



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 VÝŠKOMER PRE ULTRAĽHKÉ LIETADLÁ

RADAR ALTIMETER FOR ULTRAMICRO AIRPLANES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MAREK IMRICH

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. PAVEL ZEMČÍK,

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce



Student: **Imrich Marek**
Program: Informační technologie
Název: **Radarový výškoměr pro ultralehká letadla**
Radar Altimeter for Ultramicro Airplanes
Kategorie: Uživatelská rozhraní

Zadání:

1. Prostudujte literaturu na téma pilotáž ultralehkých letounů, dále prostudujte možnosti využití milimetrového radaru pro měření výšky letadla nad terénem.
2. Navrhněte po konzultaci s vedoucím vhodný způsob aplikace radaru pro letadla se zaměřením na snadnou instalaci a nízké pořizovací náklady na techniku v letadle.
3. Diskutujte možnosti využití a dosažitelné vlastnosti navrhovaného řešení a instalace do letadla.
4. Implementujte systém a demonstруйте jeho funkčnost na vhodném příkladu použití.
5. Diskutujte dosažené výsledky a možnosti pokračování práce.

Literatura:

- Dle pokynů vedoucího

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

Vedoucí práce: **Zemčík Pavel, prof. Dr. Ing.**

Vedoucí ústavu: Černocký Jan, doc. Dr. Ing.

Datum zadání: 1. listopadu 2020

Datum odevzdání: 30. července 2021

Datum schválení: 30. října 2020

Abstrakt

Radarové zariadenia patria medzi neodlučiteľnú súčasť leteckej sféry. K navádzaniu ultralight lietadiel pri pristávaní je veľmi dôležité využívať vhodný modul. Bakalárska práca je zameraná na využívanie výškového radaru založeného na mikrovlnnom senzore IWR6843ISK vyrábaného spoločnosťou TEXAS Instruments a jeho aplikovanie v praxi pre ultralight lietadlá. Jeho schopnosťou v spojení s počítačom je výškové navádzanie ultralight lietadla na pristávaciu plochu dráhy pomocou generovania zvukových tónov, ktoré majú pilotovi indikovať vzdialenosť nad terénom. Hlavným cieľom práce je navrhnúť model použitia mikrovlnného modulu v spojení s počítačom a jeho následné otestovanie vhodnosti použitia pri vykonávaní pristávacieho manévru. Cieľom práce je navrhnutie systému, ktorý pracuje s milimetrovým radarom a jeho zhodnotenie použiteľnosti v praxi. Navrhovaný modul generuje bodové mračná, ktoré sú následne syntakticky analyzované, následne sú výstupné dáta vhodne korelované, ďalej transformované na exaktnú výšku polohy lietadla nad terénom s následnou zvukovou interpretáciou pilotovi.

Abstract

Radar equipment is an integral part of the aviation sector. It is very important to use a suitable module to guide ultralight aircraft during landing. The bachelor thesis is focused on the use of altitude radar based on the microwave sensor IWR6843ISK manufactured by TEXAS Instruments and its application in practice for ultralight aircraft. Its ability in conjunction with a computer is the altitude guidance of an ultralight aircraft to the runway by generating sound tones to indicate to the pilot the distance above the terrain. The main goal of this work is to design a model for the use of a microwave module in conjunction with a computer and its subsequent testing of the suitability for use in performing a landing maneuver. The aim of this work is to design a system that works with millimeter radar and its evaluation of usability in practice. The proposed module generates point clouds, which are then parsed, then the output data are suitably correlated, further transformed to the exact height of the aircraft above the terrain with subsequent sound interpretation to the pilot.

Kľúčové slová

Radar, výškomer, ultralight lietadlo, mikrovlna, priblíženie, pristávacia dráha, signalizácia, palubný systém, avionika, zvuk, radarové spracovanie, vstavaný systém.

Keywords

Radar, altimeter, ultramicro airplane, microwave, approach, runway, signalisation, on-board system, avionics, sound, radar processing, embedded system.

Citácia

IMRICH, Marek. *Radarový výškomer pre ultralight lietadlá*. Brno, 2021. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce prof. Dr. Ing. Pavel Zemčík,

Radarový výskomer pre ultraláhké lietadlá

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením pána prof. Dr. Ing. Pavla Zemčíka. Uviedol som všetky literárne zdroje, publikácie a ďalšie zdroje, z ktorých som čerpal.

.....
Marek Imrich
29. júla 2021

Podakovanie

Týmto by som sa chcel srdečne poďakovať všetkým ľuďom, ktorí mi boli oporou počas tvorby tejto bakalárskej práce. Menovite dakujem môjmu vedúcemu bakalárskej práce prof. Dr. Ing. Pavlovi Zemčíkovi za umožnenie výberu tejto témy a za vedenie pri písaní tejto práce a odborné rady. Ďalej by som sa chcel poďakovať celej mojej rodine, ktorá má počas celého môjho štúdia podporovala a usmerňovala.

Obsah

1	Úvod	3
2	Ultraľahké lietadlo, výškomery a aplikácia výpočtovej techniky	5
2.1	Ultraľahké lietadlo	5
2.2	Mechanický výškomer	6
2.3	Digitálne meranie nadmorskej výšky	7
2.4	Rádiovýškomer	8
2.5	Aktuálne využívané výškomery	8
2.6	Manéver priblíženia a pristátia	10
3	Radarové technológie a spracovanie signálov	13
3.1	Charakteristika radaru	13
3.2	Princíp fungovania radaru	14
3.3	Druhy radarov	16
3.4	Využitie radarov	18
3.5	Radary typu milimetrových vĺn	19
3.6	Generovanie bodových mračien	24
3.7	mmWave SDK a modul IWR6843ISK	25
4	Analýza súčasného stavu	29
4.1	Prehľad vlastností aktuálnych výškomerov	29
4.2	Ciele práce	30
4.3	Požiadavky na radarový približovací výškomer	30
5	Implementácia riešenia	33
5.1	Hlavné komponenty a ich schéma	33
5.2	Generovanie zvukového signálu	35
5.3	Počiatočná kalibrácia	36
5.4	Paralelné spracovanie dát	38
5.5	Konfiguráciou modulu	39
5.6	Použité nástroje a technológie	40
5.7	Overenie funkčnosti a dosiahnuté výsledky	40
5.8	Navrhované úpravy a vylepšenia	43
6	Záver	44
	Literatúra	45
A	Obsah priloženého pamäťového média	48

B Experimentálne nastavovania radarového modulu	49
C Použitie programu a jeho závislosti	53

Kapitola 1

Úvod

Cieľom bakalárskej práce je zjednodušiť pristávací manéver pre pilotov ultralahkých lietadiel, nakoľko pri tomto manévri majú zväčša dosť obmedzený výhľad dopredu pred lietadlo a pohľadom z uhla je dosť náročné určiť v danej rýchlosti dostatočne presnú výšku nad terénom. Realizačným cieľom práce je vytvoriť počítačové zariadenie nápomocné k uľahčeniu zvládnutia tohoto manévra najmä pre žiakov - pilotov vo výcviku, kedy ešte nedisponujú potrebnou odhadovou zručnosťou.

Bakalárska práca sa zaoberá problematikou výškového navádzania ultralahkých lietadiel na pristávaciu dráhu a experimentovaním s inteligentným modulom milimetrových vln IWR6843ISK, overením jeho použiteľnosti ako zariadenia, ktoré má umožniť pilotovi lepšie vykonať manéver záverečného priblíženia a pristátia. Na riešenie tohoto problému by sa hodilo zariadenie na báze radaru umiestnené na lietadle a systém s počítačom, ktorý by dané informácie z radaru spracovával a následne danú informáciu o výške poskytol pilotovi.

V dnešnej dobe sa vývojom avioniky zaoberá viacero firiem, ktoré neustále vyvíjajú nové hardvérové a softvérové riešenia. Na trhu po celom svete je ich niekoľko desiatok. S ich pomocou si môžu aj laici - majitelia ultralahkých lietadiel, vytvoriť zostavu prístrojov, ktorá môže byť funkcionálne ekvivalentná modernej avionike, ktorá je dnes používaná v dopravnom letectve. V dnešnej dobe vieme využívať rôzne prístroje pozostávajúce z komplexných displejov, pomocou ktorých vieme zobrazovať GPS polohu, informácie o stave, náklone, rýchlosti a všeobecnej polohe lietadla v priestore ale i mnoho ďalších. Je taktiež možné vytvárať systémy určené k navádzaniu lietadla na pristávaciu dráhu indikujúce výškovú polohu lietadla v priestore nad prekážkou, ktorú v danom prípade predstavuje terén, respektíve pristávacia dráha.

Táto téma mi je blízka ako z pohľadu informatika, ktorý rád vyvíja nové užitočné systémy, ktoré dokážu uľahčiť život v rôznych oblastiach života a voľného času, tak aj z pohľadu súkromného a športového pilota. Viem, že lietanie pre radosť je nádherný pocit, avšak na jeho začiatkoch sa niektoré postupy a manévry môžu javiť až príliš náročné. Hlavným cieľom je teda vytvorenie akéhosi pomocníka pozostávajúceho z počítača a radaru, ktorý jednoduchým spôsobom signalizuje výšku lietadla nad zemou aj bez potreby prílišne nákladných systémov.

Nasledujúca kapitola 2 pojednáva o tom, čo také ultralahké lietadlo vôbec predstavuje a ako sa od ostatných líši. Hovorí aj o základnej problematike výškomerov. Približuje problematiku fungovania radaru rôznych typov, ich vlastností, ale aj s tým spojené nedostatky. Následne sú v nej vysvetlené princípy pristátia malého lietadla z pohľadu postupov a ovládania lietadla. Za ňou nasleduje kapitola 3, ktorá vysvetľuje základné pojmy radarov, čo sú to za zariadenia, princípy ich fungovania a ich špecifiká. Ďalej presnejšie špecifikuje radary

založené na princípe milimetrových vln aj ich všeobecné a podrobné fungovania. Zároveň aj ich prácu s výstupnými dátami v podobe generovania bodových mračien. Taktiež táto kapitola obsahuje popis inteligentného milimetrového radarového modulu *IWR6843ISK* vyrábaného spoločnosťou Texas Instruments a k nemu dodávaných vývojových nástrojov, ktoré patria do voľnej distribúcie danej spoločnosti. Ďalšia kapitola 4 analyzuje súčasný stav a požiadavky na výsledný systém, ktorý ma pozostávať z milimetrového modulu a počítača, jeho požadované vlastnosti a schopnosti, charakterizuje náplň práce potrebnú k tomu, aby mohol byť radar aplikovateľný pre jeho účel ale taktiež pojednáva o spôsobe overovania. V predposlednej, a teda kapitole 5 sú uvedené náležitosti tvorby celého systému. Pozostáva zo sekcií, v ktorých je popísaný a znázornený výsledný systém. Je v nej obsiahnutý postup, ktorým bol zostavený vhodný výber a konfigurovanie vstupných parametrov. Ďalej popisuje prácu s dátami, ktoré milimetrový radarový modul zasiela po univerzálnej sériovej zbernici do počítača. Následne popisuje spracovanie dát na výšku nad terénom, ktorá podlieha počiatočnej kalibrácii a jej prevod na zvukový signál. Taktiež popisuje vhodnosť zvolenej metodiky pre paralelné spracovanie dát. Následne sú v nej zhodnotené aj dosiahnuté výsledky, ktoré sú porovnané voči vykonanému overeniu funkčnosti nasledované popisom nedostatkov navrhnutého systému a ďalších možných úprav a vylepšení. Poslednú kapitolu 6 tvorí záver dotvárajúci celkovú predstavu o stanovených cieľoch a ich naplnení, ktoré sa prácou podarilo dosiahnuť.

Kapitola 2

Ultraľahké lietadlo, výškomery a aplikácia výpočtovej techniky

Táto kapitola popisuje základné ustanovenia týkajúce sa konkrétnej kategórie lietadiel, ktorými sú ultraľahké lietadlá s vlastnými špecifikáciami, ďalej popisuje základné typy výškomerov, ktoré sú u tých typov bežne využívané. V ďalších častiach je popis fázy pristávania ako súhrn postupov a predpisov, aké musí lietadlo danej kategórie pri pristátí dodržať a to k tomu, aby boli exaktne špecifikované potrebné vlastnosti navrhovaného systému. Cieľom tejto kapitoly nie je vytvoriť encyklopedický prehľad všetkých konkrétnych postupov a vlastností lietadiel a ich výškomerov ale zoznámiť čitateľa s fázou pristátia a použitím výškomerov tak, aby bolo čo najexaktnejšie možné vytvoriť si predstavu o možnostiach pri aplikácii výpočtovej techniky pre túto fázu letu.

2.1 Ultraľahké lietadlo

Ultraľahké lietadlá môžeme zaradiť medzi pomerne mladú kategóriu lietadiel, ktorej počiatky spadajú do 70. rokov 20. storočia [24]. V ich počiatkoch sa vyvinuli z bezmotorových lietadiel - vetroňov s prídavným motorom. V súčasnosti sú prevádzkované v jednotlivých štátoch Európskej Únie v rámci širokej škály certifikačných a prevádzkových postupov, ktoré podliehajú vnútroštátnej legislatíve toho daného štátu, v ktorom sú prevádzkované.

Aktuálne medzi lietadlá tejto kategórie zaraďujeme tie, ktoré dosahujú vzletovú hmotnosť menšiu ako 450kg v Európe a 600kg v Spojených štátoch amerických [25]. Ultraľahké lietadlá nespádajú pod regulácie právnych predpisov v rámci Európskej Únie, a teda podliehajú jednotlivým vnútroštátnym predpisom a ich právnych úpravám.

S postupným vývojom nových technológií, motorov a celkovým dizajnom tieto lietadlá nabrali na komplexnosti, no zároveň dokázali zostať v medziach daných hmotnostných obmedzení[24].

Tieto lietadlá sú špecifické práve tým, že na ich palube nemusia byť len systémy schválené typovým certifikátom, a teda aj na ich prístrojové vybavenie nie sú kladené príliš vysoké nároky. Zväčša pozostávajú z jednoduchých celkov, ktoré nie sú cenovo náročné.

Na obrázku číslo 2.1 je vyobrazené ultraľahké lietadlo Viper SD-4 vyrábané spoločnosťou Tomark Aero so sídlom v Prešove, ktorá sa vývojom tohoto lietadla zaoberá vyše desať rokov.



Obr. 2.1: Viper SD-4 spoločnosti Tomark Aero¹

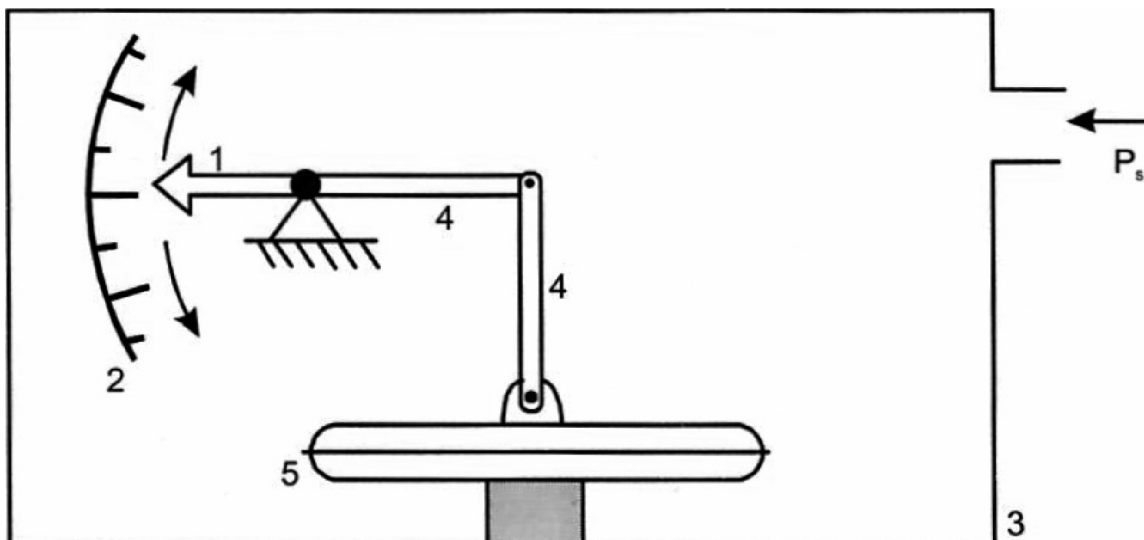
2.2 Mechanický výškomer

Letecké aerometrické výškomery sú konštruované ako absolútne tlakomery, ktorých základným konštrukčným prvkom je uzatvorená tlakomerná krabica [15]. Meranie je vykonávané na základe kalibračného vzťahu medzi nadmorskou výškou a prúdom statického tlaku. Jednou z hlavných častí mechanizmu výškomera je mechanizmus, ktorým sa vykonáva základné nastavenie tlaku. Ten predstavuje referenčnú tlakovú hladinu, od ktorej následne meriame aktuálnu tlakovú výšku. Tlak býva zvyčajne nastavovaný v základných tlakových jednotkách, ktorými sú milibary, hektopaskaly, prípadne palce ortuťového stĺpca. Výšková indikácia u leteckých výškomerov využíva metrický alebo imperiálny systém. Hodnoty sú teda zobrazované v metroch, respektíve kilometroch alebo v stopách. Ak je potreba vykonať teplotnú korekciu, to znamená eliminovať odchýlku aktuálneho teplotného zvrstvenia od štandardných podmienok atmosféry, túto opravu vykonáme manuálne s využitím korekčných tabuliek.

Na obrázku číslo 2.2 je vyobrazená základná schéma výškomera, ktorého vstupom P_s je statický tlak, ktorý tvorí jedinou vstupnú informáciu potrebnú k indikácii nadmorskej výšky a konštrukcia pozostávajúca z nasledujúcich častí:

1. ukazateľ,
2. stupnica,
3. teleso prístroja,
4. prevodový mechanizmus,
5. barokrabica.

¹Obrázok je prevzatý z <https://www.tomarkaero.com/wp-content/themes/yootheme/cache/ecom4-b97f9803.jpeg>



Obr. 2.2: Schéma aerometrického výškomera [15]

2.3 Digitálne meranie nadmorskej výšky

Informácie ohľadne nadmorskej výšky sú vypočítavané v počítači spracúvajúcom letové dáta s pomenovaním *Air Data Computer (ADC)* respektíve počítač letových dát [17]. Toto zariadenie funguje na podobnom princípe ako mechanický výškomer, keďže je priamo pripojený k pitot-statickému systému, pričom výsledná výška sa prenáša po dátovej zbernici. Každý takýto počítač letových dát má tiež vstup zo sondy celkovej teploty vzduchu. Táto sonda slúži ako doplňujúci údaj ku korekcii teplotnej tlakovej zmeny pri stanovení hustoty vzduchu. Vďaka nej je vypočítaná hodnota tlaku s nulovou odchýlkou. Taktiež je výsledná informácia doplnená aj o údaje z GPS.

Na lietadlách sa výstup typicky prenáša do kabíny na digitálny ukazovateľ výšky alebo multifunkčný displej po dátovej zbernici pomocou štandardných transferov typu *ARINC 429*, ďalej *Gillham* alebo aj *IEEE1394*.

Tieto zariadenia pracujú zväčša autonómne a nevyžadujú žiaden zásah pilota [2]. Niektoré zariadenia, ako napríklad *Enhanced Software Configurable Air Data Unit (ESCADU)*, vid. obrázok číslo 2.3, sú softvérovo nakonfigurovatelné tak, aby vyhovovali mnohým rôznym leteckým aplikáciám.



Obr. 2.3: Počítač letových dát typu ESCADU²

2.4 Rádiovýškomer

Rádiovýškomery využívané v komerčných a vojenských lietadlách fungujú ako prídavný výškomer, ku klasickým aerometrickým výškomerom. Napomáhajú pri vykonaní priblíženia a pristátia na dráhu tak, že sa s nimi meria reálna výška na rádiovom princípe pričom ich zamieriavaný cieľ predstavuje zemský povrch [12]. Fungujú na inom princípe ako bežné pulzné radary, ktoré len merajú reálny čas prenosu a na tomto podklade je vypočítaná vzdialenosť. Tieto rádiovýškomery sú navrhované ako nízkoenergetické radary so spojitou frekvenčne modulovanou vlnou s nízkym dosahom, ktoré pracujú vo frekvenčnom pásme 4,3 GHz. Podstatnou je aj šírka pásma, ktorá určuje presnosť takéhoto výškomera. Napríklad ak sa jedná o výškomer s frekvenciou ± 100 Hz jeho odchýlka dosahuje len zhruba 0,75 metra. Takéto zariadenia sú však finančne nákladné.

2.5 Aktuálne využívané výškomery

V segmente ultralightových lietadiel sa bežne využívajú zväčša analógové mechanické prístroje, ktoré sú schopné určiť výšku lietadla v priestore za pomoci merania atmosferického tlaku.

²Obrázok je prevzatý z <https://www.leane.it/en/escadu>

Toto meranie má hlavnú nepopierateľnú vlastnosť, ktorou je práve nezávislosť na akomkoľvek inom systéme. Nepotrebuje napájanie z elektrickej siete, fungujú nepretržite, nie je ich možné rušiť ani zahliť. Avšak, majú aj radu nevýhod. Hlavnou z nich je práve to, že pracujú na systéme merania atmosferického tlaku, ktorý sa neustále mierne mení s narastajúcou zmenou výšky, teploty, času ale aj zmenou geografickej oblasti a poveternostných podmienok a zároveň za dosť veľkej odozvy na tlakovú zmenu. Lokálny barometrický tlak, je zvyčajne poskytovaný pilotovi strediskom riadenia letovej prevádzky [23]. Taktiež, ak sa jedná o presnosť, s ktorou vedia výškový údaj zobrazovať, hovoríme o rade desiatok metrov až kilometrov, čo je pre meranie výšky pri pristátí nedostatočné. Taktiež mechanické ústrojenstvo dokáže časom strácať svoje vlastnosti, a teda je potrebné vykonávať jeho kontrolu a kalibráciu. Na obrázku číslo 2.4 je vyobrazený jednoduchý aeromechanický výškomer používaný v prevažnej väčšine ultralight lietadiel.



Obr. 2.4: Analógový mechanický výškomer³.

V súčasnej dobe digitalizácie údajov, je taktiež možné využívať prístroje typu "glass cockpit" [16]. Ide o takýto prístroj, aký je znázornený na obrázku číslo 2.5, kedy klasické mechanické analógové prístroje sú nahrádzané multifunkčným digitálnym displejom, na ktorom je možné zobrazovať údaje s oveľa väčšou presnosťou a minimálnou odozvou. V pravej časti displeja je možné vidieť údaje o nadmorskej výške. Za hlavné nevýhody sú však považované extrémne vysoké obstarávacie náklady, ktoré bežne dosahujú tisícky eur. Taktiež ich vstupným údajom je meraná hodnota atmosferického tlaku, ktorá môže byť v najvyšších verziách doplnená aj o údaje z GPS, avšak zobrazované výškové hodnoty predstavujú aj napriek tomu len jednotky metrov. Taktiež za podstatnú nevýhodu môžeme považovať aj potrebný príkon, ktorý dosahuje niekedy až desiatky ampérov.

³Obrázok je prevzatý z <https://www.airteam.eu/cz/p/winter-instruments-4-fgh-10#>



Obr. 2.5: Digitálny ukazateľ typu glass cockpit⁴

2.6 Manéver priblíženia a pristátia

Štandardné priblíženie a pristátie zahŕňa postupy, kedy sa lietadlo postupne plynulo približuje k zemi až po dosadnutie a úplné zastavenie [28]. Normálnymi štandardnými postupmi rozumieme situáciu, kedy sú všetky faktory ovplyvňujúce pristátie v norme, ako napríklad: slabý bočný vietor, prípadne pristávanie priamo proti nemu a taktiež aj to, že je k dispozícii výkon motora, ďalej to, že v dráhe konečného priblíženia nie sú žiadne prekážky a pristávacia plocha je pevná a dostatočne dlhá, umožňujúca postupné bezpečné zastavenie. Vybraný bod dosadnutia pri pristávanom manévri je zvyčajne za prahom priblíženia zväčša vo vzdialenosti odpovedajúcej prvej tretine pristávacej dráhy.

Manéver priblíženia a pristátia pozostáva zo štyroch základných fáz, ktorými sú:

1. poloha base leg,
2. finálne priblíženie,
3. prechodový oblúk.
4. dosadnutie.

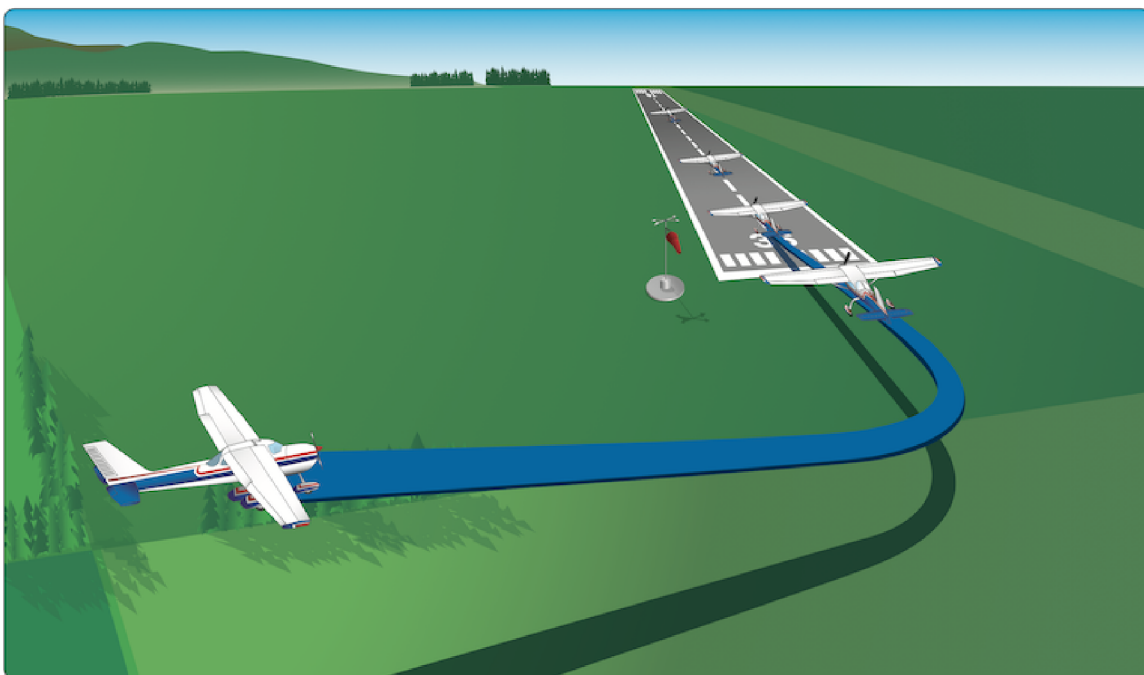
Vždy je potrebné vykonávať tieto postupy vrátane konfigurácie lietadla, rýchlosti letu a iných premenných na základe konkrétnych postupov stanovených výrobcom, ktoré sú uvedené v letovej príručke lietadla schválené leteckým úradom daných pre konkrétny typ lietadla [28].

⁴Obrázok je prevzatý z <https://www.airteam.eu/cz/p/dynon-efis-d10a#>

Poloha base leg

Umiestnenie do základnej polohy "base leg", ktorá je počiatočnou fázou pristávania zachytená na obrázku číslo 2.6, je jedným z najdôležitejších rozhodnutí pilota pre vykonanie akéhokoľvek priblíženia na pristátie [28]. Pilot musí presne posúdiť nadmorskú výšku a vzdialenosť, z ktorej vykoná postupný stabilizovaný zostup a dovedie lietadlo k pristátiu na požadovanom mieste. Táto vertikálna aj horizontálna vzdialenosť závisí od viacerých faktorov, ako napríklad sily vetra, použitých klapiek a iných.

V tejto polohe lietadlo začne sklesávať so zníženým výkonom motora danou vzdušnou rýchlosťou pri vysunutom podvozku a použití klapiek, ak sú potrebné [28]. V tejto konfigurácii lietadlo pokračuje až do bodu, kedy sa plytkou zákrutou dráha letu priamo vyrovná so stredovou osou pristávacej dráhy.



Obr. 2.6: Poloha base leg a finálne priblíženie [28]

Finálne priblíženie

Po dokončení poslednej okruhovej zákruty sa lietadlo dostáva do fázy finálneho priblíženia na pristávaciu dráhu [28]. Po zrovnaní lietadla do osi dráhy, nastavení klapiek a potrebnej príпустe motora, vyvážení a stabilizácii pozdĺžneho a priečného sklonu lietadlo vyklesáva výšku pod stabilizovaným zostupovým uhlom, tak aby lietadlo dosadlo v prvej tretine pristávacej dráhy. Uhol zostupu je podmienený aerodynamickým zdvihom, kĺzavosťou, silou ťahu motora a hmotnosťou lietadla. Ak sú všetky tieto sily konštantné, tak je aj zostupový uhol konštantný. Cieľom dobrého, stabilizovaného konečného priblíženia je klesnúť pod uhlom a rýchlosťou, ktorá umožňuje letúnu dosiahnuť požadovaný bod dotyku pri rýchlosti, ktorá sa blíži k pádovej rýchlosti tesne pred dotykom.

Vykonávacie nariadenie komisie Európskej únie č. 923/2012 oddielu SERA.5005 bod f) určuje minimálnu výšku lietadla nad terénom následovne:

"Okrem toho, ak je to potrebné na vzlet a pristátie, alebo okrem prípadu, keď príslušný orgán vydal povolenie, sa let VFR nesmie vykonávať [1]:

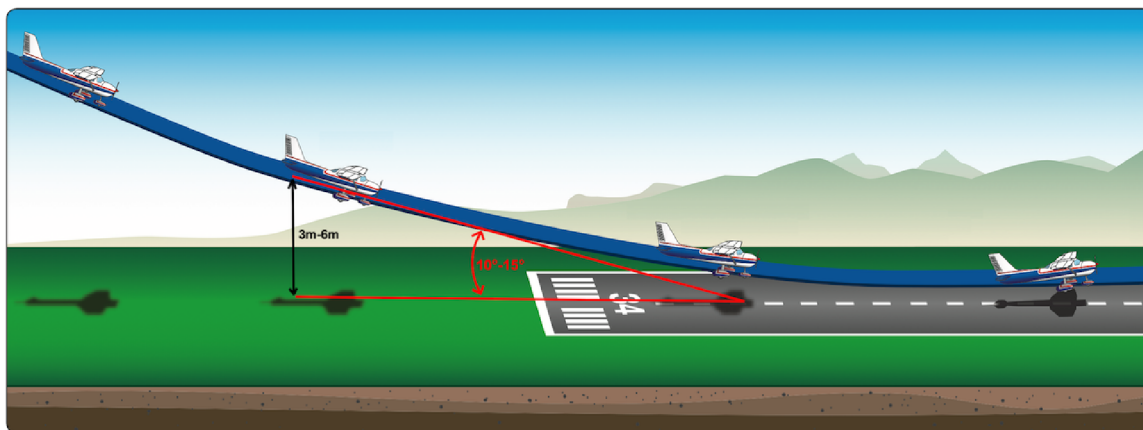
1. nad husto osídlenými oblasťami veľkomiest, miest a osád alebo nad zhromaždiskom ľudí na voľnom priestranstve vo výške, ktorá je menšia ako 300 m (1 000 ft) nad najvyššou prekážkou v okruhu 600 m od lietadla;
2. všade inde, než je uvedené v bode 1, vo výške nižšej ako 150 m (500 ft) nad zemou alebo nad vodou, alebo 150 m (500 ft) nad najvyššou prekážkou v okruhu 150 m (500 ft) od lietadla".

Z vyššie uvedeného ustanovenia vyplýva, že sa lietadlo pred finálnym priblížením musí nachádzať najmenej 150 metrov nad terénom, teda aj 150 metrov nad pristávacou dráhou v ideálnom prípade, kedy sa v zostupovej osi nenachádzajú žiadne iné vertikálne prekážky.

Prechodový oblúk a dosadnutie

Fáza prechodového oblúku predstavuje pomalý a plynulý prechod zo zostupového uhla na pristávací. Postupne sa veľkosť zostupového uhla voči zemi znižuje, až je dráha letu s povrchom takmer rovnobežná. Táto fáza začína približne vo výške medzi tri až šesť metrov, kedy sa začne trajektória zaoblovať a končí sa vo výške niekoľko desiatok až jednotiek centimetrov nad pristávacou dráhou. Tento proces prebieha nepretržite až po fázu výdrže, kedy sa postupne začne aplikovať spätný tlak na výškové kormidlo, čím sa zvýši sklon a uhol nábehu. To napomáha lietadlu pri plynulom dosadnutí za súčasného znižovania doprednej rýchlosti.

Počas zahájenia prechodového oblúka pozdĺžna os lietadla smeruje k zemi pod uhlom približne 10° až 15° . Obrázok číslo 2.7 znázorňuje popisovanú fázu priblíženia, prechodového oblúka a následného dosadnutia na pristávaciu dráhu.



Obr. 2.7: Priblíženie, prechodový oblúk a dosadnutie⁵

Pri vykonávaní tohoto manévra býva rozhľad zväčša nedostatočný, kvôli faktu, že je lietadlo pri finálnej fáze uvedené do mierného stúpacého uhla a výhľad vpred pokrýva nos lietadla.

⁵Obrázok je prevzatý z https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/airplane_handbook/media/10_afh_ch8.pdf, s následným doplnením

Kapitola 3

Radarové technológie a spracovanie signálov

V tejto kapitole sú popísané vlastnosti a schopnosti radarov, ktorých obsahom je opísať, čo to radar vôbec je, na akých princípoch funguje, aké jednotlivé druhy radarov existujú a v akých všetkých možných aplikáciách sa v súčasnej dobe používajú. Ďalej sú v tejto kapitole popísané radary typu milimetrových vln, ich funkcia a základné matematické princípy ich činnosti. Za touto charakteristikou nasleduje popis toho, ako tieto moderné moduly pracujúce na milimetrovej technológii vytvárajú zhľuky dát. Táto kapitola nemá za cieľ tvoriť podrobnú charakteristiku všetkých vlastností ale prehľad hlavných preberaných znalostí potrebných k tomu, aby vysvetlila žiadúcu problematiku v danej oblasti tak, aby mnou navrhnutý systém skladajúci sa z radaru a vstavaného systému bol pre dané použitie vyhovujúci a aby výsledné zariadenie založené na module milimetrového radaru vo fáze pristávania bolo nápomocné.

3.1 Charakteristika radaru

Radar predstavuje zariadenie, ktoré využívame každý jeden deň, či už si to uvedomujeme alebo nie [4]. Ide o zariadenie, ktoré je súčasťou rôznych aplikácií, strojov, iných zariadení alebo funguje ako samostatný produkt. Ak hovoríme o radare alebo radarovom snímači, hovoríme o konverznom zariadení, ktoré sníma a zisťuje rôzne polohy iných objektov, ich tvary, ich pohybové trajektórie aj pohybové charakteristiky. Ďalej hovoríme o zariadení, ktoré je schopné nie len iné predmety detekovať, ale dokáže tieto zariadenia odhaliť aj keď sa nachádzajú za rôznymi prekážkami. Radar predstavuje teda zariadenie, ktoré dokáže vidieť aj cez „steny“. Tiež ide o zariadenie, ktoré nie je závislé na svetelných podmienkach, teda na svetle alebo tme.

Pojem radar predstavuje skrátený názov, ktorý bol odvodený od pôvodného celého názvu Radio Detecting And Ranging [3]. Ide o názov, ktorý presne popisuje funkciu radaru a objasnenie radaru ako zariadenia. Jeho celý názov znamená využívanie milimetrových vln na zisťovanie dosahu. Radar je teda zariadením, ktoré využíva mikrovlny vysielané z vysieláčov v sérii impulzov, ktoré vzápätí odrážajú energiu, na základe čoho radar dokáže určovať rôzne potrebné parametre v závislosti od odvetvia, v ktorom je využívaný.

Tento pojem je tiež definovaný a chápaný ako určitý senzor, ktorého hlavnou úlohou je rozpoznávanie objektov rôzneho druhu v rôznych vzdialenostiach [27]. Ide o prístroj, ktorý

je určený k detekcii, sledovaniu, rozpoznávaniu a lokalizácii objektov. Pri definovaní pojmu radar môžeme tiež hovoriť o snímacom zariadení, ktoré zameriava určené ciele.

Ďalej by sme radar mohli charakterizovať ako najbežnejšiu a zároveň najdôležitejšiu vysokofrekvenčnú technológiu [11]. Technológiu, ktorá identifikuje ciele a prenáša informácie medzi zariadeniami. Radar predstavuje technológiu, ktorá prijíma vysielané vlny a obratom z nich vyhodnocuje dáta a dáva nám spätnú väzbu v podobe potrebných údajov, ktoré chceme získať.

Radar by sme mohli definovať aj ako zariadenie, ktoré odrážané rádiové vlny využíva k tomu, aby odkryl neviditeľné či vzdialené predmety [19]. Predstavuje zariadenie, ktoré odhaľuje akékoľvek predmety rôzneho charakteru bez závislosti na ich veľkosti, tvare, vzdialenosti a iných číť. Ak takýto predmet odrazí radarom vysielané vlny, na tejto báze ho dokáže identifikovať. Taktiež ide o zariadenia schopné odhalovania rozsahu objektov s fantastickou presnosťou, čo znamená, že vzdialenosť, s ktorou dokáže radar narábať, sú kilometre alebo yardy. Nakoľko rýchlosť vln je známou konštantou a keďže radarový prijímač je schopný merať v milióntinách sekundy čas, ktorý potrebuje žiarenie z radaru z vysielateľa na zachytenie objektu a spätné odrazenie, vzdialenosť je možné určiť v nepredstaviteľný zlomok času a s presnosťou merania na yardy alebo dokonca stopy.

Vo všeobecnosti teda môžeme pod pojmom radar chápať zariadenie, ktoré narába s rádiovými vlnami, na základe čoho je schopné odkryť predmety, ktoré nie sú pre naše oko viditeľné, pretože sa nachádzajú v ďalekej vzdialenosti alebo sú prekryté inými predmetmi. Tiež je schopné odhaliť objekty na základe iných charakteristík, akými môže byť veľkosť, tvar, poloha a podobne. V závislosti od informácií, ktoré radar o takomto objekte zistí, nám dokáže povedať nie len jeho vzdialenosť, ale tiež aj lokalizovať jeho polohu či dráhu, ktorou sa bude pohybovať.

3.2 Princíp fungovania radaru

Napriek tomu, že radar je zariadením, ktoré je možné využiť vo viacerých sférach, jeho bazálny princíp fungovania je založený na základe rovnakej sady komponentov, ktoré obsahuje. To znamená, že bez ohľadu na rôznorodosť druhov radarov, ktoré existujú a ich využitia alebo miesta inštalácie, všetky radary pozostávajú z rovnakej konštrukcie a rovnakých súčastí. Touto rovnakou súčasťou, ktorú nájdeme v každom jednom radare, je takzvaný magnetrón. Ide o zariadenie, ktoré sa využíva pri generovaní rádiových vln, pri ich vyžarovaní, prijímaní a na rozhranie pri zobrazení potrebných informácií príjemcovi. Magnetrón je tiež producentom mikrovln, ktoré predstavujú vysokofrekvenčné elektromagnetické vlny, ktoré dokážu prekonávať veľké vzdialenosti.

Druhou súčasťou každého radaru je anténa, ktorá najskôr slúži ako prostriedok vysielania vln v nami zameranom smere [21]. Milimetrové vlny, ktoré sú anténou vysielané postupujú do takej vzdialenosti, až kým nenatrafia na nejaký objekt, od ktorého sa vzápätí odrazia a následne na to sa vrátia naspäť k anténe. Na tomto princípe fungovania dokáže radar identifikovať aj objekty, ktoré sa vzdalujú alebo naopak približujú veľkou rýchlosťou. Táto anténa teda predstavuje nielen vysielateľ, ale zároveň aj prijímač a medzi týmito dvoma funkciami anténa prepína, nakoľko počas vysielania nie je schopná aj prijímania. Anténa má tak dve role, ktoré v procese fungovania radaru zastupuje. Všetky vlny, ktoré anténa zachytí sú následne prevedené do počítača, ktorý ich spracúva do čitateľnej podoby príjemcovi. Tento krok tiež zahŕňa selektovanie prijatých dát anténou, ktoré nepotrebujeme sledovať, pretože sú pre nás bezpredmetné. Môže ísť napríklad o odrazy zeme alebo budov, ktoré sú prebytočnými informáciami.

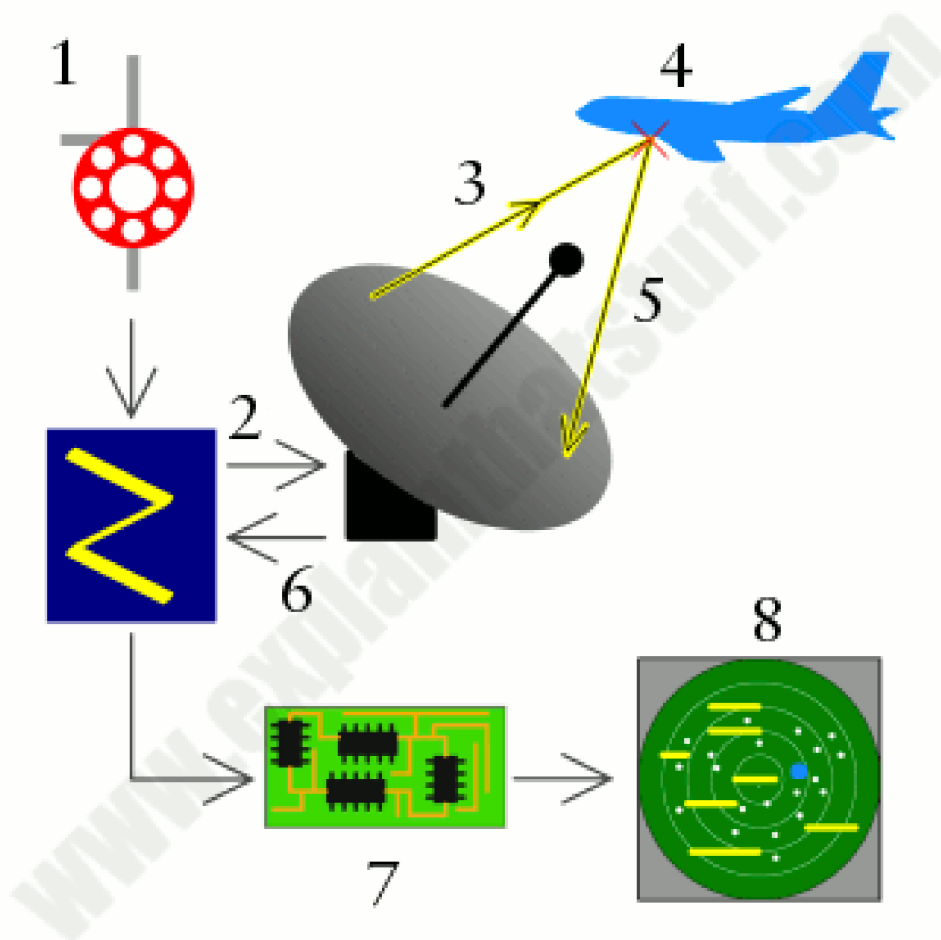
Princíp fungovania radaru by sa ďalej dal objasniť na základe dvoch javov, ktoré sú známe z bežného života a môžeme ich pomenovať ako takzvané Echo a Dopplerovu zmenu [6]. Sú to dva koncepty, ktoré sú využívané pri odrážaní zvuku, ale radar využíva presne rovnaké techniky za pomoci rádiových vln. Echo predstavuje klasickú ozvenu. Ak zakričíme do studne, za chvíľu sa k nám ozvena vráti. Tento jav sa deje na základe odrážania zvukových vln od povrchu. Zvukové vlny, ktoré do studne vyšleme v podobe slov sa od povrchu tejto studne odrazia a vrátia naspäť k nám. Doba, za ktorú sa k nám ozvena vráti je závislá od vzdialenosti medzi nami a objektom, od ktorého sa zvukové vlny odrazia. Rovnako ako ozvena funguje aj radar. Všetky vlny, ktoré sú z radaru vyslané, cestujú tak dlho, až pokým nenájdu objekt, od ktorého sa dokážu odraziť a vrátiť sa naspäť k radaru. Doba, za ktorú informáciu dostaneme je takisto závislá na vzdialenosti objektu, ktorý vyslané vlny odrazí. Efekt echa alebo ozveny je pri fungovaní radaru možné využívať ako základ pre určenie vzdialenosti objektov. Ďalší jav, ktorým sa dá objasniť princíp fungovania radaru je Dopplerová zmena alebo Dopplerov posun. Ide o zmeny intenzity alebo frekvencie zvuku, ktoré sú spôsobené približovaním objektu a odrazenia sa od objektu. U takto odrazeného zvuku nastávajú určité výkyvy, ktoré v skutočnosti nepredstavujú iný alebo nový zvuk, je to stále ten istý zvuk, ktorý len vnímame inak na základe jeho posunu. Tento jav sa dá objasniť na príklade dvoch áut idúcich oproti sebe. Ak jedno auto začne trúbiť, zvuk ktorý auto vydá počujeme inak keď je od nás vzdialenejšie, ako keď je bližšie alebo vedľa nás. Dopplerov posun sa pri fungovaní radaru teda využíva k určovaniu rýchlosti pohybujúceho sa telesa. Avšak, zvuk nedokáže cestovať na príliš veľké vzdialenosti, a práve preto radar pre svoje fungovanie využíva rádiové vlny, ktoré cestujú ďaleko a dajú sa zistiť aj keď sú slabé a sú pre ľudí neviditeľné.

Ďalším dôvodom prečo radar pracuje práve s elektromagnetickými alebo rádiovými vlnami je to, že tieto vlny dokážu fungovať v akýchkoľvek podmienkach [8]. Avšak, niektoré predmety sú vyvinuté tak, že sa vlny od nich neodrazia. Môže ísť o ich povrch alebo geometrický tvar, ktoré jednoducho vlnu vstrebú, čo spôsobí, že sa k nám nevráti. Tiež sa môže stať, že sa vlna síce odrazí, ale úplne iným smerom ako je anténa radaru. Práve preto fungovanie radaru je založené aj na využívaní indexu, ktorý sa nazýva Radar Cross Section (RCS) a zohľadňuje geometriu cieľa, smer radaru, frekvenciu aj materiál terča. Táto výpočtová metrika, zohľadňuje všetky spomenuté faktory. Vďaka tomu dokáže radar vyhodnocovať aj prípadné objekty, ktoré by mohli byť voči rádiovým vlnám rezistentné.

Chris Woodford opisuje fungovanie radaru v krátkych bodoch, ktoré presne zobrazujú postupnosť krokov, ktoré odrážajú princíp jeho slúženia nasledovne [29]:

1. Magnetron vygeneruje vysokofrekvenčné rádiové vlny.
2. Duplexer prepne magnetron na anténu.
3. Anténa slúži ako vysielač, ktorý úzkym lúčom rádiových vysiela vzduch.
4. Rádiové vlny zasiahnu objekt a odrazia sa späť k anténe.
5. Anténa odrazené vlny zachytí počas prestávky medzi prenosmi. Je to tá istá anténa, ktorá vlny aj vysiela.
6. Duplexer prepne anténu na prijímaciu jednotku vln.
7. Počítač v prijímacej jednotke spracúva odrazené a zachytené vlny, ktoré kreslí na obrazovku.
8. Identifikovaný objekt sa objaví na obrazovke radaru v cieľovom okolí.

Tieto body princípu fungovania radaru sú znázornené aj v grafickej podobe na obrázku číslo 3.1.



Obr. 3.1: Princíp fungovania radaru¹

3.3 Druhy radarov

Existuje niekoľko druhov radarov, ktoré majú určité odlišnosti podľa zámeru ich využitia. Radary je možné rozdeliť na základe rôznych klasifikácií, podľa toho akú majú funkciu alebo podľa spôsobu ich fungovania, prípadne ich využitia v praxi. V tejto kapitole si priblížime ich rozdelenie na základe týchto klasifikácií a uvedieme jednotlivé druhy radarov, ktoré do každej z klasifikácií spadajú.

Radary je možné rozdeliť do troch klasifikácií. Prvú klasifikáciu predstavujú typy radarov na základe ich konkrétnej funkcie. Druhú klasifikáciu predstavujú typy radarov na základe vzoru skenovania. Tretou klasifikáciou sú radary založené na aplikáciách.

¹Obrázok je prevzatý z <https://www.explainthatstuff.com/radar.html>

1. **Typy radarov na základe konkrétnej funkcie** – do tejto klasifikácie spadajú niekoľko druhov radarov [14].

- **Primárny radar** - primárny radar predstavuje taký druh radaru, ktorý vysiela smerom k cieľu vysokofrekvenčné signály. Vysielané impulzy sa od cieľa odrážajú a zároveň sú prijímané rovnakým radarom. Ide teda o základný typ radaru, ktorý je založený na bazálnom princípe fungovania, od ktorého sa odvíjajú ostatné druhy radarov.
- **Sekundárny radar** – tento druh radaru predstavuje radar, ktorý je obohatený o odpovedač, ktorý pri svojom fungovaní využíva. Sekundárne radarové jednotky narábajú so signálmi aktívnej odpovede. Pozostáva z dvoch jednotiek. Pozemnej a sekundárnej. Pozemná jednotka sa nazýva vyšetovač a jej úlohou je vysielať smerom k cieľu kódované impulzy. Odpovedač tieto impulzy prijme aj dekoduje a prenesie získané informácie naspäť do pozemnej jednotky, ktorá zhotoví odpoveď a zobrazí sa na primárnom radare. Sekundárna radarová jednotka vysiela a prijíma impulzy, ktoré sú pomocou odpovedača spracované a cieľ odpovedá na inej frekvencii.
- **Pulzný radar** – ide o typ radaru, ktorý vysiela vysoko výkonné impulzy smerom k cieľu a nejaký čas čaká na ozvenu tohto vysielaného signálu, kým vyšle nový impulz. Poznáme dva druhy pulzných radarov – Radar MTI (Moving Target Indicator) a Pulzný Dopplerov radar. Radar MTI využíva opakovanie nízkej frekvencie impulzov, ktorými sa radar snaží vyhnúť nejasnostiam dosahu, ale zároveň tento druh pulzného radaru môže mať Dopplerove nejasnosti. Pulzný Dopplerov radar zas používa opakovanie vysokých frekvencií, vďaka ktorým sa dokáže vyhnúť Dopplerovým nejasnostiam, ale môže pri ňom nastať zas veľa dosahových nejasností.
- **Radar s nepretržitou vlnou** – nepretržite vysiela vysokofrekvenčný signál aj nepretržite prijíma odrazené signály. Ide o typ radaru, ktorý chce zabezpečiť, aby energia, ktorá sa prenáša, neunikla do prijímača a nevzniklo tak spätnoväzbové pripojenie. Radar s nepretržitou vlnou má dva druhy – nemodulovaný a modulovaný. Nemodulovaný radar s nepretržitou vlnou dokáže identifikovať iba rýchlosť objektu, ale nedokáže určiť ich rozsah. Modulovaný radar s nepretržitou vlnou naopak dokáže identifikovať aj rozsah objektu.

2. **Typy radarov na základe vzoru skenovania** – radary, ktoré spadajú do tejto klasifikácie sa odlišujú podľa spôsobu skenovania údajov [14]. Tieto spôsoby skenovania existujú 4 a závisia od spôsobu snímania vzorov.

- **Kónické skenovanie** - toto skenovanie je vykonávané radarom na princípe rotácie hlavného lúča signálu okolo osi maximálneho zisku (maximálneho vyžarovaneho výkonu). Ak je daný zameraný predmet na tejto priamke maximálneho zisku signálu, vráti sa signál s maximálnym výkonom čo predstavuje to, že zmena amplitúdy bude rovná nule. Ak sa však objekt nachádza mimo osi maximálneho zisku následný odrazený signál bude sínusového tvaru, ktorého amplitúda je priamo úmerná vzdialenosti medzi objektom a danej meranej osi. Pomocou správneho umiestnenia maximálneho prijatého výkonu vieme určiť cieľové umiestnenie zameriavaného objektu. Obrovskou nevýhodou je však fakt, že tieto radary nie sú schopné určiť cieľ mimo svojho úzkeho záberu skenovania.

- **Radar Track-While-Scan** – tento druh radaru dokáže skenovať svoj lúč na rozhraní väčšej plochy, vďaka čomu dokáže radar vidieť cieľ, aj keď je jeho trať narušená.
- **Monopulzný skenovací radar** – v monopulznom skenovacom radare sa skenovanie vykonáva na základe postupného pulzovania viacerých antén. Pri skenovaní využíva radar jeden reflektor, ktorý je osvetlený z viacerých častí, čím sa vytvárajú dva lúče, ktoré sú vzájomne prekrývané. Tento druh radaru je zväčša využívaný v lodníctve.
- **Elektronické skenovanie** - predstavuje taký typ radaru, ktorý má elektronicky riadené fázové pole, pri čom zásadou v elektronickom riadení lúča je rušenie elektromagnetickej energie.

3. **Typy radarov založených na aplikáciách** – ide o radary, ktoré fungujú na báze aplikácií, ktoré sú ich súčasťou [14]. Druhy radarov založených na aplikáciách sú štyri.

- **Dozorový radar** – jeho primárnou aplikáciou je dohľad. Ide o radar, ktorý využíva skenovaciu anténu a jeho rozlíšenie je mierne. Dozorový radar má ešte dva podtypy v závislosti od ich sféry využitia. Sú to radary riadenia letovej prevádzky a radary protivzdušnej obrany.
- **Sledovací radar** – primárnou aplikáciou je sledovanie. Tento druh radaru sleduje cieľ dovedy, kým sa mu ho nepodarí lokalizovať. Sledovacie radary sa nazývajú aj radarmi riadenia palby, pretože využívajú veľmi vysokú opakovaciu frekvenciu, veľmi úzku šírku lúča aj impulzov, vďaka čomu sú sledovacie radary veľmi presné. V momente keď sledovací radar lokalizuje cieľ, tak automaticky sleduje jeho pohyby.
- **Meteorologický radar** – primárnou aplikáciou meteorologického radaru je pozorovanie a predpoveď. Tento druh radaru narába s množstvom energie, ktorá je od cieľa odrazená a rozptýlená, na základe čoho radar dokáže odhadovať množstvo aj intenzitu zrážok. Meteorologický radar využíva rôzne frekvenčné pásma a odvíja sa od signálu, ktorý je od cieľa rozptýlený.
- **Zobrazovací radar** – primárnou aplikáciou predstavuje zobrazenie. Zobrazovací radar meria dva rozmery súradníc, z ktorých vytvára mapový obraz pozorovaného cieľa. Jeho hlavným využitím je mapovanie zeme a jej povrchu. Radar vysiela signál smerom k povrchu zeme a následne na to čaká na jej odozvu, teda na signál, ktorý zem odrazí. Z odrazeného signálu radar spracuje obraz.

3.4 Využitie radarov

Jednotlivé druhy radarov, ktoré boli spomenuté v predchádzajúcej podkapitole súvisia aj s ich využitím. V závislosti od druhu radaru sa rozlišuje aj jeho využitie a sféra, v ktorej sa radar používa. Na základe funkcií a schopností, s ktorými jednotlivé druhy radarov disponujú je určená aj oblasť pre ich zameranie. My si priblížime niektoré z týchto oblastí a objasníme ich využitie v rámci konkrétneho zamerania sa na odvetvie činností, pri ktorých je radar využívaný.

Najviac známy je radar ako vojenská technológia [29]. Hlavnou oblasťou, v ktorej sa teda radary využívajú, je predovšetkým armáda a letectvo. V armáde sú radary využívané

najmä na detekciu prichádzajúcich lietadiel alebo iného nebezpečenstva. Umiestnené sú na letiskách alebo iných pozemných staniciach. Ich prioritným využitím je teda ochrana pred prípadným napadnutím nepriateľských štátov. Ešte viac je však radar využívaný práve v letectve, a to konkrétne na civilných letiskách. Väčšina lietadiel, ktoré z civilných letísk odlietajú alebo na ne naopak pristávajú sú riadené leteckou prevádzkou, ktorá za pomoci radarov a ich skenovacích misiek tieto lietadlá vedú dnu aj von, bez ohľadu na aktuálne počasie. Vďaka radaru ich dokážu bezpečne navigovať a orientovať správnym smerom.

Ako ďalšia sféra využitia radarov je lodníctvo alebo námorníctvo [5]. Podľa medzinárodných predpisov na zabránenie zrážkam lodí na moriach – COLREGS, je sledovanie lodí povinné. K tomu využívajú lode práve radary. Vďaka radarom, ktoré majú v sebe zabudované, je možné voči rôznym prípadným nehodám a zrážkam s inými loďami predchádzať. Vďaka radaru totiž lode dokážu sledovať okolie na mori a vidia, čo sa pred nimi nachádza. Avšak, radary v lodnej doprave neslúžia len k eliminácii nehôd, ale ich využitie je dôležité aj pre riadenie a sledovanie lodnej dopravy pobrežnou hliadkou alebo inými orgánmi.

Radary sú tiež veľmi využívané v cestnej doprave [22]. Slúžia k odhaľovaniu rýchlostí, akými sa autá po cestách pohybujú. K tomuto účelu využívajú radar hlavne policajné zložky. Avšak, radar má v sebe zabudovaný aj samotný automobil. Každé auto, ktoré disponuje s možnosťou využívania tempomatu, využíva vlastne radar. Ak hovoríme o tempomate v aute, hovoríme teda o radare, ktorý sníma všetko okolo auta, vďaka čomu sa dokáže auto pohybovať stálou rýchlosťou bez potreby manuálneho udržiavania rýchlosti vodičom, a v prípade, že by to už viac nebolo bezpečné, tento radar automaticky vyšle signál a vodič sa opäť ujíma riadenia automobilu a koordinácie rýchlosti.

Ďalšie využitie nachádza radar v oblasti meteorológie [9]. Za pomoci radarov totiž meteorologické stanice sledujú a zároveň aj predpovedajú počasie. Radar dokáže poskytovať informácie o intenzite zrážok aj o ich výskyte na základe skenovania priestoru oblohy. Tiež dokáže monitorovať meteorologické systémy, ktoré sú väčšieho a vážnejšieho rozsahu, ako sú napríklad hurikány alebo tornáda.

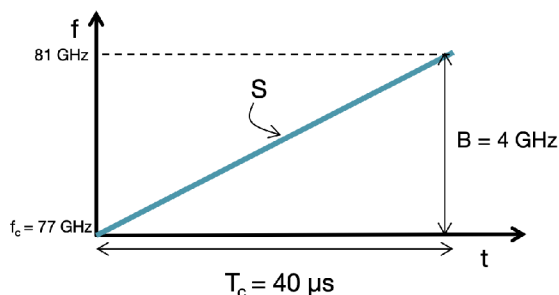
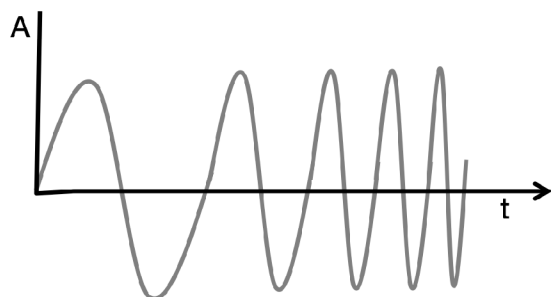
Menej známym využitím radarov je sledovanie zvierat a ich výskytu na planéte, migrácii či spôsobe života [20]. Vďaka radarom dokážeme odhaliť ohrozené druhy, pozorovať ich úkryty či zhromažďovať údaje o ich poklese alebo náraste. Radarová technológia si nachádza uplatnenie aj v iných sférach, ktoré sú späté s každodenným životom človeka [7]. Jej využitie je v komerčných, lekárske aj priemyselných systémoch a nakoľko radary ako technológia neustále napredujú a zdokonaľujú svoje aplikácie, aj ich oblasť využitia neustále rastie.

3.5 Radary typu milimetrových vln

Technológia s názvom milimeter wave (mmWave) predstavuje špeciálny druh radaru, ktorý spočíva vo využívaní krátkych elektromagnetických vln [13]. Tak, ako aj iné radarové systémy fungujú na princípe odražaní vln od objektov v dráhe, aj mmWave radarový systém funguje na rovnakej báze. Rozdiel je však práve v dĺžke vln. Vlnová dĺžka, ktorú mmWave radary prenášajú, je iba v milimetrovom rozsahu, vďaka čomu radar dokáže detekovať aj malé objekty merajúce len zlomok milimetra. Vlna, ktorú mmWave radar vysiela sa nazýva Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW), teda frekvenčne modulovaná spojitá vlna. Tento signál je vysielať nepretržite kmitavým pohybom, čo zabezpečuje možnosť merania rýchlosti, uhla aj rozsahu.

Meranie rozsahu v radare FMCW prebieha na základe zvyšovania frekvencie signálu lineárne s časom. Ide o základný typ signálu odraženého od objektov, nazývaný aj cvrlikanie. Pri tomto druhu signálu môže byť čas funkciou jeho rozsahu, ako je zobrazené na obrázku

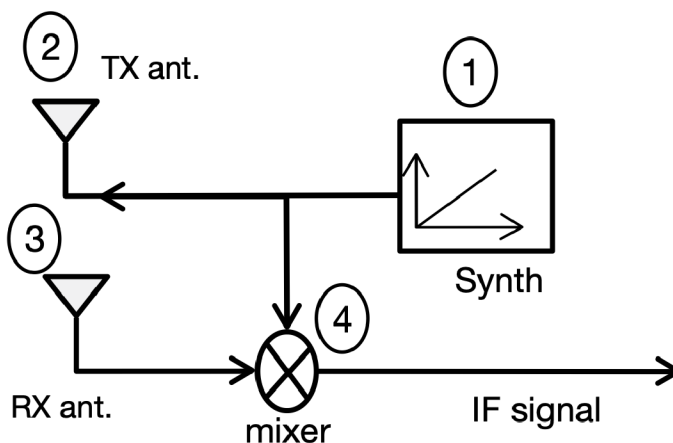
číslo 3.2 alebo môže byť čas funkciou jeho frekvencie, čo je znázornené na obrázku číslo 3.3



Obr. 3.2: Cvrlikajúci signál s amplitúdou ako funkcia v čase [13]

Obr. 3.3: Cvrlikajúci signál s frekvenciou ako funkcia v čase [13]

Mmwave radar je tvorený z niekoľkých súčastí [13]. Obsah tohto radaru pozostáva zo syntetizátora, ktorý signál, tzv. cvrlikanie generuje, TX antény, ktorá ho vysiela, RX antény, ktorá odrazený signál prijíma a frekvenčného mixéra, ktorý zo signálov TX a RX vyprodukuje medzifrekvenčný signál, ktorý predstavuje nový signál s novou frekvenciou – Intermediate Frequency (IF) signál, vid. obrázok číslo 3.4.



Obr. 3.4: Blokový diagram FMCW radaru [13]

Nakoľko ide o kombináciu dvoch signálov, k získaniu nového IF signálu za pomoci frekvenčného mixéra využívame výpočtové vzorce

$$x_1 = \sin(\omega_1 t + \Phi_1) , x_2 = \sin(\omega_2 t + \Phi_2) .$$

x_1 a x_2 sú sínusové vstupy, pre ktoré platí, že výstupný výstup má okamžitú frekvenciu rovnú rozdielu okamžitej frekvencie dvoch vstupných sínusoidou. Fáza výstupu sa tak rovná rozdielu dvoch vstupných signálov:

$$x_{out} = \sin[(\omega_1 - \omega_2)t + (\Phi_1 - \Phi_2)] .$$

Pri funkcii času vyobrazenej na snímke číslo 3.5 si môžeme všimnúť, že signál RX je časovo oneskorenou verziou signálu TX, čo je možné matematicky odvodiť nasledujúcou rovnicou:

$$\tau = \frac{2d}{c} ,$$

kde τ je časové oneskorenie, d predstavuje vzdialenosť od detekovaného objektu a c je rýchlosť svetla.

Vzdialenosť medzi signálmi je však pevná, čo znamená, že signál pozostáva z tónu s konštantnou frekvenciou. Signál je tak platný iba pre časový interval, v ktorom TX aj RX sa vzájomne prekrýva. Výstupný IF signál mixéra ako funkcie veľkosti času predstavuje sínusovú vlnu, ktorá reprezentuje rozdiel medzi fázou TX a RX v čase zodpovedajúcom začiatku vysielania signálu

$$\phi_0 = 2\pi f_c \tau .$$

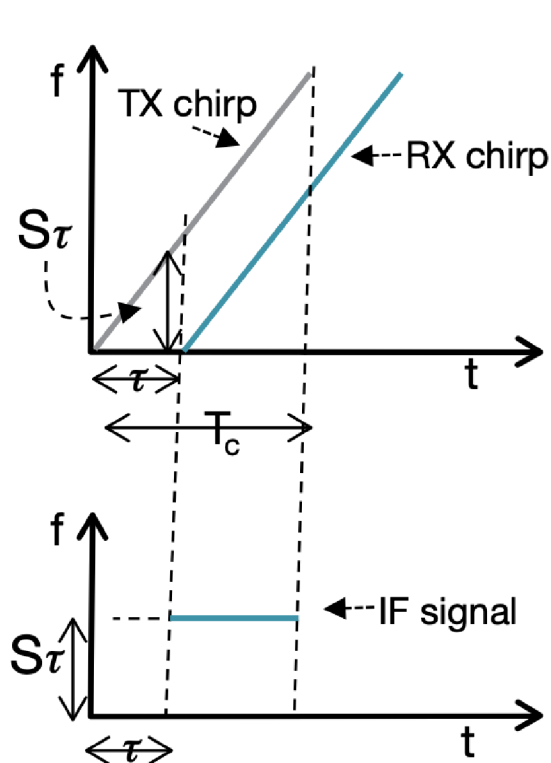
Vo všeobecnosti môžeme povedať, že ak pre objekt vo vzdialenosti d od radaru bude IF signálom sínusová vlna, potom bude platiť

$$A \sin(2\pi f_o t + \phi_0) ,$$

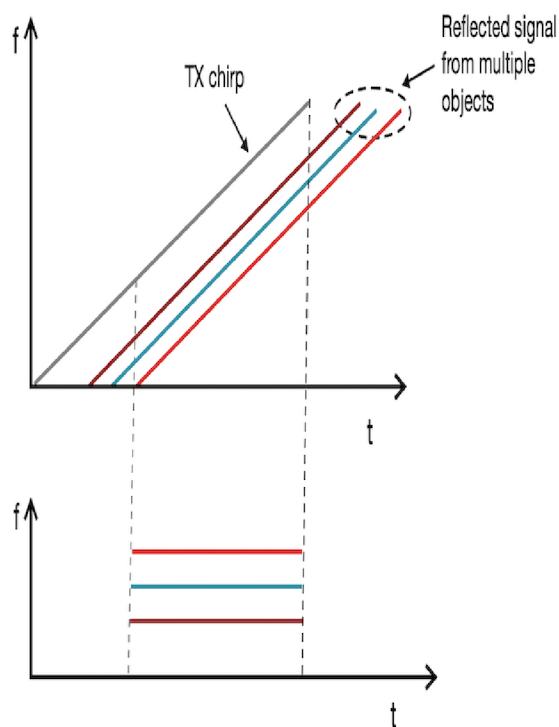
kde platí:

$$f_0 = \frac{S2d}{c} \quad a \quad \phi_0 = \frac{4\pi d}{\lambda} .$$

Zatiaľ sme vychádzali z detekovania len jedného objektu radarom. Teraz si priblížime detekovanie radarom viacerých objektov naraz, viď obrázok číslo 3.6. Pri viacerých objektoch radar prijíma rôzne RX aj TX signály oneskorené o odlišný čas, tak ako to zachytáva obrázok číslo 3.6. Vznikajú tak viaceré tóny s odlišnou konštantnou frekvenciou, ktoré je potrebné spracovať. K spracovaniu týchto signálov sa využíva tzv. Fourierova transformácia, ktorej výsledkom je frekvenčné spektrum so samostatnými vrcholmi pre rôzne tóny. Tieto vrcholy tvorí na princípe zvýšenia rozlíšenia a zväčšenia dĺžky IF signálu. Ak sa zväčší dĺžka signálu, úmerne sa zväčší aj šírka jeho pásma.



Obr. 3.5: IF frekvencia je konštantná [13]



Obr. 3.6: Viaceré IF tóny - detekcia viacerých objektov [13]

Ďalej Fourierova transformácia hovorí, že dva signálové tóny môžu byť vyriešené vo frekvencii za predpokladu, že táto frekvencia predstavuje nasledovný vzťah:

$$\Delta f > \frac{1}{T_c} .$$

Meranie rýchlosti zas funguje na báze vysielania dvoch signálov radarom, ktoré budú mať vrcholy na rovnakom mieste, ale s inou fázou. Takto nameraný fázový rozdiel zodpovedá rýchlosti pohybu objektu, čo popisuje obrázok číslo 3.7. Fázový rozdiel je odvodený z rovnice:

$$\Phi_0 = \frac{4\pi d}{\lambda} .$$

nasledovne:

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi\nu T_c}{\lambda} .$$

Rýchlosť objektu je možné odvodiť matematickým vzorcom:

$$\nu = \frac{\lambda \Delta \Phi}{4\pi T_c},$$

a pretože meranie rýchlosti je založené na fázovom rozdiel dostaneme nejasnosť v meraní. Meranie je jednoznačné iba ak platí $|\Delta \Phi| < \pi$.

Použitím rovnice:

$$\nu = \frac{\lambda \Delta \Phi}{4\pi T_c}$$

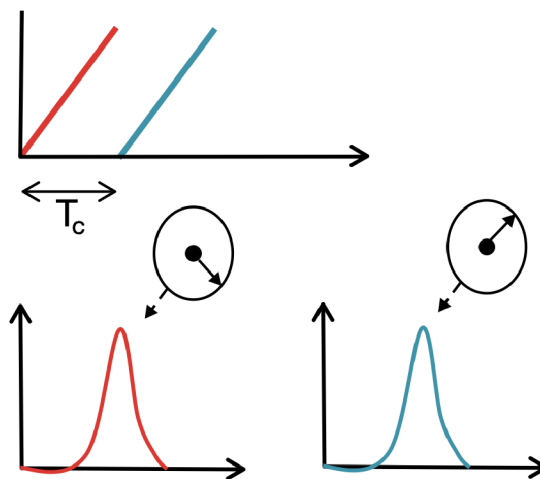
môžeme ďalej odvodiť nasledujúcu rovnicu:

$$\nu < \frac{\lambda}{4T_c}.$$

Rovnica:

$$v_{max} = \frac{\lambda}{4T_c}$$

reprezentuje maximálnu relatívnu rýchlosť meraní dvoma vyslanými signálmi s rovnakou vzájomnou vzdialenosťou, pričom táto vyššia maximálna rýchlosť vyžaduje kratší prenosový čas medzi cvrlikaním [13].



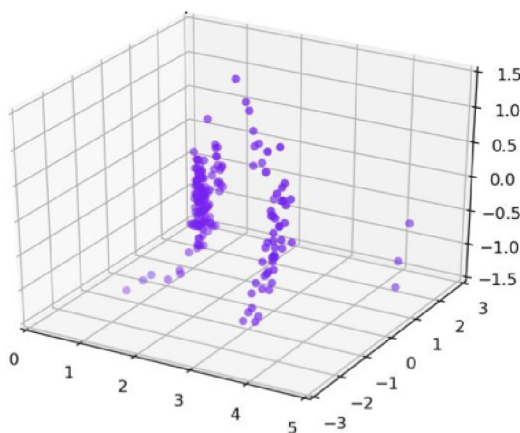
Obr. 3.7: Meranie rýchlosti dvoch rôznych objektov [13]

3.6 Generovanie bodových mračien

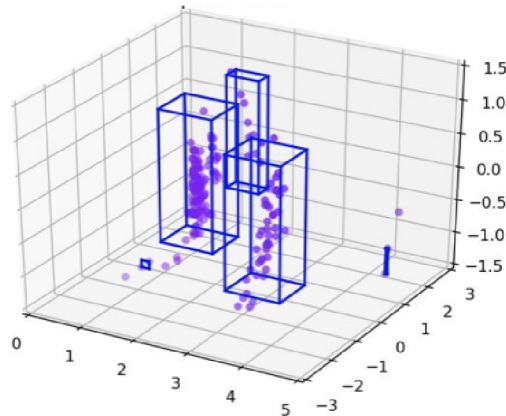
Bežná nosná frekvencia radarového snímača s kmitočtovo modulovanými kontinuálnymi vlnami alebo taktiež aj skrátene radarového snímača s milimetrovou vlnou sa bežne nachádza v rozsahu od 57 GHz až do 85 GHz podľa rôznych primárnych aplikácií [10]. V automobilovom segmente sa bežne využívajú primárne tie s frekvenciou 76 GHz až 81 GHz. Radary na frekvenciách 57 GHz až 64 GHz sa môžu používať na interaktívne snímanie pohybu na krátku vzdialenosť. Výhodou je, že s vysokou frekvenciou je k dispozícii aj veľká šírka pásma až 4 GHz, pričom sa stále znižuje aj fyzická vzdialenosť hardvérových komponentov vrátane antén. Vďaka tomu je radarový snímač s milimetrovou vlnou omnoho kompaktnejší a taktiež dosahuje vyššieho rozlíšenia ako tradičné radary s nízkym kmitočtom.

Zároveň sa nevyskytujú významné rozdiely v modulácií a spracovaní signálu medzi milimetrovým radarom a konvenčným frekvenčne modulovaným radarom s kontinuálnou vlnou [10]. Radarový senzor s milimetrovou vlnou spravidla prenáša zároveň viac frekvenčne modulovaných lineárnych signálov cez viaceré kanály pod rôznymi uhlami. Po spracovaní signálu a vykonanej digitalizácii sa získava surová multidimenzionálna kocka dát z radaru. Následne je vykonaná séria rýchlej Furierovej transformácie a odhadujú sa parametre každého bodu odrazu v scéne, t. j. vzdialenosť, azimut, výškový uhol a údaje o rýchlosti založené na Dopplerovom efekte. Okrem toho sa počas tohto procesu začleňuje konštantná rýchlosť falošného poplachu (CFAR) na detekciu bodov nad daným pomerom signálu k šumu (SNR) proti bežne sa vyskytujúcejmu okolitému hluku a indikácia pohyblivého objektu (MTI) je používaná na detekciu a odlíšenie pohybujúcich sa bodov od statického pozadia. Nakoniec sa týmto procesom získa množina pohyblivých bodov, nazývaná tiež mrak radarových bodov, respektíve bodové mračno.

Ak je na scéne prítomné množstvo viacerých pohyblivých cieľov, tak je získané mračno súhrnným súborom všetkých takýchto bodov a cieľov [10]. Preto sa musí na zoskupenie podmnožiny bodov do jedného cieľa použiť zoskupovacia metóda, ako napríklad priestorové zoskupenie bodov na základe hustoty tak, aby bolo možné oddeliť viacero cieľov. Medzitým možno ťažisko cieľa odhadnúť z podmnožiny bodov, ktorá je s ním spojená. Potom následne sledovacím algoritmom, ako je Kalmanovo filtrovanie docielime to, aby bola trajektória každého cieľa zaznamenaná s priradením jedinečného identifikátora cieľa. Môže sa použiť najmä spoločný algoritmus klastrovania / sledovania. Pomocou identifikátora cieľa je možné zhromaždiť celú históriu pohybu každého cieľa osobitne, a tak môžeme analyzovať pohyb každého cieľa samostatne.



Obr. 3.8: Bodové mračno²



Obr. 3.9: Klastrovanie bodov³

Obrázok 3.8 vizuálne stvárňuje príklad bodových mračien a následne na obrázku číslo 3.9 je znázornené klastrovanie daných bodov.

Moderné milimetrové radary sú veľmi rýchle z ponímania spracovania údajov ale sú výrazne limitované v procese prenosu dát cez sériový port alebo cez sieťové rozhranie radiča [30]. Práve preto je široko používaná aplikácia bodových mračien v týchto moderných radaroch založených na frekvenčne modulovanej kontinuálnej vlne. Problémy s klastrovaním a označovaním detekovaných cieľov radarov s milimetrovou vlnou vyvolali obavy výskumníkov v ich bezpečnosť a použiteľnosť. Jedná sa tomu tak najmä v oblasti automobilového priemyslu, inteligentných dopravných systémov a monitorovania pacientov v medicíne. Výstup mračna radarových bodov je zvyčajne príliš riedky a nie je až tak jednoduché detekované ciele vizualizovať. Na detekciu jednotlivých cieľov je teda potrebný spoločný algoritmus na zoskupovanie a sledovanie. Konvenčný klastrový algoritmus priestorového zhľukovania so šumom DBSCAN alebo taktiež Density-based spatial clustering of applications with noise, a teda algoritmus hustoty založenej na priestorovom zhľukovaní aplikácií s hlukom má hlavnú výhodu v tom, že dokáže efektívne filtrovať šumový bod. Taktiež zvláda zhľuky rôznych tvarov a veľkostí v pevnej počiatkovej vzdialenosti jadra. Avšak, variantné hustoty môžu spôsobiť problémy so zhľukovaním. Napríklad, variantne riedke alebo variantne husté objekty niekedy môžu spôsobiť aj falošné zhľukovanie. Zároveň je originálny algoritmus priestorového zhľukovania so šumom citlivý na vstupné parametre, a teda detekcia aj klastrovanie ovplyvňuje výsledok algoritmu hustoty pri vytváraní bodových mračien radarových bodov milimetrových snímačov. Keďže radar s milimetrovou technológiou vysielanej vlny detekuje ciele v polárnych súradniciach, detekované body a ciele sú hustejšie v oblasti s bližším dosahom ale riedke v poli vzdialeného dosahu radaru.

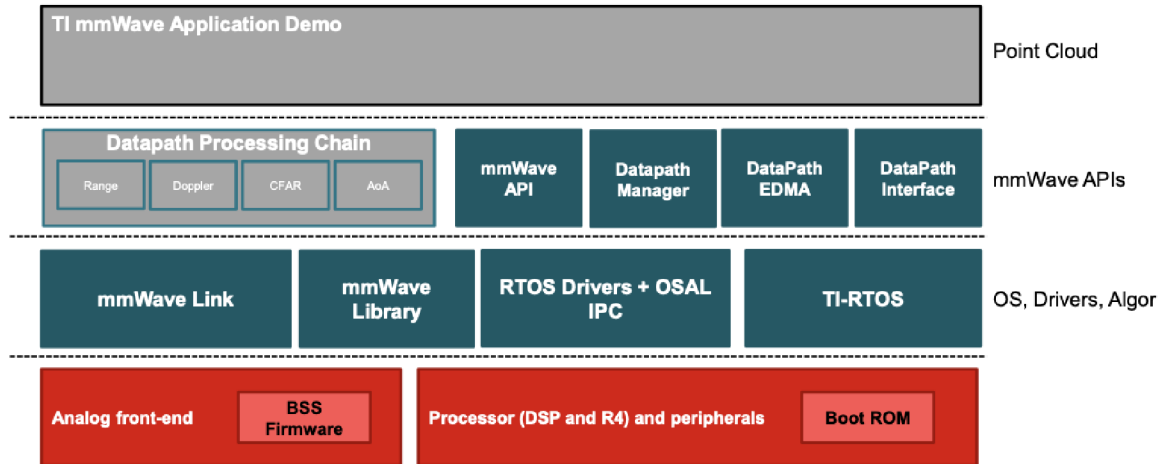
3.7 mmWave SDK a modul IWR6843ISK

Spoločnosť Texas Instruments ponúka Software Development Kit (SDK) respektíve sadu vývojových nástrojov. Je založená na jednotnej softvérovej platforme pre portfólio milimetrových modulov, ktorá poskytuje ľahké nastavenie a rýchly prístup k vyhodnoteniu a vývoju založených na použiteľných nástrojoch poskytovaných priamo z balenia [26].

²Obrázok je prevzatý <http://www.cs.ox.ac.uk/files/10889/%5BDCOSS19%5DmID.pdf>

³Obrázok je prevzatý <http://www.cs.ox.ac.uk/files/10889/%5BDCOSS19%5DmID.pdf>

Na obrázku č. 3.10 je znázornená architektúra softvérového vývojového nástroja, ktorá pozostáva z časti demo aplikácie, ktorá je schopná priamo vytvárať bodové mračná, ďalej z časti programovacieho aplikačného rozhrania a taktiež z podporného softvéru zahŕňajúceho ovládače a knižnice pre prácu s modulmi pracujúcimi na princípe milimetrových vln.



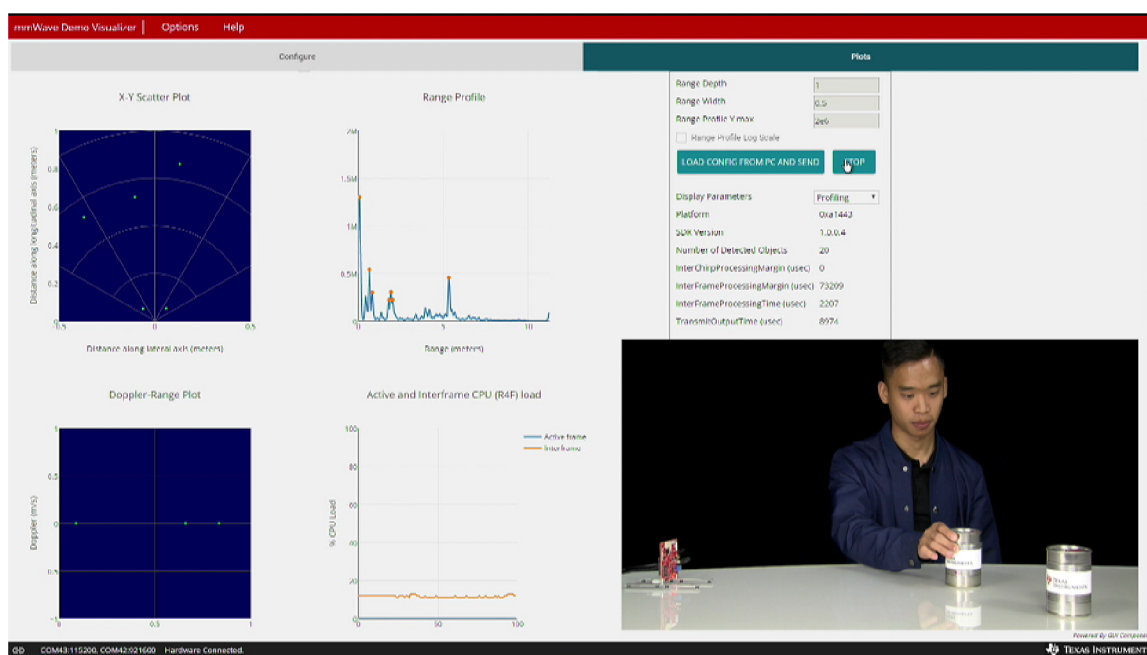
Obr. 3.10: Architektúra softvérovej vývojovej súpravy [26]

Táto sada vývojových nástrojov obsahuje radu priamo použiteľných programov vytvorených pre prácu s radarovými modulmi založených na princípe milimetrových vln a taktiež pre spracovanie dát, ktoré tieto zariadenia pri meraní generujú [26]. Obsahuje napríklad pythonovské skripty *parser_mmw_demo.py* a *mmw_demo_example_script.py*, ktoré spoločne dokážu spracovávať výstupné údaje milimetrového radaru tak, že ich načítavajú v podobe binárnych dát zo súboru vygenerovaného modulom milimetrovým vln počas merania, ktorý obsahuje záznam nameraných hodnôt a po ich analýze a spracovaní navracajú výstupné spracované dáta v kolekcii objektov typu *Tuple*. V nej sú uložené hodnoty ako napríklad:

- výstup syntaktickej analýzy,
- index hlavičky začiatku dát,
- počet bytov spracovaných paketov,
- počet detekovaných objektov,
- detekovaná X-ová súradnica objektu,
- detekovaná Y-ová súradnica objektu,
- detekovaná Z-ová súradnica objektu,
- detekovaná vzdialenosť objektu,
- pomer signálu k šumu pre daný bod.

mmWave Demo Visualizer

Veľmi užitočným nástrojom je aj *mmWave Demo Visualizer*, ktorý funguje ako konfiguračný nástroj pre zadávanie vstupných konfiguračných parametrov rôznych typov inteligentných modulov s milimetrovou vlnou od spoločnosti Texas Instruments pomocou grafického užívateľského rozhrania pracujúceho vo webovom prehliadači, ktorý priamo dokáže spracovávať a graficky znázorňovať výstupné zhľuky bodov v reálnom čase, tak ako je to vyobrazené na snímke číslo 3.11.



Obr. 3.11: mmWave Demo Visualizer⁴

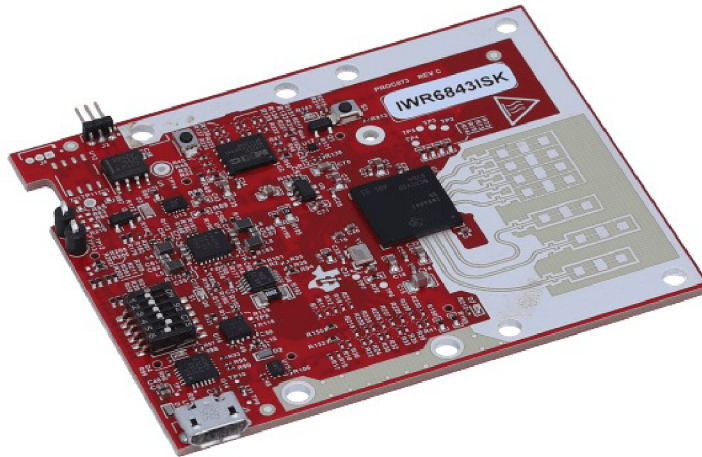
IWR6843ISK inteligentný senzor milimetrových vln

Inteligentný modul IWR6843ISK od spoločnosti Texas Instruments zobrazený na obrázku č. 3.12 pozostáva z čipu IWR6843 a antény s veľkým dosahom pracujúci na frekvenciách od 60 GHz až po 64 GHz. Tento kit poskytuje radu výhod akými sú napríklad:

- veľký dosah merania,
- 4 prijímacie a 3 vysielačie antény umožňujúce merania až v 120° uhle s meraním sklonu do 30°,
- USB rozhranie zabezpečujúce napájanie so súčasným zdieľaním dát na sériovom port,
- nízka obstarávacia cena - približne 150€,
- malé rozmery a nízka váha,
- generovanie bodových mračien,

⁴Obrázok je prevzatý z https://training.ti.com/sites/default/files/EVM_OOB_demo_thumbnail.png

- široká škála aplikačnej použiteľnosti,
- dostupnosť rady vývojových nástrojov a technická podpora.



Obr. 3.12: Modul IWR6843ISK⁵

Tento inteligentný senzor pracuje na princípe milimetrových vln, ktoré dokážu byť vysielané jednou až štyrmi vysielacími anténami [18]. Tie môžu byť podľa potreby nakonfigurované, aby dokázali zameriavať objekty pod uhlom až 120°. Taktiež dosah tohto merania predstavuje desiatky metrov s presnosťou na centimetre. Výsledný dosah aj presnosť je však priamo ovplyvnený danou konfiguráciou. Odrazený lúč vln dokáže byť zachytávaný až trojicou prijímacích antén. Celé toto meranie zabezpečuje samostatný čip IWR6843, ktorého výstup je smerovaný na micro-USB port s podporou UART sériovej zbernice.

⁵Obrázok je prevzatý z <https://www.ti.com/tool/IWR6843ISK>

Kapitola 4

Analýza súčasného stavu

Táto kapitola popisuje nevýhody aktuálne dostupných zariadení na meranie výšky nad terénom. Ďalej charakterizuje potrebné vlastnosti a špecifiká, ktoré musí výsledné radarové zariadenie spĺňať k tomu, aby bolo vhodne použiteľné a ďalej popisuje navrhované praktiky na overenie použiteľnosti milimetrového radaru na dané účely navádzania lietadla v praxi.

4.1 Prehľad vlastností aktuálnych výškomerov

Aktuálne využívané výškomery v segmente ultralahkých sú založené na princípe merania statického tlaku. Je to pochopiteľné, keďže daný spôsob činnosti je pre ich bežné využitie dostatočný a cenovo menej náročný. Ich hlavnými nevýhodami však sú napríklad nepresnosť respektíve príliš veľký rozsah pri meraní a teda neposkytujú informácie o výške v malom merítku, ďalej taktiež ich neschopnosť zobrazovania skutočnej výšky nad terénom ale taktiež aj to, že ich odozva môže byť príliš vysoká prípadne iné nevýhody vyplývajúce z danej konštrukcie. Tieto systémy sú teda veľmi nevyhovujúce pre meranie presnej výšky pri pristávaní. Tak ako toto porovnanie zobrazuje tabuľka 4.1 narozdiel od toho existujú aj systémy, ako napríklad rádiovýškomery, ktoré dokážu zobrazovať skutočnú výšku nad terénom ich odozva je nízka, avšak ich obrovskou nevýhodou je, že ich cena je príliš vysoká a teda sa v tomto segmente letectva vôbec nevyužívajú.

	Aerometrický výškomer	Digitálny výškomer	Rádiovýškomer
Presnosť merania	desiatky metrov	metre	desiatky centimetrov
Nutnosť napájania	nie	áno	áno
Odozva	vysoká	nízka	nízka
Výška nad terénom	nie	založená na GPS	skutočná výška
Orientačná cena	od 200 do 3000€	od 2000€ do 20000€	tisíciky až desiatky tisíc €
Zobrazenie výšky	vizuálne	vizuálne	vizuálne
Kalibrácia	na zemi/za letu	na zemi/za letu	na zemi/za letu

Tabuľka 4.1: Základné vlastnosti výškomerov

Na zadanie, som sa rozhodol navrhnúť zariadenie, ktoré by bolo cenovo dostupné, malo by nízku odozvu a vysokú zobrazovaciu presnosť skutočnej výšky nad terénom v rade niekoľkých centimetrov. Taktiež by bolo vhodné aby výsledné zariadenie vedelo poskytovať informáciu o výške nad terénom akusticky, tak aby sa pilot mohol zrakom plne sústrediť na pristávaciu dráhu pred sebou a aby mu informácia o výške bola zadávaná zvukovo priamo do slúchadiel.

4.2 Ciele práce

Cieľom práce nie je vytvoriť perfektné radarové zariadenie, ktoré predčí všetky aktuálne používané typy radarov. Jej cieľom je otestovať vhodnosť použiteľnosti inteligentného modulu milimetrových vln a jeho použitia na uľahčenie vykonania pristávacieho manévra v poslednej fáze letu, pri priblížení a pristátí na dráhu. Následne, v prípade úspechu s použitím, navrhnúť vhodné riešenia v jeho ďalšom použití, respektíve, v prípade neúspechu zhodnotiť, prečo toto zariadenie nedosiahlo potrebných vlastností.

Táto práca sa zaoberá otestovaním vhodnosti použitia milimetrových radarov v tejto oblasti práve preto, že doposiaľ neboli milimetrové radary v tejto sfére lietadiel aplikované, aj keď z ich charakteristík vyplýva, že by sa na túto aplikáciu mohli náležite hodiť.

Z podkapitoly 3.7 je vyplývajúce, že spoločnosť Texas Instruments vyrába inteligentné moduly milimetrových vln s bohatou softvérovou podporou. Tieto nástroje by bolo vhodné využiť aj pri tvorbe aplikácie na vykonanie testov s daným modulom.

Celý tento systém je potrebné ešte otestovať vhodne zvolenými metodikami počas letových testov na ľuďoch - pilotoch, určiť efektívnosť a použiteľnosť v praxi. Ale taktiež odhaliť aj slabé miesta a prípadné nedostatky v návrhu, následne s týmito údajmi efektívne pracovať, prípadne navrhnúť možnosti ďalších vylepšení a úprav. Mieru funkčnosti a efektivity použiteľnosti radaru založeného na princípe milimetrových vln v danej aplikácii na lietadle teda zhodnotia piloti počas testov v reálnom prostredí.

4.3 Požiadavky na radarový približovací výškomer

Tieto požiadavky vyplývajú zo súhrnných charakteristických črt, ktoré by mal výsledný systém dosahovať, tak aby boli docielené požadované vlastnosti.

Všeobecné funkcie

Vytvorený nástroj musí generovať zvukový signál odpovedajúci nameranej výške a za pomoci vytváraných tónov informovať na prítomnosť terénu a približovania sa k nemu na obdobnom princípe, ako to bežne poznáme zo sektora áut, kde sú už parkovacie senzory takmer štandardnou výbavou. Tento systém musí indikovať danú výšku nad terénom zmenou intenzity zvukového tónu, ktorá bude s väčšou blízkosťou čoraz intenzívnejšia. Taktiež by daná intenzita mala reflektovať rozsah výšky, v ktorej sa lietadlo práve nachádza, to znamená vo väčšej výške povedzme do 6 metrov nesmie svojou mierou zahľcovať pozornosť pilota.

Taktiež je nutné aby systém od zahájenia fázy prechodového oblúka až po finálnu fázu dosadenia s dostatočnou razanciou indikovaného tónu oveľa precíznejšie informoval o vzdialenosti lietadla od terénu, tak aby výpovedná hodnota tónu jasne reflektovala približujúci sa povrch pristávacej plochy.

Spôsob zobrazenia výškovej informácie

Za ideálnu možnosť ako symbolizovať reálnu výšku pilotovi v reálnom čase považujem zdieľanie informácie za pomoci zvuku. Keďže zrakové vnemy pilota sú v tejto najkritickejšej fáze letu dostatočne vyťažené, toto riešenie považujem za najlepšiu možnosť. Tiež keď zhodnotíme, že presné dáta o výške ani nie je potrebné a vhodné zobrazovať napríklad na displeji, kde by sa daný údaj neustále menil, čo by mohlo viesť až k zmeteniu a odpútavaniu pozornosti pilota.

Zameriavacia presnosť

Pri zameriavaní výšky od hornej hranice merateľnej vzdialenosti radaru až do momentu, kedy sa lietadlo dostáva do fázy prechodového oblúka, nie je potrebné zameriavať presnú výšku s prílišnou presnosťou. Keďže pri zostupe dochádza k rýchlej vertikálnej zmene výšky nad terénom, bude až do výšky začiatku prechodového oblúka postačovať presnosť zhruba na 50 centimetrov.

Vo výške vstupu do prechodového oblúka, čiže vo vzdialenosti okolo troch až šiestich metrov nad zemou, by sa mala táto presnosť postupne zvyšovať. Pre túto fázu by bolo vhodné dosiahnuť presnosť v maximálne pár desiatkach centimetrov. Ideálna presnosť v danom rozsahu by mohla dosahovať 5 až 25 centimetrov s postupným zdokonaľovaním určítosti.

Hlavnou z požiadaviek pri zameriavaní je presnosť v tesnej blízkosti zeme, kedy je potrebné dostatočne precízne rozlíšiť vertikálnu výškovú zmenu nad terénom v jednotkách centimetrov, pretože táto vzdialenosť je rozhodujúca pre vykonanie čo "najhladšieho" pristátia. Vo všeobecnosti by bolo dobré docieľiť presnosť pri zameriavaní v tesnej blízkosti zeme na približne päť centimetrov, keďže chcem zhotoviť čo najlepšieho pomocníka pre fázu dosadnutia. V tejto fáze nie je z kabíny najlepší výhľad, keďže pri dosadnutí je zväčšený uhol nábehu a rozhľad pred seba znemožňuje prístrojová doska a pohľad mierne do stany môže reálnu výšku pri doprednom pohybe skresľovať.

Odozva

Čo sa týka odozvy, tá musí dosahovať čo najmenšieho oneskorenia. V ideálnom prípade by sa malo jednať o prenos danej výškovej informácie v reálnom čase. V prípade vysokej odozvy, by bola informácia o výške pilotovi interpretovaná neskoro a tým by strácal daný systém svoju výhodu.

Zameriavací uhol

Pri meraní potrebujeme eliminovať možnosť odrazov vln od trupu lietadla a taktiež od pristávacieho podvozku, ktorý prečnieva smerom k zemi. Tiež nie je ani potrebný veľmi široký lúč vln, keďže vzdialenosť, ktorú budeme zameriavať, predstavuje v podstate ťažnicu medzi trupom lietadla a zemou. Ideálne rozpätie dostačujúce pre naše využitie by teda mohol predstavovať uhol zhruba 0 až 90 stupňov.

Obstarávacie náklady

Keďže by sa malo jednať o zariadenie dostupné pre širokú škálu užívateľov v segmente letectva ultralhkého lietania, kde sa očakávajú minimálne vstupné náklady, a preto za akceptovateľnú cenu považujem cenu do výšky 500€.

Napájanie

Celý systém, by nemal presahovať jednotky ampérov. Pri bežnom použití by sa ako hlavný zdroj elektrickej energie mohla využiť už existujúca palubná sieť, ktorá dokáže poskytovať napätie 12 voltov, prípadne štandardná napájacia USB zásuvka s napätím 5 voltov.

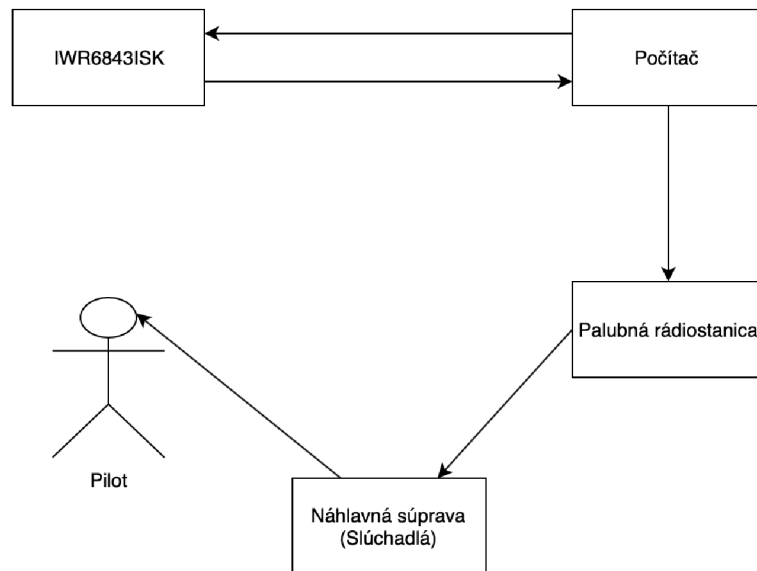
Kapitola 5

Implementácia riešenia

V tejto kapitole sú popísané informácie ohľadne implementácie navrhovaného riešenia. Táto kapitola vychádza z všeobecných požiadaviek, ktoré boli stanovené v kapitole 4.2. Zároveň zohľadňuje aj technické a funkčné požiadavky, ktoré sú stanovené v časti ???. Sú v nej popísané náležitosti o schéme systému, jej prvkoch a ich význame. Následne v ďalších častiach pojednáva o spracovaní dát, generovaní zvukového signálu ďalej o počítačovej kalibrácii o tom ako a prečo musí byť vykonávaná. Ale taktiež hovorí o nutnej konfigurácii modulu milimetrových vĺn, pre správne generovanie dát. Taktiež sú v nej popísané postupy overenia navrhnutého systému, a zhodnotenie výsledkov aké sa podarilo dosiahnuť. Záverom načrtáva aj možnosti úprav a vylepšení, ktoré by bolo do budúcnosti vhodné realizovať.

5.1 Hlavné komponenty a ich schéma

Navrhnutý systém je zložený zo štyroch hlavných celkov tak, ako to zobrazuje bloková schéma na obrázku číslo 5.1.



Obr. 5.1: Bloková schéma

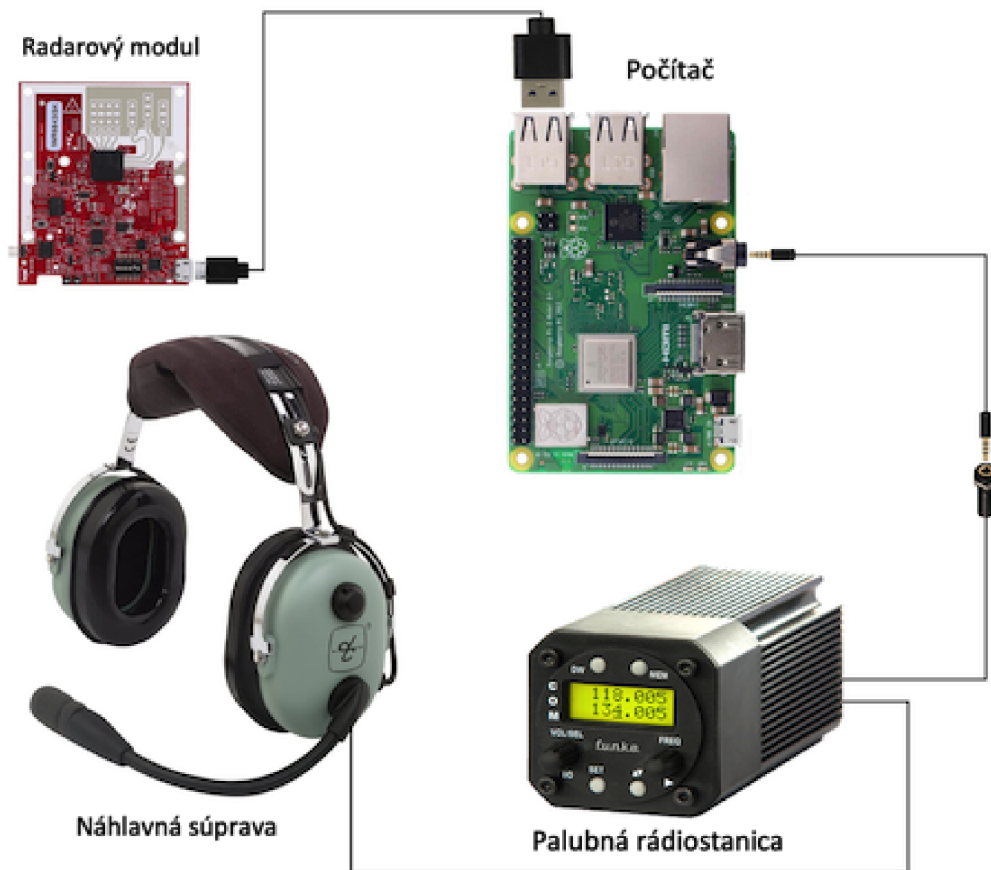
Dva základné komponenty sú nainštalované v každom lietadle. Prvým z nich je lietadlová palubná rádiostanica, ktorá zabezpečuje komunikáciu medzi pilotom a pozemnou stanicou, posádkou lietadla medzi sebou, ale taktiež umožňuje prehrávať rôzne zvukové tóny, varovania a hlásenia palubných systémov, ktoré sú pripojené k jej externému zvukovému vstupu. Túto skutočnosť vieme vhodne využiť, keďže bez akéhokoľvek iného zariadenia vieme prehrávať zvuky signalizácie výšky priamo pilotovi, cez náhlavnú súpravu (slúchadlá), ktoré sú ďalším zariadením a základným komponentom danej sústavy.

Následne nevrhnutý systém pozostáva ďalších dvoch hlavných komponentov, ktorými sú počítač a inteligentný modul milimetrových vln IWR6843ISK. Ako počítač v tejto sústave bol zvolený jednodoskový miniatúrny počítač od spoločnosti Raspberry Pi Foundation. Model 3b+ so 64-bitovým štvor-jadrovým procesorom pracujúcim na 1.4GHz frekvencii, predstavuje dostatočný výpočtový výkon pre spracovanie údajov v reálnom čase. Medzi jeho výhody patrí taktiež osadenie univerzálnou sériovou zbernicou s podporou UART aj nízky napájací príkon maximálne 2,5 ampéra pri napätí 5 voltov. Tento počítač má tiež priamo osadený audio jack konektor, ktorý predstavuje ideálnu voľbu pre audio výstup. Obrovskou výhodou je ďalej operačný systém založený na Linuxovom jadre. V neposlednom rade jednou z podstatných výhod sú aj miniatúrne rozmery a hmotnosť, nakoľko tento počítač musí byť osadený na palube lietadla. Ďalšou ale ani z ďaleka nie poslednou z radu výhod je jeho nízka spotreba elektrickej energie a teda možnosťou napájania priamo z elektrickej siete lietadla. Tiež cena je veľmi prívetivá a pohybuje sa okolo hodnoty 50 eur.

Tento počítač tvorí nosnú časť celej sústavy a jeho funkciou je vytvoriť rozhranie medzi radarovým modulom a rádiostanicou, kedy jeho hlavnou úlohou je prijímať vygenerované dáta bodových mračien radaru, spracovať a vyhodnotiť ich tak, aby poskytovali údaje o zameranej výške. Následne túto výškovú informáciu poupraviť o počiatočnú kalibráciu vysvetlenú v bode 5.3, ktorou sa docieli skutočná výška lietadla nad terénom, ktorá sa v ďalšom kroku transformuje na zvuk čo popisuje časť 5.2, ktorý je prostredníctvom zvukového výstupu nazdieľaný do palubnej rádiostanice a tým sa dostáva informácia o výške nad terénom vďaka tónovej reprezentácii až do náhlavnej súpravy pilota. Tento počítač je taktiež využívaný aj k nakonfigurovaniu radarového zariadenia.

Inteligentné radarové zariadenie IWR6843ISK predstavuje radarovú technológiu novej generácie. Po správnom nakonfigurovaní popísanom v časti 5.5, ktoré prebieha cez univerzálnu dátovú zbernicu určenú k prijímaniu a odosielaniu dát, generuje zhluky bodov - bodové mračná, ktoré reprezentujú zameriavané objekty. V danom prípade reprezentuje plochu zemského povrchu, ktorú zameriava pri priblížení a pristátí. Tieto dáta sú následne po dátovej zbernici zasielané späť počítaču, k ich ďalšiemu spracovaniu.

Spracovanie dát, ich prevod na výšku s následnou korekciou o kalibračnú hodnotu musí prebiehať paralelne s generovaním výstupných tónov. O tom, ako je to zabezpečené pojednáva časť 5.4. Nasledujúca schéma zobrazená na snímke číslo 5.6 popisuje zapojenie jednotlivých komponentov.



Obr. 5.2: Schéma zapojenia komponentov

5.2 Generovanie zvukového signálu

Na generovanie zvuku je použitá knižnica *pyaudio*¹. Jedná sa o vstupno-výstupnú zvukovú knižnicu, fungujúcu na rôznych platformách operačných systémov. Časť funkcie priamo určenej na vygenerovanie zvukového tónu bola použitá a upravená, tak aby vyhovovala pre dané použitie z webu².

Pri zameriavaní je potrebné transformovať informáciu o aktuálnej výške a jej zmene s vhodným rozložením, ktoré sa aplikuje ako časová jednotka, na ktorú prestaneme generovať zvukový tón. Počas prvotného testovania tohoto modulu bolo zvolené lineárne rozloženie. To nesie obrovskú výhodu v presnosti a výsledný tón exaktne korešponduje k danej výške nad terénom. Prvé testovanie však prinieslo aj spätnú väzbu so záverom, že toto rozloženie nie je vôbec vhodné.

Keďže tón postupne lineárne naberá na intenzite, nevieme až tak dokonalo rozlíšiť a posúdiť fázu kritického približovania sa k zemi. Tento problém je možné riešiť nelineárnym rozložením intenzity zvukového tónu.

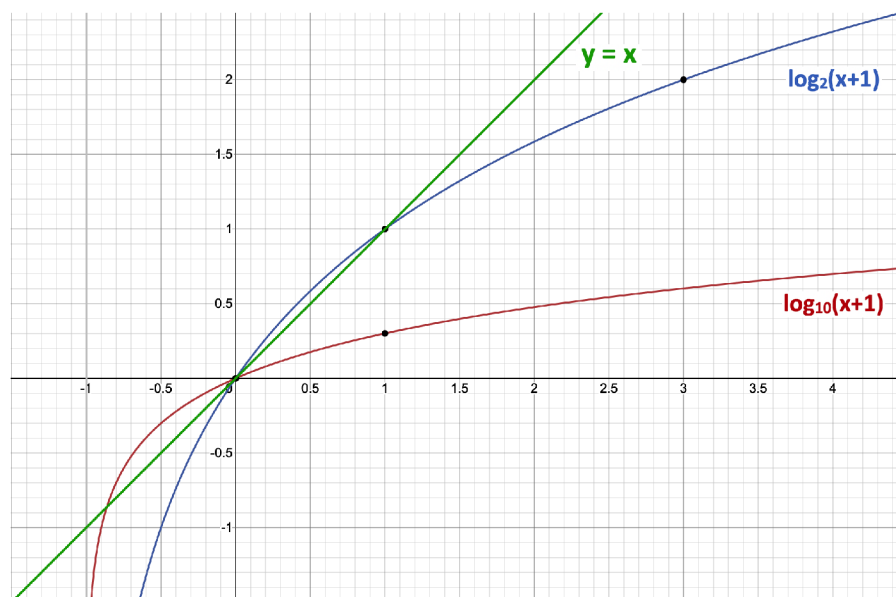
V ďalšej fáze testovania bola zvolená logaritmická funkcia pri základe dvoch. Táto funkcia poskytuje relatívne vhodné rozloženie, keďže na jej základe je možné doceliť dostatočne expandujúceho efektu prírastku intenzity tónu s blížiacim sa zemským povrchom. Je však

¹<https://people.csail.mit.edu/hubert/pyaudio/>

²<https://stackoverflow.com/a/33880295/5150211>

potrebné aplikovať posunutie, a to preto, že logaritmická funkcia pri základe dva sa na definičnom obore blíži k nule a je potrebné generovať vždy nezáporné hodnoty aj pri nulovej vzdialenosti lietadla "nad" terénom, to znamená aj v dobe dotyku so zemou, pretože by sme dostali nedefinovanú výstupnú hodnotu. Ďalšími testami som dospel k záveru, že sa interpretácia vzdialenosti výrazne zlepšila a vo fáze prechodového oblúka zintenzívnila na vyhovujúcu úroveň pre rozpoznanie a dostatočnú výstrahu pre pilota, avšak posledná fáza tesnej výdrže nad zemou nie je ešte dostatočne rozlíšiteľná, kvôli príliš klesajúcej tendencii odpovedajúcej takmer lineárnemu rozloženiu.

To vedie k jednoznačnému úsudku, že potrebujeme logaritmickú funkciu pri väčšom základe. Volím teda logaritmus pri základe desiatich. To zabezpečuje to, že je generovaný zvuk ešte s výraznejšou zmenou intenzity pri zmenšujúcej sa vzdialenosti, ale zato miernejším rozložením väčších hodnôt. Rovnako, ako u predošlej logaritmickej funkcie, aj tu je nutné vykonať posunutie tak, ako predtým. Na nasledujúcom obrázku číslo 5.3 je možné vidieť rozdiel v generovaných hodnotách najskôr pri lineárnem rozložení $y = x$ a ďalej logaritmickom rozložení pri základe dvoch a následne pri základe desať, oboch s kladným posunutím o jedna.



Obr. 5.3: Porovnanie priebehu funkcií

5.3 Počiatková kalibrácia

To, že môže byť modul osadený na lietadlá rôzneho typu, predstavuje potrebu vykonať pri spustení počiatkovú kalibráciu, ktorá ma za úlohu určiť reálnu výšku umiestnenia radaru nad povrchom zeme. Ako je to jasne vidieť z obrázka 5.4, radarový modul je osadený na spodnej časti trupu v istej výške nad zemou, aj keď podvozok lietadla sa pevne dotýka zeme. V reálnom meraní výšky je teda potreba vykonať korekciu o túto vzdialenosť, ktorá sa navyše môže líšiť od typu lietadla prípadne umiestnenia modulu. Vďaka tejto kalibrácii je tiež možné zvoliť ľubovoľné umiestnenie radarového modulu teoreticky v akejkoľvek časti napríklad na krídle dokonca aj u hornoplošníkov, avšak takéto umiestnenie je vhodné

riadne zvážiť, aby nemohlo dochádzať k odrazom vln od pevných častí lietadla a následnej nefunkčnosti resp. nepresnosti celého systému.



Obr. 5.4: Osadenie modulu na trupe lietadla - pohľad odzadu

Pri kalibrácii sa očakáva to, že už je zariadenie osadené na lietadle v potrebnej polohe a taktiež to, že je lietadlo aktuálne na zemi. Účelom tejto počiatočnej kalibrácie je vykonať opakované zameranie vzdialenosti, ktorá je následne využitá pre kompenzáciu výškového rozdielu medzi vzdialenosťou radaru od pevného povrchu a skutočnej vzdialenosti pristávacieho podvozku nad terénom. Táto kalibrácia sa vykonáva vždy pri spustení skriptu, kedy sa vykoná opakované zameranie vzdialenosti medzi modulom a terénom, ktorá najskôr alokuje priestor potrebný pre daný počet vzoriek na určenie presnej blízkosti terénu. Najskôr bola zvolená hodnota prvých troch vzoriek. Toto riešenie však neposkytuje dostatočnú presnosť, pretože meranie len na tri vzorky občas obsahuje väčšiu chybovosť, a keďže som ako ideálnu chybovosť DIST_EPS zvolil vzdialenosť troch centimetrov je potrebné nasnímať väčší počet jednotlivých vzoriek. Ďalšie využitie až desiatich vzoriek prinieslo požadované zlepšenie, avšak prinieslo aj výraznú časovú náročnosť. Následne zvolená hodnota piatich vzoriek zabezpečuje ideálny kompromis medzi dostatočnou presnosťou a časovou náročnosťou výpočtu kalibračnej hodnoty. Vo všeobecnosti môžeme popísať výpočet kalibrovannej hodnoty nasledujúcim pseudokódom:

```
Nech dist je pole vzoriek;  
N je pocet vzoriek;  
DIST_EPS je velkost zvolenej odchylky;
```

```

hlasy = [0.1, 0.2, ... 0.N] <- tie predstavuju .N zmien na indexe, teda 0
s indexom 1 az N
cyklus x = 1 az N {
  cyklus y = 1 az N {
    ak absolutna_hodnota(dist[x] - dist[y]) <= DIST_EPS {
      hlasy[x] += 1
    }
  }
}
}

vzdialenost = dist[index_maximlnej_hodnoty(hlasy)]

```

Exaktne prebieha výpočet kalibrovanej vzdialenosti na základe hlasovania, a to tak, že pre každú vzorku sa vypočíta pole absolútnych rozdielov voči všetkým vzorkám (vrátane seba samej, a teda každá vzorka musí mať minimálne jeden hlas). Vypočítané absolútne hodnoty v poli sú porovnané s konštantou `DIST_EPS`, ktorá reprezentuje maximálny rozdiel na považovanie hodnôt za rovnaké. Ak je absolútny rozdiel menší alebo rovný ako konštanta `DIST_EPS`, hodnota je zamenená za jednotku, inak za nulu (teda pole rozdielov sa pretransformuje podľa vzorca "vzdialenost <= DIST_EPS"). Potom suma hodnôt tohoto pola reprezentuje počet hodnôt, ktoré sú podobné vzdialenosti, pre ktorú bolo pole počítané. Výsledkom je pole hlasov, z ktorého sa vyberie index s najvyššou hodnotu a vybraný index sa použije na indexovanie do pôvodného pola vzdialeností. A teda kalibrácia využije tú hodnotu, ktorá sa objavuje najčastejšie vo vzorkách s maximálnou hodnotou odchýlky `DIST_EPS`, teda mnou preddefinovanej hodnoty troch centimetrov.

Vďaka tejto kalibrácii môže byť modul osadený do rôznych typov lietadiel s odlišnou výškou podvozku, respektíve na odlišné miesta upevnenia na lietadle s rôznou polohou voči zemi. Toto riešenie prináša aj jednu nutnú zákonitosť, ktorou je potreba vykonať počiatočné spustenie aplikácie v ustálenej polohe nad súvisle rovným povrchom. Nie je teda možné vykonať kalibráciu s lietadlom napríklad vo vysokej tráve, ktorá by mohla negatívne ovplyvniť počiatočné stanovenie výšky, a potom sa presunúť na pristávaciu dráhu s nízkym porastom. V takomto prípade systém bude síce stále funkčný, avšak mimoriadne nepresný, preto sa takejto ovplyvnenej kalibrácii treba vyhnúť.

5.4 Paralelné spracovanie dát

Keďže je potreba spracovania dát, ktoré sú generované v reálnom čase, je nutné zabezpečiť vzájomné vylúčenie prístupu ku generovaným hodnotám medzi funkciou načítania a spracovania dát a funkciou generujúcou zvukové signály. Najskôr bol zvolený modul *threading*³, ktorý vytvára rozhranie vlákien vysokej úrovne. Použitý modul síce zabezpečuje vhodné prostredie pre vylúčenie vzájomného prístupu k dátam, avšak pre synchronizáciu vykonávania kódu v jednotlivých vláknach využíva globálny zámok Global Interpreter Lock (GIL) tak, že je v jednom okamihu umožnené vykonávanie kódu maximálne z jedného vlákna zároveň, aj keď je daný program spustený na viacjadrovom procesore. Toto aplikačné použitie však pre danú aplikáciu predstavuje obrovskú nevýhodu, keďže to má za následok výrazne spomalenie výpočtu aktuálnej vzdialenosti a jej zvukovej reprezentácie. Systém

³<https://docs.python.org/3/library/threading.html#module-threading>

kvôli tomuto spomaleniu priniesol výrazné oneskorenie a nebol schopný poskytovať pilotovi informáciu o výške v reálnom čase, ale až s výrazným oneskorením približne 1 až 2 sekúnd. Pre výslednú aplikáciu bol teda nepoužiteľný. Následne som tento problém vyriešil použitím modulu *multiprocessing*⁴, ktorý pracuje na podobnom princípe ako vlákňovanie. Tento balík však ponúka lokálnu aj vzdialenú súbežnosť, čo umožňuje plne využiť viac jadier súčasne. Pri generovaní dát sa aplikuje funkcia *Lock*, ktorou sa vytvorí zámok, následne je pre kód spracovania zvuku vygenerovaný nový proces, ktorý zamedzí vzájomnému prístupu, a teda k nekonzistencii dát. Pomocou toho prebieha výpočet vzdialenosti a generovanie zvukového signálu paralelne a zabezpečuje tak spätnú väzbu v reálnom čase bez akéhokoľvek citelného časového oneskorenia.

5.5 Konfiguráciou modulu

Platform	xWR68xx
SDK version (*)	3.5
Antenna Config (Azimuth Res - deg)	4Rx,2Tx(15 deg)
Desirable Configuration	Best Range Resolution
Frequency Band (GHz)	60-64
Calibration Data Save/Restore	Save, 0x1F0000
Frame Rate (fps)	20
Range Resolution (m)	0.041
Maximum Unambiguous Range (m)	6.3
Maximum Radial Velocity (m/s)	5.78
Radial Velocity Resolution (m/s)	0.73
Scatter Plot	✓
Range Profile	✓
Statistics	✓
Desired Radar Cross Section (sq. m)	0.5

Tabuľka 5.1: Parametre konfigurácie

Pri tejto konfigurácii modulu dosahujú výstupné dáta požadovanej presnosti, nakoľko je nastavené najlepšie možné rozlíšenie rozsahu. Maximálny jednoznačný rozsah s požadovanou presnosťou sa síce mierne zmenšil na hodnotu 6,3 metra, to však stále vyhovuje zadanej špecifikácii, keďže chceme dosahovať maximálnej možnej presnosti do vzdialenosti cirka šiestich metrov. Maximálna rýchlosť radiálnej zmeny je nastavená na hodnotu 5,78 metra za sekundu, čomu pri danom nastavení odpovedá maximálne rozlíšenie radiálnej rýchlosti do 0.73 metra za sekundu. Toto nastavenie bolo zvolené preto, že nie je predpoklad a ani dôvod,

⁴<https://docs.python.org/3/library/multiprocessing.html>

aby sa lietadlo malo v poslednej finálnej fáze priblíženia pohybovať väčšou vertikálnou rýchlosťou. Veľkosť plochy zameriavanej plochy pred radarom bola zvolená na 0,5 metra štvorcového. Táto konfigurácia tak prináša maximálny dosah až do zhruba 49,5 metrov, čo je pre dané použitie bohato dostačujúce. Ďalšie experimentálne nastavovanie je popísané v prílohe B. To, ako je treba použiť *mmWave Demo Visualizer* na konfiguráciu modulu IWR6843ISK pre generovanie správnych bodových mračien je popísané v prílohe C. Taktiež sa v rovnakej kapitole nachádza aj popis o tom ako ho následne používať.

5.6 Použité nástroje a technológie

Načítanie výstupných dát, ktoré inteligentný modul IWR6843ISK generuje, prebieha zo vstupu sériovej zbernice pomocou knižnice *serial*⁵, kedy sú do vyrovnávacej pamäte načítavané údaje z portu s názvom *mmWave:Auxillary Data port* s nastavením prenosovej rýchlosti na 921600 bps. Tieto načítané údaje sú následne poskytnuté parsovej funkcii binárnych dát *parser_one_packet* vyvinutej spoločnosťou Texas Instruments, ktorá je obsiahnutá v skripte *parser_mmw_demo.py* s voľnou distribúciou. Táto funkcia následne vracia naformátované údaje, ktoré obsahujú informácie o zameraných bodoch, ich súradniciach, vzdialenostiach, azimute, intenzite signálu, pomere signálu k šumu a iných.

Následne prebieha spracovanie dát takým spôsobom, že je vždy prvý cieľ odstránený, keďže sa v danom nastavení jedná o šumový bod, ktorý by mohol výsledné meranie negatívne ovplyvniť. Následne sa porovnáva sila signálu pri jednotlivých zameraných bodoch. Ako to ukázal model testovania v demo vizualizéri, tak hodnota s najsilnejším signálom predstavuje nami zameriavanú vzdialenosť na ťažnici medzi modulom a povrchom. Tento bod je teda prehlásený za nameranú priamu vzdialenosť medzi radarom a cieľom, ktorá však ešte nepredstavuje reálnu vzdialenosť medzi lietadlom a terénom. Túto hodnotu je ešte potrebné upraviť o kalibračnú hodnotu a stanoviť tak výškový rozdiel.

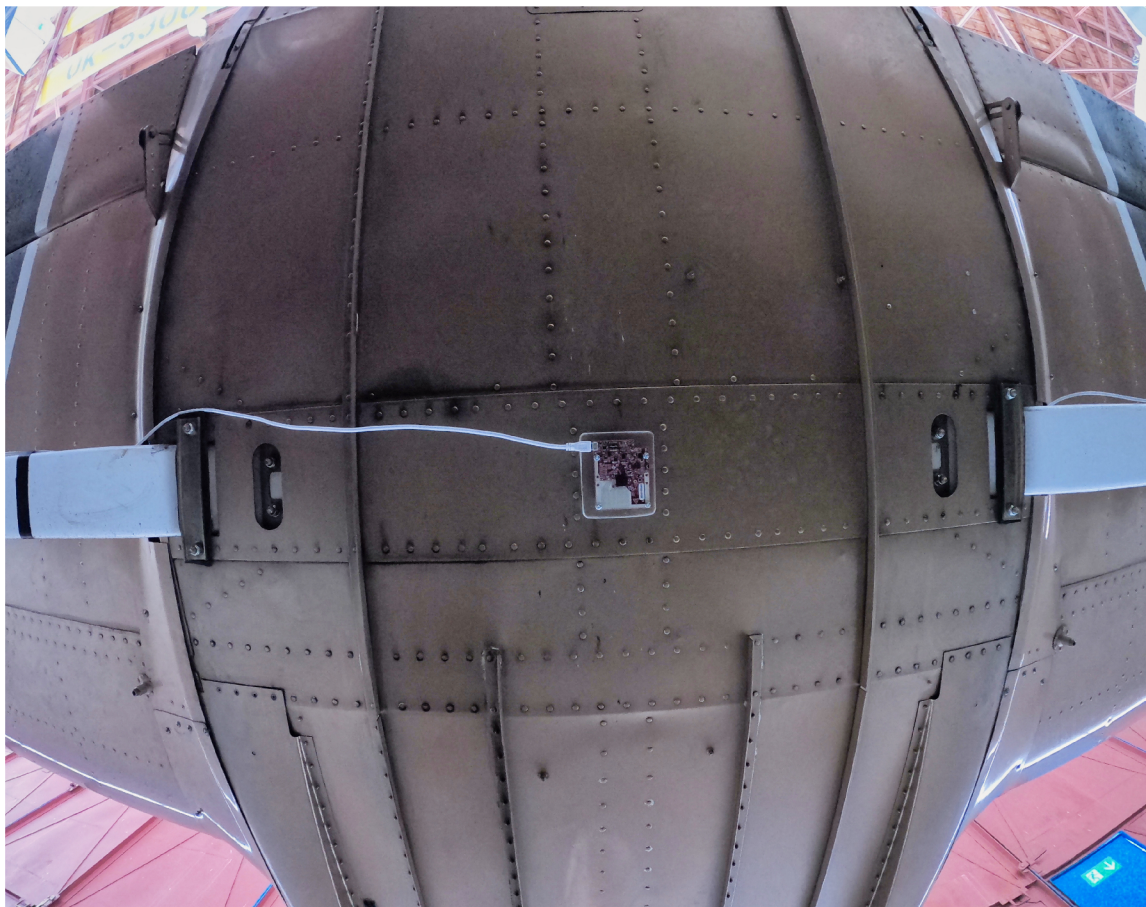
Občas sa tiež môže vyskytnúť prípad, kedy sa v danom snímku nezamerá žiaden bod. Tento prípad je jednoducho ošetrený tak, že daný snímok ignoruje a pokúšame sa načítať body z ďalšieho snímku.

Ak sa hodnotu vzdialenosti podarilo úspešne zmerať, táto hodnota je navrátená, uvoľní sa miesto vo vyrovnávacej pamäti veľkosti odpovedajúcej načítaných dát obsahujúcich dané snímky a opätovne sa spracovávajú ďalšie prichádzajúce dáta.

5.7 Overenie funkčnosti a dosiahnuté výsledky

Modul milimetrového radaru je osadený na kuse plnej polykarbonátovej dosky na zabezpečenie nevodivého spojenia pomocou skrutiek a mostíkov priložených v balení modulu. Micro-USB kábel je vedený spodnou časťou trupu do kabíny lietadla v priestore okolo hlavnej podvozkovej nohy tak, ako je to vyobrazené na obrázku číslo 5.5 a 5.4. Toto riešenie bolo použité pre vylúčenie problémov s napájaním a komunikáciou po dátovej zbernici, keďže pri použití príliš dlhého kábla (5 metrov) nebolo modul vôbec možné pripojiť. Následne pri kratšom kábli v dĺžke 3 metrov bolo napájanie dostatočné, avšak občas stále dochádzalo k neidentifikovanému prerušeniu a výpadku spojenia medzi modulom IWR6843ISK a počítačom osadeným v lietadle. Vďaka tomuto riešeniu bolo možné použiť len kábel dĺžky 2 metre. Ako možné riešenie by bolo vhodné zvoliť aj kvalitnejší kábel s hrubším tienením, ktorý som však nemal k dispozícii pre otestovanie.

⁵<https://pyserial.readthedocs.io/en/latest/index.html>



Obr. 5.5: Osadenie modulu na trupe lietadla - pohľad zdola

S osadeným modulom bolo vykonané opätovné testovanie, ktoré vykonávali piloti - inštruktori, počas ktorého sa opätovne realizovalo priblíženie a pristátie na dráhu a nimi navrhované postrehy boli zohľadnené a aplikované na výsledný systém. Týmito testami sa dospelo aj k záverom, ako treba pracovať s krivkou rozloženia zvukového signálu od počiatočného lineárneho až po finálne logaritmické rozloženie pri základe desiatich.

Následne sa testoval systém aj pre opravu vadných pristátí, kedy v tesnej blízkosti zeme zase začali mierne stúpať tak, aby sa overila správna funkcia systému a jeho prípadného využitia aj v takejto situácii takzvaného vyplávania, ktorá môže občas pri pristátí nastať. Nasledujúci obrázok číslo 5.6 znázorňuje schému zariadení tak, ako bola použitá pri testovaní. Pri ich vykonávaní bol použitý bežný prenosný počítač.



Obr. 5.6: Schéma použitá počas testovania

Z hodnotení pilotov taktiež vyplynuli ďalšie dve požiadavky na systém, ktoré však v aktuálnej podobe ešte nie sú zapracované a to:

1. aplikácia plného tónu v konečnej fáze,
2. indikácie nástupu do prechodového oblúka.

Aplikáciu plného tónu v prvom bode je myslený neprerušovaný zvuk, keďže aktuálna implementácia obsahuje v tesnej blízkosti lén tón s minimálnym prerušením, t.j. ide o razantné pípanie blížiac sa takmer k plnému tónu. Pri letoch však taktiež zhodnotili, že aj aktuálna verzia je dostatočne zrozumiteľná a jedná sa skôr o návrh na zlepšenie pre neskúsených žiakov, aby bola informácia stopercentná. Z tohto vyplynul aj druhý bod, kedy inštruktori navrhli do budúca zapracovať aj informáciu o výške, kedy lietadlo prechádza z fázy klesania pri priblížení do prechodového oblúka a je potrebné vykonať zmenu v zostupovom uhle, aby v tejto fáze taktiež dostal pilot lepšiu spätnú odozvu o danej potrebe vykonať zásah do riadenia.

Vo všeobecnosti však piloti, ktorí dané zariadenie testovali dospeli k záveru, že zariadenie tohoto typu vie a môže byť nápomocné, najmä u neskúsených pilotov, ale taktiež aj u lietadiel s obzvlášť zlým výhľadom z kabíny lietadla.

Z pohľadu stanovených cieľov a technických charakteristík sa podarilo vytvoriť zariadenie, ktoré by bolo na základe milimetrového radaru schopné určiť výšku lietadla nad terénom, túto informáciu vhodne previesť na zvukový signál ktorý je v reálnom čase prehrávaný pilotovi, ktorý na základe neho vie odhadnúť aktuálnu výškovú polohu nad terénom. Taktiež je výsledný systém nenáročný na napájanie a jeho obstarávacie náklady sa pohybujú

niekde na úrovni 200€ respektíve ceny do 250€ záležiac od aktuálnej ceny komponentov, kabeláže a potrebného príslušenstva na prípadnú montáž.

5.8 Navrhované úpravy a vylepšenia

Bolo by bolo vhodné zapracovať vylepšenia získané postrehmi pilotov, ktoré boli navrhované na základe vykonania testov v reálnom prostredí. Navrhujem zapracovať rozoznávanie tesného priblíženia, kedy by vo výške približne desať centimetrov medzi pristávacím podvozkom a terénom znel plný neprerušovaný tón. Taktiež prípadne dobudovať systém, ktorý by rozpoznával dosiahnutú výšku počiatku prechodového oblúka. Toto riešenie by však muselo byť komplexnejšie, keďže daná výška závisí od viacerých faktorov, ako napríklad od daného typu lietadla, jeho hmotnosti, doprednej rýchlosti a iných.

Taktiež by stálo za úvahu rozšíriť tohoto pomocníka o bezpečnostné funkcie, ktoré by na základe pozdĺžneho a priečneho sklonu vedeli určiť príliš vysoký uhol, kedy by pokračovaním daného manévru mohlo dôjsť až k stretu vrtule, prípadne krídla u dolnoplošníkov so zemou.

Zároveň si viem toto zariadenie predstaviť aj na určovanie výšky a potrebného sklonu lietadla pri jeho štarte, rozlete a následnom stúpaní, kedy by vo fáze výdrže indikoval ideálnu výšku a následne optimálny uhol stúpania.

Kapitola 6

Záver

Cieľom práce bolo otestovanie vhodnosti použitia inteligentného milimetrového radarového modulu na jeho aplikáciu ako pristávacieho radarového zariadenia, ktorý je v kombinácii s počítačom použiteľný na zvukovú interpretáciu výšky nad terénom.

Otestovaním v reálnom použití pri pristávaní sa overilo, že použitie takéhoto modulu pri pristávaní ultralightných lietadiel môže a vie byť pilotovi nápomocné, na základe čoho vieme skonštatovať, že zámer bol splnený.

Literatúra bola naštudovaná a vhodná, obsahujúca náležitosti o tom, čo také ultralightné lietadlo vôbec je, ako je s takýmto lietadlom vykonávaný manéver priblíženia a pristávania vrátane presných výškových postupov, taktiež boli naštudované aktuálne využívané možnosti merania výšky pre tieto lietadlá. Následne podrobne preštudované radary, to ako pracujú radarové systémy, aké majú možnosti použitia aj podrobné postupy, ako radary s milimetrovou vlnou vykonávajú meranie vzdialenosti.

Bola navrhnutá aplikácia inteligentného radaru milimetrových vln IWR6843ISK od spoločnosti Texas Instruments v spojení s prenosným počítačom pre zamieravanie výšky lietadla nad terénom vo fáze pristávania s generovaním zvukových signálov interpretujúcich výšku lietadla nad terénom pre pilota na otestovanie použiteľnosti takéhoto zariadenia v segmente ultralightných lietadiel, tak aby sa určilo, či je vôbec takéto radarové zariadenie vhodné pre dané použitie.

Po zhodnotení všetkých vlastností bolo navrhnuté použitie radarového zariadenia milimetrových vln, jeho správna konfigurácia a následné spracovávanie výstupných dát, prevedených do zvukovej podoby, ktorá je po pripojení a osadení do lietadla schopná pilotovi priamo do náhlavnej súpravy zvukovo indikovať výšku lietadla nad pristávacou dráhou.

Ako sa letovými testami preukázalo, testovaní respondenti - piloti, zhodnotili, že zariadenie takéhoto typu vie byť v danej fáze veľmi nápomocné. Predtým, ako by bolo toto zariadenie zaradené do produkčnej verzie, musia byť ešte vykonané niektoré navrhované úpravy, avšak aplikácia takéhoto zariadenia v praxi je možná.

Práca ma naučila nové znalosti z oblasti radarov a radarového zamieravania, a taktiež aj ich použiteľnosti v praxi. Práca s týmto typom radaru a v danej oblasti ma veľmi zaujala a chcel by som v nej do budúcnosti ešte pokračovať. Chcel by som ďalej pokračovať na komplexnom zariadení, ktoré by bolo založené na radare s milimetrovými vlnami, bolo by jednoducho použiteľné na lietadle aj pre bežného laika, ktorý by k jeho použitiu vyžadoval iba minimálne zručnosti práce s počítačom.

Literatúra

- [1] VYKONÁVACIE NARIADENIE KOMISIE (EÚ) č. 923/2012 z 26. septembra 2012, ktorým sa stanovujú spoločné pravidlá lietania a prevádzkové ustanovenia týkajúce sa služieb a postupov v letovej prevádzke a ktorým sa mení a dopĺňa vykonávacie nariadenie (EÚ) č. 1035/2011 a nariadenia (ES) č. 1265/2007, (ES) č. 1794/2006, (ES) č. 730/2006, (ES) č. 1033/2006 a (EÚ) č. 255/2010, 13. októbra 2012. DOI: 10.3000/19770790.L_2012.281.SLK. ISSN 1977-0790. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/HTML/?uri=OJ:L:2012:281:FULL&from=SK>.
- [2] *Air Data Computer (ADC)* [online]. SKYbrary, 1. apríla 2021 [cit. 2021-05-29]. Dostupné z: [https://www.skybrary.aero/index.php/Air_Data_Computer_\(ADC\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Air_Data_Computer_(ADC)).
- [3] AGRICULTURE, D. of a FOOD. *How RADAR works* [online]. Government of Western Australia, 17. marca 2020 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.agric.wa.gov.au/sites/gateway/files/How%20radar%20works%20infosheet.pdf>.
- [4] ATWELL, C. *What is a radar sensor?* [online]. 3 Speen Street, Suite 300, Framingham: Fierce Electronics, 01. marca 2021 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.fierceelectronics.com/sensors/what-a-radar-sensor>.
- [5] BHATTACHARJEE, S. *Marine Radars and Their Use in the Shipping Industry* [online]. Marine Insight, 08. januára 2021 [cit. 2021-05-22]. Dostupné z: <https://www.marineinsight.com/marine-navigation/marine-radars-and-their-use-in-the-shipping-industry/>.
- [6] BRAIN, M. *How Radar Works* [online]. HowStuffWorks, 2021 [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <https://science.howstuffworks.com/radar.htm>.
- [7] BROWNE, J. *Radar Grows from Military Tool to Everyday Use* [online]. Microwaves & RF, 18. augusta 2015 [cit. 2021-05-29]. Dostupné z: <https://www.mwrf.com/technologies/systems/article/21846409/radar-grows-from-military-tool-to-everyday-use>.
- [8] COHEN, J. *How RADARs work* [online]. Think Autonomous - Medium, 09. júla 2020 [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://medium.com/think-autonomous/how-radars-work-1eb523893d62>.
- [9] COUNCIL, N. R. *Weather Radar Technology Beyond NEXRAD*. Washington, DC: The National Academies Press, 2002. ISBN 978-0-309-08466-6. Dostupné z: <https://www.nap.edu/catalog/10394/weather-radar-technology-beyond-nexrad>.
- [10] FENG, J., SENGUPTA, A. a SIYANG, C. *MmFall: Fall Detection Using 4-D mmWave Radar and a Hybrid Variational RNN AutoEncoder* [online]. IEEE Xplore, 23.

- decembra 2020 [cit. 2021-06-01]. DOI: 10.1109/TASE.2020.3042158. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9305931>.
- [11] FENG1, Z., FANG1, Z., WEI1, Z., CHEN, X., QUAN, Z. et al. *Joint Radar and Communication: A Survey* [online]. ResearchGate, január 2020 [cit. 2021-04-14]. DOI: 10.23919/JCC.2020.01.001. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/349704537_Joint_Radar_and_Communication_A_Survey.
- [12] FERREIRA, R., MARINHO, M., LIU, K., COSTA, J. P. Javidi da, AMARAL, A. et al. Improved landing radio altimeter for unmanned aerial vehicles based on an antenna array. In: Október 2012, s. 105–113. DOI: 10.1109/ICUMT.2012.6459648. ISBN 978-1-4673-2016-0.
- [13] IOVESCU, C. a RAO, S. *The fundamentals of millimeter wave radar sensors* [online]. Texas Instruments, júl 2020 [cit. 2021-06-01]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/wp/spyy005a/spyy005a.pdf?ts=1626358208820&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.
- [14] JAIN, P. *Classifications of RADAR* [online]. Engineers Garage, 23. februára 2012 [cit. 2021-05-22]. Dostupné z: <https://www.engineersgarage.com/classification-of-radars/>.
- [15] KELLER, L. a AL. et. *Učebnice pilota 2013 : pro žáky a piloty všech druhů letounů a sportovních létajících zařízení, provozujících létání jako svou zájmovou činnost*. Cheb, Česká republika: Svět křídel, 2013. ISBN 978-80-87567-26-5.
- [16] KNIGHT, J. The Glass Cockpit. *Computer*. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society. Október 2007, zv. 40, č. 10, s. 92–95. DOI: 10.1109/MC.2007.365. ISSN 1558-0814.
- [17] KRITZINGER, D. Altitude. In: KRITZINGER, D., ed. *Aircraft System Safety*. Woodhead Publishing, 2017. ISBN 978-0-08-100889-8.
- [18] KUMAR, C. *User's Guide 60GHz mmWave Sensor EVMs* [online]. Texas Instruments, október 2020 [cit. 2021-06-02]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ug/swru546d/swru546d.pdf?ts=1627435822489&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Ftool%252FAWR6843A0PEVM.
- [19] MCKINNEY, J. *Chapter III: What is radar?* [online]. IEEE Xplore, 18. septembra 2006 [cit. 2021-04-27]. DOI: 10.1109/MAES.2006.1703268. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1703268>.
- [20] MEIN, S. a NEBEL, S. *The Use of Radar in the Study of Animal Migration* [online]. The nature education, 2012 [cit. 2021-05-29]. Dostupné z: <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/the-use-of-radar-in-the-study-84825627/>.
- [21] MICU, A. *How does radar work?* [online]. ZME Science, 17. septembra 2018 [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://www.zmescience.com/science/how-does-radar-work/>.
- [22] PARKER, M. Chapter 20 - Automotive Radar With contributions by Ben Esposito. In: PARKER, M., ed. *Digital Signal Processing 101 (Second Edition)*. Second Edition. Newnes, 2017, s. 253–276. DOI: 10.1016/B978-0-12-811453-7.00020-2. ISBN

978-0-12-811453-7. Dostupné z:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128114537000202>.

- [23] RAMSEY, D., DOWNS, E. a POBEREZNY, T. *The Complete Idiot's Guide to Sport Flying*. 30th Street Suite 1100, New York: Alpha, február 2005. 336 s. ISBN 978-1592573172.
- [24] R.J.THWAITES, ROBERTS, D., NEWBY, G. a WELSH, D. F. *Contract Number EASA.2009.C.53* [online]. Templehurst House, 48 New Street Chipping Norton, Oxfordshire: Hawk Information Services Limited, 2010 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/02%20-%20Interim%20Report%20EASA%202009%20C53%20v%202.pdf>.
- [25] R.J.THWAITES, ROBERTS, D., NEWBY, G. a WELSH, D. F. *Regulatory Options for the European Light Aircraft (ELA1)* [online]. Templehurst House, 48 New Street Chipping Norton, Oxfordshire: Hawk Information Services Limited, 24. novembra 2010 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/03%20-%20Final%20Report%2026%20Nov%2010.pdf>.
- [26] SAKHUJA, N. *MMWAVE-SDK deep dive Easy evaluation and development of mmWave systems with software development kit* [online]. Texas Instruments, 2020 [cit. 2021-06-02]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ml/slyp721/slyp721.pdf?ts=1627281498308&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Ftool%252FMMWAVE-SDK.
- [27] SKOLNIK, M. I. *Radar* [online]. Britannica, 18. novembra 2020 [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/radar>.
- [28] TRANSPORTATION, A. T. S. B. United States Department of. *Airplane flying handbook 2016*. Aviation Supplies & Academics, Inc., november 2016. 352 s. ISBN 978-1619545120.
- [29] WOODFORD, C. *Radar* [online]. Explain That Stuff, 12. marca 2021 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/radar.html>.
- [30] ZHAO, P., LU, C. X., WANG, J., CHEN, C., WANG, W. et al. MID: Tracking and Identifying People with Millimeter Wave Radar. In: *2019 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)* [online]. IEEE Xplore, 2020, s. 8 [cit. 2021-06-01]. DOI: 10.1109/DCOSS.2019.00028. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8804831>.

Príloha A

Obsah priloženého pamäťového média

Na priloženej SD karte sa nachádza:

1. Archív *ximric01.zip* obsahujúci:

- *ximric01/src/altimeter.py* Zdrojový súbor aplikácie
- *ximric01/src/xWR68xx_config.cfg* Konfiguračný súbor radaru IWR6843ISK
- *ximric01/doc/technicka_sprava.pdf* Technická správa vo formáte PDF
- *ximric01/doc/dokumentacia.md* Návod k použitiu aplikácie
- *ximric01/doc/latexSrc* Zložka obsahujúca zdrojové súbory technickej správy

Príloha B

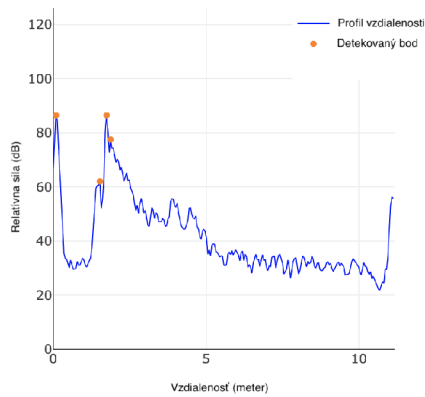
Experimentálne nastavovania radarového modulu

Prvá fáza experimentovania s konfiguráciou zariadenia prebiehala vo vnútornom prostredí, a to tak, že sa najskôr vykonávali testy vhodného nastavenia radaru. Tie mali za cieľ určiť, či je modul ideálne nakonfigurovaný tak, aby sa dosahovalo čo najväčšej presnosti pri meraniach do vopred stanovených vzdialeností. Za kľúčové bolo najmä meranie v rozsahu 0 až 3 metrov.

V prvom experimente boli zvolené základné parametre merania na hodnoty:

- *Anténna konfigurácia*: 4Rx, 3Tx(15deg. + Elevation),
- *Počet snímok (fps)*: 10,
- *Rozlíšenie rozsahu (m)*: 0.044,
- *Maximálny jednoznačný rozsah (m)*: 9.02,
- *Maximálna radiálna rýchlosť (m/s)*: 1,
- *Rozlíšenie radiálnej rýchlosti (m/s)*: 0.13.

Pri tomto nastavení bola výsledná schopnosť presne zamerať objekty s požadovanými parametrami do vzdialenosti približne 45 metrov a vykonaný test na merania rovného objektu (steny) vo vzdialenosti 2 metrov bez iných prekážok priniesol výstup, ktorý je zobrazený na obrázku číslo [B.1](#).



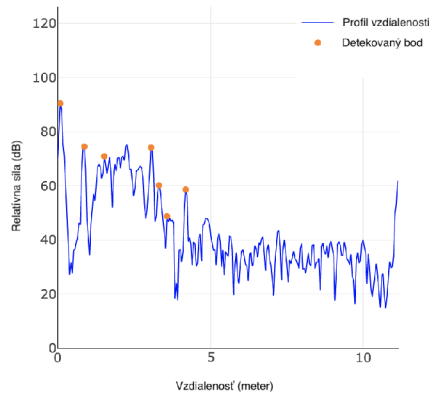
Obr. B.1: Profil rozsahu - experiment č. 1

Z daného obrázku je zrejmé, že bod zameraný s najväčšou silou predstavuje práve nami zameriavanú vzdialenosť 2 metrov. Ďalšia dvojica bodov v blízkom okolí vpravo a vľavo od tohto bodu sú merané vzdialenosti pod miernym uhlom. Prvý bod taktiež s veľmi veľkou relatívnou silou predstavuje zrejme interferenciu medzi vlastnými vlnami. Nameraná vzdialenosť odpovedá meranej hodnote, teda dvom metrom, ktorá mierne v čase osciluje v rámci preddefinovaných tolerancií.

V nasledujúcom experimente boli zvolené parametre merania takto:

- *Anténna konfigurácia:* 1Rx, 1Tx,
- *Počet snímkov (fps):* 10,
- *Rozlíšenie rozsahu (m):* 0.044,
- *Maximálny jednoznačný rozsah (m):* 9.02,
- *Maximálna radiálna rýchlosť (m/s):* 1,
- *Rozlíšenie radiálnej rýchlosti (m/s):* 0.13.

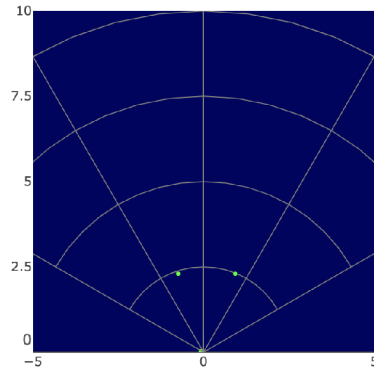
Toto nastavenie prinieslo prekvapivé výsledky. Keďže bola nastavená iba jedna vysielacia a jedna prijímacia anténa, dokážeme zamerať objekty iba na priamke. Avšak, ako znázorňuje výstup z merania na obrázku číslo B.2, pri tak blízkej meranej vzdialenosti dochádza k niekoľkonásobným odrazom a silnej interferencii. To má za následok, že výsledné meranie vôbec nedosahuje požadovanú presnosť. Taktiež toto nastavenie prináša aj nevýhodu v celkovej presnosti, ktorá je deklarovaná len do vzdialenosti približne 35 metrov. Toto základné nastavenie nie je teda pre naše účely vôbec vhodné.



Obr. B.2: Profil rozsahu - experiment č. 2

Keďže meranie s malým počtom nakonfigurovaných antén neprineslo požadované zlepšenie, ba práve naopak výraznú nepresnosť nameraných hodnôt, ďalej sú vykonávané s maximálnym počtom antén. Tým, že nie je potrebné zameriavať objekty v 3-rozmernom priestore s ich uhlom sklonu, nasledujúci experiment je vykonaný s maximálnym počtom antén, avšak práve bez merania uhla náklonu. Anténa konfigurácia je teda v režime 4Rx, 2Tx(15deg.). Ostatné parametre ostali nezmenené.

Obrázok číslo B.3 vyobrazuje profil rozmiestnenia bodov v priestore. Z obrázka vyplýva, že sa zamerané body nachádzajú takmer v ideálnej rovine. Toto nastavenie je pre nás teda najvhodnejšie pre ďalšie spracovanie.



Obr. B.3: Profil rozmiestnenia bodov v priestore

Ďalej je potreba zdokonaľiť exaktnosť merania bodov, ale zároveň aj optimalizovať vstupné parametre tak, aby bola dosahovaná čo najväčšia možná presnosť, avšak pri zachovaní maximálnej merateľnej vzdialenosti s požadovanou presnosťou. Vďaka rýchlemu prepočtu, ktorý ponúka *mmWave Demo Visualizer*, vieme optimálne zvoliť parametre merania tak, aby sme toho dosiahli čo najefektívnejšie.

Výsledné nastavenie teda v *mmWave Demo Vizualizeri* teda vyzerá nasledovne:

Setup Details

Platform:

SDK version (*):

Antenna Config (Azimuth Res - deg):

Desirable Configuration:

Frequency Band (GHz):

Calibration Data Save/Restore:

Scene Selection

Frame Rate (fps):

Range Resolution (m):

Maximum Unambiguous Range (m):

Maximum Radial Velocity (m/s):

Radial Velocity Resolution (m/s):

Plot Selection

Scatter Plot

Range Profile

Noise Profile

Range Azimuth Heat Map

Range Doppler Heat Map

Statistics

RCS

Desired Radar Cross Section (sq. m):

Maximum Range for desired RCS (m): 49.438

RCS at Max Unambiguous Range (sq. m): 0.000132

Console Messages

Obr. B.4: Konfigurácia vyobrazujúca nutné parametre

Príloha C

Použitie programu a jeho závislosti

Pre pripojenie a konfiguráciu radarového modulu je potrebné vykonať tieto kroky:

1. pred spustením je potreba pripojiť inteligentný modul IWR6843ISK k počítaču dodávaným USB-A/micro-USB káblom,
2. nastaviť prepínače (ak tomu tak ešte nie je) modulu do programovacieho módu tak ako je to popísané v časti: **Programovací mód**,
3. následne v prehliadači otvoriť stránku s mmWave Demo Visualizérom na webovej adrese: https://dev.ti.com/gallery/view/mmwave/mmWave_Demo_Visualizer/ver/3.5.0/. Tá automaticky ponúkne inštaláciu zásuvného modulu a ovládačov, potrebných ku konfigurácii,
4. pripojiť modul pomocou tabu "Options" v ľavom hornom rohu stránky, kde je potreba zvoliť aplikačný a dátový port tak, ako sú jednotlivé porty modulu v skutočnosti k počítaču pripojené,
5. následne vykonať nastavenie milimetrového snímača podľa popisu v časti: **Konfigurácia modulu**,
6. odoslať konfiguráciu do modulu pomocou tlačidla "SEND CONFIG TO MMWAVE DEVICE" v ľavom dolnom rohu,
7. ukončiť prehliadač, spustiť terminál a prejsť do zložky s uloženým skriptom *altimeter.py*. Následne tento skript spúšťať tak, ako je to priblížené v časti: **Spustenie skriptu a jeho závislosti**.

Programovací mód

Panel s prepínačmi nachádzajúci sa na prednej strane modulu IWR6843ISK je podľa manuálu potrebné nastaviť do programovacieho módu tak, ako to zobrazuje tabuľka **C.1**

	S1.1	S1.2	S1.3	S1.4	S1.5	S1.6
S1 prepínač - nastavenie	On	Off	On	On	Off	N/A

Tabuľka C.1: Nastavenie prepínačov pre naprogramovanie - možnosť č.1

Ja som počas pripájania v tejto konfigurácii prepínačov zaznamenal občasné problémy s nadviazaním spojenia. Následne som podľa manuálov, fór a testovania došiel aj k záveru, že je lepšie použiť nastavenie prepínačov tak, ako to popisuje tabuľka číslo C.2. Pri tomto nastavení bolo pripojenie a následná konfigurácia modulu bezproblémová.

	S1.1	S1.2	S1.3	S1.4	S1.5	S1.6
S1 prepínač - nastavenie	Off	Off	On	On	Off	Off

Tabuľka C.2: Nastavenie prepínačov pre naprogramovanie - možnosť č.2

Konfigurácia modulu

Konfigurácia inteligentného modulu prebieha nastavením exaktných parametrov na testovaním overené hodnoty tak, ako je to znázornené na snímke B.4.

Spustenie skriptu a jeho závislosti

Spustenie skriptu prebieha v termináli z príkazového riadku pomocou príkazu v skrátenej podobe:

```
$ python3 altimeter.py -p <uart_data_port>
```

prípadne taktiež príkazom v dlhej podobe:

```
$ python3 altimeter.py -port <uart_data_port>
```

Ako argument (`uart_data_port`) je nutný dátový port milimetrového radaru, s celou jeho cestou, takže napríklad vo formáte:

```
/dev/tty.SLAB_USBtoUART6
```

Skript pre svoju funkciu potrebuje externé knižnice, ktoré nepatria do štandardu, ktorými sú:

- serial
- pyudio

Tieto knižnice je teda zapotreby pred spustením nainštalovať.