

UNIVERZITA KOMENSKÉHO, BRATISLAVA
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

SIMULÁCIA DYNAMICKÝCH
3D ATMOSFÉRICKÝCH JAVOV

BAKALÁRSKA PRÁCA

2015

Barbora Klembarová

UNIVERZITA KOMENSKÉHO, BRATISLAVA
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

SIMULÁCIA DYNAMICKÝCH
3D ATMOSFÉRICKÝCH JAVOV

BAKALÁRSKA PRÁCA

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

Bratislava, 2015

Barbora Klembarová



Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Meno a priezvisko študenta: Barbora Klembarová
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: Simulácia dynamických 3D atmosférických javov
Simulation of Dynamic 3D Atmospheric Phenomena

Cieľ: Cieľmi práce sú:
- implementácia idealizovaných fyzikálnych modelov atmosférických javov (gust front, microburst),
- implementácia simulátorov snímačov (senzor smeru a rýchlosti vetra, dopplerovský radar, LIDAR), poskytujúcich simulované dáta rýchlosti a smeru vetra v reálnom čase,
- využitie simulátora na overenie algoritmov detekcie význačných javov (UCAR Phase III LLWAS algoritmus),
- získanie POD a FAR charakteristík algoritmu detekcie.

Anotácia: Jadrom práce je implementácia idealizovaných fyzikálnych modelov význačných atmosférických javov v reálnom čase a následné využitie simulátora pri overovaní algoritmov detekcie týchto javov (stanovenie POD, FAR charakteristík algoritmov).

Vedúci: RNDr. Peter Borovanský, PhD.
Konzultant: RNDr. Martin Gažák
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

Ďakujem svojmu školiteľovi, ale hlavne svojmu konzultantovi Maťovi, že mi vždy odpovedal na moje maily a pomohol mi to celé učesať. Mojim spolubývajúcim Olívii a Katke, že spolu so mnou zdieľali tento zážitok a Vladkovi za neustálu psychickú podporu. Bratovi, že sa kvôli mne vzdal svojho notebooku a rodičom, že vo mňa verili.

A sestre.

Abstrakt

Microburst je atmosférický jav produkujúci strih vetra, ktorý je nebezpečný pre lietadlá vo fáze vzletu alebo pristávania. Na detekciu strihu vetra sa používajú systémy LLWAS pracujúce s 2D dátami (prízemný vietor meraný anemometrami) a algoritmy využívajúce 3D dáta z radarov/lidarov. Na overovanie týchto algoritmov sú vhodné simulované 3D dáta. Ich vytváraniu sa venujeme v tejto práci. Simulácia je zložená z dvoch častí, v prvej sa simuluje samotný jav a v druhej snímače, ktoré tento jav skenujú. Implementácia bude následne využitá na overenie už existujúcich algoritmov, získanie štatistických charakteristík (pravdepodobnosť detekcie) a ich porovnanie.

Kľúčové slová: strih vetra, *microburst*, simulácia, pravdepodobnosť detekcie, radar, lidar

Abstract

Microburst is an atmospheric phenomenon producing wind shear. It is hazardous to aircraft in the phase of approach or departure. Several methods are used for wind shear detection, such as LLWAS, which works with two-dimensional data (surface wind measured by anemometers) and algorithms using three-dimensional data from radars or lidars. To check the correctness of the implementation, we use simulated 3D data. Creation of the simulation datasets is discussed in this work. The simulation consists of two parts, in the first part phenomenon is simulated and in the second part sensors are simulated, which scan the phenomenon. Finally, we will use the implementation to validate existing algorithms, obtain their statistic characteristics (probability of detection) and compare them.

Keywords: wind shear, microburst, simulation, probability of detection, radar, lidar

Obsah

Úvod	1
1 Základné pojmy a ich význam	2
1.1 Strih vetra	2
1.2 Microburst	3
1.2.1 Časti microburstu	3
1.2.2 Charakteristiky	4
1.2.3 Typy microburstov	4
1.2.4 Vplyv microburstu na lietadlo	5
1.3 Snímače	6
1.3.1 Anemometer	6
1.3.2 Dopplerovský radar	6
1.3.3 LIDAR	7
2 Implementácia	8
2.1 Implementácia modelu microburstu	8
2.1.1 Základné vstupné parametre	8
2.1.2 2D model	9
2.1.3 3D model	10
2.2 Implementácia simulátorov snímačov	12
2.2.1 Implementácia simulátora anemometra	12
2.2.2 Implementácia simulátora Dopplerovského radaru a Lidaru	13
3 Využitie simulátorov javov a senzorov pri overovaní systémov detekcie	21
3.1 Systémy detekcie	21

<i>OBSAH</i>	viii
3.1.1 LLWAS	21
3.1.2 TDWR algoritmus divergencie	25
3.2 Charakteristika POD	27
3.2.1 POD detekcia algoritmu LLWAS	29
3.2.2 POD analýza TDWR algoritmu	31
Záver	36
A POD analýza, letisko Jeju (ICAO: RKPC, IATA: CJU), Kórea	37
B POD analýza pre algoritmus TDWR	43

Zoznam obrázkov

1.1	<i>Microburst</i> [12]	4
2.1	UCAR model	9
2.2	Model podľa Microstep-MIS	10
2.3	Hjelmfelt model	10
2.4	3D model	12
3.1	Algoritmus LLWAS	22
3.2	Letisko [13]	23
3.3	ARENA okolo dráhy 09	28
3.4	ARENA	29
3.5	<i>Microburst</i> blízko radaru/lidaru	34
A.1	POD analýza – model UCAR	37
A.2	Pokrytie letiska	38
A.3	Možnosť 1	38
A.4	Možnosť 2	39
A.5	Možnosť 3	39
A.6	Možnosť 4	40
A.7	Možnosť 5	40
A.8	Možnosť 6a	41
A.9	Možnosť 6b	41
A.10	Možnosť 7	42
A.11	POD analýza – 3D model	42
B.1	POD analýza pre dráhu 09	43
B.2	POD analýza pre dráhu 09	43

B.3	POD analýza pre dráhu 09	44
B.4	POD analýza pre dráhu 09	44
B.5	TDWR – Modifikovaná POD analýza pre dráhu 09	44
B.6	Modifikovaný TDWR – Modifikovaná POD analýza pre dráhu 09	45
B.7	TDWR – Modifikovaná POD analýza pre dráhu 09	45
B.8	Modifikovaný TDWR – Modifikovaná POD analýza pre dráhu 09	45

Zoznam tabuliek

3.1	POD analýza pre dráhy 07/25 a 13/31– UCAR	30
3.2	POD analýza pre dráhy – 3D model	31
3.3	POD analýza pre dráhu 09	32
3.4	POD analýza pre dráhu 09	32
3.5	POD analýza pre dráhu 09	33
3.6	POD analýza pre dráhu 09	33
3.7	POD analýza pre dráhu 09	35
3.8	POD analýza pre dráhu 09	35

Úvod

V súčasnosti sa stáva mnoho leteckých havárií z rôznych príčin. Jednou z nich sú atmosférické javy, ktoré sú zvlášť nebezpečné v blízkosti dráh letiska. Patrí medzi ne *microburst*, ktorý bude hlavnou témou tejto práce.

V roku 1982 FFA¹, NCAR² a univerzita v Chicagu stanovili, že dokážu alebo vyvrátia existenciu *microburstov* a ich potenciálne nebezpečenstvo pre letiská. V Colorade sa nasadili dopplerovské radary a anemometre, určené na hľadanie *microburstov*. Tento projekt sa nazval *Joint Airport Weather Studies Project (JAWS)*.

Využitím siete anemometrov vznikol systém LLWAS, ktorý slúži na detekciu strihu vetra blízko zemského povrchu. Jeho výhodou je nezávislosť na rozptyle svetelných, či rádiových frekvencií a rýchla odozva systému (10 s), zatiaľ čo radar musí skenovať. Avšak, veľmi málo LLWAS systémov je dostatočne rozsiahlych, aby pokryli dostatočnú plochu okolo letiska.

Na druhej strane, dopplerovský radar všeobecne nevie zdetegovať veľmi suché *microbursty*, pretože radarové lúče sa primárne odrážajú od kvapôčok vody a Lidar nevie detegovať mokré *microbursty*, pretože zrážky príliš utlmujú laserový signál a znižujú dosah merania.

V prvej kapitole sa oboznámime s terminológiou a vysvetlíme si aký vplyv má *microburst* na lietadlo. V druhej kapitole sa budeme venovať simulácii 3D modelu *microburstu* a simulácii jednotlivých snímačov, ktoré majú slúžiť na vytváranie idealizovaných vstupných dát pre algoritmy slúžiace na detekciu *microburstov*. Tieto algoritmy budú popísané v kapitole 3, kde si zároveň spravíme analýzy vygenerovaných dát a porovnanie algoritmov.

¹Federal Aviation Administration

²National Center for Atmospheric Research

Kapitola 1

Základné pojmy a ich význam

V tejto kapitole uvedieme základné pojmy, s ktorými sa budeme stretávať. Definície väčšiny z nich či bližšie informácie nájdete v ICAO Manual on Low-level Wind Shear [7] alebo v meteorologickom výkladovom slovníku[8].

Popritom si vysvetlíme význam niektorých pojmov potrebných pre prácu.

1.1 Strih vetra

Strih vetra, budeme podľa ICAO[7] nazývať *zmenu v rýchlosti alebo smere vetra v priestore*. Zahŕňa to skupinu prúdení vzduchu od malých vírov po vzájomný tok obrovských vzduchových mäs.

Z tohto vysvetlenia plynie, že akýkoľvek atmosférický jav alebo fyzická prekážka, spôsobujúca zmenu rýchlosti alebo smeru vetra spôsobuje strih vetra.

Strih vetra je vždy prítomný v atmosfére. Jedným z dôkazov, ktoré môžeme vidieť ľudským okom sú oblačné vrstvy v rôznych výškach, pohybujúce sa rôznymi smermi.

V tejto práci sa budeme zaoberať najmä nízkoúrovňovým strihom vetra. Tento pojem zahŕňa množinu vzdušných pohybov v nižších vrstvách atmosféry. Patria medzi ne búrky, prímorské vetry, nízkoúrovňové dýzové prúdenia, horské vetry či frontálne systémy.

1.2 Microburst

Ako prvú si uvedieme definíciu downburstu, pomocou ktorej následne definujeme *microburst*.

Definícia 1.2.1 *Downburst (prepad studeného vzduchu) je intenzívny prúd vzduchu smerom nadol vyvolávajúci škodlivé rozbiehavé vetry blízko povrchu zeme.*

Definícia 1.2.2 *Pojmom microburst sa označuje downburst s horizontálnym priemerom 0.4 až 4 km.*

1.2.1 Časti microburstu

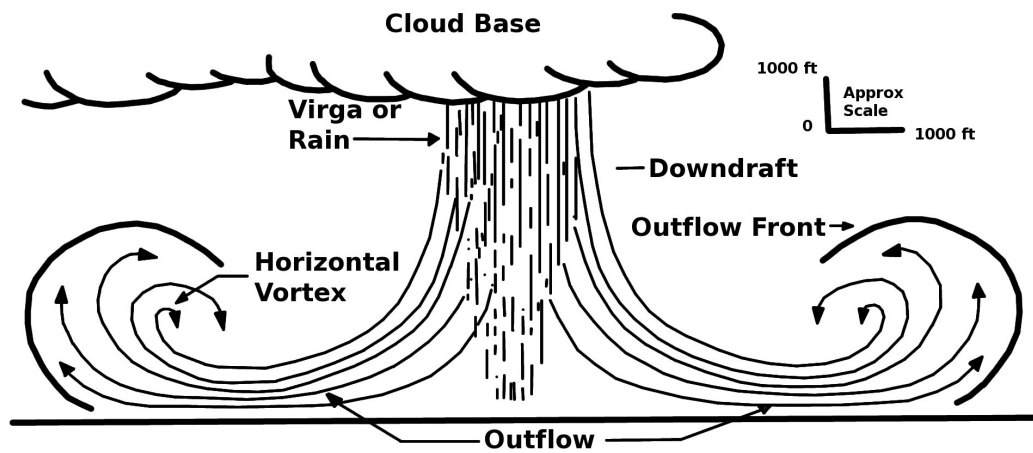
Microburst je zložitý jav, ktorý sa skladá z niekoľkých častí. Kvôli jednoznačnosti a zjednodušeniu vyjadrovania si ich popíšeme podľa obrázka 1.1.

1. *cloud base* (doslovne základňa oblakov) – najnižšia výška viditeľných oblakov
2. *downdraft* – stĺpec prúdu vzduchu pohybujúci sa smerom nadol
3. *outflow* – horizontálne rozbiehavé vetry
4. *virga* (slovensky zrážkové pruhy) – pruhy vody alebo ľadu padajúce z oblaku, ktoré sa vyparia skôr ako dopadnú na zemský povrch
5. *outflow front* – front¹ oddeľujúci outflow od zvyšného vzduchu
6. *horizontal vortex*² – proti smeru točiaci sa vodorovný vír

Medzi časti *microburstu* by sme mohli zaradiť aj protivietor (anglicky *headwind*) a zadný vietor (anglicky *tailwind*). Z pohľadu objektu traverzujúceho priestor zasiahnutý *microburstom* môžeme priestor rozdeliť na oblasť s prevládajúcim protivetrom a oblasť s prevládajúcim zadným vetrom.

¹rozhranie alebo prechodová oblasť medzi dvoma vzduchovými hmotami rôznych hustôt

²doslovne vodorovný vír, po anglicky sa niekedy označuje aj horizontal roll vortex

Obr. 1.1: *Microburst* [12]

1.2.2 Charakteristiky

V tejto časti sú bližšie popísané typické charakteristiky *microburstu*, ktoré popísal Mr. David Whatley[11].

Pomocou nich si vieme určiť typický *microburst*, ktorý neskôr budeme simulovať.

- Velkosť* – *Microburst* má typicky na začiatku horizontálny priemer menší ako 1 míľa (≈ 1.6 km). Klesá z výšky cloud base do výšky približne 1000–3000 ft (≈ 300 –900 m). Blízko zemského povrchu sa mení na vodorovné rozbiehavé vetry, ktoré môžu mať priemer až 2.5 míle (≈ 4 km).
- Rýchlosť* – Horizontálna zložka vetra v blízkosti zemského povrchu môže nadobúdať rýchlosť až 45 knotov (≈ 83 km/h). Maximálna vertikálna zložka rýchlosti vetra je 6000 ft/min (≈ 110 km/h).
- Trvanie* – *Microbursty* trvajú väčšinou najviac 15 minút od nárazu na zem po rozptýlenie. Horizontálne vetry zvyšujú svoju intenzitu počas prvých piatich minút (tie najsilnejšie trvajú približne 2–4 minúty).

1.2.3 Typy microburstov

Microburst môže byť suchý alebo mokrý, popíšeme si za akých podmienok vznikajú.

1.2.3.1 Vznik suchého microburstu

Suchý *microburst* vzniká, keď sú horné vrstvy atmosféry vlhké, zatiaľ čo spodná vrstva je veľmi suchá. Keď sa potom v horných vrstvách vytvorí búrka, tak dážď padá do suchej spodnej časti, kde ochladzuje vzduch. Takýto vzduch je ťažší a klesá k zemi. Spôsobuje tak reťazovú reakciu padania vzduchu k zemi. Po dopadnutí na zemský povrch sa vzduch začne šíriť na všetky smery. Väčšinou sa to dá pozorovať ako prstenec zvířeného prachu.

Tento jav sa označuje suchý *microburst* a môže dosiahnuť rýchlosť 60–100 mile/h (≈ 96 –161 km/h) [5] .

1.2.3.2 Mokrý microburst

Takisto ako pri suchom *microburste*, sa pri mokrom rúti vzduch z búrky smerom k zemskému povrchu, kde sa šíri vo všetkých smeroch. Avšak navyše je sprevádzaný hustým dažďom.

Mokrý *microburst* vzniká z búrky, preto si vysvetlíme jej fungovanie.

Búrka je mechanizmus, ktorý spočíva v nasávaní vzduchu a dažďa na jednom mieste a vypúšťania na inom mieste. Tieto miesta nemôžu byť nad sebou, pretože by sa búrka udusila. Preto je trochu naklonená, čo zaručuje vietor v hornej časti búrky. Problém je, keď je tento vietor príliš slabý. Búrka potom stráca svoje naklonenie, začína sa dusiť (prší na miesto nasávania). To spôsobuje rýchle padanie vetra a dažďa smerom nadol k zemskému povrchu [6].

1.2.4 Vplyv microburstu na lietadlo

Microbursty zapríčinili vo svete mnoho havárií lietadiel.

Predstavme si situáciu, v ktorej lietadlo pristáva a vletí do *microburstu*. Zo začiatku pilot pocíti nadnesenie, pretože narazí na silný protivietor. Problém však nastáva až v momente, keď prichádza do stredu *microburstu* a vylieta z neho. V strede pocíti strih vetra. Nemusí si to však ani všimnúť, pretože pri pristávaní lietadlo stále klesá smerom nadol. Najväčšie nebezpečenstvo nastáva pri vylietaní z *microburstu*, vtedy narazí na silný zadný vietor, následkom čoho je strata výšky. V takejto situácii už býva lietadlo často veľmi nízko a pilot nestihne lietadlo vyrovnať. Nastáva pád lietadla a zrážka so zemským povrchom.

Tejto havárii by sa dalo vyhnúť v prípade, že by pilot vedel o prítomnosti *microburstu* na dráhe a bol pripravený na rýchle vyrovnanie lietadla. Skúmanie a simulácia *microburstov* je teda dôležitá pre vývoj algoritmov, ktoré ich budú včasne a spoľahlivo detegovať.

1.3 Snímače

V tejto časti sa oboznámime so snímačmi, ktorých podstatou je meranie veľkosti rýchlosti a smeru vetra.

1.3.1 Anemometer

Definícia 1.3.1 *Anemometer – všeobecný názov pre prístroje určené na meranie, buď celkovej rýchlosti vetra alebo rýchlosti jednej, či viacerých lineárnych zložiek vektora vetra.*

Tieto prístroje sa rozlišujú podľa snímača. Medzi bežne využívané v meteorológii patria miskový, vrtuľový, zvukový či ultrazvukový.

1.3.2 Dopplerovský radar

Základné informácie o princípe radarového merania možno získať napríklad z radarového tutoriálu [10].

Definícia 1.3.2 *Radar (RAdio Detection And Ranging) je elektronický prístroj používaný na zistenie prítomnosti a vzdialenosti objektov, ktorých zloženie rozptyľuje alebo odráža elektromagnetické signály.*

Radar vysiela rádiové signály a čaká na ich odraz. Ak signál dosiahne cieľ, väčšina energie je rozptýlená, ale malá časť sa odrazí naspäť. Pomocou nej sa dá určiť, že cieľ bol prítomný. Navyše vieme, akou rýchlosťou sa signál šíri, takže podľa času, za ktorý sa signál vráti vieme určiť vzdialenosť objektu.

Definícia 1.3.3 *Radiálna rýchlosť objektu je zložka jeho ozajstnej rýchlosti v smere k radaru.*

Definícia 1.3.4 *Dopplerovský radar je radar, ktorý zisťuje a interpretuje Dopplerov efekt z hľadiska radiálnej rýchlosti cieľa.*

Dopplerovský radar zisťuje nielen vzdialenosť, ale aj rýchlosť objektu. Princíp spočíva v porovnaní frekvencií vysielaného a odrazeného signálu.

Samozrejme, dopplerovský radar nedokáže zmerať naozajstnú rýchlosť objektu, ale iba radiálnu rýchlosť, čo je vlastne rýchlosť smerom k radaru.

Preto ak niečo letí priamo k radaru alebo od radaru, tak vieme zmerať jeho aktuálnu rýchlosť. Na rozdiel od situácie, kedy niečo letí v presnom kruhu okolo radaru, kedy je jeho rýchlosť vždy kolmá na jeho spojnicu s radarom. V takom stave nameria radar vždy nulovú rýchlosť.

1.3.3 LIDAR

Definícia 1.3.5 *Lidar (Light Detection And Ranging) je prístroj kombinujúci impulzný laserový vysielateľ a optický prijímač s elektronickými signálmi. Používa sa ako nástroj na detekciu prítomnosti a vzdialenosti rôznych vzdialených objektov v atmosfére.*

Lidar dokáže merať rýchlosť na rovnakom princípe ako radar. Rozdiel je vo vlnovej dĺžke elektromagnetického žiarenia.

Kapitola 2

Implementácia

V tejto kapitole je popísané, ako sú implementované modely *microburstov* a simulátory snímačov.

2.1 Implementácia modelu *microburstu*

V tejto časti sa budeme zaoberať modelmi *microburstu* a ich implementáciou.

2.1.1 Základné vstupné parametre

Skôr než začneme so samotnými modelmi, povieme si o dvoch parametroch, ktorým sa nevyhneme.

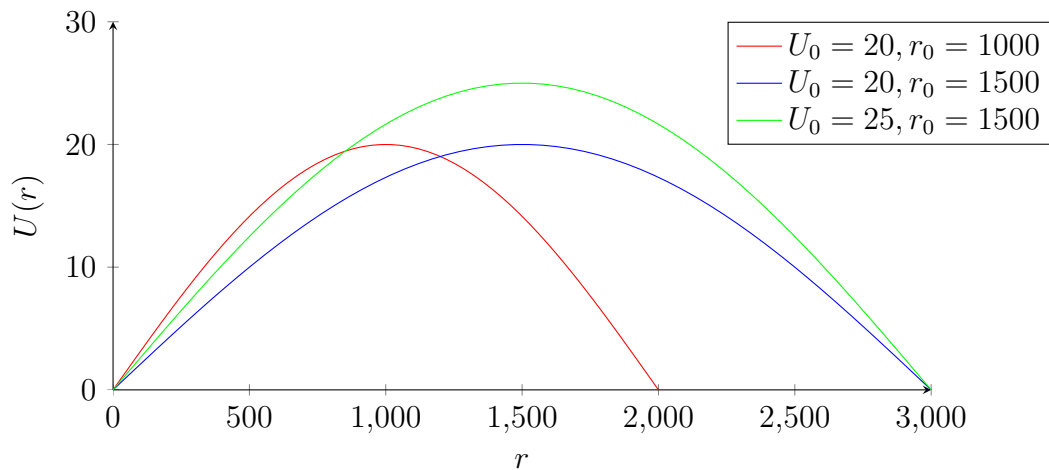
Keďže neexistuje *microburst* iba jednej veľkosti a jednej sily, tak sa každý model riadi vstupnými parametrami.

Polomer *microburstu*

Ako už z názvu vyplýva, tento vstupný parameter ovplyvňuje veľkosť *microburstu*. Je potrebné upozorniť, že pri niektorých modeloch sa ako vstupný parameter polomer považuje vzdialenosť od stredu, kde *microburst* “končí”, zatiaľ čo pri iných miesto, kde nadobúda najväčšiu rýchlosť.

Maximálna rýchlosť *microburstu*

Je to najväčšia rýchlosť akú môže *microburst* nadobudnúť v ľubovoľnom svojom bode.



Obr. 2.1: UCAR model

Podľa potreby si každý z týchto parametrov popíšeme bližšie pri konkrétnych modeloch.

2.1.2 2D model

2.1.2.1 UCAR model

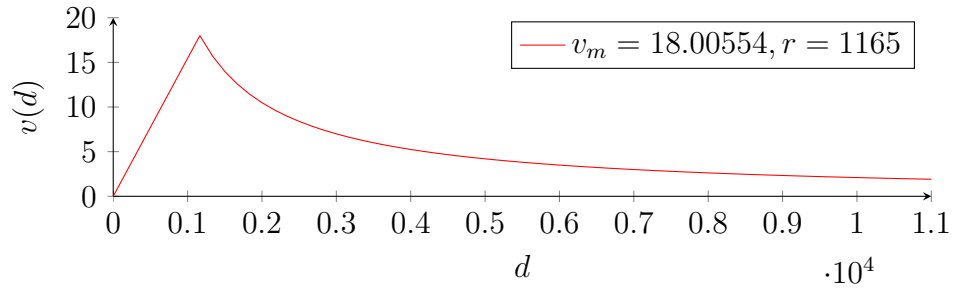
Najskôr sa zoznámime s 2D modelom, ktorý je dnes bežne využívaný na analýzu schopností systémov detegujúcich strih vetra v malých výškach (za použitia anemometrov). Modelovaná je len horizontálna zložka rýchlosti vetra v prízemnej vrstve atmosféry, predpokladá sa rovnaká rýchlosť v danom bode pre výšku 0–50 m. Predpokladá, že *microburst* je symetrický podľa stredu, takže rýchlosť sa určuje iba podľa vzdialenosti bodu od stredu *microburstu*.

$$U(r) = U_0 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{r}{r_0}\right), \quad 0 \leq r \leq 2 \cdot r_0$$

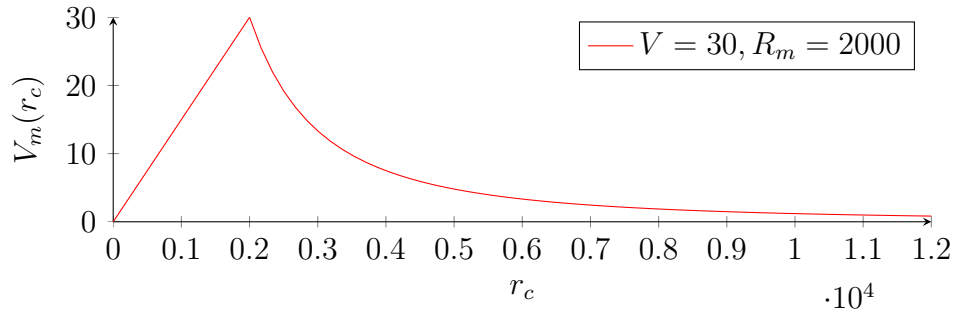
V tejto rovnici r_0 predstavuje vyššie spomínaný polomer *microburstu*. V tomto prípade platí, že *microburst* vo vzdialenosti r_0 nadobúda hodnoty parametra U_0 , ktorý predstavuje maximálnu rýchlosť *microburstu*.

2.1.2.2 Iné 2D modely

Okrem modelu uvedeného vyššie existuje niekoľko ďalších modelov. Dva z nich si v krátkosti popíšeme.



Obr. 2.2: Model podľa Microstep-MIS



Obr. 2.3: Hjelmfelt model

Model podľa Microstep-MIS

V tomto modeli najprv lineárne rýchlosť stúpa na prvých r metroch, kým nedosiahne rýchlosť v_m . Potom začne klesať nepriamoúmerne.

$$v(d) = \begin{cases} v_m \cdot d/r & d < r \\ v_m \cdot r/d & d \geq r \end{cases}$$

Hjelmfelt model

Tento model opísal pán Merritt [4]. Rovnako ako pri predošlom modeli prvých R_M metrov rovnomerne stúpa rýchlosť až po V , avšak po R_M metroch klesá rýchlejšie, podľa funkcie r^{-2} .

$$V_m(r_c) = \begin{cases} V \cdot \frac{r_c}{R_m} & r_c < R_m \\ V \cdot \left(\frac{R_m}{r_c}\right)^2 & r_c \geq R_m \end{cases}$$

2.1.3 3D model

Implementovaný model sa dá nájsť v článku o simulácii *downburstov*[2]. Rovnako ako pri 2D modeloch ostávame pri zjednodušení, kde je *microburst* symetrický podľa

stredú a teda sa berie do úvahy iba radiálna a vertikálna rýchlosť.

$$\bar{U}_r(x, y, z; t) = \Pi \frac{\bar{U}_{r,max} r}{r_t} \frac{[e^{c_1(z/z_r)} - e^{c_2(z/z_r)}]}{[e^{c_1} - e^{c_2}]} e^{\frac{1-(r^2/r_t^2)^\alpha}{2\alpha}} + \bar{U}_{trans}$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_z(x, y, z; t) = \\ - 2\Pi \frac{\bar{U}_{r,max} z_m}{r_t} \frac{\left\{ \frac{1}{c_1} [e^{c_1(z/z_r)} - 1] - \frac{1}{c_2} [e^{c_2(z/z_r)} - 1] \right\}}{[e^{c_1} - e^{c_2}]} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r_2}{r_t} \right)^\alpha \right] e^{\frac{1-(r^2/r_t^2)^\alpha}{2\alpha}} \end{aligned}$$

Funkcia Π je závislá od času t a môže sa správať rôzne. Nazýva sa faktor intenzity. Ukážeme si dva príklady (čas je v tomto prípade v minútach):

$$\Pi = \begin{cases} \frac{t}{5} & 0 \leq t \leq 5 \\ e^{\frac{-(t-5)}{11.542}} & t \geq 5 \end{cases} \quad \Pi = \begin{cases} \frac{t}{2.75} & 0 \leq t \leq 2.75 \\ e^{\frac{-(t-2.75)}{25}} & t \geq 2.75 \end{cases}$$

Okrem funkcie Π , ktorá sa môže tiež považovať za vstupný parameter, je tam niekoľko ďalších. Patria medzi ne r_t , z_r . V rovniciach to nie je viditeľné, ale rovnako ako Π to môžu byť funkcie závislé od času. Najprv uvedieme význam parametrov r_p a z_m – určujú polomer a výšku, kde *microburst* dosahuje najvyššiu rýchlosť $\bar{U}_{r,max}$. Funkcia r_t (resp. z_r) závisí od parametra r_p (resp. z_m). Obe tieto funkcie predstavujú miesto, kde má *microburst* maximálnu rýchlosť, tentokrát v čase. Vo väčšine prípadov sa funkcia z_r správa ako konštanta z_m . Rovnako sa aj funkcia r_t môže správať akokonštanta r_p , iný spôsob je (čas je v sekundách):

$$r_t = r_p + \lfloor t/60 \rfloor \cdot 30$$

Každú minútu sa polomer s najväčšou rýchlosťou posunie o 30 m.

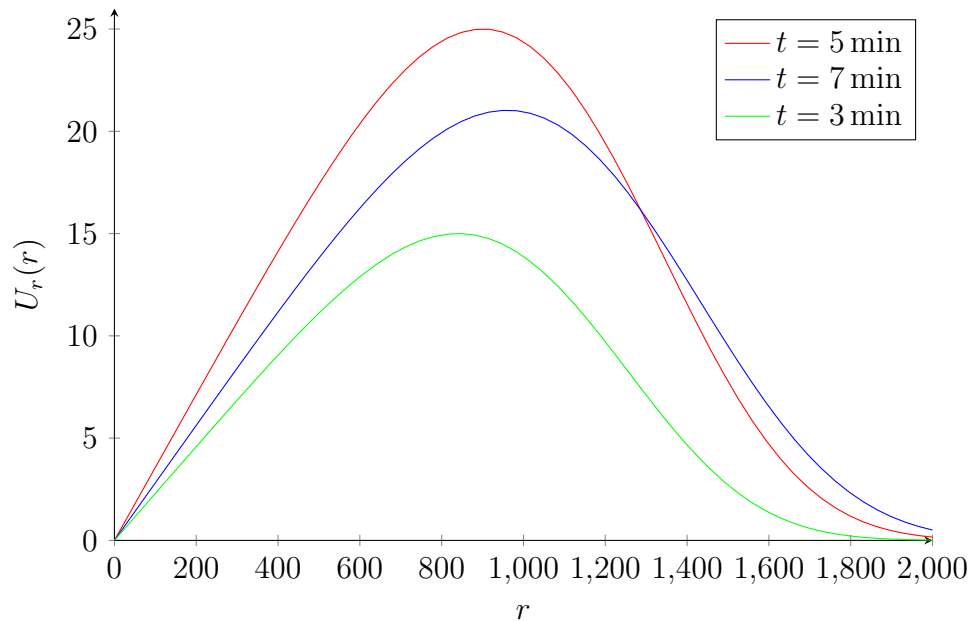
Okrem toho sa vo vzorcoch nachádza niekoľko konštánt modelu : c_1 , c_2 a α . Tie je vhodné si zvoliť napríklad : $c_1 = -0.15$, $c_2 = -3.2175$ a $\alpha = 2.0$.

Neposledne sa vo vzorcoch nachádza aj r , čo predstavuje skrátený zápis pre:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Posledný parameter je \bar{U}_{trans} , ktorý predstavuje translačnú rýchlosť búrky, ktorú pre naše potreby nechávame na nule.

Obrázok 2.4 zobrazuje graf závislosti vo výške $z = 60$ m, kde bude platiť $U_{r,max} = 25$ m/s, $z_m = 60$ m, $r_p = 750$ m. Keďže je symetrický podľa stredú, tak namiesto x , y budeme mať polomer $r = \sqrt{x^2 + y^2}$. Funkcia Π je prvého typu.



Obr. 2.4: 3D model

2.2 Implementácia simulátorov snímačov

V tejto kapitole bližšie popíšeme ako fungujú snímače a ako sme ich simulovali.

Simulátory slúžia na simuláciu merania reálneho snímača v prípade výskytu javu. Simulovaný svet obsahuje nehybnú alebo konštantne sa pohybujúcu vzduchovú hmotu s jedným javom.

2.2.1 Implementácia simulátora anemometra

V práci sme simulovali anemometer, ktorý vie zistiť vektor vetra iba v horizontálnej rovine. Zisťuje smer a veľkosť.¹

Pre naše potreby bola implementácia veľmi jednoduchá. Nikde naozaj neexistuje trieda anemometer, pretože to nebolo potrebné. V našom “svete” existuje vždy iba jeden jav a to *microburst*. Jeho sa vieme opýtať, aká je jeho rýchlosť v ktoromkoľvek bode a vieme, že horizontálna zložka rýchlosti vždy smeruje od/k *microburstu*.

Smer si teda vieme určiť vďaka spojnici stredy *microburstu* a bodu anemometra.

¹Štandardné anemometre inštalované na letiskách slúžia na detekciu rýchlosti a smer horizontálnej zložky vetra, vertikálna rýchlosť vetra sa nesleduje. [14]

2.2.2 Implementácia simulátora Dopplerovského radaru a Lidaru

Táto časť bude približovať fungovanie snímačov, výstupný súbor a presný popis simulácie.

Pre jednoduchšie vyjadrovanie si zavedme pracovný pojem DAR (Detection And Ranging), ktorý bude predstavovať aj radar aj Lidar.

2.2.2.1 Práca snímača

Najprv si podrobnejšie popíšeme ako tieto dva DAR prístroje presne skenujú (vzorujú atmosféru).

Na začiatok si povieme, čo DAR vie robiť. Po prvé, vystreľovať lúče, po druhé otáčať sa. Otáčať sa vie v dvoch rovinách, horizontálnej a vertikálnej.

Avšak nie každý DAR skenuje spôsobom, že vystrelí lúč, otočí sa a vystrelí ďalší. Môže skenovať kontinuálne, teda mať jeden súvislý lúč. Pre zjednodušenie budeme uvažovať iba prvý prípad. Aby nedošlo k nedorozumeniam, zavedieme pojem *výstrel*. Tento pojem bude označovať jeden konkrétny výstrel snímača DAR. Každý výstrel vieme popísať dvomi uhlami. Prvý uhol α z nich bude popisovať horizontálne, druhý uhol δ vertikálne natočenie prístroja DAR v čase, keď bol výstrel vystrelený.

Azimut α

Horizontálne natočenie sa volá azimut. Meria sa v stupňoch. Výstrel s azimutom 0° pôjde smerom x -ovej osi. Azimut stúpa v smere proti hodinovým ručičkám. Takže 90° pôjde smerom y -ovej osi.

Elevácia δ

Vertikálne natočenie sa nazýva elevácia. Rovnako sa meria v stupňoch. Výstrel s δ rovné 0° pôjde rovnobežne so zemským povrchom vo výške prístroja DAR. Výstrel, kde je $\delta = 90^\circ$ bude vystrelený presne nad DAR.

Ďalší potrebný pojem bude *stratégia skenovania*. Keď už vieme strieľať lúče, chceli by sme to robiť v nejakom konkrétnom poradí, aby to bolo efektívne a zároveň tie dáta boli na niečo použiteľné.

Najpoužívanejším spôsobom je oskenovať časť jednej elevácie, potom sa posunúť vyššie/nížšie oskenovať rovnakú časť ďalšej elevácie opačným smerom a takto pokračovať niekoľkokrát.

Iný spôsob môže skenovať jeden azimut niekoľkokrát v rôznych eleváciach, potom druhý azimut a tak ďalej.

Ako sme stratégiu implementovali si popíšeme v časti 2.2.2.3 Simulácia.

2.2.2.2 Výstup

Podstatnou časťou je formát výstupného súboru. Najpr si tento formát popíšeme a v ďalšej stati si vysvetlíme jeho vytváranie.

Na začiatok sa najprv oboznámime s pojmom brána (ang. gate). V rámci výstrelu každý DAR prístroj nameria niekoľko hodnôt. Výstrel je myšlienkovy rozdelený na niekoľko brán, každá z nich rovnako dlhá. Pre každú bránu bude vo výstupnom súbore jedna hodnota pre dopplerovskú rýchlosť. Okrem toho sa aj brána delí na niekoľko bodov. Rýchlosť brány sa potom určí ako aritmetický priemer jednotlivých bodov brány.

Ukážka

```

1 Number of gates:          100
2 Range gate length (m):   30.0
3 Gate length (pts):       10
4 Start time:              20141118 14:46:28.04
5 Data line 1: Decimal time (hours)  Azimuth (degrees)
6           Elevation (degrees)
7 f9.6,1x,f6.2,1x,f6.2
8 Data line 2: Range Gate  Doppler (m/s)
9           Intensity (SNR + 1)
10 i3,1x,f6.4,1x,f8.6 – repeat for no. gates
11 ****
12 ...
13 14.775961    4.46 158.00
14    0 0.0286 1.029725
15    1 -4.1756 1.025700
16    2 -3.4494 1.042160

```

17	...
18	99 8.8576 1.007425
19	14.776214 5.20 158.00
20	0 -0.0096 1.053980
21	1 -3.6405 1.026471
22	2 -3.1437 1.045258
23	...
24	99 5.9528 1.008176
25	14.776467 5.94 158.00
26	0 0.0669 1.077123
27	1 -5.2840 1.020938
28	2 -3.1819 1.048235
29	...

V ukážke si môžeme všimnúť, že počet brán (Number of gates) je 100, každá brána je dlhá 30 m (Range gate length) a v rámci každej brány máme 10 bodov (Gate length).

V riadku číslo 4 je dátum a čas začiatku skenovania. Súbor pokračuje opisom jednotlivých riadkov, ktoré sú pod riadkom číslo 10.

Riadky 11, 17 a 23 sú dátové typu 1, zvyšné sú dátové riadky typu 2.

Dátový riadok typu 1 (Data line 1) popisuje jeden výstrel. Čas kedy bol vystrelený, pod akým azimutom a s akou eleváciou. Riadok číslo 7 opisuje formát čísel².

Dátový riadok typu 2 (Data line 2) popisuje jednu bránu výstrelu. Najprv poradie brány, potom nameranú rýchlosť a intenzitu výstrelu. Uvažuje sa, že výstrel sa časom stráca, až môže zaniknúť. SNR nadobúda hodnoty 0–1, takže *intensity* nadobúda hodnoty 1–2. Riadok 9 popisuje formát čísel.

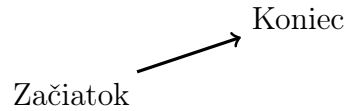
Po každom riadku typu 1, ide práve toľko riadkov typu 2, aký je počet brán.

2.2.2.3 Simulácia

Popíšeme si, ako presne budeme simulovať DAR snímače, čo všetko bude nastaviť dopredu a ako vygenerujeme výstupný súbor. Začneme opisom objektov.

²f9.6 znamená desiatinné číslo s 9 číslicami pred a 6 po desatinnej čiarky. 1x znamená jednu medzeru.

Objekt Wind3DVector Pri práci s modelom sú potrebné vektory, ktoré budú predstavovať vietor. V tomto prípade bolo vhodné zvoliť si pozičné vektory (nemajú iba koniec ale aj začiatok).



Vektory sa dajú vytvárať jedine zadaním súradníc začiatku a konca. Okrem toho sa s vektormi dajú robiť rôzne matematické operácie.

Majme dva vektory :

$$\vec{u} = (x_{Z_1}, y_{Z_1}, z_{Z_1}, x_{K_1}, y_{K_1}, z_{K_1})$$

$$\vec{v} = (x_{Z_2}, y_{Z_2}, z_{Z_2}, x_{K_2}, y_{K_2}, z_{K_2})$$

Pre jednoduchosť si určíme ešte “rozmary” vektorov.

$$u_x = x_{K_1} - x_{Z_1} \quad u_y = y_{K_1} - y_{Z_1} \quad u_z = z_{K_1} - z_{Z_1}$$

$$v_x = x_{K_2} - x_{Z_2} \quad v_y = y_{K_2} - y_{Z_2} \quad v_z = z_{K_2} - z_{Z_2}$$

Skalárny súčin $\vec{u} \cdot \vec{v} = u_x \cdot v_x + u_y \cdot v_y + u_z \cdot v_z$

Súčet Nech je to vektor \vec{w} . Keďže sa pracuje s pozičnými vektormi, tak je súčet definovaný iba pre dva vektory s rovnakým začiatkom³.

$$x_{K_w} = x_{Z_1} + u_x + v_x \quad y_{K_w} = y_{Z_1} + u_y + v_y \quad z_{K_w} = z_{Z_1} + u_z + v_z$$

Súradnice začiatku sú rovnaké ako pre vektor \vec{u} (resp. \vec{v}).

Projekcia Nech vektor \vec{w} predstavuje projekciu vektora \vec{u} na vektor \vec{v} . Opäť bude platiť, že začiatok je rovnaký ako pre vektor \vec{u} . Jeho koniec bude vyzeráť:

$$x_{K_w} = x_{Z_1} + \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{v}|^2} v_x \quad y_{K_w} = y_{Z_1} + \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{v}|^2} v_y \quad z_{K_w} = z_{Z_1} + \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{v}|^2} v_z$$

Horizontálna zložka vektora \vec{u} Zložka bude vyzeráť ako vektor \vec{w} , pre ktorý platí

$$\vec{w} = (x_{Z_1}, y_{Z_1}, 0, x_{K_1}, y_{K_1}, 0)$$

³Bolo by možné definovať aj funkciu, *pripočítaj ku mne vektor*. V takom prípade by sa z druhého vektora brali do úvahy len rozmary.

Objekt Microburst3D Tento objekt predstavuje *microburst*, popísaný v časti 2.1.3 3D model. Pamätá si všetky vstupné parametre. Najpodstatnejšou časťou je niekoľko funkcií:

- `computeRt` - predstavuje funkciu r_t
- `computeZr` - predstavuje funkciu z_r
- `computePI` - predstavuje funkciu Π , ktorá sa parametrizuje dvoma premennými *peakPI* a *delimiterPI*. Parameter *peakPI* predstavuje hranicu dvoch prípadov funkcie, a *delimiterPI* predstavuje delenec druhého prípadu.
- `radialWindSpeedAtPosition` - počíta $\bar{U}_r(x, y, z; t)$ - radiálnu rýchlosť *microburstu*. Vracia objekt typu `Wind3DVector`.
- `verticalWindSpeedAtPosition` - vypočíta vertikálnu rýchlosť modelu $\bar{U}_z(x, y, z; t)$. Vracia objekt typu `Wind3DVector`.
- `windAtPosition` - vracia `Wind3DVector`, ktorý dostane sčítaním vektorov, ktoré vrátia dve predošlé funkcie.

Okrem vstupných parametrov, ktoré sú spomínané predtým, je potrebné vedieť stred *microburstu*. Ten sa zadáva v súradnicovej sústave. Bude to potrebné pri neskorších aplikáciach tohto modelu.

Ako dodatok do modelu sa pridal pohyb javu. Na vstupe bude zoznam súradníc $[x, y]$, a čas kedy sa *microburst* bude v tomto bode nachádzať.

Výpočet sa upraví pomocou funkcie *getVectorOfMotion*, ktorá vracia objekt typu `Wind3DVector`, ktorý sa pripočíta k vektoru vypočítaného modelom. Zjednodušene sa predpokladá, že *microburst* sa medzi jednotlivými bodmi pohybuje rovnomerne.

Objekt StrategyDAR Tento objekt predstavuje stratégiu skenovania, ktorá bola popísaná v kapitole 2.2.2.1 Práca snímača. Naprogramovaný je podľa návrhového vzoru Iterátor. Zatiaľ funguje iba na princípe oskenovania niekoľkých elevácií.

Na začiatku sa určí prvý výstel – jeho elevácia a azimut (*firstDelta* a *firstAlpha*), koľko elevácií je potrebné oskenovať (*numberOfLevels*), aká veľká časť každej elevácie sa bude skenovať (*levelRange*), koľko stupňov sú vzdialené jednotlivé elevácie (*levelGap*),

a o koľko stupňov sa bude pohybovať v jednej elevácii medzi jednotlivými výstrelmi (*step*). Popritom sa vypočíta maximálny počet krokov v jednej elevácii

$$\text{maxLevelSteps} = \lfloor \text{levelRange} / \text{step} \rfloor + 1$$

Ako správny Iterátor, má objekt dve hlavné metódy – *hasNext()* a *next()* a dve hlavné premenné, ktorými sa riadi priebeh : *currentLevelStep* a *currentLevel*. Druhá z nich určuje aktuálny level a prvá aktuálny krok v rámci aktuálneho levelu. Metóda *next* najprv aktualizuje tieto dve premenné (buď sa posunie *currentLevelStep* v rámci levelu, alebo sa *currentLevel* zvýši o 1.) Potom sa vypočíta o koľko je potrebné sa posunúť oproti prvému výstrelu.

```

1 x = firstAlpha ;
2 if (currentLevel%2 == 0) {
3     x += (currentLevelStep - 1) * step ;
4 } else {
5     x += (maxLevelSteps - currentLevelStep) * step ;
6 }
7 y = firstDelta + currentLevel * levelGap ;
8 return (x, y) ;

```

Objekt DAR Objekt DAR predstavuje snímače Lidar/radar. Na začiatok je potrebné vedieť jeho parametre. Medzi ne patrí jeho rýchlosť – za koľko sekúnd prejde jeden stupeň a jeho pozícia v súradnicovej sústave⁴. Okrem toho existuje niekoľko parametrov, ako je napríklad dosah snímača. Ten sa nezadáva priamo, ale určuje sa počet brán (*numberOfGates*) a dĺžka jednej brány (*rangeGateLength*). Ich súčin je dosah prístroja DAR. Okrem toho sa určuje počet bodov v rámci jednej brány (*gateLength*). Dodatočné parametre, o ktorých sa bude písať neskôr, budú maximálny biely šum (*maxNoise*) a alfa útlmu (*attenuationAlfa*).

Podstatnou metódou je skenovanie javu. Na vstupe dostane jav (musí byť 3D), stratégiu skenovania, čas kedy má začať skenovať – relatívne k začiatku javu (0 je od začiatku javu, negatívne číslo pred začiatkom, pozitívne po začiatku). Nasleduje

⁴Neskôr bude podstatná hlavne pozícia prístroja DAR voči javu.

cyklus, ktorý je riadený metódou *hasNext* stratégie, teda beží, kým vie stratégia dať ďalší výstrel.

Stratégia vracia výstrel ako dve čísla – elevácia a azimut, pod ktorým má byť vystrelený. Bolo potrebné si to prerátať na karteziánske súradnice. Súradnice, ktoré vracia stratégia, by sa dali označiť za sférické. Avšak nepredstavujú klasickú sférickú súradnicovú sústavu. Preto sa najprv premenia súradnice stratégie na sférické. Nech azimut je α a elevácia je δ . Potom pre polárny uhol ϕ platí $\phi = 90^\circ - \delta$. Zároveň pre uhol θ sférických súradníc platí $\theta = 90^\circ - \alpha$. Popis sférických súradníc a ich prepočet na karteziánske súradnice je možné nájsť v článku [1]. Do karteziánskych súradníc sa to potom prepočíta ako:

$$x = r \cos \theta \sin \phi$$

$$y = r \sin \theta \sin \phi$$

$$z = r \cos \phi$$

Nech je bod $P_0 = (x_D, y_D, z_D)$, kde x_D, y_D, z_D sú súradnice, aké má prístroj DAR a zvolíme bod $P_1 = (x_D + x, y_D + y, z_D + z)$. Tieto dva body potom určujú polpriamku výstrelu. Na tejto polpriamke sa postupne budú určovať body, v ktorých sa bude zisťovať rýchlosť microburstu.

Zaradom sa pre každú bránu odčíta rýchlosť v niekoľkých bodoch (počet je rovný premennej *gateLength*). Každá odčítaná hodnota rýchlosti je reprezentovaná ako objekt *Wind3DVector*. Avšak potrebná je rýchlosť vzhľadom na DAR, takzvaná radiálna. Tento vektor sa zistí pomocou projekcie (vektor skutočnej rýchlosti na polpriamku určenú bodmi P_0 a P_1). Z tohto radiálneho vektora sa zisťuje jeho veľkosť. Ešte je potrebné si uvedomiť, že ak vektor smeruje k radaru, tak musí byť nameraná rýchlosť záporná.

Nech radiálny vektor je \vec{r} a smeruje z bodu P_r do bodu H_r . Pre zistenie smeru vektora sa určí uhol medzi vektorom \vec{r} a vektorom \vec{a} z bodu P_r do bodu P_0 .

$$\cos uhol = \frac{\vec{r} \cdot \vec{a}}{|\vec{r}| |\vec{a}|}$$

Tento uhol môže byť jedine 0° alebo 180° . Takže jeho kosínus bude buď 1 alebo -1 . Keďže menovateľ bude vždy kladný, tak nie je potrebné vypočítať uhol, stačí zistiť či je skalárny súčet kladný alebo záporný.

Ako bolo na začiatku spomínané, dá sa nastaviť vstupný parameter $maxNoise$, ktorý predstavuje biely šum. Ten je simulovaný pripočítaním náhodného čísla z intervalu $\langle -maxNoise, maxNoise \rangle$ k radiálnej zložke vektora.

Navyše sa berú do úvahy dve ohraničenia. Prvé z nich je zem, takže tam sa hodnoty simulujú nulové. Druhé je horné ohraničenie, kde sa uvažuje že signál sa úplne stratí.

Doteraz sa ani raz nesimuloval druhý stĺpec dát. Ten sa veľmi jednoducho mení od 2 po 1. Preto sa na začiatku zvolí $attenuationAlpha$, ktorá určuje parameter útlmu. Ten predstavuje funkcia $e^{-x^\alpha} + 1$. Aby sa vyhlo neustálemu meneniu parametra, v prípade zmeny dosahu prístroja DAR, sa $attenuationAlpha$ určuje percentuálne na dosah. Konkrétny parameter α dostaneme ako :

$$\alpha = \frac{attenuationAlpha \cdot 1000}{numberOfGates \cdot rangeGateLength}$$

Multiplikatívna konštanta 1000, sa tam nachádza z dôvodu určovania parametra $attenuationAlpha$ percentuálne na jeden kilometer, zatiaľčo parameter určujúci dosah ($rangeGateLength$) je v metroch.

Kapitola 3

Využitie simulátorov javov a senzorov pri overovaní systémov detekcie

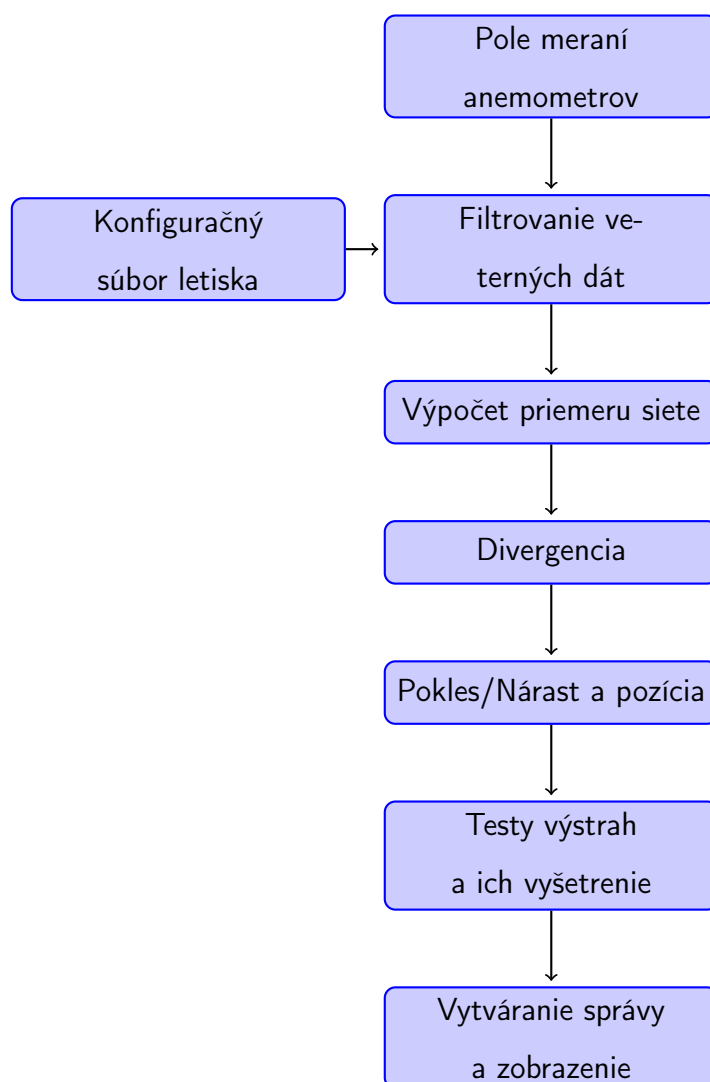
Situácie, v ktorých je potrebné overovať, sú dve. Po prvé samotné algoritmy. Po druhé reálne systémy. Napríklad, ak sa nasadzuje algoritmus na letisko, správanie závisí od rozmiestnenia anemometrov, teda je analýza pravdepodobnosti detekcie nutnou súčasťou návrhu systému.

3.1 Systémy detekcie

V tejto časti budú popísané systémy, ktoré neskôr budeme overovať.

3.1.1 LLWAS

Low Level Wind Shear Alert System patrí medzi systémy detegujúce strih vetra. Je založený na sieti anemometrov merajúcich veľkosť a smer vetra v blízkosti letiska.



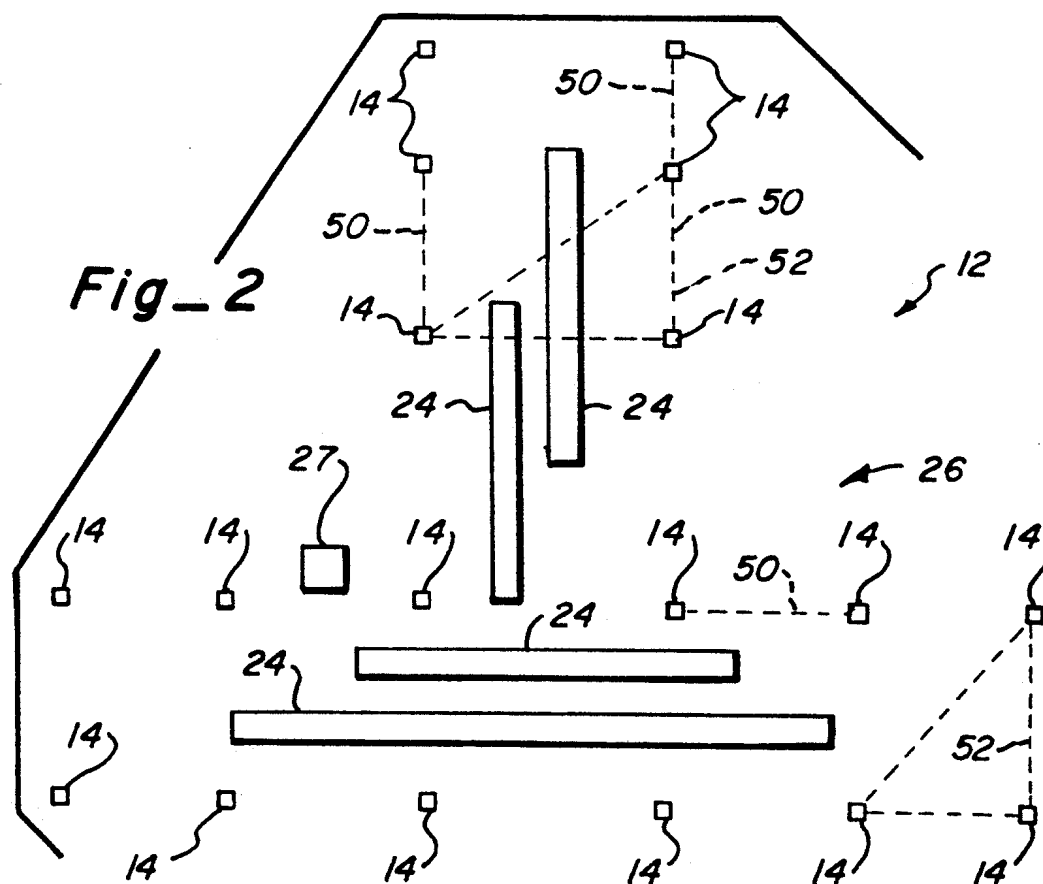
Obr. 3.1: Algoritmus LLWAS

Na obrázku 3.1 je vývojový diagram algoritmu LLWAS podľa patentu [13]. Postupne budú vysvetlené všetky jeho časti.

Na obrázku 3.2 je znázornené letisko, kde sú vyznačené nasledovné objekty: dráha (24), anemometer (14), hrana (50), trojuholník (52), riadiaca veža letovej prevádzky (27), letisko (26) a sieť anemometrov (12).

Výstražný systém *LLWAS* využíva sieť anemometrov na detekciu *microburstu*. Každý anemometer dodáva merania vetra, ktoré sa ukladajú v centrálnom počítači ako veterné vektory. V rámci každého výpočtového cyklu algoritmu (*polling cycle*) sa zistí rýchlosť a smer na každom anemometri.

Výpočet je riadený konštantami, ktoré sú v konfiguračnom súbore letiska (*Airport configuration file - AFC*). Obsahuje hodnoty príznakov, tolerancie a limít.



Obr. 3.2: Letisko [13]

Vstup predstavuje konfiguračný súbor spolu s meraniami anemometrov. Tieto dáta potom prejdú niekoľkými filtračnými procesmi. Pre uloženie dát pre jednotlivé filtre sa používajú cyklické fronty pre každý anemometer. Každý filter je špecifikovaný svojou postupnosťou filtrovaných váh. Jednotlivé filtre sú pre : priemer siete, výpočet divergencie, výpočet poklesu a nárastu.

Filter má formu:

$$U(t) = \frac{\sum_{i=0}^L W(i) \cdot u(t-i)}{\sum_{i=0}^L W(i)} \quad V(t) = \frac{\sum_{i=0}^L W(i) \cdot v(t-i)}{\sum_{i=0}^L W(i)}$$

kde L je dĺžka filtra¹.

Výpočet priemeru siete a štandardnej odchýlky sú vážené priemery z odhadov z predchádzajúceho poll a aktuálneho priemeru a štandardnej odchýlky. Veterné dáta

¹Nachádza sa v konfiguračnom súbore.

stanice, ktoré sa signifikantne líšia od priemeru siete predošlého *poll* sa nevyužívajú na rátanie súčasného priemeru.

Divergencia sa určuje na hranách a trojuholníkoch. Hrana je úsečka medzi dvoma blízkimi senzormi, typicky vzdialenými 1.5 až 5.5 km. Tri senzory tvoria trojuholník v prípade, že každá hrana má 1.5–5.5 km a najmenší uhol je väčší ako 25°.

Divergencia hrany sa vypočíta ako skalárny súčin smeru hrany a rozdielu rýchlosti na koncoch hrany. Divergencia trojuholníka je daná ako:

$$U_x + V_y$$

kde (U_x, U_y) a (V_x, V_y) sú vypočítané vyriešením maticového systému:

$$\begin{pmatrix} U_x \\ U_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 & X_2 \\ Y_1 & Y_2 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} U_2 - U_1 \\ U_3 - U_1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 & X_2 \\ Y_1 & Y_2 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} V_2 - V_1 \\ V_3 - V_1 \end{pmatrix}$$

kde hodnoty $U_1, U_2, U_3, V_1, V_2, V_3$ sú veterné vektory v troch bodoch trojuholníka a X_1, Y_1, X_2, Y_2 sú dva vektory, ktorými je trojuholník určený.

Keď už sú určené divergencie, začne sa zisťovať pokles asociovaný s *microburstom* alebo strihom vetra. Pre každú hranu a trojuholník sa vypočíta očakávaný pokles protivetra na lietadlo letiace cez *microburst* ako súčin divergencie a *effective length*. Odvodenie *effective length* je založené na štatistickej analýze zahŕňajúcej teoretický model microburstu, dĺžky hrán, veľkosti a tvary trojuholníkov.

Po týchto výpočtoch sa urobí kontrola, či je pretrvávajúci pokles/nárast pozdĺž dráhy. Vytrvalosť je meraná v zmysle n úspešných výskytov z posledných m meraní (*polls*).

Posledný krok je rozhodnutie, či nastala výstraha a ak áno, akú výstražnú správu vyslať. Robí sa niekoľko testov: na divergenciu, konvergenciu², na strih vetra s poklesom alebo nárastom. Divergenčný test indikuje *microburst* v prípade, že hodnota poklesu je väčšia ako prah (určený v konfiguračnom súbore). Okrem toho sa v tomto kroku vyšetří, ktorý z alarmov je najnebezpečnejší. Pravidlá na určovanie sú dve. Po prvé *microburst* je nebezpečnejší ako akýkoľvek iný strih vetra a po druhé pokles je viac ohrozujúci ako

²záporná divergencia

nárast, okrem prípadu, kedy je nárast podstatne väčší. Najnebezpečnejšia výstraha sa pretvorí do správy a pošle na riadiacu vežu.

Bližšie podrobnosti je možné nájsť v patentne amerických štátov [13].

3.1.2 TDWR algoritmus divergencie

Táto kapitola popisuje algoritmus pracujúci s radarovými/lidarovými dátami. Bližšie informácie sú v publikácii [4].

3.1.2.1 Vstup a výstup

Vstupom tohto algoritmu je jediný sken atmosféry pod konštantným uhlom elevácie, zatiaľ čo krok azimutu je 1° . Predpokladá sa, že dáta vstupujúce do algoritmu prešli rôznymi kontrolami kvality. Vstupná hodnota rýchlosti, ktorú kontroly prehlásili za nepresnú, bude označená ako neplatná.

Okrem toho je algoritmus riadený konfiguračným súborom obsahujúcim rôzne minimálne hodnoty, či konštanty.

Výstup algoritmu sú dve množiny: množina strihových segmentov (ang. *set of shear segments*) a množina strihových oblastí (ang. *set of shear regions*). Segmenty sú jednorozmerné časti každého radiálneho lúča, ktorý obsahuje divergentný strih. Oblasti sú dvojrozmerné plochy, ktoré sú vytvorené spojením niekoľkých segmentov spĺňajúcich kritériá. Určené sú azimutovým uhlom, minimálnou a maximálnou vzdialenosťou³ zo všetkých segmentov a rozdielom rýchlosti pozdĺž segmentu.

3.1.2.2 Identifikácia strihového segmentu

Na začiatku algoritmu sa určia jednorozmerné segmenty. V rámci každej radiály sa hľadajú časti so stúpajúcim trendom. Skúma sa vždy istý časový úsek (ang. *range gate*) jednej radiály. Pre každú aktuálnu bránu sa vytvorí “okno”, tvorené niekoľkými ďalšími bránami.

Vždy sa o aktuálnej bráne rozhodne, či sa na nej môže začať segment. Pre hodnoty rýchlostí v okne musí platiť:

- i) všetky hodnoty v okne sú validné

³Útvar by sa dal popísať aj ako rozdiel dvoch výsekov z kruhu s rovnakým uhlom.

- ii) všetky hodnoty v okne sú väčšie ako aktuálna brána
- iii) niekoľko začiatkových hodnôt tvorí monotónne stúpajúcu postupnosť.⁴

Segment sa ukončí v prípade, že :

- i) celkový počet hodnôt v okne, ktoré buď nie sú validné, alebo sú menšie rovné ako hodnota v aktuálnej bráne, prekročí dovolený počet⁵.
- ii) rozdiel rýchlosti aktuálnej brány a najmenej rýchlosti väčšej ako aktuálna, prekročí povolenú hodnotu (Hodnota *Min Pos*).

Ak sa bránou segment neukončí, nastáva posúvanie okna. Vtedy treba určiť, ktorá z brán sa stane aktuálnou. Ak bude hodnota novej brány príliš vysoká (relatívne na priemerný sklon ostatných hodnôt v okne), tak nové okno nemusí zachovať stúpajúci sklon, čo spôsobí predčasné ukončenie segmentu. Z tohto dôvodu sa vyberá nová aktuálna brána ako rovnováha medzi zväčšením sklonu príliš rýchlo (vybratím vysokej hodnoty) a stúpaním pomaly (vybratím malej hodnoty), čo by spôsobilo zastavenie sa na malom lokálnom maxime. Na dosiahnutie sa vyberie nový začiatkový bod so špecifickými vlastnosťami. Definujme si zmenu rýchlosti v každom bode ako rozdiel s predchádzajúcou rýchlosťou. Následne sa zo všetkých bodov okna – väčších ako začiatkový bod – vyberie bod *B* s najmäňšou kladnou zmenou rýchlosti. Hľadaný nový začiatkový bod bude prvý, ktorý bude mať kladnú zmenu rýchlosti a bude menšia ako *Next Sample* krát zmena rýchlosti bodu *B*, kde *Next Sample* predstavuje ohraničenie určené v konfiguračnom súbore.

3.1.2.3 Validácia segmentu

Detekcia segmentu je veľmi citlivá, pretože neobsahuje žiadne požiadavky na dĺžku či silu stúpajúcich trendov. Typicky, pri neprítomnosti *microburstu* bude nájdených množstvo segmentov. Z tohto dôvodu, musí každý segment prejsť validačnými testami, aby sa odstránilo čo najviac segmentov nesúvisiacich s *microburstom*.

Validačný proces je cyklus zahŕňajúci testovanie a orezávanie. V každom chode cyklu sa každý segment môže odmietnuť.

⁴Presný počet je v konfiguračnom súbore.

⁵Hodnota *Bad* v konfiguračnom súbore.

Segment bude odmietnutý ak *a)* je nedostatočne dlhý; *b)* má príliš malý rozdiel rýchlosti ; *c)* má veľmi málo validných hodnôt; alebo *d)* nemá konzistentný stúpajúci trend.

Navyše sa môže skracovať, aby sa zabezpečilo že *a)* koncové body sú lokálne extrémny; *b)* že sa neodchyľujú príliš ďaleko od lokálneho mediánu; a *c)* sklon pri koncových bodoch je dostatočný.

3.1.2.4 Spájanie azimutov

Posledným krokom algoritmu je spojenie segmentov do dvojrozmerných oblastí. Dva segmenty sa spoja ak rozdiel ich azimutov je menší ako *Angular*⁶. Združovací proces pokračuje, až kým sú všetky segmenty zoskupené do oblastí.

Následne môže byť každá z oblastí odmietnutá, ak pre ňu platí (plocha oblasti sa rovná súčtu plôch jednotlivých segmentov, ktorými je tvorená): *a)* plocha oblasti je menšia než *Total Div Area*; *b)* je zložená z počtu segmentov menšieho ako *Min Div Segments*; alebo *c)* maximálny rozdiel rýchlosti (na najsilnejšom segmente oblasti) je menší než *Max Div Diff*.

Zvyšné oblasti sú výsledok algoritmu.

3.2 Charakteristika POD

Charakteristika POD – pravdepodobnosť detekcie (ang. *Probability of detection*) indikuje “kvalitu” algoritmu.

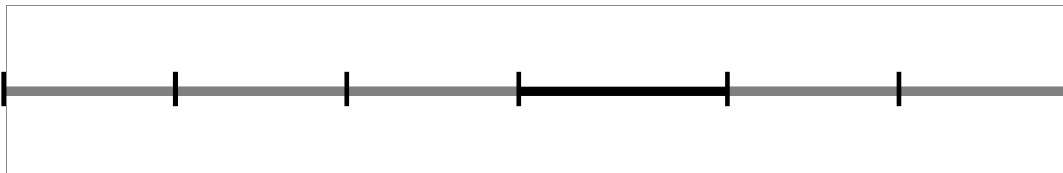
POD je dôležitou charakteristikou systémov detekcie strihu vetra využívaných na letiskách. Vyhodnocuje sa vo fáze návrhu systému pre konkrétne letisko.

Letisko má jednu dráhu alebo viacero dráh. Každá dráha má súradnice konca a začiatku⁷. Každý fyzický pás betónu predstavuje dve dráhy. Na obrázku 3.3 je dráha zo západu na východ, z hľadiska letectva sú to dve dráhy: jedna 09 pri vzlete/pristávaní zľava doprava (t. j. 90° na ružici kompasu) a druhá 27 zprava doľava. Štandardne je *microburst* nebezpečný v prípade, že sa nachádza v okolí dráhy. Toto okolie je presne definované a nazýva sa ARENA (*AREa Noted for Attention*) podľa Wilsona [13]. Je

⁶Hodnota v konfiguračnom súbore.

⁷Zjednodušene sa uvažuje dráha ako úsečka namiesto obdĺžnika.

to obdĺžnik dlhý päť námorných míľ plus dĺžka dráhy a široký jednu námornú míľ⁸. Pozícia dráhy voči ARENA je na obrázku 3.3.



Obr. 3.3: ARENA okolo dráhy 09

POD sa ráta iba pre túto oblasť. Vždy na začiatku sa zvolí *microburst*, ktorého výskyt budeme detegovať a rozlíšenie. Základný princíp výpočtu je nasledovný:

1. Vytvorí sa mriežka. Jej veľkosť je najtesnejšie ohraničenie všetkých ARENA do obdĺžnika, plus v každom smere sa pridá polomer *microburstu*. Rozlíšenie určuje vzdialenosť jednotlivých bodov mriežky.
2. Pre každý bod mriežky sa bude rátať počet zásahov a počet zlyhaní.
3. Postupne sa do každého bodu mriežky položí stred *microburstu*. Následne sa tento jav pokúsi zdetegovať⁹.
4. Ak bola detekcia úspešná, tak sa pre každé políčko mriežky, ktoré má prienik s javom pripočíta plus jeden zásah. Ak bola neúspešná, tak plus jedno zlyhanie.
5. POD pre jedno políčko mriežky sa vypočíta pomocou vzorca¹⁰:

$$POD = \frac{\#_{HIT}}{\#_{HIT} + \#_{MISS}}$$

Výstup tohto postupu je pole čísel v intervale $\langle 0, 1 \rangle$. Toto pole sa potom vizualizuje a vypočítavajú sa priemerné hodnoty pre rôzne oblasti. ARENA sa dá predstaviť aj ako zloženie šiestich oblastí (pre každú námornú míľu po dĺžke plus dráha, viď obrázok 3.4).

⁸Zahŕňa oblasť troch námorných míľ pred prahom dráhy – *arrival* oblasť a dve námorné míle za koncom dráhy – *departure* oblasť.

⁹Buď pomocou anemometrov, alebo prístroja DAR.

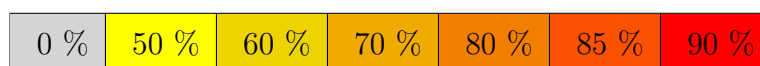
¹⁰ $\#_{HIT}$ predstavuje počet zásahov, $\#_{MISS}$ naopak počet zlyhaní.



Obr. 3.4: ARENA

Pre každú z oblastí 3A, 2A, 1A, RWY, 1D, 2D sa vyráta POD. Potom pre 1A + RWY + 1D, 2A + 1A + RWY + 1D + 2D a pre celú ARENA¹¹.

Legenda pre POD na obrázkoch je:



3.2.1 POD detekcia algoritmu LLWAS

V prípade, že sa počíta analýza POD pre algoritmus LLWAS pre konkrétne letisko so zadanou sadou anemometrov, sa *microburst* prevedie na časové rady rýchlostí a smerov vetra príslušné pre jednotlivé anemometre. Tieto časové rady slúžia ako vstup algoritmu LLWAS, ktorý vráti na výstupe zoznam výstrah pre danú meteorologickú situáciu. Ak nastala aspoň jedna výstraha, tak sa detekcia tohto konkrétneho *microburstu* považuje za úspešnú.

Nástroj pre POD analýzu vyvíjaný v rámci tejto práce bol použitý v roku 2014 na POD analýzu systému LLWAS nainštalovanom na medzinárodnom letisku Jeju (ICAO: RKPC, IATA: CJU), Kórejska republika. Použitý bol 2D model *microburstu* UCAR.

Výsledky aktuálnej situácie sú spracované v správe [9]. Tabuľka 3.1 a obrázky A.1, A.2 zobrazujú dovedajšiu situáciu.

¹¹A znamená *approach*, D *departure*.

Oblasť		POD	Oblasť		POD
07		55.50 %	13		40.60 %
07 3A		3.10 %	13 3A		0.00 %
07 2A	25 2D	59.50 %	13 2A	31 2D	2.90 %
07 1A	25 1D	80.10 %	13 1A	31 1D	52.10 %
RWY	RWY	78.90 %	RWY	RWY	79.90 %
07 1D	25 1A	61.60 %	13 1D	31 1A	69.10 %
07 2D	25 2A	35.30 %	13 2D	31 2A	47.20 %
	25 3A	9.00 %		31 3A	2.10 %
	25	56.30 %		31	40.90 %

Tabuľka 3.1: POD analýza pre dráhy 07/25 a 13/31– UCAR

Obrázok A.2 zobrazuje pokrytie letiska. Každé políčko môže nadobúdať hodnotu 0 alebo 1. V kroku 4, ak je detecia úspešná, tak sa na políčko stredu zadá pokrytie 1, inak 0. Teda to určuje, kde bude *microburst* zdetegovaný, ak tam položíme jeho stred.

3.2.1.1 Navrhované úpravy siete anemometrov

Najlepšie rozmiestnenie anemometrových staníc by bolo, ak by POD arény bol vyšší ako 90%. Pre zlepšenie POD na letisku Jeju sa predložili úpravy na zvýšenie.

Možnosti úprav sú nasledujúce:

1. Presunutie stanice 10 – pozemkové dôvody – obrázok A.3.
2. Nová stanica 13 – zlepšenie pokrytia dráhy 25 (2A,3A) – obrázok A.4.
3. Presunutie 10 a pridanie stanice číslo 13 – obrázok A.5
4. Odstránenie staníc 5 a/alebo 6 – nachádzajú sa v zastavanej ploche mesta – obrázok A.6.
5. Nové stanice 12,13 – zlepšenie pokrytia dráhy 25 (2A,3A) – obrázok A.7.
6. Zlepšenie pokrytia dráhy 07 (2A,3A):
 - a) Nové stanice 14, 15.
 - b) Nové stanice 14₂, 15 a premiestnenie stanice 9.

7. Maximalistický variant:

- Odstránenie staníc 5,6.
- Premiestnenie staníc 9,10.
- Pridanie staníc 12,13 na dráhu 25 *approach*.
- Pridanie staníc 14₂,15 na dráhu 07 *approach*.

3.2.1.2 Porovnanie POD analýzy pre 2D a 3D model

Model 2D je štandardný model využívaný pri LLWAS algoritme, napriek tomu POD analýza s 3D modelom poskytuje lepšie výsledky, ako je možné vidieť pri porovnaní tabuliek 3.1 a 3.2, či obrázkov A.1 a A.11.

POD analýza pomocou 2D modelu je odporúčaná organizáciou UCAR (ktorá vyvinula LLWAS algoritmus) a teda 3D model môže predbežne slúžiť len ako pomocný údaj pre návrh LLWAS systémov. Avšak bude vhodný na overovanie systémov založených na TDWR algoritme, vid'. kapitola 3.2.2 POD analýza TDWR algoritmu.

Oblasť		POD	Oblasť		POD
07		73.30 %	13		53.40 %
07 3A		34.10 %	13 3A		0.00 %
07 2A	25 2D	82.70 %	13 2A	31 2D	4.90 %
07 1A	25 1D	87.50 %	13 1A	31 1D	75.20 %
RWY	RWY	90.10 %	RWY	RWY	91.10 %
07 1D	25 1A	83.50 %	13 1D	31 1A	87.90 %
07 2D	25 2A	51.00 %	13 2D	31 2A	69.20 %
	25 3A	44.80 %		31 3A	25.90 %
	25	74.80 %		31	57.90 %

Tabuľka 3.2: POD analýza pre dráhy – 3D model

3.2.2 POD analýza TDWR algoritmu

POD v tomto prípade funguje podobne, ale algoritmus POD je rozdelený na dve časti. Delí sa to presne v bode 3.

Prvá časť pozostáva z generovania sady dát. Do každého bodu mriežky sa položí stred *microburstu* a pustí sa skenovanie prístrojom DAR. Generovanie je parametrizované prístrojom DAR, stratégiou skenovania, typom *microburstu* a časom začiatku. Vždy sa skenuje rovnakou stratégiou a rovnakým snímačom DAR preto sú rôzne uložené *microbursty* skenované v rôznom čase. Klasický spôsob je, že sa skenuje elevácia 1° , s krokom 0.73° . Prvý výstrel býva s azimutom 0° . Čas začiatku, určuje čas prvého výstrelu relatívne k času začiatku javu.

Druhá časť je samotné zisťovanie POD. Algoritmus vezme celú sadu vygenerovaných dát a v každom súbore sa pokúsi zdetegovať *microburst* algoritmom TDWR. Algoritmus vráti zoznam regiónov. Ak nájde aspoň jeden región, tak sa zvýši počet HIT v ploche *microburstu*, inak sa zvýši počet MISS.

Nasleduje niekoľko tabuliek rôznych analýz. V každej bude platiť, že Lidar je 300 m severne od stredu dráhy s dosahom 6 km, a radar 926 m severne, s dosahom 9 km. Lidar v Hong Kongu je 300 m od dráhy. Radary kvôli rozmerom bývajú ďalej. Skenovaný *microburst* má klasické parametre ($U_{r,max} = 25$ m/s, $z_m = 60$ m, $r_P = 750$ m, Π prvého typu). Rýchlosť radaru je 2° za sekundu.

Oblasť		POD
09		82.70 %
09 3A		49.20 %
09 2A	27 2D	100.00 %
09 1A	27 1D	100.00 %
RWY	RWY	95.80 %
09 1D	27 1A	80.10 %
09 2D	27 2A	70.60 %
	27 3A	28.80 %
	27	80.10 %

Tabuľka 3.3: POD analýza pre dráhu 09

Rozlíšenie 200, Lidar, čas začiatku
skenovania 0 min, šum 0

Oblasť		POD
09		92.90 %
09 3A		59.00 %
09 2A	27 2D	100.00 %
09 1A	27 1D	100.00 %
RWY	RWY	100.00 %
09 1D	27 1A	100.00 %
09 2D	27 2A	100.00 %
	27 3A	55.40 %
	27	93.00 %

Tabuľka 3.4: POD analýza pre dráhu 09

Rozlíšenie 200, Lidar, čas začiatku
skenovania 5 min, šum 0

Oblasť		POD
09		98.00 %
09 3A		100.00 %
09 2A	27 2D	100.00 %
09 1A	27 1D	100.00 %
RWY	RWY	98.70 %
09 1D	27 1A	96.40 %
09 2D	27 2A	92.80 %
	27 3A	70.00 %
	27	93.30 %

Oblasť		POD
09		100.00 %
09 3A		100.00 %
09 2A	27 2D	100.00 %
09 1A	27 1D	100.00 %
RWY	RWY	100.00 %
09 1D	27 1A	100.00 %
09 2D	27 2A	100.00 %
	27 3A	100.00 %
	27	100.00 %

Tabuľka 3.5: POD analýza pre dráhu 09
Rozlíšenie 200, Radar, čas začiatku
skenovania 0 min, šum 0

Tabuľka 3.6: POD analýza pre dráhu 09
Rozlíšenie 200, Radar, čas začiatku
skenovania 5 min, šum 0

K tabuľkám prislúchajú obrázky : 3.3 – B.1, 3.4 – B.2, 3.5 – B.3, 3.6 – B.4.

Na obrázkoch B.1 a B.3 vidno POD analýzu, ktorá začínala v nultej minúte. Pretože algoritmus má problém zdetegovať *microburst* počas prvej minúty, keďže je tam ešte príliš malý rozdiel rýchlosti, tak na začiatku skenu (prvá minúta) sa *microbursty* nezdetegujú.

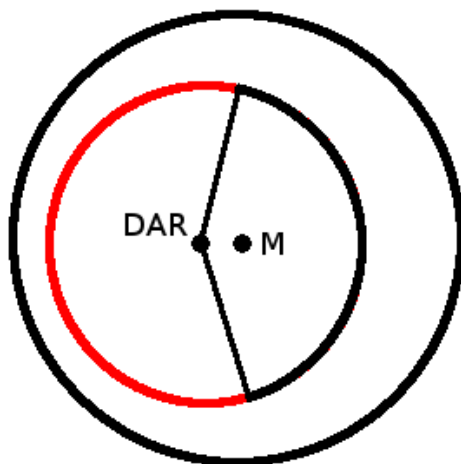
Dobrý výsledok je, že POD je v piatej minúte väčší ako 90%. Lidar nemá na koncoch ARENA 90%, ale to je preto, lebo sme zvolili 6 km dosah Lidaru. Tie však môžu mať dosah až 9 km a vtedy by bol POD v piatej minúte 100%.

3.2.2.1 POAD

POAD – *Probability of Area Detection* je pojem, ktorý sme si zadefinovali pre modifikáciu POD. Narozdiel od POD, ktorý v podstate znamená pravdepodobnosť v bode, že ak bod bude zasiahnutý *microburstom*, tak sa tento jav zdeteguje, tak POAD znamená pravdepodobnosť, že ak bude bod súčasťou *microburstu*, tak ho algoritmus zdeteguje a aspoň jeden z regiónov bude obsahovať tento bod.

Jedna z vecí, ktoré vidno na obrázkoch POAD sú, že okolo radaru/lidaru je POAD znížený. Dôvod vidno na obrázku 3.5. V prípade, že *microburst* zasahuje DAR, tak sa zdeteguje región iba na jednej strane (ako vidno čierny región), zatiaľ čo červená oblasť

zdetegovaná nebude.



Obr. 3.5: *Microburst* blízko radaru/lidaru

3.2.2.2 Porovnanie TDWR s jeho modifikáciou

Bakalárska práca Olívie Kunertovej [3] sa venuje implementácii TDWR algoritmu a jeho modifikácii. Túto modifikáciu si nazveme TDWR'. Pre lepšie porovnanie sa používa aj POAD z kapitoly 3.2.2.1.

Oblasť		POD		POAD	
		TDWR	TDWR'	TDWR	TDWR'
09		92.90 %	93.10 %	88.80 %	89.00 %
09 3A		59.00	59.80	47.30	48.20 %
09 2A	27 2D	100.00	100.00	100.00	100.00 %
09 1A	27 1D	100.00	100.00	100.00	100.00 %
RWY	RWY	100.00	100.00	90.20	90.20 %
09 1D	27 1A	100.00	100.00	99.80	99.90 %
09 2D	27 2A	100.00	100.00	99.80	99.90 %
	27 3A	55.40	60.40	47.60	48.80 %
	27	93.00 %	93.80 %	89.60 %	89.80 %

Tabuľka 3.7: POD analýza pre dráhu 09

Rozlíšenie 200, Lidar, čas začiatku skenovania 5 min, šum 0
obrázky B.5 a B.6 zobrazujú posledné dva stĺpce

Oblasť		POD		POAD	
		TDWR	TDWR'	TDWR	TDWR'
09		100.00 %	100.00 %	63.00 %	98.30 %
09 3A		100.00	100.00	51.50	100.00 %
09 2A	27 2D	100.00	100.00	61.80	100.00 %
09 1A	27 1D	100.00	100.00	64.80	100.00 %
RWY	RWY	100.00	100.00	53.60	91.90 %
09 1D	27 1A	100.00	100.00	76.00	100.00 %
09 2D	27 2A	100.00	100.00	74.40	99.70 %
	27 3A	100.00	100.00	66.70	99.80 %
	27	100.00 %	100.00 %	65.60 %	98.20 %

Tabuľka 3.8: POD analýza pre dráhu 09

Rozlíšenie 200, Radar, čas začiatku skenovania 5 min, šum 2
obrázky B.7 a B.8 zobrazujú posledné dva stĺpce

Záver

Na začiatku práce sme vysvetlili základné meteorologické pojmy. Ďalej sme popísali 2D a 3D modely *microburstov* spolu s ich implementáciou. Následne sme si vysvetlili ako pracuje radar/lidar a presnú implementáciu simulátorov týchto senzorov.

V ďalšej časti sme si ukázali využitie týchto modelov pri overovaní systémov detekcie. Najprv sme si popísali rôzne algoritmy, ktoré sa v tejto oblasti využívajú. Vysvetlili sme si pojem POD a jeho rátanie pre letisko. Jeden z algoritmov – LLWAS – bol už dlho využívaný a nástroje POD analýzy implementované v rámci tejto práce sa využívajú pri navrhovaní siete anemometrov na letiskách [9].

Pre overovanie algoritmu detekcie TDWR je problematický prístup k datasetom obsahujúcim reálne *microbursty*, takže simulované dáta výrazne pomohli pri testovaní algoritmov. Okrem toho sa simulované javy využívajú pre POD analýzy.

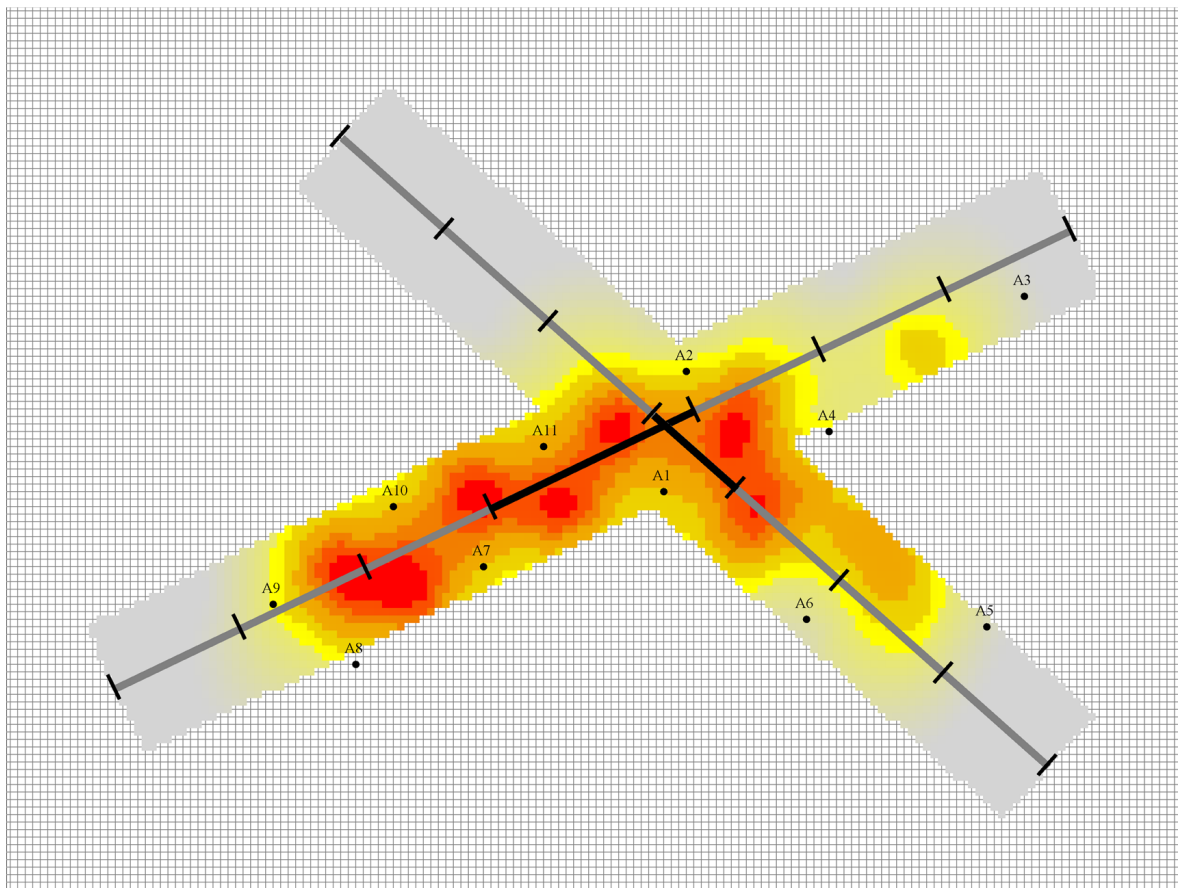
V budúcnosti sa plánuje implementácia zjednodušeného modelu ďalšieho z javov – *gust front*, čím sa rozšíria možnosti simulátora a tým pádom možnosti overovania algoritmov. Pomôže to generovať dáta, ktoré overia či algoritmus naozaj deteguje *microburst* práve vtedy keď sa tam nachádza.

Vyhodnocovanie charakteristiky FAR (*False Alarm Ratio*) je inherentne problematické. Podľa názoru W. Wilsona (autora LLWAS algoritmu), prezentovaného počas obhliadky systému na medzinárodnom letisku Changi, Singapur, 2014, je problematický návrh sady takých (z meteorologického hľadiska prípustných) javov, ktoré by mohli vyvolávať falošné detekcie strihu vetra a pritom by nepredstavovali reálne nebezpečenstvo.

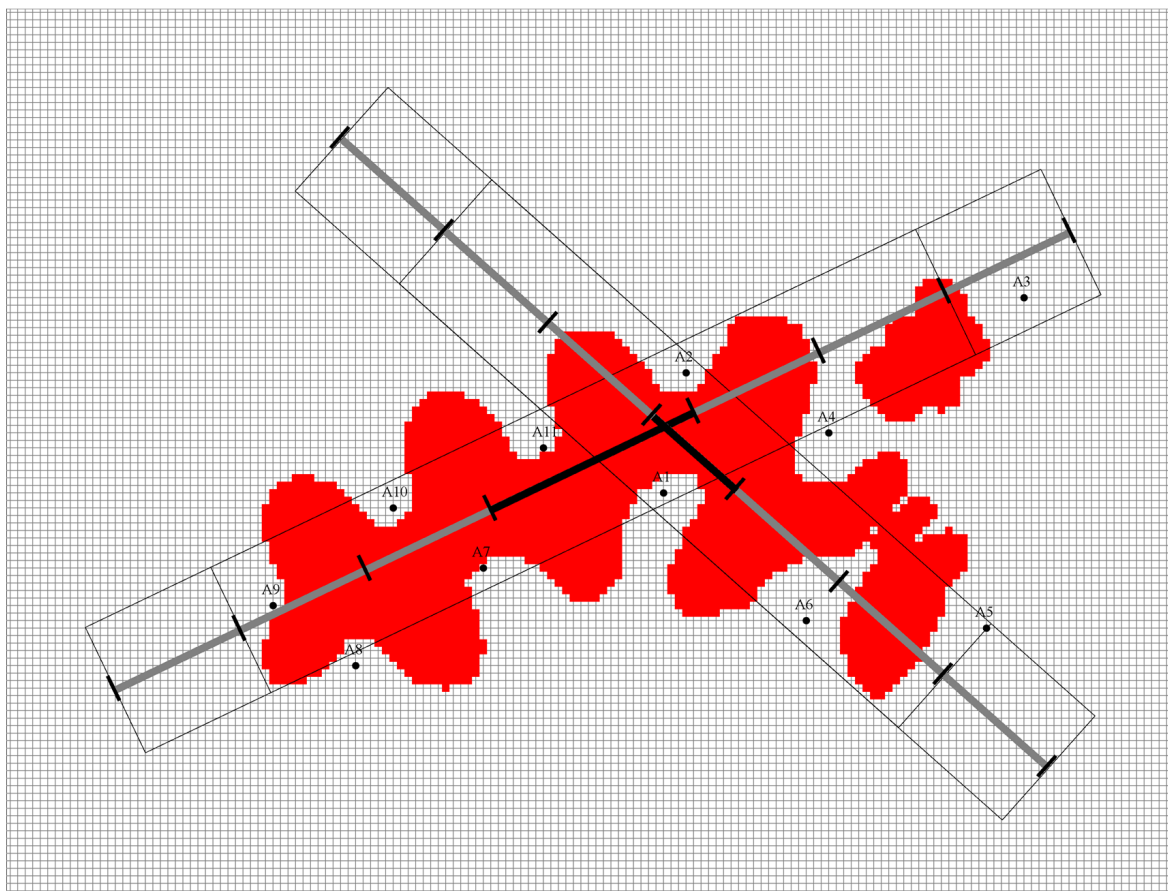
Dodatok A

POD analýza, letisko Jeju (ICAO: RKPC, IATA: CJU), Kórea

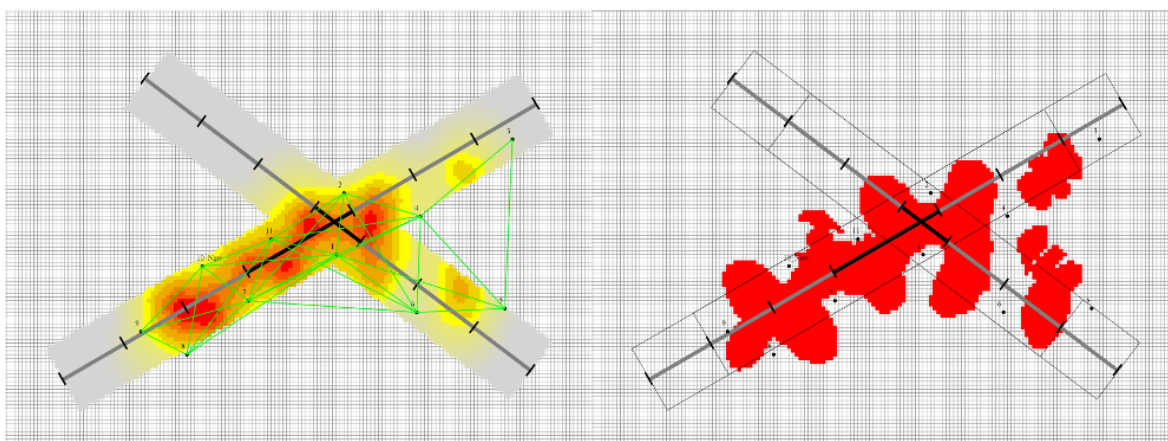
Dodatok zhŕňa výsledky analýzy popisovanej v kapitole 3.2.1.



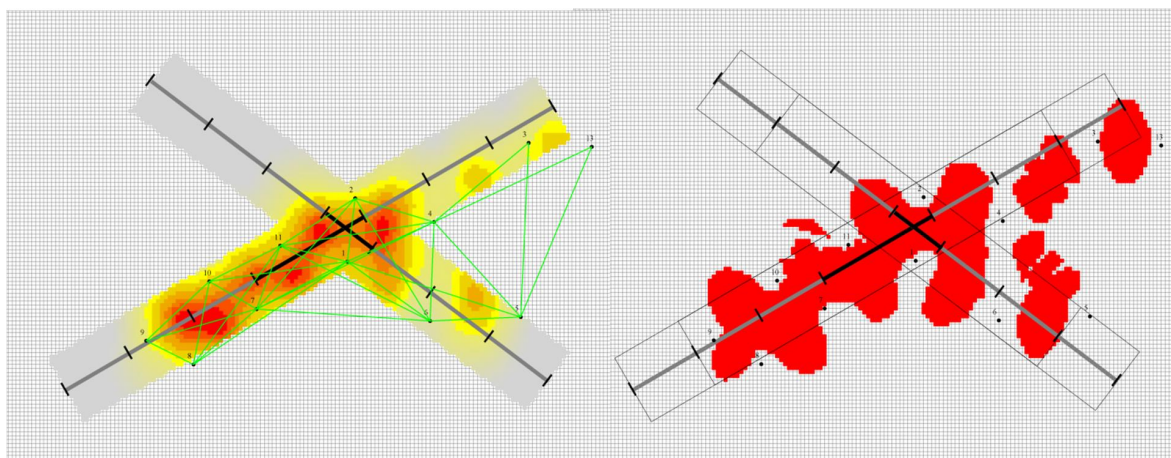
Obr. A.1: POD analýza – model UCAR



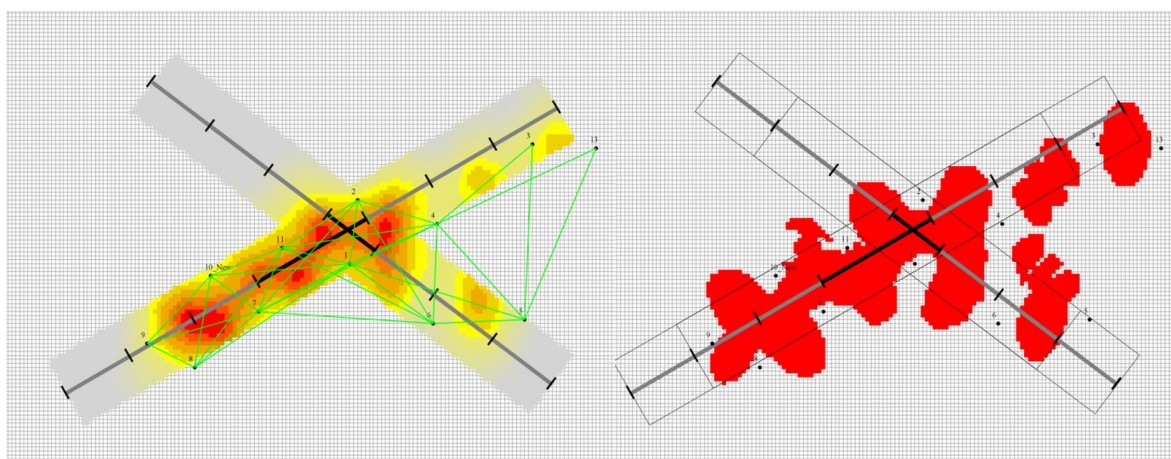
Obr. A.2: Pokrytie letiska



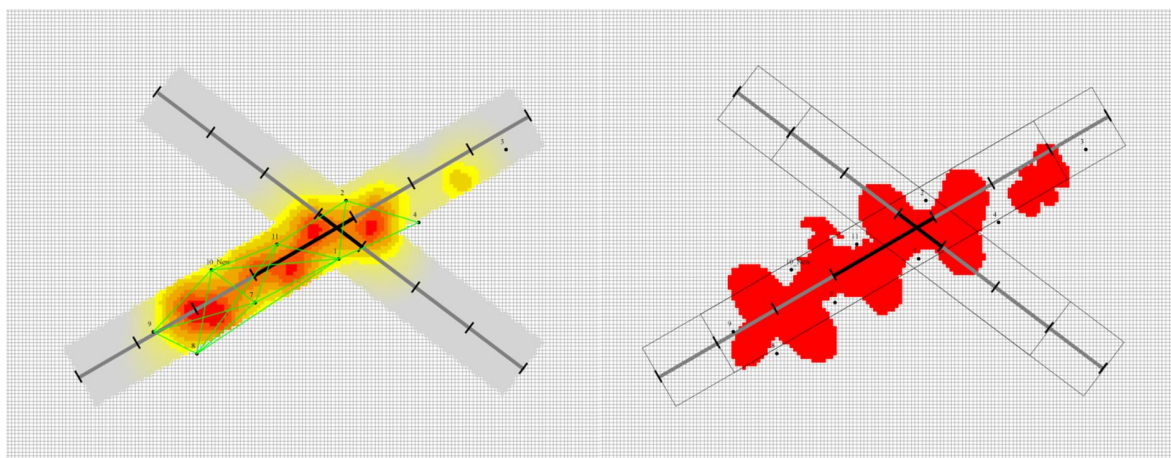
Obr. A.3: Možnosť 1
premiestnenie anemometru 10



Obr. A.4: Možnosť 2
pridanie anemometru 13

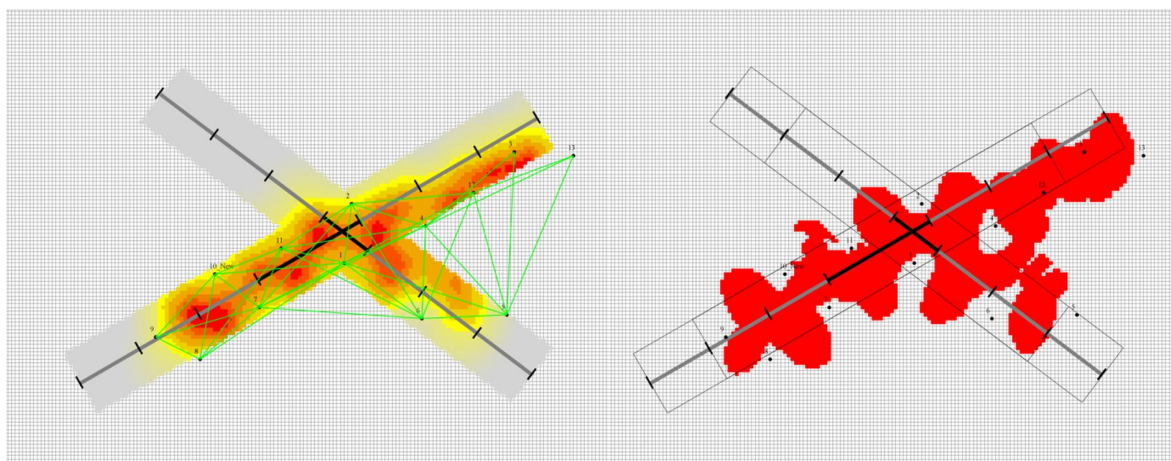


Obr. A.5: Možnosť 3
premiestnenie anemometru 10, pridanie anemometru 13



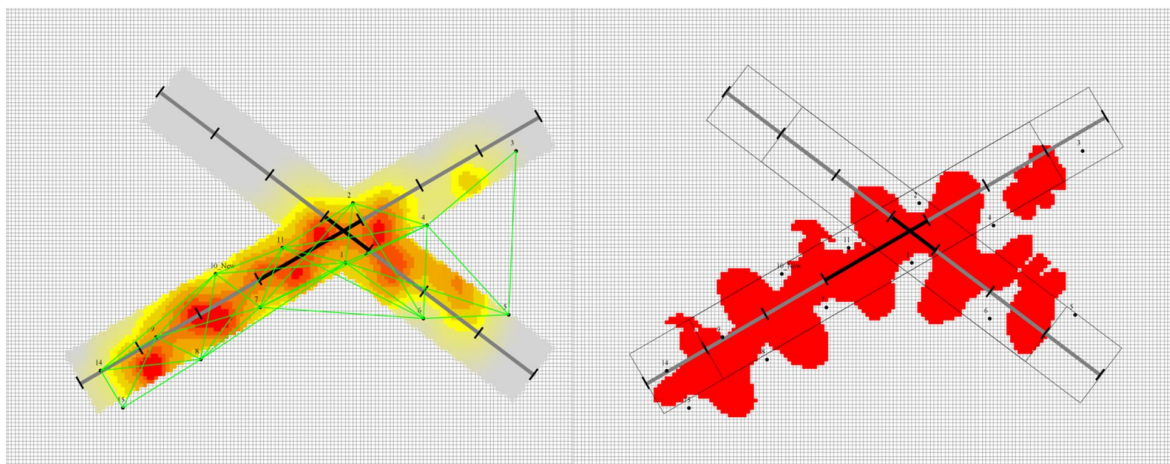
Obr. A.6: Možnosť 4

premiestnenie anemometru 10, vynechanie anemometrov 5,6

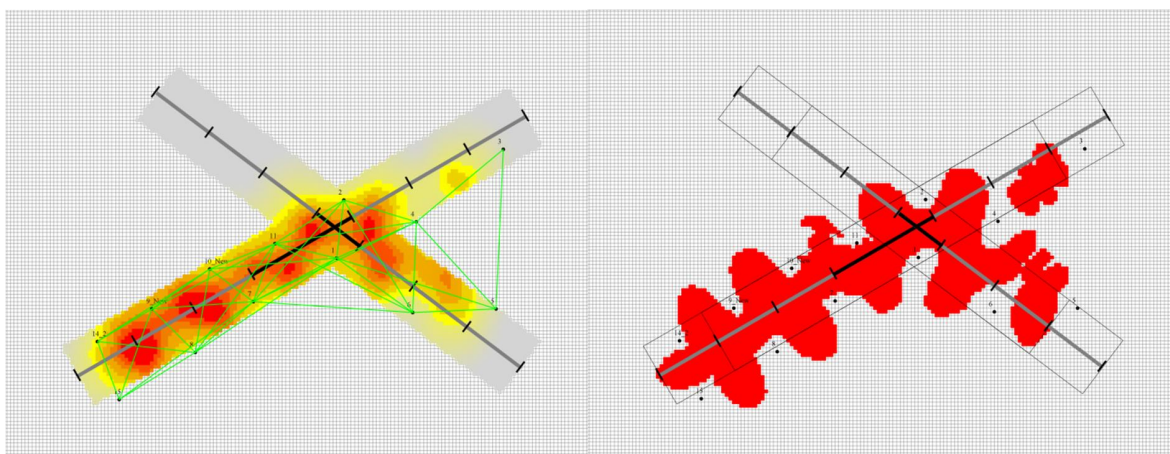


Obr. A.7: Možnosť 5

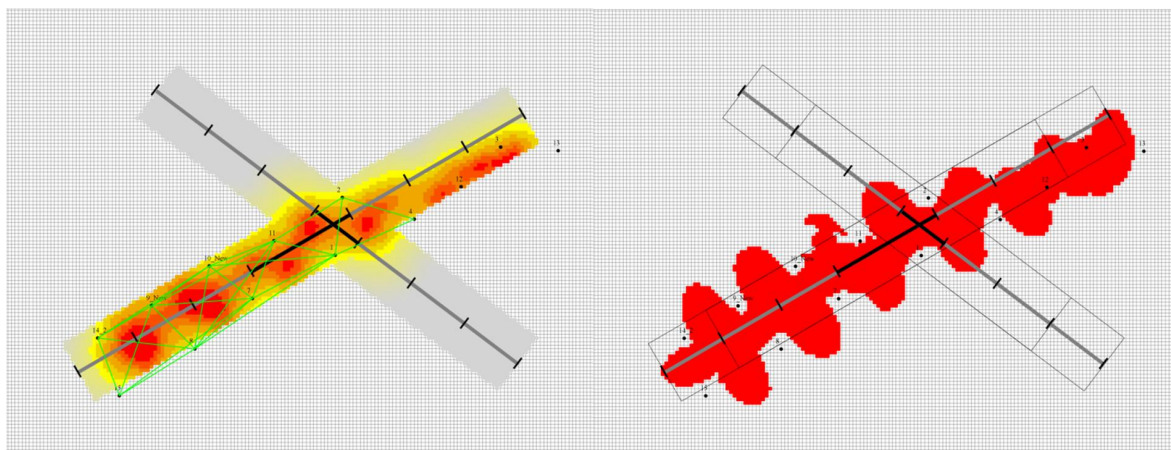
premiestnenie anemometru 10, pridanie anemometrov 12,13



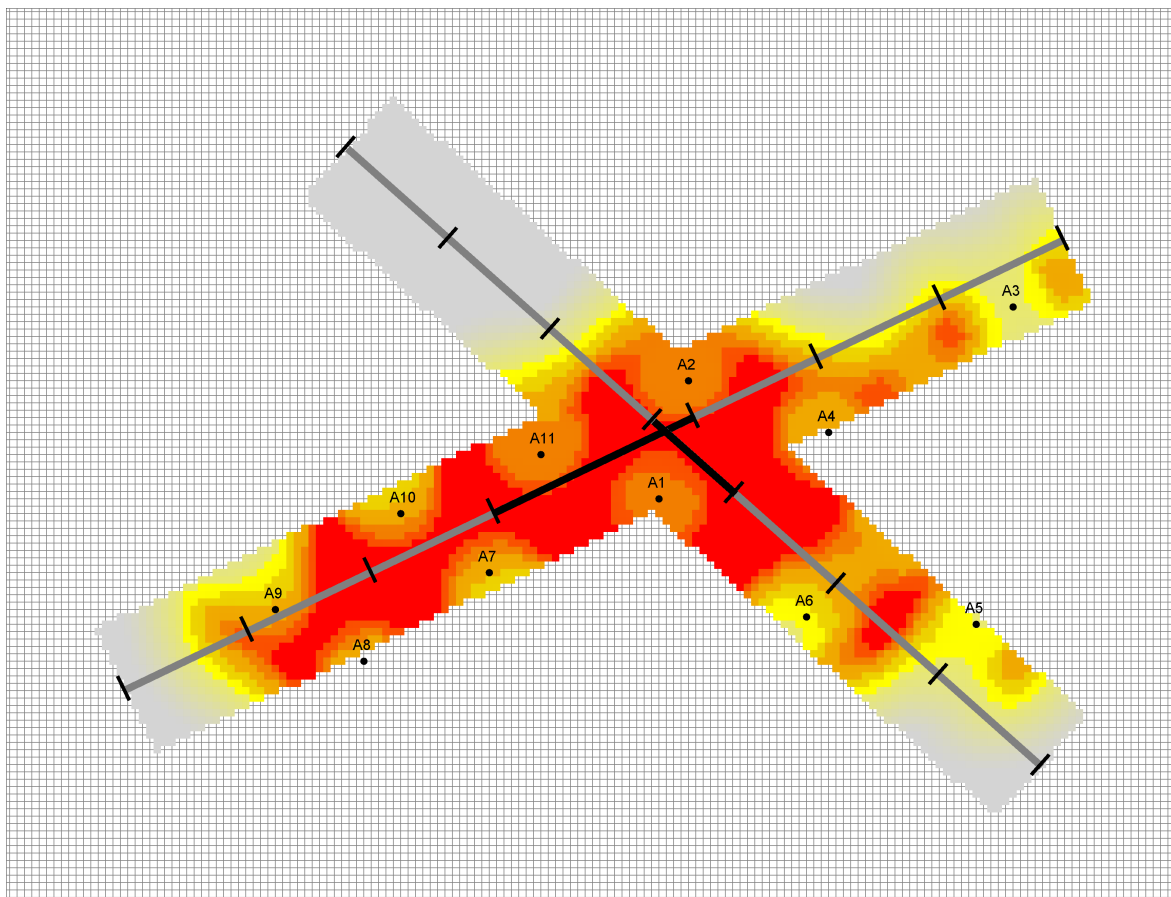
Obr. A.8: Možnosť 6a
premiestnenie anemometru 10, pridanie anemometrov 14,15



Obr. A.9: Možnosť 6b
premiestnenie anemometrov 9,10, pridanie anemometrov 14₂,15



Obr. A.10: Možnosť 7
maximalistický variant

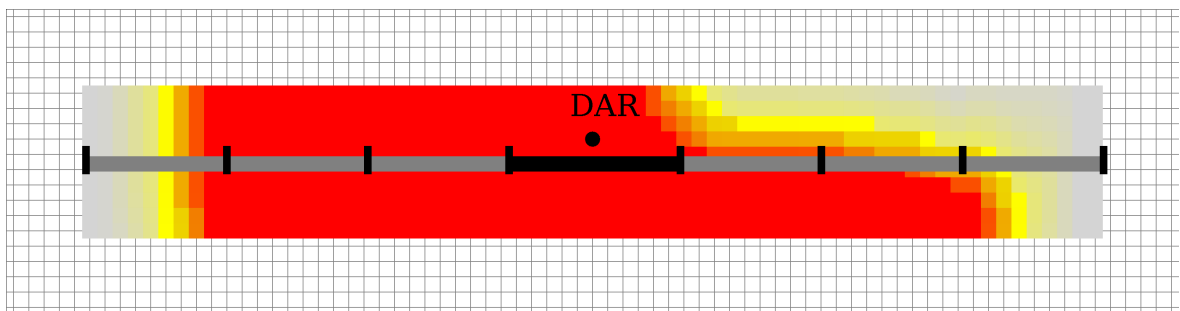


Obr. A.11: POD analýza – 3D model

Dodatok B

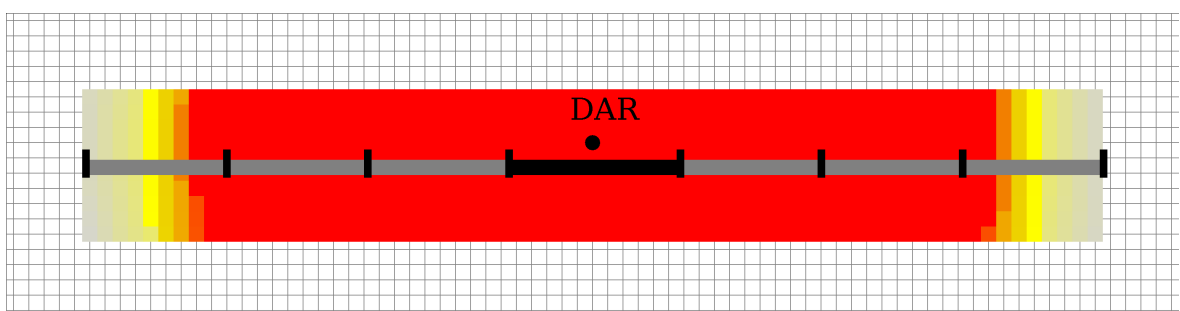
POD analýza pre algoritmus TDWR

Dodatok zhŕňa výsledky analýzy popisovanej v kapitole 3.2.2.



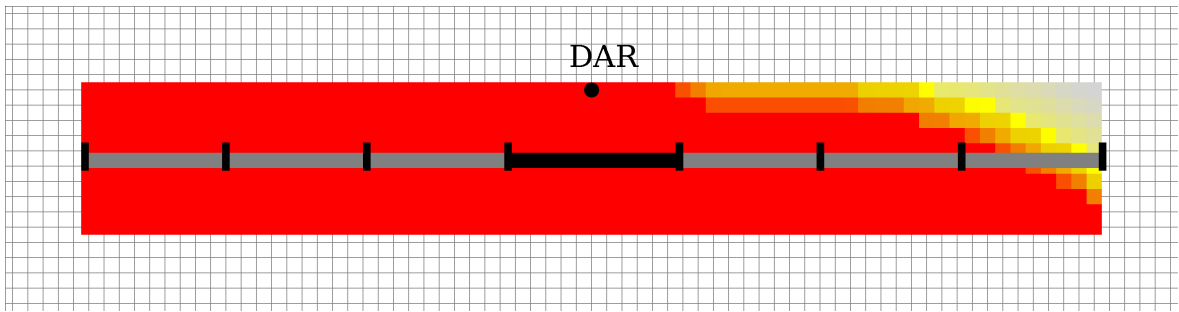
Obr. B.1: POD analýza pre dráhu 09

Rozlíšenie 200, Lidar, čas začiatku skenovania 0 min, šum 0



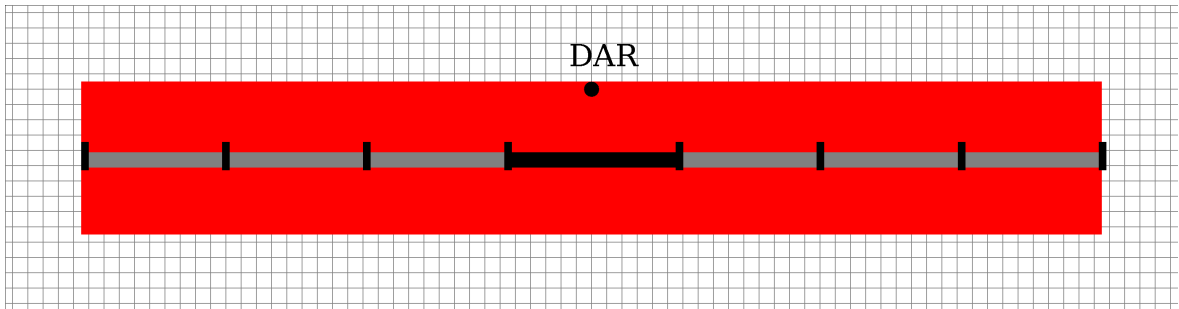
Obr. B.2: POD analýza pre dráhu 09

Rozlíšenie 200, Lidar, čas začiatku skenovania 5 min, šum 0



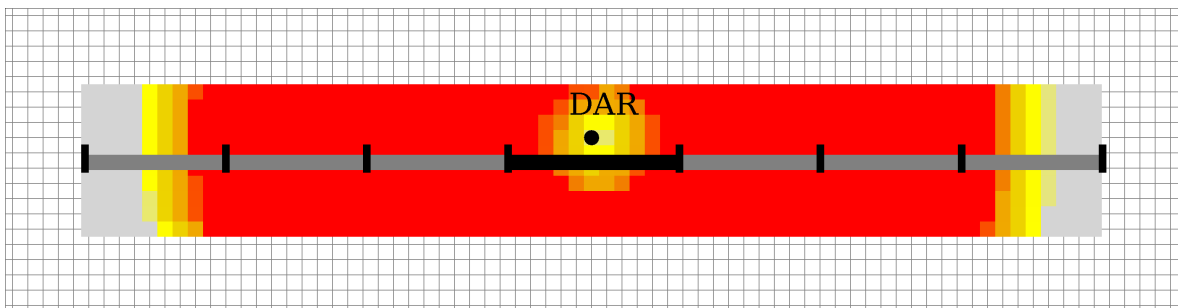
Obr. B.3: POD analýza pre dráhu 09

Rozlíšenie 200, Radar, čas začiatku skenovania 0 min, šum 0



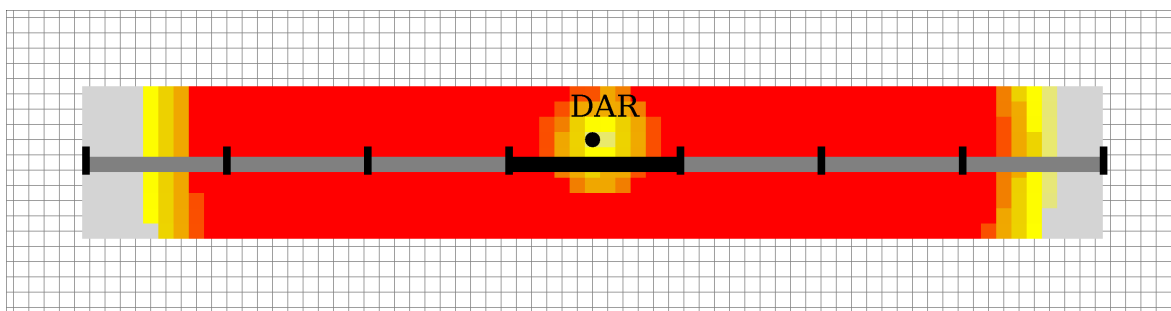
Obr. B.4: POD analýza pre dráhu 09

Rozlíšenie 200, Radar, čas začiatku skenovania 5 min, šum 0

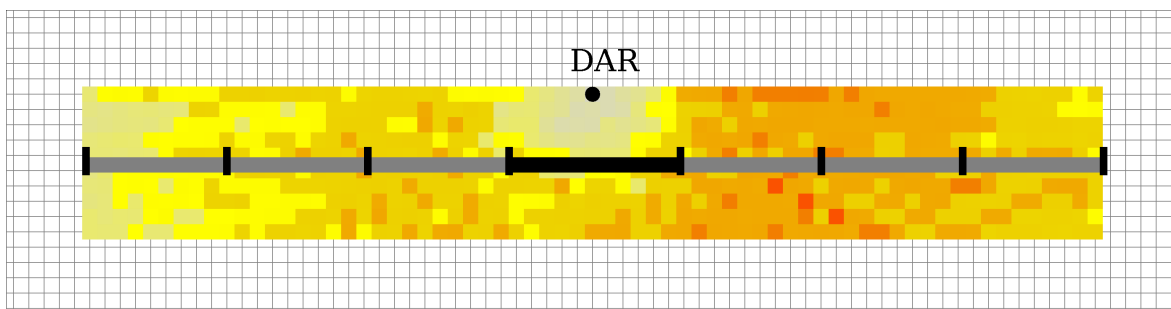


Obr. B.5: TDWR – Modifikovaná POD analýza pre dráhu 09

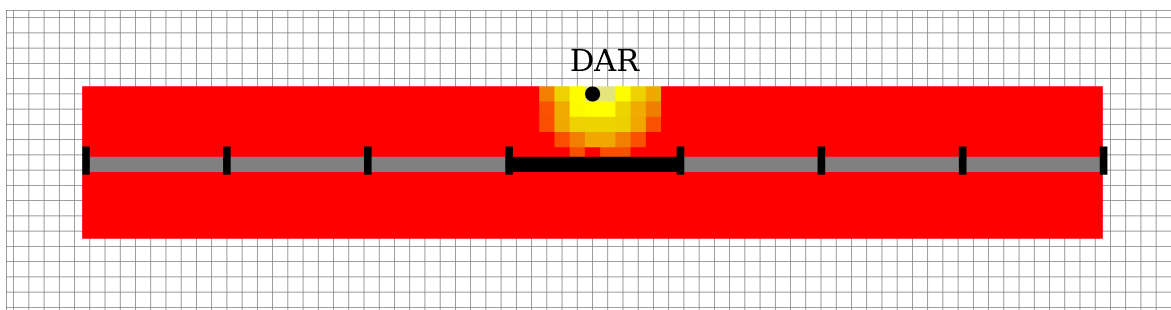
Rozlíšenie 200, Lidar, čas začiatku skenovania 5 min, šum 0



Obr. B.6: Modifikovaný TDWR – Modifikovaná POD analýza pre dráhu 09
Rozlíšenie 200, Lidar, čas začiatku skenovania 5 min, šum 0



Obr. B.7: TDWR – Modifikovaná POD analýza pre dráhu 09
Rozlíšenie 200, Radar, čas začiatku skenovania 5 min, šum 2



Obr. B.8: Modifikovaný TDWR – Modifikovaná POD analýza pre dráhu 09
Rozlíšenie 200, Radar, čas začiatku skenovania 5 min, šum 2

Literatúra

- [1] Spherical Coordinates – from Wolfram MathWorld. <http://mathworld.wolfram.com/SphericalCoordinates.html>.
- [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] O. Kunertová. Analýza a rozpoznávanie vzorov v 3D/4D dátach. Bakalárska práca, Univerzita Komenského v Bratislave, 2015.
- [4] M. W. Merritt. *Microburst Divergence Detection for Terminal Doppler Weather Radar*. Project report. Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, 1991.
- [5] Tucson News Now. Weather 101: Dry microbursts. <http://www.TucsonNewsNow.com/story/18235096/weather-101-dry-microbursts>, 2012.
- [6] Tucson News Now. Weather 101: Wet microbursts. <http://www.TucsonNewsNow.com/story/18640826/weather-101-wet-microbursts>, 2012.
- [7] International Civil Aviation Organization. *Manual on Low-level Wind Shear*. Doc (International Civil Aviation Organization). International Civil Aviation Organization, 2005.
- [8] American Meteorological Society. AMS glossary. http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main_Page, 2012.
- [9] MicroStep-MIS spol. s r.o. Low Level Windshear Alert System, Jeju International Airport(ICAO: RKPC, IATA: CJU), Site Survey Report, November 18 2014.

- [10] WeatherTAP.com and TAP Publishing. WeatherTAP.com – NEXRAD radar tutorial. <http://www.weathertap.com/guides/radar/weather-radar-tutorial.html>, 2012.
- [11] D. Whatley. Lesson 5: Wind shears and microbursts. <http://www.nwas.org/committees/avnwxcourse/lesson5.htm>, 2003.
- [12] Wikimedia. Microburst. <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Microburstcrosssection.JPG>, 2010.
- [13] F. W. Wilson. Wind shear alert system, June 22 1993. US Patent 5,221,924.
- [14] WMO. *Guide to meteorological instruments and methods of observation*. Number 8. Geneva, Switzerland : World Meteorological Organization, 2008.