najmä s radarovým modulom. Samotné testy radaru by sa mohli rozdeliť na tri etapy, medzi ktoré patria testovanie v miestnosti, meranie výšky a správanie počas letu. Ostatné testy spočívali najmä v mikropočítači, kde sa testovalo najmä bluetooth pripojenie a taktiež reakcie na klávesy.

## 6.2 Experiment v miestnosti

Pri testovaní v miestnosti išlo najmä o zistenie fungovania, spôsob spojzadenia a najmä o zoznámenie s radarovým modulom. Celé testovanie prebiehalo v uzavretej miestnosti. Meraná bola vzdialenosť niekoľkých objektov od radaru. Najlepším objektom pre statické meranie bola stena. S radarom sa pohybovalo k stene, od steny a na stranu, no radar vždy smeroval ku stene. Merania sa robili vo vzdialenosti od jedného metra až do troch metrov. Na meranie nižších vzdialeností sa využíval dutý ihlan obalený v alobale. Tento objekt dokáže lepšie odrážať rádiové vlny, a tým pádom generovať viac bodov v bodovom mračne. Taktiež bol zisťovaný spôsob zmeny zachytených bodov pri pohybe osôb. Samotné merania neboli dôležité z pohľadu meraných dát, ale z dôvodu získania výsledkov, ktoré pomohli ďalším experimentom.

Testovanie sa začalo najprv spojzadením už existujúcich experimentov od výrobcu radarového modulu Texas Instruments. Jedným z týchto experimentov bol OutOfBox Demo, ktorý slúži na predstavenie modulu, spôsob jeho nastavenia a spôsob použitia. Tento experiment taktiež zahŕňa jednoduchý demo program pre vytvorenie konfiguračných súborov a taktiež ako vizualizér pre bodové mračno.

Pre použitie radarového modulu je potrebné okrem správneho zapojenia a znalosti sériových portov taktiež pre prvým použitím nahráť binárny súbor. Pri každom použití je potrebné nahráť binárny súbor, ktorý slúži k nastaveniu radaru. Pri správnom konfiguračnom súbore je možné pomocou vizualizéra vidieť zachytené objekty v reálnom čase. Pre pochopenie konfiguračného súboru bol súbor často modifikovaný a sledovaný pre jednotlivé zmeny.



Obr. 6.1: Jednotlivé experimenty skúšané v miestnosti

Znalosti získané z experimentu boli užitočné pri následnej implementácii jednotlivých komponentov ak aj algoritmu na výpočet vzdialnosti (výšky). Okrem testovania funkčnosti radaru. Bolo zistených niekoľko zaujímavostí na ktoré bolo treba dať pozor. Najdôležitejšiou časťou radarového modulu je konfiguračný súbor, ktorý je do modulu nahraný. Pomocou konfiguračného súboru sa vie nastaviť viac menej všetko od najvyššej nameranej výšky až po začiatočnú frekvenciu „chirp“ signálu. Každá zmena vyvoláva zmenu vysielania rádiového signálu, čo môže ovplyvniť aj bodové mračno. Nasledujúce dôležité zistenia sa týkali samotného bodového mračna. Jeden z najväčších problémov bolo vytvoriť dostatočne husté bodové mračno. Pri väčšine experimentov s rôznymi konfiguračnými súborami sa objavil problém počtu bodov v jednotlivých meraniach. V jednom meraní sa priemerne nachádzalo 15 bodov v bodovom mračne, čo nie je dostatočné na určenie správnej výšky. Preto bolo rozhodnutie jednotlivé merania spájať s ostatnými meraniami v jednej sekunde. A zväčšil sa počet meraní v jednej sekunde na zväčšenie bodového mračna. Taktiež sa upravili hodnoty v konfiguračnom súbore, ktoré mali na starosti prahu pre detekciu objektov. Týmto spôsobom sa síce zväčšil počet bodov v bodovom mračne, no pri veľkom znížení prahu zachytenia bodov sa na radar dostalo príliš veľké množstvo šumu a merania sa znehodnotili. Posledným problémom bol šum, ktorého sa celkovo veľa nevyskytovalo. No pri meraniach krátkych vzdialeností predstavovali problém. Totižto časť šumu by sa mohla nazvať ako únik z vysielacej antény, pretože body boli zachytené v bezprostrednej blízkosti radaru. Tento problém sa riešil jednoduchým prahom nastaveným na body, ktoré sa vyskytovali do vzdialenosti pol metra.

### 6.3 Testovanie výšky

Pri testovaní výšky sa testovala správnosť algoritmu na výpočet výšky, ako aj na testovanie rôznych konfiguračných súborov. Testovaní prebehlo niekoľko na viacerých miestach s cieľom dosiahnuť čo najpresnejšie merania výšky s vysokou konzistenciou a minimálnym rozptylom výsledných hodnôt. Merania prebiehali staticky a bolo testovaných viacero konfiguračných súborov. Výsledky boli nahrávané a neskôr vyhodnocované. Výsledky boli zaznamenávané a neskôr analyzované, čo umožnilo postupné zdokonaľovanie algoritmu na výpočet výšky a jeho verifikáciu.



Obr. 6.2: Testovanie výšky na 70 metrov vysokej vyhlíadke

Prvotné pokusy končili neúspechom. Z dát jasne vyplývalo, že radarový modul nemal dostatočný dosah. Problém sa skrýval vo vybratých konfiguračných súboroch, ktoré boli na experiment použité. Po zmenení úpravy konfigurácie sa podarilo získavať bodové mračná, ktoré dokázali prezentovať správnu výšku. A tak boli objavené aj chyby v implementácii algoritmu pre výpočet výšky. Nové konfiguračné súbory sa snažili brať ohľad aj na potenciálnu rýchlosť lietadla.

Úspešný experiment sa uskutočnil na internáte Purkyňových kolejí. Metrom bola odmeraná výška všetkých poschodí a neskôr sa z balkóna odmerala výška radarom. Radarové meranie trvalo vždy niekoľko sekúnd. Merania skončili úspechom. Algoritmus dokázal úspešne odmerať najvyššiu výšku 38 metrov s rozptylom ani nie 50 centimetrov.

Úspech experimentu potvrdil vhodnosť použitia radarového modulu pre meranie výšky. Avšak reálne využitie tohto modulu sa uskutoční počas letu, kde sú požiadavky na presnosť a rýchlosť merania omnoho vyššie. Pri letových aplikáciách je nevyhnutné, aby konfiguračný súbor bol nastavený tak, aby radar dokázal efektívne snímať bodové mračná aj pri vysokej rýchlosti letu. Toto zahŕňa optimalizáciu nastavení radaru tak, aby zvládol rýchle zmeny výšky a polohy lietadla, a zároveň zachovával vysokú kvalitu dát. Tieto úpravy sú kľúčové pre uistenie, že radar bude schopný poskytovať presné a spoľahlivé údaje, ktoré sú nevyhnutné pre bezpečnú a efektívnu navigáciu lietadla.

## 6.4 Testovanie na lietadle



Obr. 6.3: Letisko Tri sudy Kotvrdovice

Hlavné testovanie prebiehalo na letisku Tri sudy v Kotvrdoviciach<sup>3</sup>. S leteckým inštruktorom bolo vyhotovených niekoľko letov. Počas letu sa vykonávali jeden až dva experimenty. Správne použitie zhotoveného výškomera sa dalo najlepšie testovať počas pristávania a vzlietavania. Experimenty mali za cieľ otestovať a overiť niekoľko funkčností jednotlivých častí a nakoniec aj celého výškomera ako takého. Najkritickejšie časti, ktoré bolo potrebné testovať, bolo správne pripevnenie radarového modulu na lietadlo, správna funkčnosť tlačidiel, pripojenie bluetooth a generovanie zvuku. Najdôležitejšie bolo testovanie konfiguračných súborov a algoritmu na výpočet vzdialenosti.

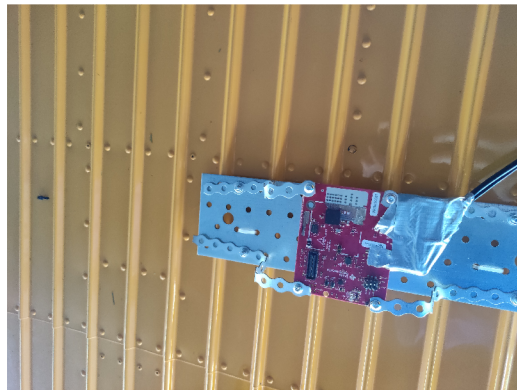
Na letisku Tri Sudy boli experimenty prevádzané počas niekoľkých dní. Prvý deň bolo predstavené testovacie lietadlo Aeroprakt A-22 Foxbat. Po zoznámení bolo potrebné navrhnúť spôsob, akým upevniť radarový modul na lietadlo. Následne bola vytvorená železná konštrukcia, ktorá mala pomôcť prichytiť radarový modul na lietadlo. Ďalším problémom bolo napájanie mikropočítača a radarového modulu. Možnosti na vyriešenie problému boli dve, a to využitie powerbanky na napájanie oboch častí alebo využiť 12V auto zásuvku, ktorá sa vyskytovala na palube lietadla. Pre efektívnejšie testovanie bola vybraná powerbanka. Jej najväčšiu výhodu predstavuje možnosť testovania aj mimo lietadla. Táto metóda bola vhodná pre otestovanie fungovania výškomeru ešte pred namontovaním a zapnutím lietadla.

---

<sup>3</sup>Stránka letiska



Obr. 6.4: Testovacie lietadlo Aeroprakt A-22 Foxbat



Obr. 6.5: Železná konštrukcia radarového modulu pripojená na lietadlo

Prvé testovacie lety odhalili niekoľko problémov implementácie výškomera. Tieto chyby sa týkali fungovania mikropočítača a nie fungovania radaru. Najväčším problémom bolo posielanie signálu na bluetooth audio zariadenie. Implementačný problém sa vyskytol aj pri spustení radarového modulu. Mikropočítač mal problém definovať sériový port určený pre získavanie dát. Nejskoršie testy, kde sa testoval najmä algoritmus na výpočet výšky, dopadli zmiešaným spôsobom. Prvý test bol spustený pri štarte. Od výšky jedného metra dokázal výškomer pomerne jasne namerať stúpanie výšky.

Okrem problémov so samotným zostaveným výškomerom bol taktiež problém pri testoch poveternostných podmienok. Počasie predstavovalo problém a riziko pri letaní. To malo za príčinu limitáciu počtu možných letov, a tým pádom aj počet možných testovaní jednotlivých konfigurácií.



Obr. 6.6: Pristávanie lietadla so zapnutým radarovým výškomerom

Nasledujúce dni sa testovali už iba jednotlivé konfiguračné súbory. Najväčším problémom meraní bola rýchlosť lietadla. Vytvorené konfiguračné súbory očakávali pri pristávaní nižšiu rýchlosť ako bola skutočná. Riešením bolo navrhnuť konfiguračné súbory s dosahom dobrej výšky aj za cenu zníženia maximálnej výšky. Pri jednom lete bolo zariadenie prezentované leteckému inštruktovi. Podľa leteckého inštruktora nie je potrebné dosiahnuť výšku nad 20 metrov. Cieľom je, aby výsledný zvuk zvyšoval svoju intenzitu od výšky pol metra až do piatich metrov. Ideálna výška pre bod dosadnutia je pomerne malý interval, ktorý začína na pol metre a končí pri metri. Pri vyššej výške hrozí poškodenie lietadla, prípadne odskok a havária lietadla. Práve preto je potreba lepšieho zvukového značenia. Taktiež bol vedený rozhovor s pilotom helikoptéry, ktorý taktiež prejavil záujem o výškomerové zariadenie.



# Kapitola 7

## Záver

Cieľom práce bolo vytvoriť radarový výškomer, ktorý by dokázal merať vzdialenosť medzi lietadlom a zemským povrchom a zvukovo informovať pilota. Z nameraných výsledkov vyplýva, že zostrojené zariadenie je možné využiť na meranie výšky, čím je hlavný zámer práce splnený.

Literatúra, ktorá bola preštudovaná, sa zameriavala na radar a konkrétnejšie na milimetrovú technológiu v radare. Taktiež som sa oboznámil s literatúrou týkajúcou sa ultralightových lietadiel ako aj spôsob pristávania. V neposlednom rade som si osvojil problematiku jednotlivých druhov výškomerov. Po naštudovaní literatúry a konzultácii s vedúcim som sa rozhodol na výbere technológii a jednotlivých komponentov pre zostavenie výsledného zariadenia. Hlavné dva komponenty sú radarový modul od firmy Texas Instruments a mikropočítač Raspberry Pi. Na výslednom zariadení som následne implementoval algoritmus na výpočet výšky, taktiež pripojenie bluetooth audio zariadenia a ovládanie zariadenia pomocou programovateľnej klávesnice. Po implementácii som zariadenie testoval na ultralightom lietadle. Po konzultácii s pilotom vrtuľníka a leteckým inštruktorom je jasné, že o zariadenie záujem je a dokázalo by pomáhať začínajúcim letcom pri pristávaní.

Výsledné zariadenie cenovo neprekročilo 400 €, čo je považované za úspech, keďže väčšina leteckého vybavenia je pomerne drahá. Najväčšia nameraná výška bola 40 metrov. Taktiež prebehlo 10 experimentov, kde najvyššia výška bola 20 metrov. Čo je ale dostatočné, pretože kľúčová výška pre pristátie sa pohybuje od piatich metrov do pol metra. Aj keď zhotovené zariadenie splňa požiadavky práce, tak zariadenie má ešte potenciál pre vylepšenie a pokračovanie vo vývoji. Okrem pochopenia fungovania radarov a lietadiel mi práca dala skúsenosti s vytvorením zariadenia, ktoré funguje s niekoľkými fyzickými komponentami. Taktiež mi priniesla skúsenosti týkajúce sa mikropočítačov. Jeden z možných zameraní do budúcnosti je zlepšenie nameranej výšky pre lietadlo, ako aj zefektívnenie nameraného bodového mračna. Taktiež by v práci niekto mohol pokračovať tak, aby k meraniu nebol potrebný mikropočítač a všetky výpočty by vytváral radarový modul.

# Literatúra

- [1] *Vyhláška Ministerstva dopravy a spojů*. Máj 1997. Zákon č. 49/1997 Sb., o civilním letectví a o změně a doplnění zákona č. 455/1991 Sb.
- [2] ADMINISTRATION, F. A. Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge FAA-H-8083-25C. In: U.S. Department of Transportation, 2023, kap. 8, s. 28. ISBN 1998109526.
- [3] EREN, H. Altimeters. In: *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley Sons, Inc., Február 2005. DOI: 10.1002/0471654507.eme005. ISBN 978-0471270539.
- [4] GUZZI, R. *Radiative Transfer, Solution Techniques*. Január 2014. ISBN 978-0-387-36698-2.
- [5] KELLER, I. L. *Učebnice Pilota 2016*. 35002 Cheb - Podhrad, Chebská 146, ČeskárRepublika: Svět křídel, 2016. ISBN 978-80-87567-89-0.
- [6] LNĚNIČKA, J. Ultralehká letadla. *AeroWeb* [online]. Marec 2006, [cit. 2024-03-5]. Dostupné z: <https://www.aeroweb.cz/clanky/129-ultralehka-letadla>.
- [7] MARKOWSKI, M. Ultralight Airplanes. *Scientific American*. New York, NY 10004-1562: Scientific American, a division of Nature America, Inc. Júl 1982, zv. 247, č. 1, s. 62–69, [cit. 2024-03-5]. Dostupné z: <https://www.jstor.org/stable/24966636>.
- [8] SANDEEP RAO, C. I. a. *The fundamentals of millimeter wave radar sensors* [online]. 12500 TI Blvd., Dallas, Texas 75243 USA, júl 2020 [cit. 2024-02-28]. Dostupné z: <https://www.ti.com.cn/cn/lit/wp/spyy005a/spyy005a.pdf?ts=1711991828531>.
- [9] SANDEEP RAO, T. I. *Introduction to mmwave Sensing: FMCW Radars* [online]. 12500 TI Blvd., Dallas, Texas 75243 USA [cit. 2024-02-28]. Dostupné z: [https://www.ti.com/content/dam/videos/external-videos/2/3816841626001/5415528961001.mp4/subassets/mmwaveSensing-FMCW-offlineviewing\\_0.pdf](https://www.ti.com/content/dam/videos/external-videos/2/3816841626001/5415528961001.mp4/subassets/mmwaveSensing-FMCW-offlineviewing_0.pdf).
- [10] SHAUN QUEGAN, S. K. a. *Understanding Radar Systems*. 2. vyd. 89, Dean Road, Mendham, NJ 07945, USA: SciTech Publishing, Inc., 1999. ISBN 1-891121-05-7.
- [11] SKOLNIK, M. Radar. *Encyclopedia Britannica* [online]. 325 N. LaSalle Street, Suite 200 Chicago, IL 60654-2682, USA: [b.n.]. Júl 1999, Revidované 16.3.2007, [cit. 2024-01-10]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/radar>.
- [12] TURGEON, A. Altimeter. [online]. 1145 17th Street NW Washington, DC 20036: National Geographic Society. Október 2023, [cit. 2024-03-08]. Dostupné z: <https://education.nationalgeographic.org/resource/altimeter/>.

- [13] WOLFF, C. *Classification of Radar Systems* [online]. Josefine-Clouth-Straße 14, 50733 Kolín, Německo: [b.n.], 1998 [cit. 2024-01-20]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/02.basics/Classification%20of%20Radar%20systems%20%281%29.en.html>.
- [14] YANOVSKY, F. a NEBYLOV, A. Radar Altimeters. In.: Január 2013, s. 55–88. ISBN 978-1-60550-059-0 (paperback); 978-1-60550-061-3 (e-book).

## Príloha A

# Obsah priloženého pamäťového média

Na pamäťovom médiu sa nachádzajú nižšie uvedené priečinky a súbory.

- Doc/pdfSrc - Zdrojové súbory textu práce
- Doc/xhubaq00.pdf - Bakalárska práca v pdf
- Src - Zdrojové súbory
- Src/README.md - Návod na použitie a správne spustenie

Detailnejšia štruktúra rozdelenia zdrojových súborov je popísana v README.md