

UNIVERZITA KOMENSKÉHO, BRATISLAVA
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

ANALÝZA A ROZPOZNÁVANIE
VZOROV V 3D/4D DÁTACH

BAKALÁRSKA PRÁCA

2015

Olívia Kunertová

UNIVERZITA KOMENSKÉHO, BRATISLAVA
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

ANALÝZA A ROZPOZNÁVANIE
VZOROV V 3D/4D DÁTACH

BAKALÁRSKA PRÁCA

Študijný program: Informatika
Študijný odbor: 2508 Informatika
Školiace pracovisko: FMFI.KAI - Katedra aplikovanej informatiky
Školiteľ: RNDr. Peter Borovanský, PhD.

Bratislava, 2015

Olívia Kunertová



Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Meno a priezvisko študenta: Olívia Kunertová
Študijný program: informatika (Jednoodborové štúdium, bakalársky I. st., denná forma)
Študijný odbor: 9.2.1. informatika
Typ záverečnej práce: bakalárska
Jazyk záverečnej práce: slovenský
Sekundárny jazyk: anglický

Názov: Analýza a rozpoznávanie vzorov v 3D/4D dátach
Pattern recognition and analysis in 3D/4D data

Cieľ: Ciele práce sú:
- využitím reprezentácie postupnosti 3D atmosférických dát získaných zo snímačov (dopplerovský radar, LIDAR) implementovať nástroj na vizualizáciu rýchlosti a smeru vetra (3D vizualizácia, 2D rezy),
- analýza dát a následný návrh a implementácia algoritmu detekcie význačných meteorologických situácií definovaných dokumentami Medzinárodnej organizácie pre civilné letectvo,
- overenie algoritmu detekcie na modelových situáciách.

Anotácia: Jadrom práce je vizualizácia stavu atmosféry využitím reprezentácie postupnosti 3D atmosférických dát získaných zo snímačov (dopplerovský radar, LIDAR) a následná detekcia / rozpoznávanie význačných meteorologických situácií (strih vetra, microburst, gust front).

Vedúci: RNDr. Peter Borovanský, PhD.
Konzultant: RNDr. Juraj Bartok, PhD.
Katedra: FMFI.KAI - Katedra aplikovanej informatiky
Vedúci katedry: prof. Ing. Igor Farkaš, PhD.
Dátum zadania: 17.09.2014

Dátum schválenia: 28.10.2014

doc. RNDr. Daniel Olejár, PhD.
garant študijného programu

.....
študent

.....
vedúci práce

Pod'akovanie

Chcela by som sa poďakovať svojmu školiteľovi, ale najmä konzultantovi Maťovi za trpezlivosť pri niekoľkonásobnom čítaní bakalárky. Ďalej moja vďaka patrí rodine, ktorá ma vždy podporovala a kamarátkam Baške a Katke, s ktorými sme sa podporovali pri písaní. Taktiež ďakujem Peťovi za trpezlivosť a podporu.

Abstrakt

Kvôli bezpečnosti pri vzlietaní a pristávaní lietadla je nevyhnutné poznať poveternostné podmienky v danej oblasti. Je potrebné vedieť, či sa na letisku nevyskytuje jav *microburst*, ktorý spôsobuje strih vetra a varovať pilota. Na letiskách sa zbierajú dáta, ktoré sú následne analyzované. Dáta sa získavajú pomocou dopplerovských snímačov, ktoré namerajú radiálnu zložku rýchlosti objektu v smere k snímaču. V tejto práci sa budeme zaoberať analýzou týchto dát. V práci predstavíme nástroj na vizualizáciu získaných dát. Opíšeme existujúci TDWR algoritmus detekcie strihu vetra a pomocou vizualizácie modelových dát navrhujeme a implementujeme modifikovaný TDWR algoritmus detekcie. Následne oba algoritmy otestujeme na simulovaných dátach a výsledky porovnáme.

Kľúčové slová: *microburst*, vizualizácia, detekcia

Abstract

Due to safety during takeoff or landing it is necessary to know weather conditions in the area. It is necessary to know, if there is a phenomenon microburst. This phenomenon causes a wind shear, which is hazardous to aircrafts. The wind data are collected by sensors and they are subjects to analysis. The 3D data are obtained by doppler radar and lidar. The lidar and radar provide radial velocity of an object in their direction. We are going to deal with data analyzing in this work. We will introduce a tool to visualize wind data. We will describe existing TDWR wind shear detection algorithm. By means of visualization of wind data, we will design and implement wind shear detection algorithm. We will test both algorithms on simulated data and compare results of these tests.

Keywords: microburst, wind shear, visualization, detection

Obsah

Úvod	1
1 Úvod do problematiky	3
1.1 Základné pojmy	3
1.1.1 Strih vetra	3
1.1.2 Microburst	4
1.1.3 Snímače	6
1.2 Motivácia	7
2 Dáta a ich spracovanie	9
2.1 Získavanie dát	9
2.1.1 Základný princíp snímačov	9
2.1.2 Jednoduchý model snímača	11
2.2 Vstupný súbor	11
2.3 Ukladanie dát	12
2.3.1 Výstrel	12
2.3.2 Elevácia	12
2.3.3 Meranie	13
3 Vizualizácia dát	14
3.1 Matematika	14
3.1.1 Značenie	14
3.1.2 Azimut	15
3.1.3 Dĺžka vystreleného lúča	15

3.1.4	Uhol výstrelu	16
3.1.5	Pozemná vzdialenosť lúča v konštantnej výške	16
3.2	Plan Position Indicator (PPI)	16
3.2.1	Popis obrázka	17
3.2.2	Vytvorenie produktu	18
3.3	Constant Altitude Plan Position Indicator (CAPPI)	20
3.3.1	Popis obrázka	20
3.3.2	Vytvorenie produktu	20
3.4	Range Height Indicator (RHI)	22
3.4.1	Popis obrázka	23
3.4.2	Vytvorenie produktu	23
3.5	Rekonštrukcia vektorového poľa	25
4	Algoritmus detekcie	29
4.1	Zjednodušený model microburstu	29
4.1.1	Profil vetra	29
4.1.2	Hjelmfelt model	30
4.1.3	Namerané hodnoty	30
4.2	Terminal Doppler Weather Radar (TDWR) algoritmus	31
4.2.1	Cieľ algoritmu	31
4.2.2	Opis algoritmu	32
4.3	Úpravy algoritmu TDWR	34
4.3.1	Detekcia začiatku segmentu	34
4.3.2	Detekcia konca segmentu	34
4.3.3	Akceptácia segmentu	35
4.4	Implementácia algoritmu	35
4.4.1	Zisťovanie sklonu regresnej priamky	35
4.4.2	Detekovanie segmentu na výstrele	36

<i>OBSAH</i>	x
4.4.3 Určovanie regiónov strihu vetra	37
4.5 Porovnanie algoritmov	38
4.5.1 Modelové dáta	38
4.5.2 Reálne dáta	44
Záver	46

Zoznam obrázkov

1.1	<i>Microburst</i> , Zdroj: Wikimedia [16]	5
3.1	Snímač	17
3.2	PPI produkt: dosah radaru 3 km, elevačný uhol -0.5°	19
3.3	CAPPI produkt: dosah radaru 150 km, výška 8 km, dátum 01.04.2015, UTC 06:12:30	22
3.4	Snímač – RHI	23
3.5	RHI produkt: azimut 90° , opačný azimut -90°	25
3.6	Vysvetlivky značenia wind barb	26
3.7	Rekonštrukcia vektorového poľa: dosah radaru 6 km, elevačný uhol 0.5° . .	27
3.8	Rekonštrukcia vektorového poľa: dosah radaru 3 km, elevačný uhol 0.0° . .	28
4.1	PPI produkt: dosah radaru 6 km, elevačný uhol -0.5°	39
4.2	PPI produkt: dosah radaru 6 km, elevačný uhol -0.5°	40
4.3	PPI produkt: dosah radaru 6 km, elevačný uhol -0.5°	43
4.4	PPI produkt: dosah radaru 6 km, elevačný uhol -0.5°	44

Zoznam tabuliek

4.1	POD začiatok skenovania v nultej minúte	41
4.2	POD začiatok skenovania v 2.5 minúte	41
4.3	POAD začiatok skenovania v 2.5 minúte	42
4.4	Tesovanie na reálnych dátach	45

Úvod

Microburst bol objavený v sedemdesiatych rokoch minulého storočia po tragických nehodách pri vzlete a pristávaní lietadiel v Severnej Amerike. Objavil ho Theodor Fujita, profesor Chicagskej univerzity. V dôsledku radu ničivých tornád v roku 1974 začal Fujita so spolupracovníkmi na univerzite výskum. Pozoroval oblasti zničené týmito javmi. Na základe fotografií prišiel na to, že nie všetko bolo spôsobené tornádami, ale za škody bol zodpovedný zostupný prúd vzduchu, ktorý sa pri dotyku so zemou rozbieha všetkými smermi.

Ďalšou snahou bolo tento nebezpečný jav vopred zdetegovať, aby sa dalo leteckým nešťastiam predchádzať. Bol vyvinutý LLWAS – *Low Level Windshear Alert System*, ktorého limitáciou je schopnosť detegovať jav iba v prízemných oblastiach. Na niektorých letiskách sa používa systém, ktorý deteguje strih vetra pomocou dopplerovského radaru a lidar. V tejto práci budeme analyzovať dáta získané týmito snímačmi a budeme riešiť implementáciu algoritmu detekcie strihu vetra.

K nášmu riešeniu sme prišli po podrobnej analýze a vizualizácii dát a po preskúmaní existujúceho algoritmu, v ktorom sme vykonali niekoľko zmien. Oba algoritmy sme implementovali v jazyku Java a následne otestovali na simulovaných dátach. Výsledky testov ukázali, že oproti pôvodnému algoritmu, z ktorého sme vychádzali, sa nám podarilo zlepšiť rozoznávanie strihu vetra najmä pri zašumených dátach.

Práca je rozdelená do štyroch kapitol nasledovne. V prvej kapitole podrobnejšie opíšeme problém, ktorým sa budeme zaoberať. V druhej kapitole zdefinujeme dáta, ktoré budeme analyzovať a postup, ako ich budeme spracovávať. V tretej kapitole ukážeme vizualizáciu dát, ktorá povedie k lepšiemu porozumeniu problému a následnému návrhu riešenia. V poslednej štvrtej kapitole budeme rozprávať o existujúcom algoritme a navrhujeme, ako

ho upravíme. Tiež opíšeme testovanie na modelových a reálnych dátach a výsledky týchto testovaní. Porovnáme oba algoritmy a zistíme, či naše úpravy viedli k lepším výsledkom.

Kapitola 1

Úvod do problematiky

V nasledujúcom texte uvedieme čitateľa do oblasti meteorológie a letectva, a taktiež popíšeme dôvody, prečo sa danou oblasťou chceme zaoberať. Spomenieme niektoré základné pojmy, ktoré budeme neskôr v práci využívať a čitateľ by ich mal kvôli lepšiemu porozumeniu poznať.

1.1 Základné pojmy

V tejto časti uvedieme základné pojmy týkajúce sa problematiky práce. Pre získanie podrobnejších informácií o základných pojmoch odporúčame publikáciu *Manual on Low-level Wind Shear* [12], o ktorú sme sa opierali.

1.1.1 Strih vetra

Hlavným objektom nášho záujmu je strih vetra v nižších vrstvách atmosféry. Jeho najvšeobecnejšou definíciou podľa *Manual on Low-level Wind Shear* [12] je:

Definícia 1.1.1 *Akákoľvek zmena veľkosti rýchlosti a/alebo smeru vetra sa nazýva strih vetra.*

V najširšom zmysle možno povedať, že pojem strih vetra zahŕňa skupinu vzdušných prúdení od malých rozsahov, ktoré sa môžu prejaviť na lietadlách ako turbulencie, až

po vzájomný presun obrovských vzdušných mäs. Medzi množstvo javov, ktoré spôsobujú takúto zmenu patria napríklad búrky, prímorské vetry, horské vetry a frontálne systémy.

Strih vetra je vždy prítomný v atmosfére a pre pozorovateľa je viditeľný napríklad ako pohyb vrstiev oblakov v rôznych smeroch.

1.1.2 Microburst

V tejto práci sa budeme hlavne zaoberať javom *microburst*, ktorý spôsobuje strih vetra. Pre potreby definície *microburstu*, najskôr zavedieme pojem *downburst* (prepád studeného vzduchu).

Definícia 1.1.2 *Downburst je silný zostupný prúd vzduchu, ktorý sa pri styku so zemou rozlieva všetkými smermi od jeho centra a spôsobuje zničujúce rozbiehavé horizontálne vetry v blízkosti povrchu zeme.*

Downburst delíme na základe horizontálnych rozmerov na *microburst* a *macroburst*. My sa v práci budeme zaoberať iba *microburstom*.

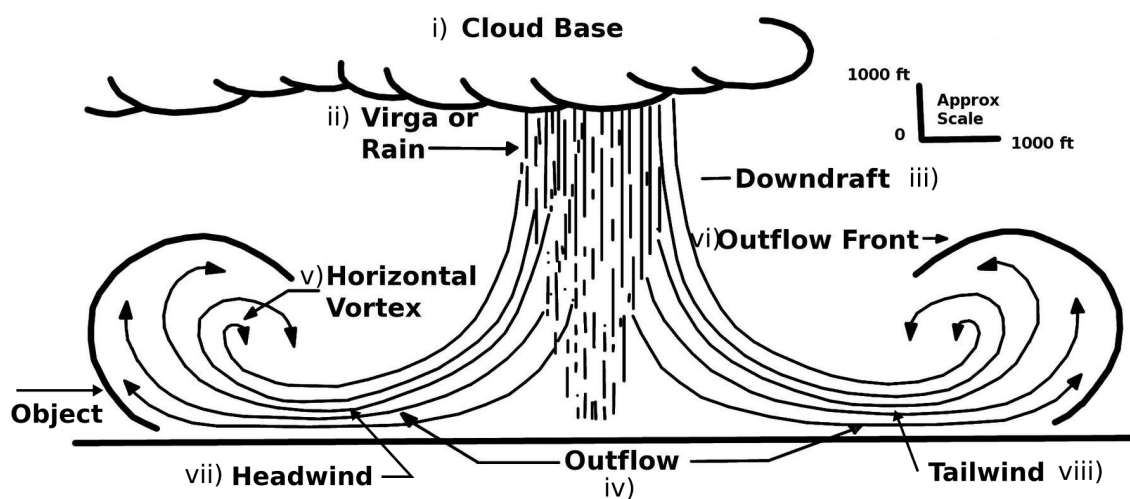
Definícia 1.1.3 *Downburst malej mierky s horizontálnym priemerom najviac 4 km sa nazýva microburst.*

Popis microburstu

V práci budeme využívať nasledovné pojmy, ktoré súvisia s časťami, z ktorých sa *microburst* skladá. Niektoré z pojmov sa v slovenčine nevyskytujú, respektíve sa ich preklad nepoužíva, a preto ich v neskoršom texte budeme používať v pôvodnom znení. Na obr. 1.1 je znázornený *microburst* aj s označenými časťami. Definície možno nájsť v online meteorologickom slovníku [13].

- i) *Cloudbase* je výška, z ktorej začína klesať *microburst*, je to výška najnižších viditeľných oblakov (premenlivá výška).
- ii) *Virga* sú zrážkové pruhy padajúce z oblakov, ktoré sa stihnú vypariť skôr, ako spadnú na povrch zeme.

- iii) *Downdraft* je pojem označujúci stĺpec studeného vzduchu, ktorý klesá k zemi.
- iv) *Outflow* sú rozbiehavé horizontálne vetry, ktoré sa vytvoria, keď *downdraft* narazí na zem.
- v) Horizontálne víry vznikajú v dôsledku nárazu prudkého vetra.
- vi) *Outflow front* je hranica medzi *outflow microburstu* a okolitým vzduchom.
- vii) *Headwind* (protivietor) je vietor v smere opačnom voči smeru pohybujúceho sa objektu.
- viii) *Tailwind* (zadný vietor) je vietor v smere zhodnom so smerom pohybujúceho sa objektu.



Obr. 1.1: *Microburst*, Zdroj: Wikimedia [16]

Charakteristiky microburstu

Pri popise charakteristík sme sa opierali o informácie získané z webovej stránky *Wind shears and Microbursts* [15].

Veľkosť – keď začína klesať *microburst* z výšky *cloudbase* do výšky približne 300 m to 900 m, priemer *downdraftu microburstu* je zvyčajne 1.6 km. Pri povrchu zeme sa už uvažuje priemer *outflow* do 4 km.

Rýchlosť – maximálna rýchlosť je 110 km h^{-1} , pričom horizontálne vetry nadobúdajú rýchlosť 83 km h^{-1} , čo môže vytvoriť 166 km h^{-1} strih vetra v prípade, že by sa objekt pohyboval vodorovne (zmena pri prechode z protivetra do oblasti zadného vetra).

Čas – dĺžka trvania *microburstu* je zvyčajne menej ako 15 min od doby, keď narazí na povrch zeme až do jeho útlmu. Horizontálne vetry naberajú na intenzite počas prvých 5 min, pričom vydržia 2 min to 4 min na maximálnej rýchlosti.

Typy *microburstu*

Suchý microburst – vzniká, keď sa dážď zmieša so suchým vzduchom a začne sa vyparovať. Proces odparovania ochladzuje vzduch. Následne studený vzduch klesá k zemi, pretože je ťažší. Čím bližšie je studený vzduch pri zemi, tým má väčšiu rýchlosť. Keď studený vzduch narazí na zem, začne sa šíriť všetkými smermi, čo je typický prejav *microburstu*. Je takmer nemožné ich spozorovať, pokiaľ nenarazia na zem a nerozvíria prach.

Mokrý microburst – na rozdiel od suchého *microburstu*, mokrý *microburst* sprevádzajú silné zrážky. Mokrý *microburst* teda začína búrkou, ktorá nasáva vzduch a vlhkosť a prevádza ju na zrážky a súčasne tlačí dážď a vietor von. Aby sa búrka neudusila, nesmie byť miesto, kde búrka nasáva vzduch priamo nad miestom, kde ho tlačí von. V prípade, že by niečo takéto nastalo, dochádza k rýchlemu kolapsu dažďa a vetra, čo vytvára mokrý *microburst*.

O tom, ako vzniká suchý a mokrý *microburst* sa čitateľ môže bližšie dozvedieť v článkoch o suchom a mokrom *microburste* [10], [11].

1.1.3 Snímače

Na získavanie dát budeme využívať 2 typy snímačov – dopplerovský radar a LiDAR. V nasledujúcej časti ich stručne priblížime. Detailnejší opis snímačov a princíp fungovania možno nájsť na webovej stránke *Radar Tutorial* [14] alebo v článku *LIDAR and SODAR measurements* [7].

Dopplerovský radar

Pre popis dopplerovského radaru musíme najskôr čitateľa oboznámiť s radarom.

Definícia 1.1.4 *Radar (Radio Detection And Ranging) je elektronické zariadenie, ktoré deteguje prítomnosť objektu pomocou odrazenej elektromagnetickej energie.*

Princíp fungovania radaru si zjednodušene môžeme predstaviť nasledovne. Radar vysiela elektromagnetické vlny do vzduchu a čaká na odrazený signál. Ak vysielaný signál dosiahne cieľ, väčšina jeho energie bude rozptýlená, ale časť sa odrazí späť k prijímaču radaru. Odrazený signál potvrdzuje prítomnosť objektu.

Definícia 1.1.5 *Dopplerovský radar je špeciálny typ radaru, ktorý nemeria iba vzdialenosť objektu, ale využitím dopplerovho efektu meria aj jeho rýchlosť smerom k radaru.*

Dopplerovský radar teda vie zmerať zložku rýchlosti objektu v smere k nemu porovnaním frekvencie vyslaného signálu voči frekvencii odrazeného signálu. Avšak dopplerovský radar, okolo ktorého lieta lietadlo v perfektnom kruhu, bude hlásiť nulovú rýchlosť.

LiDAR

Definícia 1.1.6 *LiDAR (Light Detection And Ranging) je optické zariadenie, ktoré vysiela laserové lúče (ako spojité vlny, ale aj ako impulzy) a meria intenzitu signálu prijatú späť.*

Dopplerovský lidar sa tiež používa v meteorológii napríklad na meranie zložky rýchlosti vetra v smere vyslaného lúča.

1.2 Motivácia

Microburst môže mať nebezpečný dopad na lietadlo počas pristávania alebo vzlietania, pokiaľ pilot nevie, že sa tam *microburst* nachádza.

Ak počas vzlietania lietadlo vletí do *microburstu*, deje sa nasledovné. Najskôr sa lietadlo dostane do silného protivetra, ktorý spôsobí, že lietadlo naberie výšku, pričom pilot uberie na rýchlosti, aby zachoval svoju obvyklú dráhu. Následne, keď už je lietadlo vo vzduchu,

dostáva sa do zlomu a narazí na zadný vietor. Avšak relatívna rýchlosť lietadla už nemusí byť dostatočne veľká na to, aby si udržalo svoju výšku.

Pri pristávaní lietadla je situácia podobná. Keď chce pilot pristáť s lietadlom, uberie na rýchlosti a začne klesať. Tu však lietadlo narazí na protivietor alebo prúdenie smerom od zemského povrchu, čo spôsobuje vztlak a nárast výšky. Pilot v snahe vrátiť sa do pôvodnej pristávacej dráhy, uberá na rýchlosti a natáča lietadlo ostrejšie smerom k zemi. Problém nastáva, keď lietadlo prechádza cez jadro *microburstu* a pri výlete z neho. Pri prechode cez zostupné prúdy sa stráca vztlak a lietadlo prudko klesá, pričom sa dostáva do zadnej časti *microburstu*, teda oblasti zadných vetrov, ktoré spôsobujú ďalšiu stratu výšky. V tomto momente sa už nestíha lietadlo narovnať a dochádza k zrážke so zemou.

Oba prípady môžu viesť k havárii lietadla a následným stratám na životoch a majetku. Existuje mnoho známych prípadov, kedy bol príčinou havárie lietadla *microburst*. Medzi najznámejšie z nich patrí nehoda Boeingu 727 spoločnosti Eastern na letisku JFK v New Yorku v roku 1975.

V prípade, že by pilot vedel o existencii *microburstu* na jeho ceste, dokázal by nárazu zabrániť. Preto je žiadané, aby sa dal takýto stav detegovať a vopred varovať pilota.

Tu nastupuje úloha algoritmov, ktoré majú zdetegovať daný jav. Algoritmy musia automaticky generovať výstrahy, ktoré majú pilota varovať, kde a s akými parametrami sa daný *microburst* vyskytuje.

Medzi známe algoritmy patrí *Low Level Windshear Alert System* LLWAS [17] a *Microburst Divergence Detection for Terminal Doppler Weather Radar* (TDWR) [9], ktorým sa budeme zaoberať my.

Kapitola 2

Dáta a ich spracovanie

V ďalšom texte popíšeme dáta, s ktorými budeme pracovať, a ako ich budeme získavať. Taktiež uvedieme, ako si tieto dáta budeme ukladať, aby sme s nimi mohli pracovať efektívne.

2.1 Získavanie dát

Naším prvým cieľom je vytvoriť profil prúdenia vzduchu v oblasti, kde chceme zistiť, či sa vyskytuje strih vetra. Ako sme už v predchádzajúcom texte spomenuli, dáta budeme získavať pomocou dopplerovského radaru a lidar. V nasledujúcej časti čitateľa oboznámime so základným princípom fungovania radaru, aby si ľahšie predstavil, aké informácie nám vie takýto snímač poskytnúť.

2.1.1 Základný princíp snímačov

Vysielač snímača vysiela do vzduchu krátko trvajúce vlnenie a prijímač čaká na odrazený signál. Na základe prijatého signálu možno získať informáciu o tom, v akej vzdialenosti sa nachádzal objekt alebo častica, od ktorej sa dané vlnenie odrazilo. Snímač zmeria, aká doba prešla medzi vyslaným a prijatým signálom. Potom vzdialenosť už dostaneme z nasledujúceho vzťahu:

$$R = c_0 \times \frac{t}{2}$$

R – vzdialenosť častice (m), od ktorej sa odrazil signál

c_0 – rýchlosť svetla vo vzduchu $\approx 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$

t – doba medzi vyslaním a prijatím signálu

Na základe zmeny frekvencie, môžeme vypočítať radiálnu zložku rýchlosti objektu, t. j. rýchlosť v smere vyslaného lúča zo vťahov:

$$v = f \times \lambda \quad (2.1)$$

v – rýchlosť šírenia vlnenia v m s^{-1}

f – frekvencia vlnenia v Hz

λ – vlnová dĺžka v m

$$f_D = \frac{-2 \times v_r}{\lambda} \quad (2.2)$$

f_D – Dopplerova frekvencia (zmena frekvencie) v Hz

v_r – radiálna rýchlosť objektu (v smere vyslaného lúča) v m s^{-1}

λ – vlnová dĺžka v m

Z predchádzajúcich vzťahov 2.1 a 2.2 môžeme odvodiť nasledujúci vzorec pre výpočet radiálnej rýchlosti:

$$v_r = -\frac{f_D \times c_0}{2f_v}$$

v_r – radiálna rýchlosť objektu (v smere vyslaného lúča) v m s^{-1}

f_D – Dopplerova frekvencia (zmena frekvencie) v Hz

c_0 – rýchlosť svetla vo vzduchu $\approx 299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$

f_v – frekvencia vysielaného signálu v Hz

Snímač nám poskytuje informáciu, v akej vzdialenosti sa od neho nachádza objekt, od ktorého sa signál odrazil a akou rýchlosťou v smere vyslaného lúča sa daný objekt pohyboval. Rýchlosť smerom od radaru (k radaru) sa označuje ako kladná (záporná).

2.1.2 Jednoduchý model snímača

Umiestnenie radaru popisujú tri súradnice – zemepisná šírka, zemepisná dĺžka a výška, v akej je radar umiestnený nad zemou. Sken priestoru si môžeme predstaviť nasledovne. Vysielač vysiela vlnenie pomocou parabolickej antény, ktorá sa postupne otáča. Natočenie antény je v danom okamihu určené výškovým uhlom (eleváciou), pri pohľade z horizontu a zemepisným uhlom (azimutom), kde 180° je južný smer.

Meranie pod daným výškovým a zemepisným uhlom sa označuje ako výstrel. Name- rané hodnoty pozdĺž výstrelu sa podľa vzdialenosti od snímača rozdelia do brán (*gates*). Z hodnôt, ktoré patria do jednej brány sa určí hodnota reprezentujúca danú bránu. Dĺžku brány respektíve vzdialenosť miest, ktoré sú reprezentované dvomi susednými hodnotami pozdĺž výstrelu označujeme *range*.

Jednou zo stratégií skenovania je postupné skenovanie elevácií. Majme určený začiatoč- ný a koncový azimut, ktoré predstavujú hranice snímaného priestoru. Na začiatku skenu je anténa natočená pod daným elevačným uhlom a začiatočným azimutom a postupne mení svoj zemepisný uhol v smere hodinových ručičiek, kým nedosiahne koncový azimut. V danom momente, zmení svoj výškový uhol a vracia sa späť, kým nedosiahne začiatočný azimut. V tejto chvíli sú už nasnímané dve elevácie. Teraz sa môže opäť zmeniť elevačný uhol a pokračovať v skenovaní ďalšej elevácie.

2.2 Vstupný súbor

Existuje viacero formátov dát zo snímačov. V nasledujúcom texte opíšeme formát vstupného súboru obsahujúceho dáta zo snímača, s ktorým budeme pracovať.

Vstupný súbor má dve časti. Prvá časť je hlavička, ktorá obsahuje časovú pečiatku, kedy meranie začalo, popisuje snímač a parametre daného merania. Nachádza sa tu umiestnenie snímača, t. j. jeho zemepisná šírka, zemepisná dĺžka a výška nad zemou. Medzi parametre merania patrí počet brán pozdĺž výstrelu a dĺžka brány.

Druhá časť súboru sú už samostatné dáta rozdelené do výstrelov. Každý výstrel má vlastnú hlavičku, ktorá ho popisuje. Časová pečiatka určuje čas, kedy bol vystrelený. Za časovou pečiatkou sa nachádza zemepisný a výškový uhol výstrelu.

Pod hlavičkou výstrelu nasledujú riadky, ktoré predstavujú jednotlivé brány výstrelu. Prvá hodnota označuje číslo brány. Nasleduje radiálna rýchlosť v smere výstrelu, pričom kladná (záporná) hodnota predstavuje smer od snímača (k snímaču). Druhá hodnota predstavuje pomer signálu a hluku prostredia.

2.3 Ukladanie dát

Pre lepšie porozumenie budeme používať nasledujúce značenie. Jedno meranie obsahuje m elevácií, pričom každá elevácia pozostáva z v výstrelov. Každý výstrel obsahuje n hodnôt – počet brán pozdĺž výstrelu.

2.3.1 Výstrel

Výstrel je určený výškovým a zemepisným uhlom. Namerané hodnoty výstrelu si uložíme do poľa veľkosti n , pričom i -ta hodnota predstavuje hodnotu reprezentujúcu i -tu bránu. Časová zložitosť vytvorenia objektu výstrel patrí do $O(n)$. Keď chceme zistiť hodnotu vo výstrele v danej vzdialenosti d , pomocou dĺžky brány ľahko určíme, do ktorej brány prislúcha daná vzdialenosť. Preto časová zložitosť prístupu k požadovanej hodnote patrí do $O(1)$.

2.3.2 Elevácia

Elevácia je určená výškovým uhlom a bude obsahovať výstrely z jedného merania, ktorých výškový uhol je rovnaký, ako výškový uhol danej elevácie. Na konkrétnej elevácii je potom výstrel určený už iba zemepisným uhlom. Pre uloženie výstrelov budeme používať dátovú štruktúru TreeMap, kde kľúčom bude zemepisný uhol a hodnota je výstrel určený týmto zemepisným uhlom. TreeMap je mapa utriedená podľa kľúča a tiež nám umožňuje dostať susedné položky. V prípade, že chceme položku podľa kľúča, ktorý sa nenachádza v mape, máme možnosť dostať položku, ktorej kľúč je najbližší menší respektíve väčší ako požadovaný kľúč. Časová zložitosť prístupu k požadovanému výstrelu patrí do $O(\log(v))$.

2.3.3 Meranie

Meranie je určené časom, kedy začalo. Elevácie prislúchajúce danému meraniu si uložíme do poľa dĺžky m . Tieto elevácie si utriedime podľa elevačného uhla. Časová zložitosť prístupu do poľa patrí do $O(1)$. Keďže elevácie sú utriedené, ak chceme zistiť index elevácie podľa daného kritéria na základe usporiadania (napríklad index elevácie, ktorej výškový uhol je najmenší väčší ako daná hodnota), môžeme použiť binárne vyhľadávanie, ktorého časová zložitosť patrí do $O(\log(m))$.

Kapitola 3

Vizualizácia dát

V nasledujúcej kapitole popíšeme vizualizáciu dát získaných zo snímača. Naším cieľom bude vytvoriť profil prúdenia vzduchu v oblasti okolo snímača. Medzi základné radarové/lidarové produkty patrí *Plan Position Indicator* (PPI), *Constant Altitude Plan Position Indicator* (CAPPI) a *Range Height Indicator* (RHI). V ďalšom texte popíšeme tieto produkty a ukážeme ich príklady na modelových aj reálnych dátach.

Každý z týchto produktov bude vizualizovať dopplerovské dáta, t. j. v danom bode budeme zobrazovať rýchlosť prúdenia vzduchu v smere vyslaného lúča. Zaužívaná znamienková konvencia je, že rýchlosť v smere od radaru (k radaru) bude kladná (záporná).

3.1 Matematika

Pre lepšie porozumenie, ako sa produkty vytvárali, by sa mal čitateľ oboznámiť s nasledujúcimi vzťahmi.

3.1.1 Značenie

Pri nasledujúcich výpočtoch použijeme označovanie:

- i) Trojuholník ABC , kde A je stred zeme, B je radar a C je bod v smere vystreleného lúča.
- ii) Uhly α, β, γ sú uhly postupne pri vrcholoch A, B, C .

- iii) ϕ – elevačný uhol, čiže platí $\phi = \beta - \frac{\pi}{2}$.
- iv) RZ – polomer Zeme v mieste radaru
- v) ra – výška radaru nad zemou

3.1.2 Azimut

Pri práci so snímačom potrebujeme často zistiť, pod akým azimutom by sme museli vyslať lúč, aby sme prešli daným bodom, ktorého projekcia na rovinu zeme je bod $T[x, y]$, pričom os y smeruje na sever a os x na východ. Definujme si funkciu *azimut*, ktorá požaduje na vstupe 2 parametre – x a y .

$$azimut(x, y) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{x}{y}\right) & y > 0 \\ \arctan\left(\frac{x}{y}\right) + \pi & x \geq 0, y < 0 \\ \arctan\left(\frac{x}{y}\right) - \pi & x < 0, y < 0 \\ \frac{\pi}{2} & x > 0, y = 0 \\ -\frac{\pi}{2} & x < 0, y = 0 \\ \text{undefined} & x = 0, y = 0 \end{cases}$$

Obor hodnôt funkcie *azimut*(x, y) je $(-\pi, \pi]$ v radiánoch.

3.1.3 Dĺžka vystreleného lúča

Majme ľubovoľný bod na rovine zeme. Označme si ho O . Pri výpočtoch často potrebujeme zistiť, v akej vzdialenosti od radaru v smere vystreleného lúča je bod, ktorého projekcia na rovinu zeme je bod O . Nech bod O je od radaru vzdialený dM metrov, potom platí:

$$\alpha = \frac{dM}{RZ} \tag{3.1}$$

$$\frac{BC}{\sin(\alpha)} = \frac{AB}{\sin(\gamma)} \Rightarrow BC = \sin(\alpha) \times \frac{AB}{\sin(\gamma)} \tag{3.2}$$

Zo vzťahu 3.1 dostávame uhol α v radiánoch. Zo sínusovej vety 3.2 už ľahko dostávame požadovanú vzdialenosť BC .

3.1.4 Uhol výstrelu

Nasledujúci výpočet predstavuje uhol, pod akým by bolo treba vyslať lúč, aby prešiel danú výšku h v pozemnej vzdialenosti dM . Najskôr určíme uhol α (3.1), a potom podľa kosínusovej vety (3.3) zistíme stranu trojuholníka BC , teda vzdialenosť bodu vo výške h od radaru.

$$BC = \sqrt{(AB)^2 + (AC)^2 - 2 \times AB \times AC \times \cos(\alpha)} \quad (3.3)$$

Následne podľa sínusovej vety, dostávame uhol β , z ktorého už vieme ľahko vypočítať elevačný uhol ϕ .

$$\frac{\sin(\beta)}{AC} = \frac{\sin(\alpha)}{BC} \Rightarrow \arcsin(\sin(\alpha) \times \frac{AC}{BC}) \quad (3.4)$$

3.1.5 Pozemná vzdialenosť lúča v konštantnej výške

Majme lúč, ktorý vystrelíme pod uhlom ϕ . Chceli by sme zistiť, v akej pozemnej vzdialenosti dM od snímača pretne výškovú hladinu h .

$$\frac{\sin(\gamma)}{AB} = \frac{\sin(\beta)}{AC} \Rightarrow \gamma = \arcsin(\frac{AB}{AC} \times \sin(\beta)) \quad (3.5)$$

$$\alpha = \pi - \beta - \gamma \quad (3.6)$$

$$\alpha = \frac{dM}{RZ} \Rightarrow dM = \alpha \times RZ \quad (3.7)$$

Aby sme vedeli vypočítať uhol α podľa vzťahu 3.6, potrebujeme najskôr vypočítať uhol γ zo sínusovej vety 3.5. Nakoniec podľa vzťahu pre výpočet uhla na kružnici 3.7, dostávame pozemnú vzdialenosť dM .

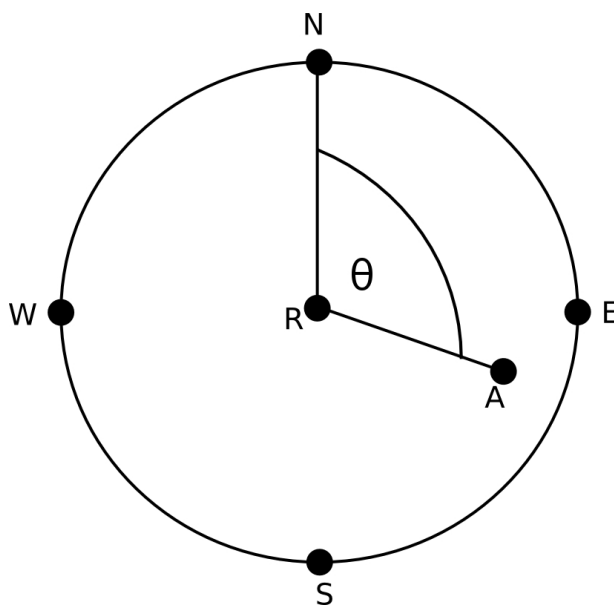
3.2 Plan Position Indicator (PPI)

PPI je jedným z najbežnejších typov zobrazení radarom. Anténa je zasadená do stredu obrázka. Miesta s rovnakou vzdialenosťou a výškou tvoria sústredné kružnice. Pre podrobnejšie informácie odporúčame článok *Radar products and operational applications* [1].

Zobrazenie vzniká tak, že anténa snímača sa otáča pod konštantným výškovým uhlom. Naopak zemepisný uhol sa mení. Objekt, ktorý vznikne z dát, keď anténa opíše uhol 360° , si môžeme predstaviť ako povrch kužeľa.

3.2.1 Popis obrázka

Na obrázku 3.1 vidíme zjednodušený model produktu. Chceme vytvoriť PPI pre eleváciu ϕ . Obrázok tvorí kruh so stredom v snímači R . Body kruhu sú všetky body na zemi, ktoré sú v dosahu radaru, ak by radar skenoval pod eleváciou 0° . Zoberme si bod A na zemi, ktorý sa nachádza v kruhu. Uhol θ označuje azimut výstrelu, ktorého projekcia na zem prechádza bodom A . V danom bode A chceme zobraziť hodnotu, ktorú nameria snímač pri výstrele pod výškovým uhlom ϕ a zemepisným uhlom θ v takom bode, že jeho pozemná vzdialenosť je rovnaká, ako vzdialenosť bodu A od snímača R , t. j. hodnota v bode, ktorého projekcia na rovinu zeme je bod A .



Obr. 3.1: Snímač

3.2.2 Vytvorenie produktu

Java 2D používa nasledovný súradnicový systém. Začiatok súradnicových osí je v ľavom hornom rohu obrázka, pričom hodnoty na osi x narastajú smerom vľavo a hodnoty osi y smerom nadol. Pre naše účely si však začiatok súradnicových osí presunieme do stredu obrázka, čím dosiahneme, že náš snímač bude zasadený do začiatku súradnicových osí. Zároveň vymeníme smerovanie osi y , t. j. hodnoty budú narastať smerom nahor.

Značenie

- i) r – dosah snímača v m
- ii) rPx – dosah snímača na obrázku v pixeloch
- iii) $A[x, y]$ – ľubovoľný bod obrázka s transformovanými súradnicami x a y
- iv) θ – azimut v bode A .

Hodnota radiálnej rýchlosti v bode

Chceme zistiť aká hodnota prislúcha bodu A . V prvom kroku musíme zistiť, či sa bod A nachádza v dosahu radaru, čo je v prípade platnosti nasledujúcej nerovnosti:

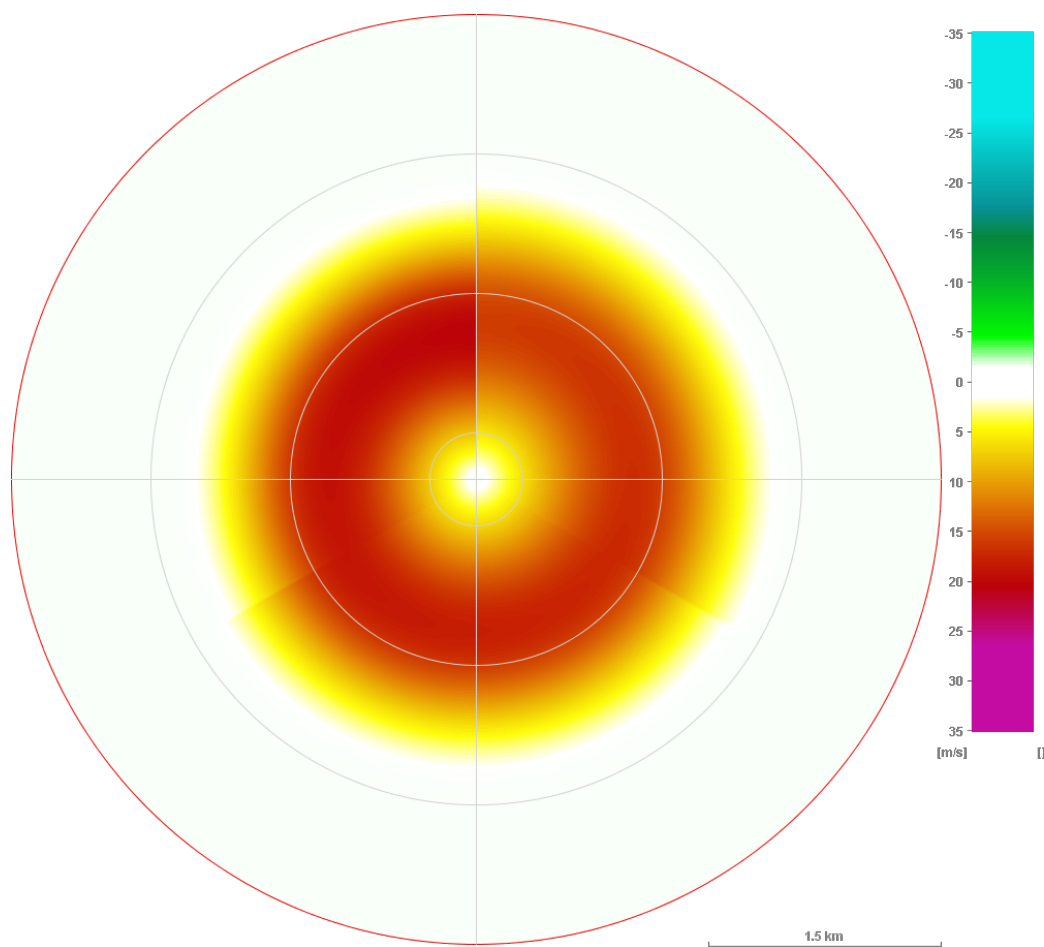
$$d = \sqrt{x^2 + y^2} \leq rPx$$

Kde d je vzdialenosť bodu A od radaru R v pixeloch. Ďalej potrebujeme určiť azimut pre bod A . Výsledok určíme podľa vzťahu z časti 3.1.2. Teraz nám treba ešte zistiť, v akej vzdialenosti od radaru na vystrelenom lúči sa nachádza bod, ktorého projekcia na rovinu zeme je bod A . Najskôr si musíme určiť reálnu vzdialenosť bodu A od snímača. Túto vzdialenosť v metroch nám určí vzťah 3.8.

$$dM = d \times \frac{r}{rPx} \quad (3.8)$$

Potom podľa výpočtu v časti 3.1.3 dostávame vzdialenosť požadovaného bodu pozdĺž vystreleného lúča. Označme si ju dL . Zoberme si 2 najbližšie výstrely pre vypočítaný

azimut θ . Najbližší predchádzajúci a najbližší nasledujúci si označíme ako θ_1 a θ_2 . Tiež si nájdime najbližšie brány na výstrele pre vzdialenosť dL a označíme si ich i a j . Dostávame 4 hodnoty, 2 pre každý výstrel. Najskôr lineárnou interpoláciou vypočítame hodnotu pre každý výstrel zvlášť. Potom výsledné hodnoty lineárne interpolujeme. Výsledok hodnota bodu, ktorého projekcia na povrch zeme je bod A .



Obr. 3.2: PPI produkt: dosah radaru 3 km, elevačný uhol -0.5°

Na obrázku 3.2 je PPI produkt vytvorený z modelových dát, ktorý zobrazuje *microburst* so stredom v mieste snímača. Meranie začalo v čase tretej minúty po začiatku *microburstu*, pričom skenovanie celej elevácie trvalo 3 minúty.

3.3 Constant Altitude Plan Position Indicator (CAPPI)

CAPPI je ďalší typ zobrazenia dát získaných snímačom. Jedná sa o horizontálny rez. Preto obrázok predstavuje dáta v rovnakej nadmorskej výške. Pre podrobnejšie informácie odporúčame článok *Radar products and operational applications* [1].

Zoberme si výšku, ktorú chceme zobraziť produktom CAPPI. Označme si ju h . Každá elevácia z merania, z ktorého vizualizujeme dáta, pretína výšku h v istej pozemnej vzdialenosti od radaru.

3.3.1 Popis obrázka

Zoberme si opäť obrázok 3.1. Radar je zasadený v strede obrázka a vytvárame CAPPI produkt vo výške h . Vyberme si ľubovoľný bod A na zemi, ktorý sa nachádza v kruhu. Uhol θ označuje azimut výstrelu, ktorého projekcia na rovinu zeme prechádza bodom A . Takýchto výstrelův je viacero, preto musíme vybrať taký výstrel, ktorý pretína výškovú hladinu h v bode, ktorého projekcia na rovinu zeme je bod A . To znamená, nájsť eleváciu, ktorá pretína našu výškovú hladinu h v rovnakej pozemnej vzdialenosti, v akej je bod A .

3.3.2 Vytvorenie produktu

Rovnako ako v časti 3.2.2 si najskôr musíme transformovať súradnicový systém na taký, ktorého začiatok súradnicových osí bude v strede obrázka, pričom hodnoty na osi x budú narastať v smere doprava a hodnoty osi y smerom nahor.

V prvom kroku si pre každú eleváciu z merania zistíme, v akej pozemnej vzdialenosti od radaru pretína požadovanú výškovú hladinu h . Na to nám posluží výpočet z časti 3.1.5.

Hodnota radiálnej rýchlosti v bode

Potrebujeme vedieť, aká hodnota prislúcha bodu $A[x, y]$. V prvom rade musíme zistiť, či sa daný bod nachádza v dosahu radaru, čo môžeme zistiť opäť z nerovnosti:

$$d = \sqrt{x^2 + y^2} \leq rPx$$

Následne zistíme príslušný azimut θ podľa výpočtu v časti 3.1.2 a jeho reálnu pozemnú vzdialenosť od radaru, t. j. prevedieme vzdialenosť v pixeloch na obrázku na vzdialenosť v metroch. Označme si dM vzdialenosť bodu $A[x, y]$ od radaru.

Zistíme kam patrí pozemná vzdialenosť bodu $A[x, y]$ z hľadiska elevácií. Môžu nastať štyri prípady:

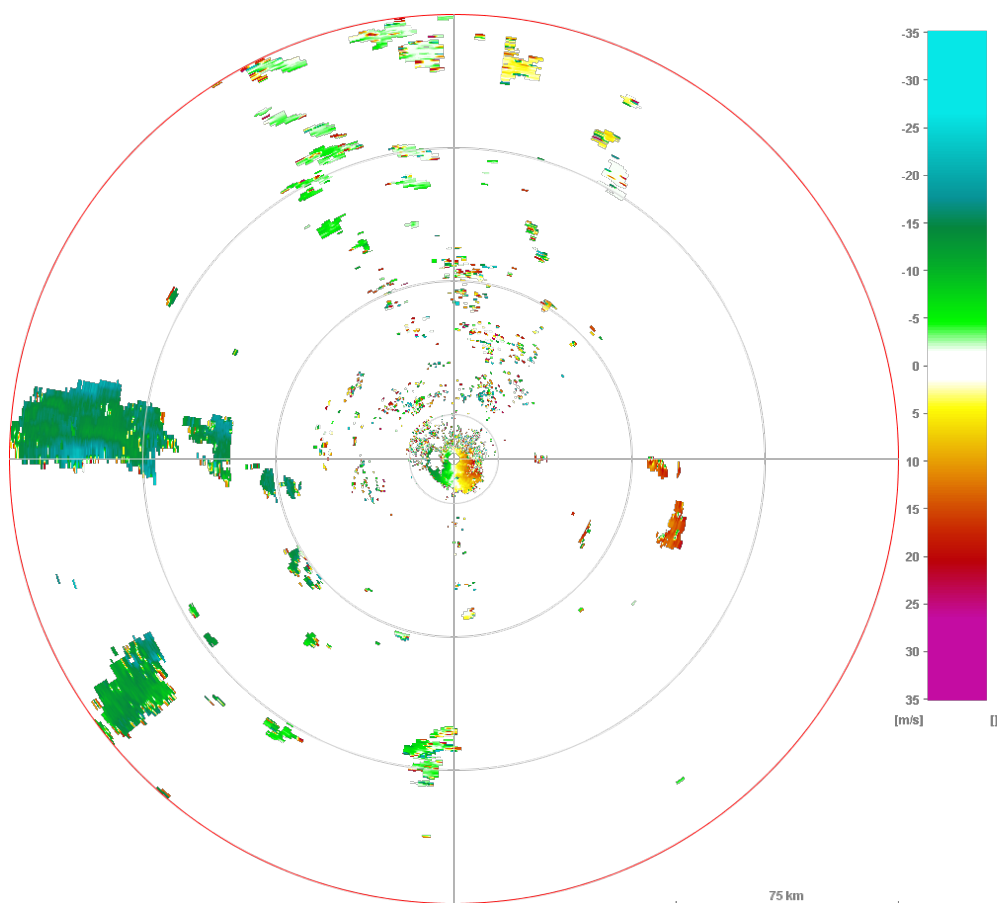
- i) Najvyššia elevácia – pozemná vzdialenosť bodu $A[x, y]$ je menšia ako pozemná vzdialenosť, v ktorej lúč s najväčšou vzdialenosťou pretne výšku h .
- ii) Najnižšia elevácia – pozemná vzdialenosť bodu dM je väčšia ako pozemná vzdialenosť, v ktorej lúč s najmenším elevačným uhlom pretne výšku h .
- iii) Presná elevácia – pozemná vzdialenosť bodu $A[x, y]$ je presne rovnaká ako pozemná vzdialenosť niektorej z elevácií.
- iv) Dve elevácie – nájdeme dve elevácie, pre ktoré platí, že pozemná vzdialenosť prvej je najväčšia menšia ako pozemná vzdialenosť dM . Pozemná vzdialenosť druhej je najmenšia väčšia ako pozemná vzdialenosť dM .

V prípade i a ii zistíme uhol elevácie, ktorá by prešla výšku h v pozemnej vzdialenosti dM podľa výpočtov v časti 3.1.4. Ak je uhlová vzdialenosť od príslušnej krajnej elevácie prípustná, berieme to ako prípad iii.

V prípade iii si vypočítame vzdialenosť od radaru pre bod A' vo výškovej hladine h podľa výpočtu v časti 3.1.3. Na základe tejto vzdialenosti dostávame dve brány vo výstrele daným elevačným uhlom a azimutom θ . Lineárnou interpoláciou týchto dvoch hodnôt dostávame hodnotu bodu A na našom obrázku 3.1.

V prípade iv pre každú z elevácií vypočítame v akej vzdialenosti popri lúči sa nachádza bod, ktorého projekcia na rovinu zeme je bod A (časť 3.1.3). Lineárnou interpoláciou dvoch hodnôt, ktoré dostaneme na základe vypočítanej vzdialenosti popri lúči najskôr pre najbližší menší azimut a potom pre najbližší väčší azimut, dostaneme dve hodnoty pre danú eleváciu a pozemnú vzdialenosť dM . Následnou lineárnou interpoláciou týchto hodnôt na základe zemepisných uhlov vypočítame hodnotu pre daný výstrel pod elevačným uhlom ϕ , azimutom θ a vzdialenosťou od radaru dM . Nakoniec lineárnou interpoláciou získaných

hodnôt pre dané dve elevácie na základe výškového rozdielu, získame výslednú hodnotu pre bod A .



Obr. 3.3: CAPPI produkt: dosah radaru 150 km, výška 8 km, dátum 01.04.2015, UTC 06:12:30

Obrázok 3.3 je produkt vytvorený z reálnych dát získaných z letiska Lijiang (ICAO: ZPLJ), provincia Yunnan, Čína. Na obrázku je zachytená búrka (zelenomodrá oblasť v ľavej časti obrázka).

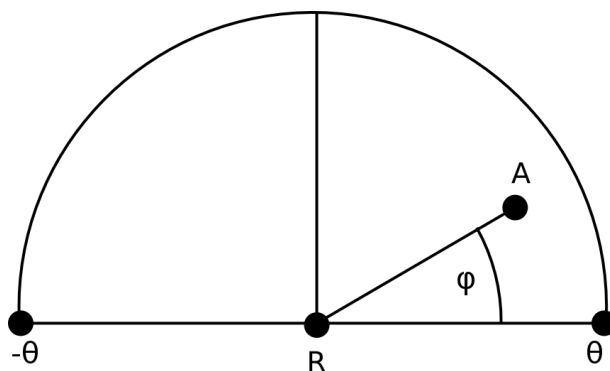
3.4 Range Height Indicator (RHI)

RHI je zobrazenie dát získaných snímačom, ktoré predstavuje vertikálny rez. Zoberieme si konštantný zemepisný uhol θ a zobrazíme dáta získané vo výstreloch pod rôznymi

elevačnými uhlami a daným uhlom θ , a taktiež dáta získané vo výstreloch pod rôznymi elevačnými uhlami a uhlom opačným k uhlu θ , ktorý v ďalšom texte budeme označovať ako $-\theta$. Pre podrobnejšie informácie odporúčame článok *Radar products and operational applications* [1].

3.4.1 Popis obrázka

Na obrázku 3.4 vidíme zjednodušený model produktu. Chceme vytvoriť RHI produkt pre zemepisný uhol θ . Obrázok tvorí polkruh so stredom v snímači R . Body polkruhu sú všetky body v dosahu radaru, ktorý skenuje pod ľubovoľným elevačným uhlom a jedným zo zemepisných uhlov θ a $-\theta$. Zoberme si bod A na obrázku 3.4. Uhol ϕ predstavuje elevačný uhol výstrelu, ktorý pod zemepisným uhlom θ , prechádza daným bodom A . V bode A zobrazíme hodnotu, ktorú snímač namerá vo výstrele pod elevačným uhlom ϕ a azimutom θ .



Obr. 3.4: Snímač – RHI

3.4.2 Vytvorenie produktu

Pri vytváraní obrázku v Jave si musíme transformovať súradnicový systém na taký, ktorý má začiatok súradnicových osí v strede spodného okraja, ktorý predstavuje snímač. Hodnoty na osi x budú narastať smerom doprava a hodnoty na osi y budú narastať smerom nahor.

Hodnota radiálnej rýchlosti v bode

Chceme zistiť aká hodnota prislúcha ľubovoľnému bodu $A[x, y]$. Kde súradnica x predstavuje vzdialenosť od radaru v smere θ a súradnica y je výška bodu nad povrchom zeme. Najskôr zistíme, či sa daný bod nachádza v dosahu radaru z nerovnosti:

$$d = \sqrt{x^2 + y^2} \leq rPx$$

V nerovnosti d predstavuje vzdialenosť bodu A od radaru v pixeloch a rPx je dosah radaru v pixeloch. Následne si bod A prevedieme do reálnych súradníc, kde súradnica x bude predstavovať pozemnú vzdialenosť od radaru pri zemepisnom uhle θ respektíve $-\theta$. Súradnica y je výška bodu A v metroch.

$$xM = |x| \times \frac{r}{rPx} \quad (3.9)$$

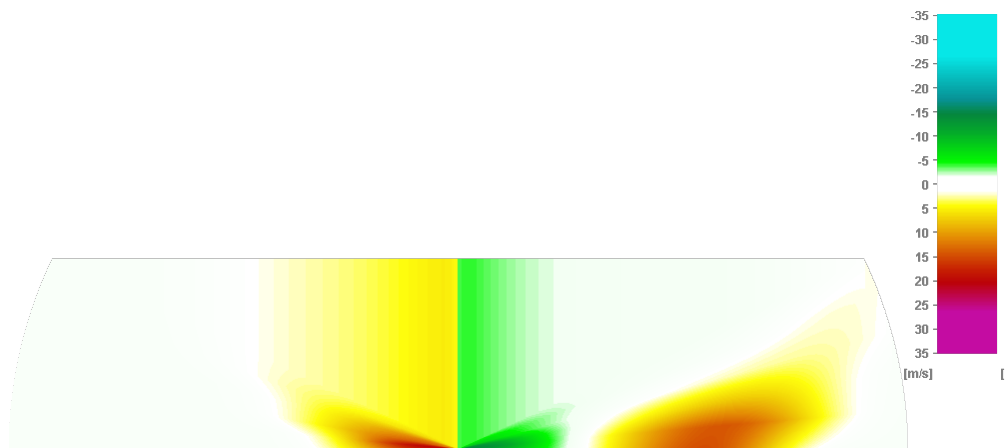
$$yM = y \times \frac{r}{rPx} \quad (3.10)$$

V rovniciach r označuje dosah radaru v metroch. V prípade, že bolo x kladné (záporné) uvažujeme zemepisný uhol θ ($-\theta$).

Rovnako ako v prípade CAPPI produktu potrebujeme zistiť hodnotu v bode s danou výškou yM a pozemnou vzdialenosťou xM .

V prvom kroku si zistíme, kam patrí pozemná vzdialenosť xM z hladiska elevácií. Ošetríme najmenšiu a najväčšiu eleváciu, t. j. v prípade, že hľadaná elevácia je prípustná, problém prevedieme na problém konkrétnej elevácie. Pre najbližšie azimuty dostaneme hodnoty vo vypočítanej vzdialenosti podľa 3.1.3. Výsledné hodnoty lineárne interpolujeme podľa azimutov.

V prípade, že dostaneme dve elevácie, pre každú eleváciu zvlášť si vypočítame hodnotu a potom na základe výškových rozdielov elevácií tieto hodnoty lineárne interpolujeme.

Obr. 3.5: RHI produkt: azimut 90° , opačný azimut -90°

Na obrázku 3.5 je RHI produkt vytvorený z modelových dát, ktorý zobrazuje *microburst* so stredom v bode 800 m smerom na východ a 0 m smerom na sever. Meranie začalo v čase tretej minúty po začiatku *microburstu*. Bolo oskenovaných 6 elevácií s rozstupmi 5° .

3.5 Rekonštrukcia vektorového poľa

V nasledujúcej časti popíšeme rekonštrukciu vektorového poľa pomocou metódy *Velocity Azimuth Processing* (VAP) podľa článku *An Integrating Velocity-Azimuth Process Single-Doppler Radar Wind Retrieval Method* [8]. Za predpokladu, že vektory vetra dvoch susedných azimutov sú uniformné, horizontálne zložky vetra môžu byť odvodené pomocou danej metódy.

Pre skeny s nízkou eleváciou má vertikálna zložka vetra zanedbateľný prínos. Preto radiálnu rýchlosť zložky k môžeme vyjadriť nasledovne:

$$k = u \times \sin \theta + v \times \cos \theta$$

Kde k je kladné (záporné), keď vietor fúka smerom od (k) radaru. Horizontálne zložky vetra smerom na východ a na sever sú u a v .

Zoberme si tri body v rovnakej vzdialenosti od radaru – A , O , B . Označme si θ ako azimut v bode O a $\Delta\theta$ je rozdiel azimutov pre body A a O a body O a B . Potom radiálne

rýchlosti k_A a k_B namerané radarom v bodoch A a B , vyjadrujú vzťahy:

$$k_A = u \times \sin(\theta - \Delta\theta) + v \times \cos(\theta - \Delta\theta) \quad (3.11)$$

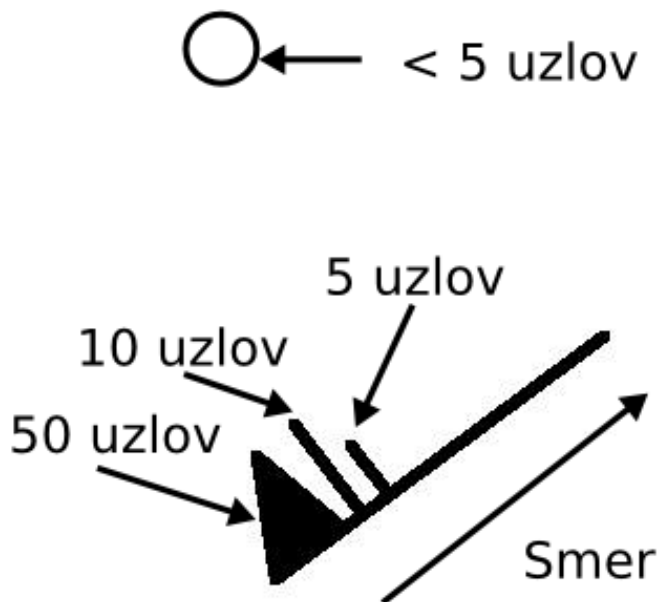
$$k_B = u \times \sin(\theta + \Delta\theta) + v \times \cos(\theta + \Delta\theta) \quad (3.12)$$

Následne zo vťahov 3.11 a 3.12 vyjadríme vzorce na výpočet horizontálnych zložiek vetra:

$$u = \frac{k_B \times \cos(\theta - \Delta\theta) - k_A \times \cos(\theta + \Delta\theta)}{\sin(2\Delta\theta)} \quad (3.13)$$

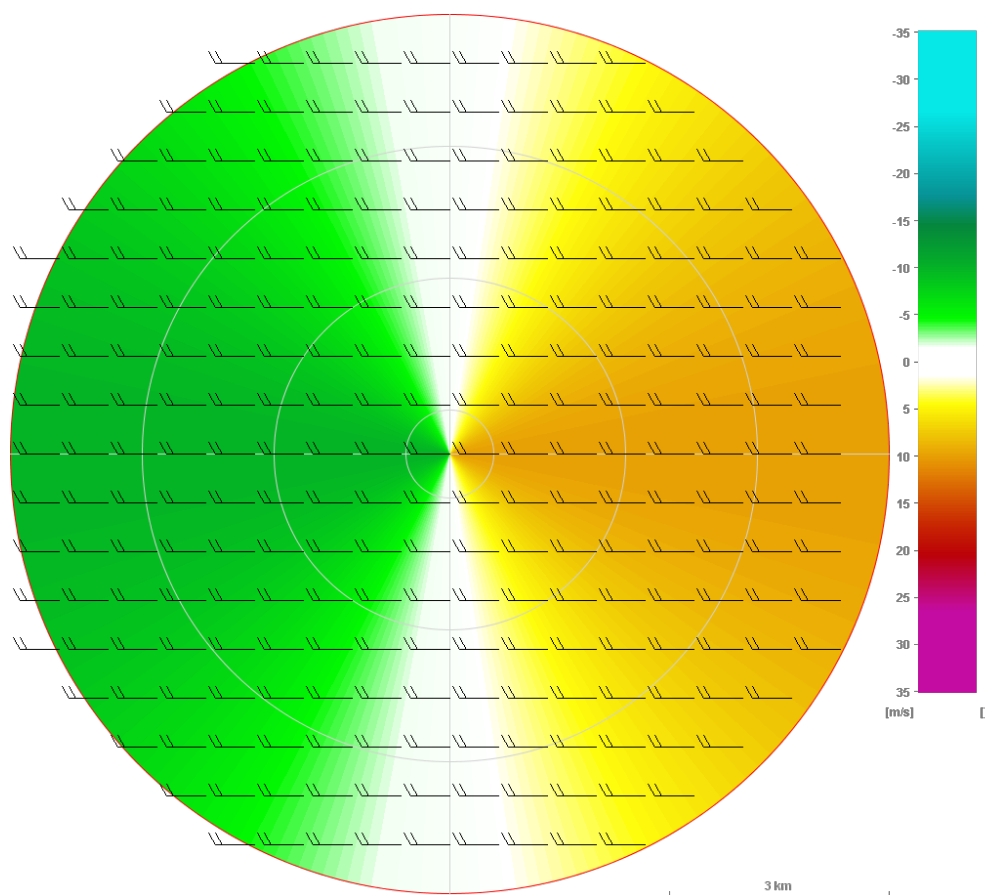
$$v = \frac{k_A \times \sin(\theta + \Delta\theta) - k_B \times \sin(\theta - \Delta\theta)}{\sin(2\Delta\theta)} \quad (3.14)$$

Zobrazme si rekonštrukciu do PPI produktu pomocou značky *wind barb*. Vysvetlenie k týmto značkám je na obrázku 3.6.



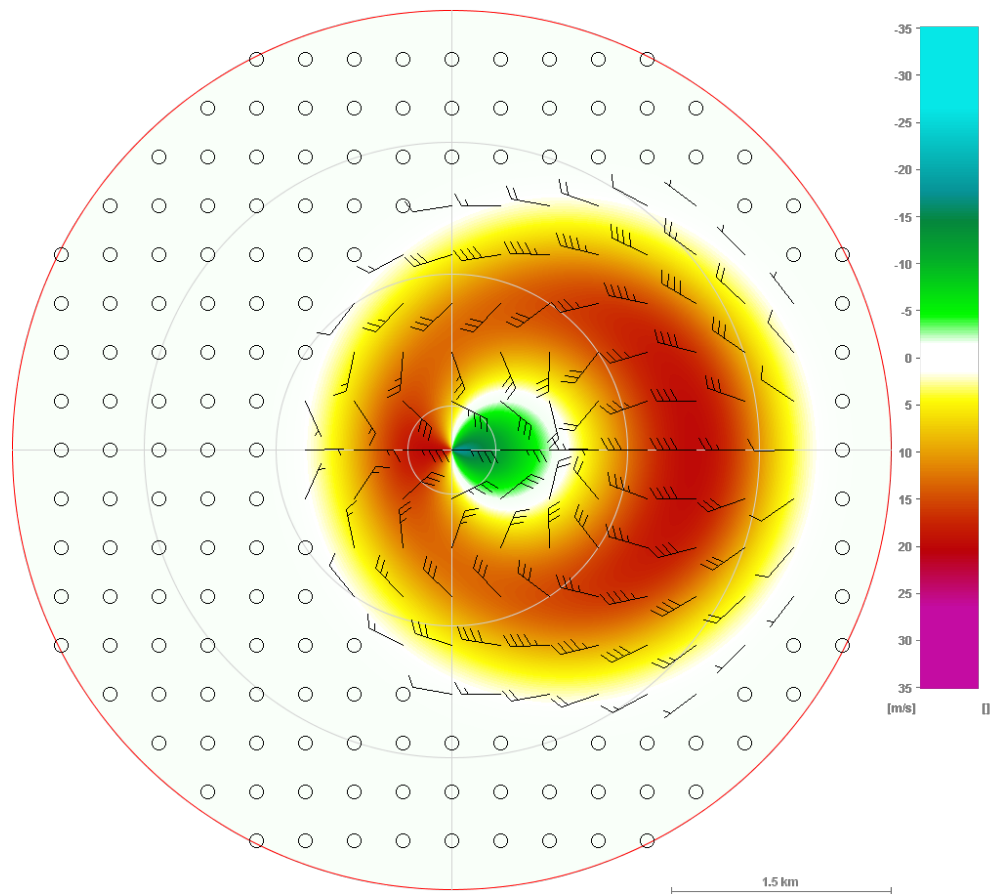
Obr. 3.6: Vysvetlivky značenia wind barb

Na obrázku 3.7 je zobrazená rekonštrukcia vektorového poľa pre rovnomerný vietor fúkajúci zo západu na východ.



Obr. 3.7: Rekonštrukcia vektorového poľa: dosah radaru 6 km, elevačný uhol 0.5°

Obrázok 3.8 predstavuje rekonštrukciu vektorového poľa pre polohu *microburstu* 750 metrov na východ od radaru. Na obrázku vidieť, že rekonštrukcia vektorového poľa neprebehla podľa predpokladu. Očakávali by sme, rozbiehavé značky pre vietor, ale na okraji *microburstu* sú natočené nesprávnym smerom. Nepresnosť môže byť spôsobená tým, že nemáme uniformné pole. Presnejšie výsledky by sme mohli dosiahnuť pomocou dvoch snímačov.



Obr. 3.8: Rekonštrukcia vektorového poľa: dosah radaru 3 km, elevačný uhol 0.0°

Kapitola 4

Algoritmus detekcie

V nasledujúcom texte opíšeme algoritmus detekcie *microburstu*. Naším cieľom je zdetegovanie meteorologického javu na základe dát získaných z dopplerovského radaru respektíve lidar. Najskôr sa budeme venovať zjednodušenému modelu *microburstu*, z ktorého budeme pri vývoji algoritmu vychádzať.

4.1 Zjednodušený model *microburstu*

Pri algoritme detekcie budeme využívať nasledujúci zjednodušený model *microburstu*, ktorý je detailne opísaný v článku od Merritta [9].

Uvažujme radiálne symetrický *outflow* od miesta, kde narazí stĺpec vzduchu na zem. Rýchlosť vetra je funkciou závislou od veľkosti, sily a vzdialenosti od stredu *microburstu*.

4.1.1 Profil vetra

Profil vetra pre zjednodušený model *microburstu* je kruhovo symetrický. Rýchlosť vetra možno vyjadriť pomocou funkcie závislej od vzdialenosti od stredu *microburstu*, pričom smer rýchlosti vetra bude vždy smerom od stredu javu.

Existuje veľa profilov, ktoré vyjadrujú rýchlosť vetra. Základný predpoklad je, že veľkosť rýchlosti vetra smerom od stredu *microburstu* monotónne rastie po určitú vzdialenosť, kde dosahuje najväčšiu rýchlosť. Potom so vzdialenosťou klesá veľkosť rýchlosti vetra k nule.

Vzdialenosť od stredu *microburstu* po miesto, kde dosahuje najväčšiu rýchlosť, sa označuje ako polomer *microburstu*. Maximálnu rýchlosť, ktorú dosahuje *microburst* budeme označovať ako v_m a vzdialenosť, v ktorej je dosiahnutá maximálna rýchlosť R_m .

4.1.2 Hjelmfelt model

Jedným zo zjednodušených modelov je 2D Hjelmfeltov model, ktorý je definovaný nasledovne:

$$v(r_m) = \begin{cases} v_m \times \frac{r_m}{R_m} & r_m < R_m \\ v_m \times \left(\frac{R_m}{r_m}\right)^2 & r_m \geq R_m \end{cases}$$

Kde r_m predstavuje vzdialenosť od stredu *microburstu*, v ktorej chceme zistiť rýchlosť vetra.

4.1.3 Namerané hodnoty

Predstavme si, že snímač vysiela lúče pod elevačným uhlom 0° . Označme D_m vzdialenosť centra *microburstu* od snímača. Nameranú radiálnu zložku rýchlosti možno vyjadriť funkciou v závislosti od vzdialenosti r od radaru a uhlom θ , ktorý zvierá vystrelený lúč s centrom *microburstu*.

$$v_r(r, \theta) = v_m(r_m) \times K \quad (4.1)$$

$$K = \frac{r - D_m \cos(\theta)}{\sqrt{D_m^2 + r^2 - 2rD_m \cos(\theta)}} \quad (4.2)$$

$$r_m = \sqrt{D_m^2 + r^2 - 2rD_m \cos(\theta)} \quad (4.3)$$

4.2 Terminal Doppler Weather Radar (TDWR) algoritmus

V nasledujúcej časti popíšeme koncept TDWR algoritmu podľa publikácie Merritta[9], z ktorého budeme vychádzať pri implementácii nášho algoritmu.

4.2.1 Cieľ algoritmu

Cieľom algoritmu je identifikovať segmenty strihu vetra pre každý vystrelený lúč. Daný vystrelený lúč prechádza *microburstom*, pričom segment strihu vetra na danom lúči tvorí oblasť od miesta s minimálnou rýchlosťou po miesto s maximálnou rýchlosťou. Tieto segmenty sa potom spájajú a vytvárajú regióny strihu vetra.

Každý segment sa vyznačuje dĺžkou a silou. Dĺžka segmentu udáva vzdialenosť maxima rýchlosti od minima rýchlosti. Sila je určená rozdielom veľkosti rýchlosti naprieč segmentom.

Dĺžka a sila segmentu sa bude líšiť v závislosti od polomeru a sily *microburstu* a od uhla medzi vystreleným lúčom a centrom *microburstu*. Rozdiel rýchlostí naprieč segmentom a jeho dĺžka sú vyjadrené pomocou vzťahov:

$$\Delta v = 2v \times \left[1 - \left(\frac{D_m}{R_m} \right)^2 \sin^2(\theta) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.4)$$

$$\Delta R = 2R_m \times \left[1 - \left(\frac{D_m}{R_m} \right)^2 \sin^2(\theta) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.5)$$

Aby neboli akceptované falošné segmenty, boli určené minimálna dĺžka a sila segmentu. Podľa článku Merritta [9] sú to nasledovné hodnoty:

$$v_t = 5 \text{ m s}^{-1} \quad (4.6)$$

$$R_T = 0.95 \text{ km} \quad (4.7)$$

4.2.2 Opis algoritmu

Vstupom pre algoritmus je meranie snímača pre konštantnú eleváciu. Lúče sú rozdelené v intervaloch 1° . Výstupom sú regióny strihu segmentu, ktoré obsahujú segmenty. Každý segment je charakterizovaný azimutom, počiatočnou a koncovou vzdialenosťou od snímača a rozdiel rýchlostí vetra naprieč segmentom. Región strihu vetra je charakterizovaný ohraňením a maximálnym rozdielom rýchlostí nachádzajúcim sa v regióne.

Detekcia segmentov strihu vetra

Prvým cieľom algoritmu je zdetegovanie segmentov strihu vetra na jednotlivých výstreloch. Úlohou je nájsť oblasť s rastúcimi hodnotami.

Priebeh je nasledovný. Vyberie sa istý počet brán, ktoré budú tvoriť okno. Okno sa bude postupne posúvať od prvej brány až po poslednú. Prvú bránu v okne si označíme ako aktuálnu. Pre každé okno sa testuje, či by v ňom mal segment začať respektíve končiť. Podľa článku Merritta [9] by malo okno predstavovať 0.5 km.

Okno, ktoré sa prehlási za začiatkové, musí spĺňať nasledujúce podmienky:

- i) Všetky hodnoty musia byť validné, t. j. pre danú bránu musel snímač vrátiť hodnotu.
- ii) Všetky hodnoty v okne musia byť väčšie ako hodnota aktuálnej brány.
- iii) Prvých $firstN$ hodnôt v okne musí byť monotónne rastúcich.

Následne sa okno posúva ďalej, pokiaľ nesplní podmienky, na základe ktorých bude prehlásené ako koncové:

- i) Celkový počet brán, ktoré nie sú validné a tých, ktorých hodnota je menšia ako hodnota aktuálnej brány je viac ako $badN$
- ii) Rozdiel rýchlostí medzi aktuálnou bránou a bránou s najmenšou väčšou hodnotou ako hodnota aktuálnej brány presahuje max .

Pričom hodnoty $firstN$, $badN$ a max sú parametrami algoritmu.

Ak majú hodnoty okna rastúci charakter, okno sa posúva ďalej. Dôležitý je však výber novej aktuálnej brány. Ak by sa vybrala príliš vysoká hodnota v porovnaní s priemernou

hodnotou, mohlo by to viesť k predčasnému ukončeniu segmentu. Naopak pri výbere malej hodnoty máme veľa testov. Preto sa do úvahy berú všetky brány, ktorých hodnota je väčšia ako hodnota aktuálnej brány a vyberie sa tá, ktorá má najmenší pozitívny prírastok. Znova sa do úvahy berú všetky hodnoty a vyberie sa prvá taká, ktorá ma pozitívny prírastok a zároveň jej prírastok je menší alebo rovný ako jeden a pol násobok zisteného minimálneho prírastku. Takto sa zabráni výberu hodnôt s príliš veľkým skokom.

Akceptácia segmentu

Segmenty musia byť testované, aby boli vylúčené tie, ktoré nepredstavujú segmenty *microburstu*. Segment nemôže byť akceptovaný, ak budú splnené nasledujúce podmienky:

- i) Ak je segment príliš krátky – jeho dĺžka je menej ako 0.95 km.
- ii) Rozdiel rýchlostí naprieč segmentom je príliš malý – menej ako 5 m s^{-1}
- iii) Ak je príliš veľa neplatných hodnôt, hodnôt menších ako počiatočná brána alebo hodnôt väčších ako koncová brána – podiel je viac ako 0.125.
- iv) Ak nemá rastúci trend počas celej dĺžky

Testovanie segmentu prebieha opakovaním nasledovného procesu, dovtedy kým segment nebude odmietnutý alebo prijatý.

Začiatok a koniec segmentu sa posunie smerom ku stredu, kým každý z nich nie je lokálny extrém. Segment bude odmietnutý, ak spĺňa jednu z podmienok uvedených vyššie. Segment bude odmietnutý, ak priemerné hodnoty približne každého 0.5 km netvorí monotónne rastúcu postupnosť. Nakoniec sa skontroluje, či obe koncové brány segmentu spĺňajú podmienku, že vo vzdialenosti 1 km od nich je rozdiel veľkosti rýchlostí aspoň 5 m s^{-1} . Ak to platí pre obe brány, segment bude akceptovaný, v opačnom prípade bude segment skrátený a akceptačný proces sa zopakuje.

Spájanie segmentov

Keď sú identifikované segmenty v jednotlivých výstreloch, musia byť spojené do regiónov strihu vetra. Akékoľvek segmenty, ktoré sa prekrývajú aspoň 0 km budú spojené.

Segmenty, ktoré majú uhlovú vzdialenosť menšiu ako 2° , patria do rovnakého regiónu. Konečným výstupom algoritmu je zoznam regiónov.

4.3 Úpravy algoritmu TDWR

Implementácia nášho algoritmu vychádza z konceptu TDWR algoritmu s niekoľkými zmenami. V nasledujúcom texte opíšeme zmeny algoritmu a dôvod týchto zmien.

4.3.1 Detekcia začiatku segmentu

Šum sa vyskytuje pri takmer každom elektronickom zariadení a vyplýva z rôznych efektov. Hodnoty, ktoré dostaneme meraním, nemusia byť reálne hodnoty, ktoré sa v oblasti merania nachádzajú.

Algoritmus TDWR vyžaduje, aby okno, o ktorom sa rozhodujeme či je začiatkové, obsahovalo iba validné hodnoty, a súčasne aby *firstN* z nich tvorilo mónotónne rastúcu postupnosť. V prípade zašumených dát, ale nemusí nastať prípad, že budeme mať mónotónne rastúcu postupnosť, ale napriek tomu hodnoty budú mať rastúcu tendenciu. Preto algoritmus TDWR nenájde začiatkový segment. Naším riešením je namiesto hľadania mónotónnej rastúcej postupnosti zistiť, či sa postupnosť prejavuje ako rastúca. T. j. zistíme sklon regresnej priamky preloženej danými hodnotami. Podľa nej zistíme, či majú hodnoty tendenciu rastu alebo poklesu.

4.3.2 Detekcia konca segmentu

Rovnako, ako v prípade detekcie začiatku segmentu, aj v prípade konca segmentu musíme rátať so šumom.

Zoberme si prípad, že hodnota aktuálnej brány bude kvôli šumu vyššia, následné hodnoty môžu mať rastúcu tendenciu, ale veľa z nich bude menších ako hodnota aktuálnej brány. V tomto prípade algoritmus TDWR predčasne ukončí segment. Možné riešenie je opäť využiť sklon regresnej priamky preloženej danými hodnotami.

4.3.3 Akceptácia segmentu

Algoritmus TDWR rovno odmietne segment v prípade, že je príliš veľa invalidných hodnôt, menších ako hodnota začiatkovej brány alebo väčších ako hodnota koncovkej brány. V prípade, že zlé hodnoty sú kumulované na jednom mieste, segment by mohol byť skrátенý tak, aby toto miesto neobsahoval. Skrátенý segment tak môže byť v konečnom dôsledku akceptovaný, čo v prípade algoritmu TDWR nie je možné.

4.4 Implementácia algoritmu

Skôr, ako opíšeme implementáciu algoritmu, uvedieme, ako budeme zisťovať sklon regresnej priamky preloženej niekoľkými bodmi. Využijeme na to metódu najmenších štvorcov.

4.4.1 Zisťovanie sklonu regresnej priamky

Aby sme mohli vyjadriť sklon regresnej priamky, musíme najskôr určiť nasledovné hodnoty:

$$s_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.8)$$

Vzťah určuje štandardnú odchýlku hodnôt x , pričom n vyjadruje počet hodnôt a \bar{x} je ich priemer.

$$s_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.9)$$

Veličina s_y je štandardná odchýlka nameraných hodnôt y , kde n je počet hodnôt y a \bar{y} je ich priemer.

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}} \quad (4.10)$$

Vzťah určuje Pearsonov korelačný koeficient r .

Sklon m regresnej priamky možno vyjadriť nasledovným vzťahom, kde r je vypočítaný korelačný koeficient podľa 4.10, s_x a s_y sú smerodajné odchýlky zo vzťahov 4.8 a 4.9.

$$m = r \frac{s_y}{s_x}$$

4.4.2 Detekovanie segmentu na výstrele

Sme v stave, že segment nebol začatý a máme aktuálnu bránu, ktorou začína okno. Ideme overiť, či daným oknom začína segment alebo nie. Aby sme okno mohli prehlásiť za začiatkové, musí sa začínať validnou hodnotou. V prípade, že to tak nie je, posunieme okno o jednu bránu ďalej. Spočítame, koľko je zlých hodnôt v okne, t. j. hodnôt, ktoré nie sú validné alebo menšie ako hodnota aktuálnej brány. V prípade, že presahujú povolený limit zlých hodnôt, okno nie je začiatkové a aktuálnu bránu posúvame na prvú zlú hodnotu, ktorú sme našli v okne. V opačnom prípade určíme sklon regresnej priamky, a ak je väčší ako sklon predstavujúci zmenu rýchlostí 5 m s^{-1} na vzdialenosti približne 950 metrov, okno prehlásime za začiatkové a posunieme ho do prvej brány, ktorej pozitívny prírastok je menší ako jeden a pol násobok najmenšieho pozitívneho prírastku hodnôt väčších ako aktuálna brána.

V prípade, že segment začal a máme aktuálne okno, vždy overíme, či nie je končiace. Pozrieme sa na počet neplatných hodnôt a hodnôt menších ako aktuálna brána. Ak zlých hodnôt je viac ako povolený limit, určíme sklon regresnej priamky hodnôt daného okna. V prípade, že je záporný, prehlásime okno za končiace. Koncová brána bude tá, ktorá je lokálnym maximom.

Následne potrebujeme zistiť, či daný segment má byť akceptovaný. Pokiaľ neodmietneme alebo neakceptujeme segment, budeme opakovať nasledovný proces:

- i) Zistíme, či podiel zlých hodnôt segmentu ku všetkým hodnotám segmentu je veľký (> 0.125). Ak je, segment skrátime smerom k stredu.
- ii) Segment odmietneme ak nemá rastúci trend naprieč celým segmentom. Zoberme si postupne okná, ktoré uložíme vedľa seba. Z validných hodnôt urobíme priemer pre každé okno. Postupnosť týchto hodnôt by mala byť monotónne rastúca.

- iii) Segment odmietneme v prípade, že dĺžka segmentu je menšia ako minimálna dĺžka segmentu alebo ak rozdiel rýchlosti naprieč segmentom je menší ako minimálny rozdiel rýchlosti.
- iv) V prípade, že segment ešte nebol odmietnutý, zistíme, či oba konce spĺňajú podmienku, že vo vzdialenosti približne 1 km je rozdiel rýchlostí aspoň 5 m s^{-1} . V prípade, že je podmienka splnená, akceptujeme segment, inak ho skrátime smerom do stredu na tom konci segmentu, kde nebola podmienka splnená.

Ďalší segment hľadáme od konca segmentu, ktorý vznikne pri úpravách počas akceptácie segmentu.

Časová zložitosť

V najhoršom možnom prípade hľadanie segmentov na výstrele, ak nenájdeme žiaden segment a okno posúvame pomaly, patrí do časovej zložitosti $O(n^2)$, kde n predstavuje počet hodnôt vo výstrele. Túto časovú zložitosť tiež dosiahneme v prípade, že nájdeme segment, ktorý validáciou budeme skracovať smerom k začiatku. Potom nájdeme ďalší, ktorý opäť skrátime a takto budeme postupovať, kým sa nedostaneme na koniec výstrelu.

Celková zložitosť hľadania segmentov na jednej elevácii patrí do $O(vn^2)$, kde v je počet výstrelův na danej elevácii.

4.4.3 Určovanie regiónov strihu vetra

Po určení segmentův strihu vetra zostáva ich zlúčenie do regiónův strihu vetra. Vstupom je zoznam segmentův pre každý výstrel a výstupom bude zoznam regiónův. Segmenty budeme spájať do regiónův pomocou hľadania súvislých komponentův grafu. Vytvoríme graf nasledovne. Vrcholy tvoria segmenty, pričom medzi dvomi segmentami bude hrana práve vtedy, keď sa prekrývajú aspoň 0 km a uhlová vzdialenosť je najviac 2° .

4.5 Porovnanie algoritmov

V nasledujúcej časti spíšeme výsledky testovania algoritmov na modelových a reálnych dátach. Porovnaním výsledkov zistíme, či sa nám podarilo zlepšiť algoritmus TDWR.

4.5.1 Modelové dáta

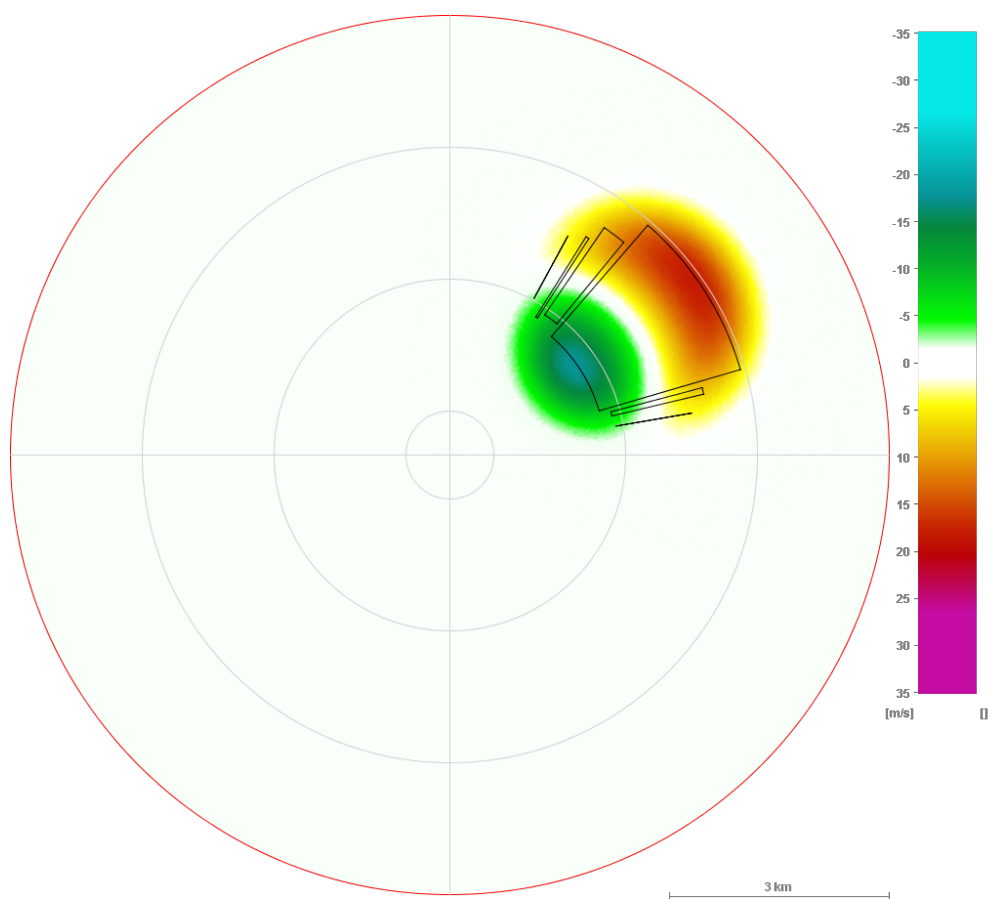
V nasledujúcom texte popíšeme výsledky algoritmov na modelových dátach. Pomocou vytvorenia PPI produktu si vizualizujeme detekciu strihu vetra pomocou oboch algoritmov.

Výstupom oboch algoritmov je zoznam regiónov strihu vetra, ktoré sú určené nasledovne. Každý región má určený minimálny a maximálny azimut, kde sa vyskytuje a minimálnu a maximálnu vzdialenosť od radaru.

Popis dát

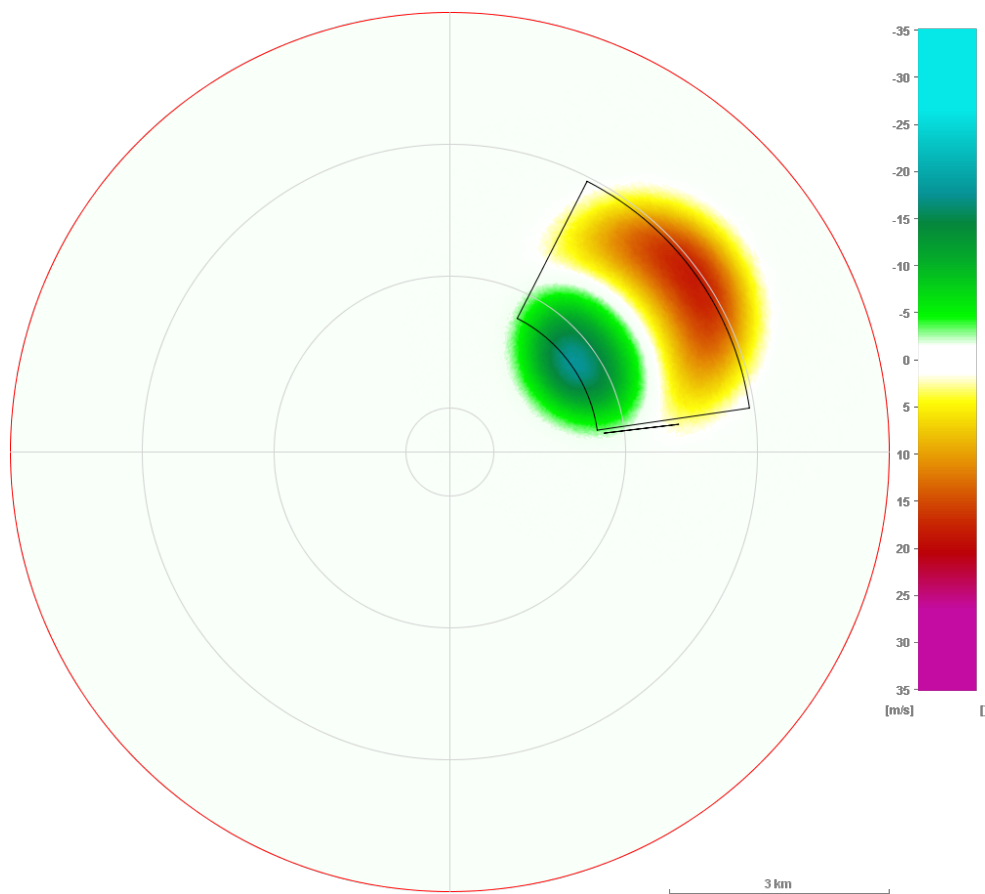
Vytvoríme si modelové dáta nasledovne. Stred *microburstu* bude umiestnený v bode $A[2500m, 1800m]$, kde os x smeruje na východ a os y smeruje na sever. Pridajme snímaču biely šum 1, čo znamená, že ku každej nameranej hodnote sa s rovnomernou pravdepodobnosťou pripočíta hodnota z intervalu $[-1, 1]$.

Zobrazme regióny strihu vetra detegované pomocou algoritmu TDWR a následne pomocou nášho upraveného algoritmu. Naším predpokladom je, že algoritmus TDWR zdeteguje menej segmentov ako modifikovaný algoritmus.



Obr. 4.1: PPI produkt: dosah radaru 6 km, elevačný uhol -0.5°

Obrázok 4.1 predstavuje detekciu strihu vetra algoritmom TDWR. Produkt zobrazil niekoľko regiónov strihu vetra. Zoberme do úvahy dva susedné regióny. Tieto regióny nie sú spojené, pretože medzi nimi existuje aspoň jeden výstrel, na ktorom nebol zdetegovaný ani jeden segment strihu vetra.



Obr. 4.2: PPI produkt: dosah radaru 6 km, elevačný uhol -0.5°

Obrázok 4.2 predstavuje detekciu pomocou modifikovaného algoritmu. Algoritmus našiel v tej istej oblasti menej regiónov strihu vetra, t. j. identifikoval viac segmentov strihu vetra.

Porovnanie algoritmov pomocou Probability Of Detection (POD)

POD analýza sa vykonáva pre letiskovú dráhu a jej arénu. Aréna pozostáva z dráhy, oblasti pristávania, ktorá má 3 námorné míle a oblasti vzlietania s 2 námornými míľami. Každú fyzickú dráhu môžeme interpretovať ako dve dráhy používané v opačných smeroch. POD analýza bola robená na dráhach 09 a 27. Dráha 09 má oblasť pristávania zo západu a oblasť vzlietania smerom na východ. Dráha 27 má oblasť pristávania z východu a oblasť vzlietania smerom na západ.

POD bodu je pravdepodobnosť, že ak dané miesto je zasiahnuté *microburstom*, bude daný *microburst* zdetegovaný. Pomocou POD analýzy implementovanej Barborou Klembarovou [6], dostávame výsledky pre snímač s dosahom 6 km, pričom snímač je umiestnený v strede dráhy a 300 m na sever. Výsledky sú zobrazené v tabuľkách 4.1 a 4.2.

Oblasť		TDWR	Upravený TDWR
09		82.7%	81.8%
3A		49.2%	49.6%
2A	2D	100.0%	100.0%
1A	1D	100.0%	100.0%
RWY	RWY	95.8%	95.8%
1D	1A	80.1%	79.4%
2D	2A	70.6%	65.1%
	3A	28.8%	27.5%
	27	80.1%	78.9%

Oblasť		TDWR	Upravený TDWR
09		91.7%	92.3%
3A		52.6%	56.3%
2A	2D	100.0%	100.0%
1A	1D	100.0%	100.0%
RWY	RWY	99.2%	99.2%
1D	1A	100.0%	100.0%
2D	2A	100.0%	100.0%
	3A	54.7%	55.2%
	27	92.7%	92.8%

Tabuľka 4.1: POD začiatok skenovania v 0 minúte, A – míľa priletu, D – míľa vzletu

Tabuľka 4.2: POD začiatok skenovania v 2.5 minúte, A – míľa priletu, D – míľa vzletu

V tabuľke 4.1 sú horšie výsledky pre oblasť 2A a 3A dráhy 27. Tieto oblasti sú na východ od snímača, preto v čase, keď boli skenované radarom, *microburst* ešte nebol vyvinutý natoľko, aby ho algoritmy mohli zdetegovať.

Tiež náš upravený algoritmus dosahuje o niečo horšie výsledky, kvôli detekcii začiatočného segmentu podľa sklonu regresnej priamky. V začiatočných minútach ešte *microburst* nemá dostatočný sklon na daných výstreloch.

V tabuľke 4.2, ktorá zaznamenáva výsledky, keď snímač začína skenovať oblasť v 2.5 minúte po začatí *microburstu*. Výsledky ukazujú, že upravený algoritmus TDWR dosahuje

o niečo lepšie výsledky.

Porovnanie algoritmov pomocou Probability Of Area Detection (POAD)

POAD analýza je upravená analýza, ktorá skúma prienik regiónov strihu vetra s oblasťou *microburstu*. POAD bodu je pravdepodobnosť, že ak je daný bod zasiahnutý *microburstom*, pri detekcii tohto javu sa daný bod nachádza v aspoň jednom regióne strihu vetra. Pomocou POAD analýzy implementovanej Barborou Klembarovou [6], dostávame výsledky pre snímač s dosahom 6 km, pričom snímač je umiestnený v strede dráhy a 300 m na sever.

Oblasť		TDWR	Upravený TDWR
09		84.6%	87.6%
3A		41.2%	44.3%
2A	2D	99.7%	100.0%
1A	1D	99.8%	100.0%
RWY	RWY	82.7%	86.6%
1D	1A	95.6%	100.0%
2D	2A	94.0%	99.8%
	3A	37.8%	47.2%
	27	84.8%	88.8%

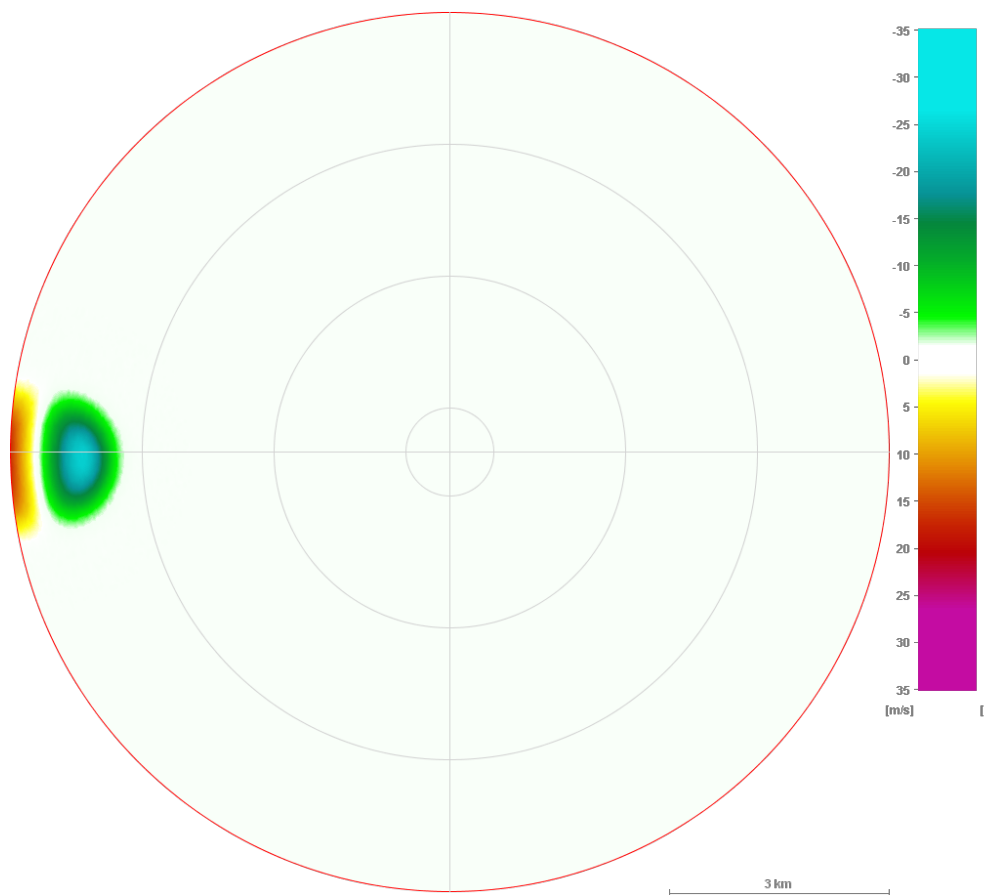
Tabuľka 4.3: POAD začiatok skenovania v 2.5 minúte, A – míľa priletu, D – míľa vzletu

Tabuľka 4.3 predstavuje dáta so šumom 1. Náš upravený algoritmus TDWR dosahuje v každej oblasti lepšie výsledky ako algoritmus TDWR.

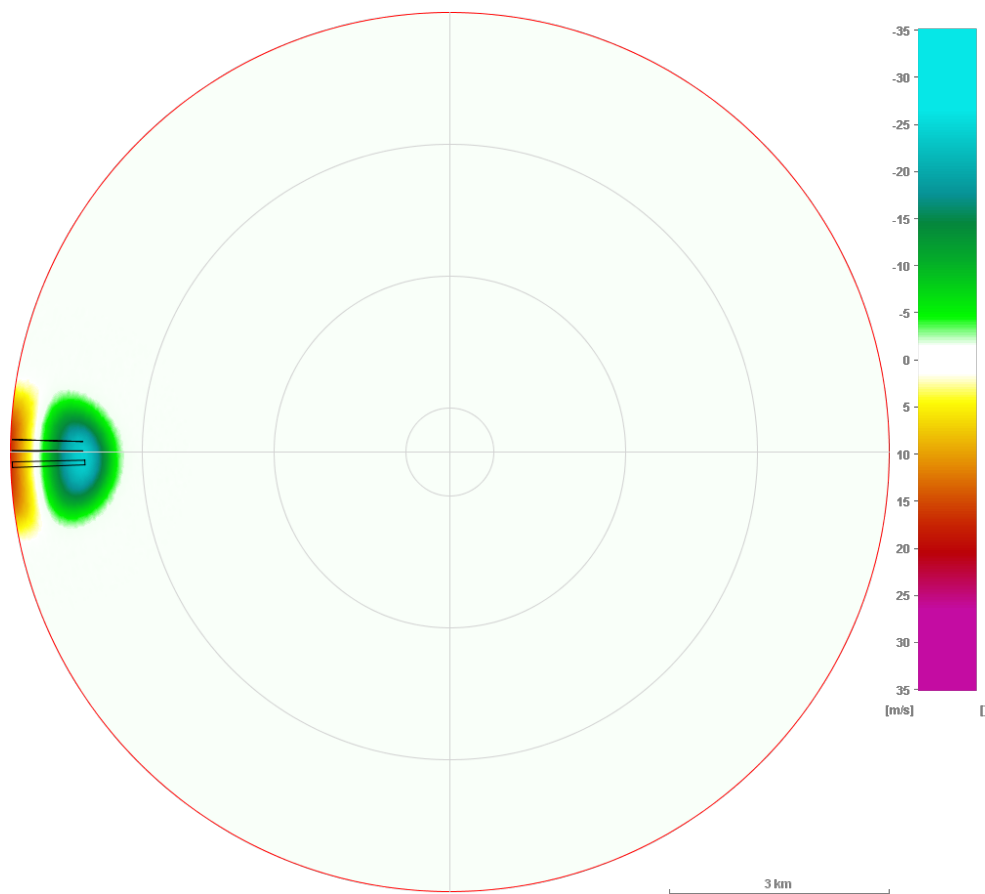
Na dráhe sú horšie výsledky pre oba algoritmy, čo je spôsobené tým, že algoritmus hľadá segmenty pre každý výstrel jednotlivo. Zoberme si *microburst*, ktorého stred je pri

snímači. Segmenty strihu vetra budú zdetegované na tých výstreloch, kde je väčšia časť *microburstu*. Naopak na výstreloch, kde *microburst* ešte zasahuje, ale dĺžka *microburstu* na danom výstrele je nedostatočná, nebude zdetegovaný žiaden segment.

Nasledujúce obrázky 4.3 a 4.4 predstavujú detekciu *microburstu* so stredom v bode $x = -5648$ metrov a $y = -109$ metrov. Dáta majú šum 1. Algoritmus TDWR nezdetegoval *microburst*, zatiaľ čo náš upravený algoritmus áno.



Obr. 4.3: PPI produkt: dosah radaru 6 km, elevačný uhol -0.5°



Obr. 4.4: PPI produkt: dosah radaru 6 km, elevačný uhol -0.5°

4.5.2 Reálne dáta

Frekvencia výskytu strihu vetra je závislá na geografickej lokalite a sezóne. Výskumy sa robia najmä v lokalitách so zvýšeným výskytom javov. Podľa publikácie od Cola a Toda [4] využili merania z dvadsiatich dní z dvoch rokov, kedy sa strih vetra naozaj vyskytol.

Na Slovensku disponuje dopplerovskými radarmi SHMU, ale táto organizácia je práve v procese výmeny radarov v lokalitách Malý Javorník a Kojšovská hoľa a pripravuje sa inštalácia dvoch ďalších radarov (Kojšovská Hoľa a Španí laz), takže reálne dáta predbežne neboli k dispozícii.

Dátum	Počet meraní	Algoritmus TDWR	Upravený TDWR
18.03.2015	12	0	0
19.03.2015	103	0	0
22.03.2015	6	0	0
23.03.2015	73	0	0
01.04.2015	40	0	0
27.04.2015	55	0	0
24.05.2015	201	0	0
25.05.2015	244	0	0
26.05.2015	247	0	0

Tabuľka 4.4: Testovanie reálnych dát z letiska Lijiang (ICAO: ZPLJ), provincia Yunnan, Čína

Algoritmy sme testovali na reálnych dátach z Číny z letiska Lijiang (ICAO: ZPLJ), provincia Yunnan, Čína. Výsledky sú zapísané v tabuľke 4.4. K dispozícii sme mali jedenásť dní v priebehu marca až apríla v rozsahu 981 meraní. Na týchto dátach sme pustili algoritmus TDWR a nami upravený algoritmus TDWR. V žiadnom z meraní nebol identifikovaný strih vetra ani jedným algoritmom.

Záver

V práci sme sa venovali problému zdetegovania nebezpečného meteorologického javu *microburst*, ktorý spôsobuje strih vetra. Na začiatku práce sme popísali problém a vysvetlili základné pojmy. Následne sme ukázali, ako spracovávať dáta, ktoré sme neskôr analyzovali. Vyvinuli sme nástroj na vizualizáciu rýchlosti a smeru vetra. Nástroj nám pomohol pri analýze modelových dát, čo viedlo k návrhu riešenia problému. Pri riešení sme sa tiež inšpirovali existujúcim algoritmom. Urobili sme niekoľko zmien na tomto algoritme, ktoré by mohli viesť k zlepšeniu výsledkov detekcie. Oba algoritmy sme potom otestovali na modelových dátach a dosiahli sme pozitívny výsledok.

Navrhli sme odlišný spôsob identifikovania začiatku a konca segmentu, ako aj akceptačný cyklus segmentu. Ukazuje sa, že v prípade zašumených dát, náš upravený algoritmus dokáže detegovať v tej istej oblasti väčšie množstvo segmentov ako pôvodný existujúci algoritmus. Otázkou ostáva, či nový prístup nevedol k zvýšenému počtu neplatných alarmov. Testovanie počtu falošných alarmov však v súčasnosti nie je možné.

Naše riešenie je ešte len v začiatkovej fáze a je miesto na ďalšie zlepšenia. Bolo by potrebné podrobnejšie otestovať algoritmus na reálnych dátach, o ktorých je známe, že sa tam *microburst* vyskytuje. Na základe týchto dát by sa mohlo presnejšie určiť, čo už považujeme za segment strihu vetra a čo ešte nie. Predmetom ďalšieho výskumu bude vydávanie alarmov v kombinácii výstupov radaru respektíve lidarů s výstupom anemometrového LLWAS systému.

Do budúcnosti je naplánovaný aj výskum a detekcia ďalších meteorologických javov ako je *gust front*.

Literatúra

- [1] C. GEÇER. Training Course on Weather Radar Systems Module D: Radar products and operational applications. *WMO RMTC-TURKEY*, (October), 2010.
- [2] M. Chay, F. Albermani, and R. Wilson. Numerical and analytical simulation of down-burst wind loads. *Engineering Structures*, 28(2):240–254, 2006.
- [3] B. L. Choy, O. S. M. Lee, C. M. Shun, and C. M. Cheng. Prototype automatic lidar-based wind shear detection algorithms. 11th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, American Meteorological Society, Hyannis, MA, USA, 4–8 October 2004.
- [4] R. E. Cole and R. F. Todd. *Terminal Doppler Weather Radar (TDWR) Low Level Wind Shear Alert System 3 (LLWAS 3) Integration Studies at Orlando International Airport in 1991 and 1992*. Project report. Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- [5] J. Holmes and S. Oliver. An empirical model of a downburst. *Engineering Structures*, 22(9):1167–1172, 2000.
- [6] B. Klembarová. Simulácia dynamických 3D atmosférických javov. Bakalárska práca, Univerzita Komenského v Bratislave, 2015.
- [7] S. Lang and E. McKeogh. Lidar and sodar measurements of wind speed and direction in upland terrain for wind energy purposes. *Remote Sensing*, 3(9):1871–1901, 2011.
- [8] X. Liang. An integrating velocity-azimuth process single-doppler radar wind retrieval method. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 24(4):658–665, April 2007.

- [9] M. W. Merritt. *Microburst Divergence Detection for Terminal Doppler Weather Radar*. Project report. Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, 1991.
- [10] Tucson News Now. Weather 101: Dry microbursts. <http://www.TucsonNewsNow.com/story/18235096/weather-101-dry-microbursts>, 2012.
- [11] Tucson News Now. Weather 101: Wet microbursts. <http://www.TucsonNewsNow.com/story/18640826/weather-101-wet-microbursts>, 2012.
- [12] International Civil Aviation Organization. *Manual on Low-level Wind Shear*. Doc (International Civil Aviation Organization). International Civil Aviation Organization, 2005.
- [13] American Meteorological Society. AMS glossary. http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main_Page, 2012.
- [14] WeatherTAP.com and TAP Publishing. WeatherTAP.com - NEXRAD radar tutorial. <http://www.weathertap.com/guides/radar/weather-radar-tutorial.html>, 2012.
- [15] D. Whatley. Lesson 5: Wind shears and microbursts. <http://www.nwas.org/committees/avnwxcourse/lesson5.htm>, 2003.
- [16] Wikimedia. Microburst. <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Microburstcrosssection.JPG>, 2010.
- [17] F. W. Wilson. Wind shear alert system, June 22 1993. US Patent 5,221,924.