Technická univerzita v Košiciach Fakulta elektrotechniky a informatiky

Automatizácia a vývoj metód pre rozpoznávanie cunami vĺn v pozorovaniach MINI-EUSO experimentu

Diplomová práca

2017

Bc. Ondrej Matija

Technická univerzita v Košiciach Fakulta elektrotechniky a informatiky

Automatizácia a vývoj metód pre rozpoznávanie cunami vĺn v pozorovaniach MINI-EUSO experimentu

Diplomová práca

Študijný program:	Informatika
Študijný odbor:	9.2.1 Informatika
Školiace pracovisko:	Katedra počítačov a informatiky (KPI)
Školiteľ:	doc. Ing. Ján Genči, PhD.
Konzultant:	RNDr. Pavol Bobik, PhD.
	Ing. Michal Vrábel

Košice 2017

Bc. Ondrej Matija

Abstrakt v SJ

Projekt Mini-EUSO je prekurzorom experimentu JEM-EUSO, prostredníctvom ktorého sa overí funkčnosť komponentov EUSO experimentov a fyzikálne podmienky pre ich merania. Primárne je JEM-EUSO projekt zameraný na hľadanie spŕšok častíc, vyvolaných nárazom vysokoenergetickej častice do molekúl atmosféry Zeme. Cieľom práce je preskúmať možnosť využitia Mini-EUSO detektoru alebo podobného experimentu, na rozpoznanie cunami vĺn z obežnej dráhy Zeme, prostredníctvom snímania žiarenia hornej vrstvy atmosféry, takzvaného airglow. Vlny pozorovateľné z orbity Zeme v airglow žiarení sú špeciálnym prípadom atmosrérických gravitačných vĺn. Keďže experiment Mini-EUSO štartuje až koncom roku 2017, implementácia zahŕňa simulácie výstupov UV kamery použitej v tomto experimente a následnú detekciu prítomnosti vĺn v týchto simulovaných dátach. Detegované vlny sú rekonštruované s cieľom určiť ich základné parametre. Následne je spoľahlivosť rekonštrukcie vyhodnotená dvomi štatistickými metódami. Práca ukazuje, že Mini-EUSO experiment dokáže nad Tichým oceánom pri bezoblačnej situácii identifikovať vlnu v airglow žiarení, zodpovedajúcu cunami rovnakej kategórie ako bola cunami vyvolaná zemetrasením v Tohoku v roku 2011.

Kľúčové slová

Mini-EUSO, JEM-EUSO, cunami, atmosférické gravitačné vlny, zhlukovanie

Abstrakt v AJ

Project Mini-EUSO is precursor of JEM-EUSO experiment which will check functionality of components of EUSO experiments and physical conditions for their measurements. JEM-EUSO is primarily focused on detection of particle shower events caused by interaction of high-energetic particles with molecules of Earth's atmosphere. Goal of this project is to explore possibility of use of Mini-EUSO detector, or similar experiment, for recognition of tsunami waves from Earth's orbit by observation of airglow. Waves observed from Earth's orbit in airglow, are specific case of atmospheric gravitational waves. Mini-EUSO experiment will start on the end of year 2017 and because of that, we implemented simulations of outputs of UV camera used in that experiment and also detection of presence of waves in simulated data. Detected waves has been reconstructed in order to determine their basic parameters. Reliability of reconstruction is measured by two statistical methods. Project shows, that Mini-EUSO is capable to identify wave that belongs to tsunami of same category, as tsunami caused by earthquake from Tohoku from 2011 in airglow, above the Pacific ocean during the cloudless period.

Kľúčové slová v AJ

Mini-EUSO, JEM-EUSO, tsunami, atmosferic gravity waves, clustering

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Katedra počítačov a informatiky

ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študijný odbor: Informatika Študijný program: Informatika

Názov práce:

Automatizácia a vývoj metód pre rozpoznávanie cunami vĺn v pozorovaniach MINI-EUSO experimentu

Automatisation a methods development for tsunami wave recognition in MINI-EUSO experiment observations

Študent:

Bc. Ondrej Matija

Školiteľ: Školiace pracovisko: Konzultant práce: Pracovisko konzultanta: doc. Ing. Ján Genči, PhD.

Katedra počítačov a informatiky

Ing. Michal Vrábel, RNDr. Pavol Bobik, PhD.

Pokyny na vypracovanie diplomovej práce:

1. Naštudovať si princípy fungovania pripravovaného MINI-EUSO experimentu.

2. Oboznámiť sa s fyzikálnym modelom šírenia sa odozvy cunami vĺn v airglov žiarení a podľa zadania vytvoriť jeho simuláciu.

3. Vytvoriť klastrovaciu metódu na rozpoznanie vzorov tvorených cunami vlnami v airglow žiarení. Metódu aplikovať na simulácie pozorovaní MINI-EUSO experimentu. Vytvoriť metodiku na odhad presnosti metódy.

4. Vytvoriť model pozorovaní MINI-EUSO experimentu z Medzinárodnej vesmírnej stanice ISS. Odhadnúť účinnosť rozpoznania a presnosť rekonštrukcie pre rôzne odozvy cunami vlny.

5. Spracovať dokumentáciu podľa pokynov vedúceho práce.

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský Termín pre odovzdanie práce: 28.04.2017 Dátum zadania diplomovej práce: 31.10.2016

doc. Ing. Jaroslav Porubän, PhD.

vedúci garantujúceho pracoviska



prof. Ing. Liberios Vokorokos, PhD.

dekan fakulty

Čestné vyhlásenie

Vyhlasujem, že som diplomovú prácu vypracoval(a) samostatne s použitím uvedenej odbornej literatúry.

Košice 28. 4. 2017

.....

Vlastnoručný podpis

Poďakovanie

Touto cestou sa chcem poďakovať všetkým, ktorí mi akýmkoľvek spôsobom pomohli pri vypracovaní tejto práce. Najväčšia vďaka patrí konzultantom diplomovej práce, najmä RNDr. Pavlovi Bobíkovi, PhD. za odborné vedenie, usmerňovanie a konzultácie, ktoré mi poskytoval pri vytváraní diplomovej práce. Ďakujem Ing. Michalovi Vrábeľovi za rady a zodpovedanie mnohých otázok. Taktiež sa chcem poďakovať aj vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Jánovi Genčimu, PhD. za odborné vedenie a cenné pripomienky.

Obsah

	Úvo	od	1
1	Cie	le práce	3
2	Mir	i-EUSO	4
3	Sim	ulácia výstupov Mini-EUSO	7
	3.1	Výpočet strednej hodnoty Poisson ovho rozdelenia $\ .\ .\ .\ .$.	9
4	Alg	oritmy pre rozpoznávanie obrazu	13
	4.1	Houghova transformácia	13
	4.2	Zhlukovanie - Clustering	15
	4.3	Gáborov filter	16
5	Pro	blémy	17
6	Opi	s metód	18
	6.1	Vytvorenie simulačných dát	18
		6.1.1 Netlmená vlna	19
		6.1.2 Tlmená vlna	20
		6.1.3 Vlnový balík	21
	6.2	Vyhľadanie počiatočného bodu	23
	6.3	Vyhľadanie vlny v simulovaných dátach	24
7	Ove	erenie fungovania zhlukovacej metódy	26
	7.1	Predpoklady	26
		7.1.1 Odôvodnenie predpokladov	26
	7.2	Overenie	27
8	Roz	poznanie vlny	36
	8.1	Predpoklady	36

	8.2	Hľadanie parametrov vlny	38
	8.3	Metodika analýzy	39
		8.3.1 Parameter γ_{68}	39
		8.3.2 Chyba dvoch tretín štatistickej distribúcie	40
9	Vyh	ľadávanie vlny v obraze - tlmená vlna	41
	9.1	Uhol $0^{\circ}\ldots$	41
	9.2	Uhol 30°	48
	9.3	Uhol 45°	50
	9.4	Vyššie uhly	51
10 Vyhľadávanie vlny v obraze - simulácia letu misie Mini-EUSO 54			54
11	11 Záver (zhodnotenie riešenia)		58
	Zoznam použitej literatúry		61

Zoznam obrázkov

0 - 1	Atmosférické gravitačné vlny v oblakoch. [1]	1
2 - 1	Schéma kamery Mini-EUSO [6]	6
3 - 1	Výsledok analýzy dát misie EUSO-balloon – rozdelenie pravdepo-	
	dobnosti [7] \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	8
3 - 2	Farebná škála pre vizualizáciu výstupov	9
3 - 3	Prázdny snímok	9
3 - 4	Vlna generovaná systémom	9
3 - 5	Simulácia snímku z kamery	9
3 - 6	Svetlo vstupujúce do kamery	10
3 - 7	Svetlo usmerňované optikou kamery [9]	12
4 - 1	Houghova transformácia – spracovanie prvého bodu	14
4 - 2	Houghova transformácia – spracovanie druhého bodu	14
4 - 3	Houghova transformácia – spracovanie tretieho bodu	14
4 - 4	Výsledky preloženia priamok	14
6 - 1	Porovnanie priebehu zmeny produkcie žiarenia s vlnovou dĺžkou	
	630 nm z $\ [21]$ označeného na obrázku červenými krížikmi s gene-	
	rovaným vlnovým balíkom	22
7 - 1	Rôzne amplitúdy vlny [22]	26
7 - 2	Nájdené zhluky pre threshold 100	28
7 - 3	Vzťah veľkosti nájdeného zhluku k amplitúde vlny, threshold $100~$.	29
7 - 4	Nájdené zhluky pre threshold 110	30
7 - 5	Vzťah veľkosti nájdeného zhluku k amplitúde vlny, threshold $110~$.	31
7 - 6	Nájdené zhluky pre threshold 120	32
7 - 7	Vzťah veľkosti nájdeného zhluku k amplitúde vlny, threshold $120~$.	33
7 - 8	Vzťah veľkosti nájdeného zhluku k amplitúde vlny, threshold 120,	
	n 100	34
9 - 1	Tlmená vlna s amplitúdou 0,06	42

9 - 2	Nájdený zhluk pri amplitúde 0,06 a threshold e $100,25$ \hdots	42
9 - 3	Histogram parametra A pre amplitúdu $0,6$ uhol $30^\circ a$ threshold 100.25	43
9 - 4	Histogram parametra B pre amlitúdu 0,6 uhol 0° a threshold 100,25	44
9 - 5	Histogram parametra B z obrázku $9\!-\!4$ preložený Gausovou krivkou	44
9 - 6	Nájdený zhluk pri amplitúde 0,06 a thresholde 103	45
9 - 7	Nájdený správny zhluk pri amplitúde $0,06$ a thresholde 105 \ldots .	46
9 - 8	Nájdený chybný zhluk pri amplitúde $0,06$ a threshold e 105	46
9 - 9	Nájdený zhluk pri amplitúde 0,48 . .	47
9 - 10	Histogram parametra A pri amplitúde 0,48 a uhle 0°	47
9 - 11	Histogram parametra B pri amplitúde 0,48 a uhle 0°	48
9 - 12	Nájdený zhluk so sklonom 30° a amplitúdou 0.48	49
9 - 13	Nájdený zlý zhluk pri amplitúde $0,06$ a thresholde $105~v$ uhle $45^\circ~$.	51
9 - 14	Nájdený dobrý zhluk pri amplitúde $0,06$ a thresholde 105 v uhle 45	51
9 - 15	Nájdený zhluk pri amplitúde 0,48 a uhle 80°	52
9 - 16	Nájdený zhluk pri amplitúde 0,48 thresholde 105 a uhle 90°	53
10 - 1	Vlna v airglow žiarení generovaná ako vlnový balík v zobrazení 3D	
	- pohľad z uhla	54
10 - 2	Vlna v airglow žiarení generovaná ako vlnový balík v zobrazení 3D	
	- pohľad z boku	55
10 - 3	Pozícia generovanej vlny na mape	55
10 - 4	Zosnímaná vlna v airglow žiarení 1	56
10 - 5	Zosnímaná vlna v airglow žiarení 2	56
10 - 6	Zosnímaná vlna v airglow žiarení 3	56
10 - 7	Zhluk zo snímky 10–4 pri thresholde 125 \ldots	57
10 - 8	Zhluk zo snímky 10–5 pri thresholde 125 \hdots	57
10 - 9	Zhluk zo snímky 10–6 pri thresholde 125 \ldots	57
11 - 1	Výsledok práce	59

Zoznam tabuliek

2 - 1	Mini-EUSO detail	4
2 - 2	JEM-EUSO detail	5
2 - 3	EUSO-balloon detail	5
7 - 1	Ilustrácia usporiadania zhlukov v obrázkoch 7–2, 7–4 a 7–6 podľa	
	veľkosti amplitúdy v zhluku	27
7 - 2	Overenie fungovania zhlukovacej metódy - threshold 100, n 10	28
7 - 3	Overenie fungovania zhlukovacej metódy - threshold 110, n 10	30
7 - 4	Overenie fungovania zhlukovacej metódy - threshold 120, n 10 \ldots .	32
7 - 5	Overenie fungovania zhlukovacej metódy - threshold 120, n 100	34
9 - 1	Výsledky analýzy uhla nájdeného zhluku - pôvodná vlna s uhlom 0° .	48
9 - 2	Výsledky analýzy uhla nájdeného zhluku - pôvodná vlna s uhlom 30°	49
9 - 3	Výsledky analýzy uhla nájdeného zhluku - pôvodná vlna s uhlom 45°	50
9 - 4	Výsledky analýzy uhla nájdeného zhluku - pôvodná vlna s uhlom 80°	52
9 - 5	Výsledky analýzy uhla nájdeného zhluku - pôvodná vlna s uhlom 90°	53
10 - 1	lVýsledky analýzy snímok zo simulovaného letu Mini-EUSO	56

Slovník termínov

- **EUSO** Extreme Universe Space Observatory
- FoV Field of view. Pozorované pole.
- **GTU** Gate Time Unit. Doba približne 2,5 μs . Po uplynutí tohto intervalu je počítadlo fotoelektorónov resetované.
- ISS International Space Station. Medzinárodná vesmírna stanica.
- JEM-EUSO Japanese Experiment Module Extreme Universe Space Observatory
- $\mathbf{PDM}\,$ Photo Detector Module
- **UHECR** Ultra High Energy Cosmic Ray. Častice s ultra vysokými energiami.
- ${\bf UV}$ Ultraviolet

Úvod

Práca je zameraná na hľadanie atmosferických gravitačných vĺn v pozorovaniach experimentu Mini-EUSO. Budeme sa venovať simulácii výstupov kamery využitej pri tejto misii a hľadaniu atmosferických gravitačných vĺn vo vygenerovaných dátach. Tieto simulácie budú predstavovať vlny v airglow žiarení, ktoré vznikli pôsobením vĺn cunami. Veríme, že tento výskum preukáže vhodnosť využitia satelitov na pozorovanie a detekciu cunami vĺn, a v budúcnosti by mohol predstavovať nový komplementárny varovný systém pred týmito vlnami. Využitie UV citlivých kamier snímajúcich airglow žiarenie z obežnej dráhy Zeme pri detekcii vĺn cunami alebo ako varovný systém pred nimi, má niekoľko výhod:

- môže slúžiť aj v oblastiach, kde si krajiny susediace s morom nemôžu dovoliť svoj vlastný varovný systém,
- takýto systém umiestnený na orbite môže poskytovať globálne varovanie pred cunami a bol by komplementárny k systémom využívaným v súčasnosti.

Väčšina gravitačných vĺn však vzniká z iných dôvodov ako sú cunami. Dokonca vznikajú nielen v hornej vrstve atmosféry, ale prejavujú sa aj v nižších vrstvách, v mrakoch. Tento jav môžeme vidieť na obrázku 0-1.



Obrázok 0–1: Atmosférické gravitačné vlny v oblakoch. [1]

V prípade preukázania vhodnosti riešenia, budeme schopní simulovať rôzne varianty a nastavenia kamery, a teda zistiť, či aplikovanie menších kamier splní úlohu dostatočne. V prípade preukázania vhodnosti je možné, že s použitím menších a lacnejších kamier, dokážeme vytvoriť monitorovací systém pozostávajúci z určitého množstva malých satelitov nesúcich tieto kamery. Takýto systém by bol na rozdiel od súčasných varovných systémov globálny, čo prinesie úžitok aj krajinám, ktoré si nemôžu dovoliť vlastný varovný systém. Spracovaním obrazu už na palube minisatelitu by bolo možné výrazne zredukovať komunikačnú réžiu a prispieť tak k ďalšiemu zníženiu nákladov na takýto varovný systém.

1 Ciele práce

Cieľom tejto práce je vytvoriť program na rozpoznávanie vzorov vĺn v snímkach, ktoré budú vytvárané v rámci misie Mini-EUSO. Taktiež by tento program mal byť schopný detegovať prítomnosť vlny a vyhodnotiť, či daná snímka je vhodná na ďalšie spracovanie alebo nie. Toto vyhodnotenie bude použité pri rozhodovaní o prípadnom zahodení snímky alebo jej zachovaní pre ďalšie skúmanie. Spoľahlivosť riešenia by mala byť čo najvyššia, aby žiadna odfotografovaná atmosférická gravitačná vlna, ktorá je predmetom skúmania, neunikla pozornosti vedcov, a to či už z dôvodu nerozpoznania vlny v obrázku alebo z dôvodu zahltenia spojenia medzi ISS a pozemným tímom Mini-EUSO.

Ďalším cieľom tejto práce je vytvoriť tento program čo možno najuniverzálnejší, aby bolo možné skúmať využitie kamier s väčším, ale aj menším rozlíšením a posúdiť tak vplyv rozlíšenia na presnosť detekcie atmosférických gravitačných vĺn. V prípade preukázania, že je možné dostatočne spoľahlivo detegovať tieto vlny aj s menším rozlíšením, napríklad 16 x 16 pixelov, bude možné nasadiť viacero menších, a preto aj lacnejších satelitov s kamerami, ktoré by spoločne tvorili jeden detektor slúžiaci napríklad ako varovný systém pred blížiacou sa vlnou cunami. Prejav vlny cunami bol prvýkrát pozorovaný v airglow žiarení len pomerne nedávno – v marci roku 2011 [2]. Je teda preukázané, že takéto pozorovanie je možné vykonávať. V našom prípade sa budeme snažiť pozorovať tento jav pomocou kamery projektu Mini-EUSO a prostredníctvom simulácií sa budeme snažiť zistiť aj možnosť pozorovania s využitím menších satelitov.

2 Mini-EUSO

Mini-EUSO je prekurzor projekt kolaborácie JEM-EUSO. [3] V rámci tohto projektu bude na Medzinárodnú vesmírnu stanicu ISS vynesený experiment Mini-EUSO. Ten je v podstate zmenšenou verziou JEM-EUSO detektoru, ktorý tvorí 143 photo detektor modulov(PDM). Mini-EUSO je tvorený jedným PDM, preto je v podstate $\frac{1}{143}$ projektu JEM-EUSO. Ide o vysoko citlivú a vysokorýchlostnú UV kameru s rozlíšením 48 x 48 pixelov. Táto misia má niekoľko cieľov. Medzi technologické ciele patrí aj prvé použitie frenselových šošoviek vo vesmíre, optimalizácia charakteristík a výkonu EUSO a zvýšenie technologickej pripravenosti hardvéru a softvéru. [4] Jedným z rozširujúcich cieľov misie Mini-EUSO je pozorovanie meteorov, keďže pozorovanie meteorov je kľúčom k zisteniu počtu a fyzikálnych vlastností malých telies obiehajúcich v blízkosti Zeme. [5] Snímanie atmosféry prebieha v nadir móde (kolmý pohľad priamo na zem). Mini-EUSO bude pozorovať Zem cez UV priehľadné okno v ruskom segmente stanice. V tabuľke 2–1 môžeme vidieť zhrnutie špecifikácie zariadenia Mini-EUSO a jeho parametre:

	Mini-EUSO
Vzdialenosť od Zeme (km)	420
Priemer (m)	0.25
FoV/pix (stupne)	0.8
Plocha snímaná jedným pixelom (km)	5.3
FoV/UV-Cam (stupne)	36
Plocha snímaná kamerou (km)	260
Počet UV kamier	1

Tabuľka 2-1: Mini-EUSO detail

4

Pre porovnanie uvádzame aj tabuľky s rovnakými parametrami, avšak uvedenými pre projekty Jem-EUSO a EUSO-balloon. Viď Tabuľka 2-2 a Tabuľka 2-3.

	JEM-EUSO
Vzdialenosť od Zeme (km)	420
Priemer (m)	2.5
FoV/pix (stupne)	0.08
Plocha snímaná jedným pixelom (km)	0.58
FoV/UV-Cam (stupne)	3.8
Plocha snímaná kamerou (km)	28.2
Počet UV kamier	143

Tabuľka 2–2: JEM-EUSO detail

Tabuľka 2-3: EUSO-balloon detail

	EUSO-balloon
Vzdialenosť od Zeme (km)	40
Priemer (m)	1
FoV/pix (stupne)	0.25
Plocha snímaná jedným pixelom (km)	0.175
FoV/UV-Cam (stupne)	12
Plocha snímaná kamerou (km)	8.4
Počet UV kamier	1

Ako si môžeme všimnúť, z vyššie uvedených tabuliek vyplýva, že každá misia je od ostatných niečím odlišná. Avšak na úrovni potvrdenia fungovania a otestovania pripravovaného hardvéru môžeme tieto misie považovať za ekvivalentné. Na obrázku 2-1 prebraného z článku Mini-EUSO [6] vidíme schému kamery projektu Mini-EUSO. Celková veľkosť kamery je pomerne malá. Je to len 25 x 47 centimetrov, čo umožňuje jednoduchú prepravu.



Obrázok 2–1: Schéma kamery Mini-EUSO [6]

3 Simulácia výstupov Mini-EUSO

Vzhľadom na fakt, že misia Mini-EUSO pri ktorej bude využitá vysokocitlivá UV kamera bude spustená až koncom roku 2017, v súčasnosti nemáme k dispozícii reálne dáta. Preto je potrebné čo možno najvernejšie modelovať výstupné dáta tejto UV kamery. Vedci v roku 2014 uskutočnili misiu EUSO-balloon, v rámci ktorej bol vypustený balón s rovnakým PDM, aký bude použitý v rámci misie Mini-EUSO. EUSO-balloon absolvoval počas bezmesačnej noci z 24. na 25. augusta 8-hodinový let v regióne blízko mestečka Timmins v Kanade. Balón uskutočnil merania z výšky 38 km. Pre analýzu dát UV pozadia boli použiteľné 3 hodiny meraní, počas ktorých pozorovala kamera oblasť s plochou $780 km^2$. Pri analýze reálnych výstupných dát z misie EUSO-balloon sa potvrdilo, že pri pohľade na airglow žiarenie za bezoblačnej noci vhodnej na snímanie, výstupy kamery, teda dáta, ktoré kamera nazbierala a uložila na disk, zodpovedajú svojim rozdelením takzvanému Poissonovmu rozdeleniu pravdepodobnosti. Viď obrázok 3–1, na ktorom je okrem rozdelenia pravdepodobnosti vidno, že intenzita svetla, ktoré EUSO-balloon pozoroval bola v priemere 276 $phm^{-2}ns^{-1}sr^{-1}$. Toto číslo samozrejme prislúcha danému času merania a danej pozícii. Vo všeobecnosti bude hodnota pozorovanej intenzity na rôznych geografických polohách v rôznych časoch rozdielna. Základnou úlohou Mini-EUSO experimentu je zachytiť časovú a geografickú variabilitu svetelného pozadia. Napriek rozličným hodnotám na rôznych miestach a v rôznych časoch bude štatistická distribúcia vždy zodpovedať Poissonovskému rozdeleniu. Preto sme pri simulácii výstupov kamery taktiež použili toto rozdelenie.

Výstupy kamery reprezentujeme pomocou matíc. Ide o matice s rozmerom 48 x 48 pixelov, ktoré obsahujú simuláciu šumu snímaného z vesmíru pri pohľade na atmosféru Zeme bez mrakov.



Obrázok 3–1: Výsledok analýzy dát misie EUSO-balloon – rozdelenie pravdepodobnosti [7]

Ukážku obrázku vytvoreného z takejto matice vidíme na obrázku 3-3. Zároveň generujeme aj matice obsahujúce rovinné sínusové vlny reprezentujúce zjednodušenú podobu atmosferických gravitačných vĺn, ktoré sú zobrazené na obrázku 3-4. Program je schopný sčítať spomínané matice a simulovať tak zábery obsahujúce vlny, na ktoré neskôr aplikujeme metódy rozpoznávania obrazu, aby sa spätne zisťovala prítomnosť týchto vĺn. Výsledok tohto spojenia môžeme vidieť na obrázku 3-5.

Vytvorili sme tiež vizualizačné funkcie na zobrazenie týchto snímkov. Tieto funkcie používajú na vyjadrenie intenzity farebnú škálu z obrázku 3-2, ktorá obsahuje 256 hodnôt pričom najnižšej hodnote v zobrazovanej snímke je priradená čierna farba. Je tak veľmi jednoduché identifikovať polohu minimálneho pixela. Všetky obrázky zobrazujúce výstupy kamery, alebo inú fázu spracovania dát vrátane obrázkov 3-3, 3-4 a 3-5 boli vygenerované týmito funkciami.

Obrázok 3–2: Farebná škála pre vizualizáciu výstupov



Obrázok 3-3:PrázdnyObrázok 3-4:Vlna ge-Obrázok 3-5:Simuláciasnímoknerovaná systémomsnímku z kamery

Sklon vlny, amplitúda, či vlnová dĺžka sú parametrizované. Vďaka tomu môžeme podľa potreby meniť vlastnosti vlny a tým simulovať rôzne prípady snímkov.

3.1 Výpočet strednej hodnoty Poissonovho rozdelenia

Pre výpočet strednej hodnoty Poissonovho rozdelenia je potrebné poznať niekoľko faktorov. Na obrázku 3–6 vidíme model kamery vo vesmíre. Obrázok znázorňuje svetlo z rôznych zdrojov, ktoré vchádza do kamery experimentu Mini-EUSO. Je to svetlo hviezd odrazené od Zeme, na obrázku 3–6 znázornené žltou čiarou. Ďalej je to svetlo produkované airglow žiarením, ktoré dopadá priamo do kamery, na obrázku znázornené zelenou čiarou, a tiež svetlo produkované airglow žiarením, ktoré dopadá do kamery po odraze od Zeme. Posledná spomínaná zložka svetla je na obrázku znázornená červenou čiarou. V priemere to predstavuje $500ph/(m^2.ns.sr)$ čo znamená, že na plochu $1m^2$ za čas 1ns dopadne 500fotónov z pozorovaného priestorového uhlu 1sr. FEI

Aby sme pracovali so základnými jednotkami musíme si túto hodnotu upraviť nasledovne:

$$500 \ ph/(m^2.ns.sr) = 500 * 10^9 \ ph/(m^2.s.sr)$$
(3.1)

Upravili sme teda nanosekundy na sekundy.



Obrázok 3-6: Svetlo vstupujúce do kamery

Ako sme však už mali možnosť vidieť skôr v tabuľke 2–1 Mini-EUSO detail, kamera Mini-EUSO nemá plochu prednej šošovky $1m^2$. Jej rozmery sú totiž 0.25 * 0.25 m, a preto jej plocha predstavuje $0,0625m^2$.

Aby sme zistili množstvo fotónov dopadajúcich na šošovku, je potrebné vynásobiť množstvo fotónov dopadajúcich na jeden meter štvorcový plochou, ktorú máme v skutočnosti k dispozícii:

$$500 * 10^9 \ ph/(m^2.s.sr) * 0,0625 \ m^2 = 31,25 * 10^9 \ ph/(s.sr) \tag{3.2}$$

Z rovnice 3.2 vyplýva, že za sekundu dopadne do detektora, teda na plochu jeho prednej šošovky, $31,25 * 10^9 fotónov$ z pozorovanej oblasti 1*steradián*. To však stále neznamená, že rovnaké množstvo fotónov bude aj spracované. Už samotná optika

predstavuje pre fotóny určitú prekážku. Cez túto optiku sa podľa práce [8] dostane iba polovica fotónov. Efektivita elektroniky tiež nie je stopercentná a nakoniec tu máme ešte filter, ktorý prepúšťa UV svetlo a eliminuje ostatné vlnové dĺžky svetla. Sumárne optika, elektronika a UV filter prepustia 13,3% prichádzajúceho svetla. Celkové straty sú teda pomerne vysoké. Aby sme zistili koľko fotónov je kamera schopná teoreticky previesť na signál, musíme náš priebežný výsledok ďalej upraviť:

$$31,25*10^9 \ ph/(s.sr)*0.133 = 4,15625*10^9 \ pe/(s.sr)$$
 (3.3)

pe predstavuje fotoelktrón, tj. elektrón vyvolaný fotónom. Pri prepočte na počet fotoelektrónov dopadajúcich na jeden pixel využijeme, že tento vidí iba 0,7^{2°}. Túto hodnotu je potrebné previesť na steradiány, aby sme mohli pokračovať v úpravách. Prevod na steradiány je vyjadrený rovnicou 3.4.

$$\left(\frac{0.7*\pi}{180}\right)^2 = 1,493e^{-4} sr \tag{3.4}$$

Rovnicu 3.3 tak môžeme ďalej upraviť s využitím výsledku rovnice 3.4, ako to vyjadruje rovnica 3.5.

$$4,15625*10^9 \ pe/(s.sr)*1,493e^{-4}sr = 620372,41 \ pe/(px.s)$$
(3.5)

Na jeden pixel teda dopadne za jednu sekundu 620372, 41 fotónov, čo predstavuje približne 1,5 fotónu za jedno GTU (GTU je štyristotisícina sekundy. GTU je skratka pre gate time unit, čo je časová jednotka, s ktorou pracujú EUSO detektory).



Obrázok 3–7: Svetlo usmerňované optikou kamery [9]

Na obrázku 3–7 vidíme, ako sa správa svetlo v optike kamery. Svetlo je smerované tak, že každý pixel vidí celú plochu prednej šošovky. Svetlo, ktoré dopadá na jeden pixel, však prichádza iba z jedného konkrétneho smeru. Keďže povrch prednej šošovky nie je rozdelený pre jednotlivé pixely, ale ako sme spomenuli skôr, každý pixel vidí celú plochu prednej šošovky, nie je potrebné deliť počet prichádzajúcich fotónov počtom pixelov.

KPI

Pre zistenie, či sa na snímke nachádza atmosferická gravitačná vlna môžeme využiť rôzne algoritmy rozpoznávania obrazu. Príklady algoritmov:

- Hough ova transformácia,
- Clustering zhlukovanie,
- Gáborov filter a ďalšie

4.1 Houghova transformácia

Podľa Richarda O. Duda a Petra E. Harta je opakujúcim sa problémom v počítačovom spracovaní obrázkov detekcia priamych čiar v digitalizovanom obrázku. [10] Houghova transformácia bola predstavená v roku 1962 a na vyhľadanie čiar v obraze bola prvýkrát použitá o desať rokov neskôr v roku 1972. Môže byt využitá na rozpoznanie čiar, kruhov či iných parametrických kriviek, ktorých rovnice sú známe. [11] Je však obmedzená tým spôsobom, že v jednom momente je možné hľadanie len jedného typu objektu, napríklad len priamky. Táto metóda hľadania tvarov v obrázku je založená na prekladaní viacerých priamok postupne cez vybrané body v obrázku, napríklad najvýraznejšie body alebo body zvýraznené algoritmom pre hľadanie rohov. Na obrázkoch 4-1, 4-2 a 4-3 prevzatých z wikipedie [12], vidíme postup spracovania bodov v obrázku. Cez každý bod preložíme priamky v rovnakých uhloch oproti osi x. Pre každý uhol si zaznamenáme, v akej kolmej vzdialenosti od stredu sa daná priamka nachádza. Tento postup zopakujeme pre každý bod až dostaneme toľko tabuliek, koľko bodov analyzujeme, ako je to vidieť na obrázku 4-4.







nie prvého bodu

Obrázok 4–1: Houghova Obrázok 4–2: Houghova transformácia - spracova- transformácia - spracovanie druhého bodu

Obrázok 4-3: Houghova transformácia - spracovanie tretieho bodu



Obrázok 4–4: Výsledky preloženia priamok

Pri analýze týchto tabuliek hľadáme tie priamky, v našom prípade odlíšené farebne a tiež aj uhlom, ktorý zvierajú s osou x, ktoré majú pri analyzovaných bodoch rovnakú vzdialenosť od stredu. Tie body, ktoré spĺňajú túto podmienku, ležia na jednej priamke. V našom prípade všetky analyzované body ležia na jednej priamke, a to na priamke, ktorá je na obrázku zobrazená ružovou farbou a v tabuľkách má približne (s nejakou toleranciou) rovnakú vzdialenosť od stredu súradnicovej sústavy. Počet priamok, a rovnako aj hustotu využitých uhlov je možné ľubovoľne meniť podľa potrieb aplikácie. Ako pomocnú metódu pre Houghovu transformáciu je možné použiť vyhľadávanie hrán. Podľa wikipedie [13] je účelom vyhľadávania náhlych zmien v

jase obrázku zachytenie dôležitých udalostí a zmien vo vlastnostiach pozorovaného sveta.

4.2 Zhlukovanie - Clustering

Pri clusteringu ide o hľadanie zhlukov podobných či rovnakých prvkov v poli. Vyhodnotenie, či sú prvky rovnaké je založené na porovnaní zvoleného parametra prvkov poľa. Tieto metódy často využívajú rekurziu a zmenu pôvodného poľa údajov, pretože menia práve riešenú bunku tak, aby bolo jasné, že už raz bola analyzovaná. Pri využití takejto metódy je potrebné duplikovať dáta pred ich spracovaním. Táto duplikácia bude slúžiť na zachovanie pôvodných dát pre potreby ďalších analýz. Ďalšou možnosťou je prechádzanie poľa po kvadrantoch. V práci sme sa rozhodli práve pre túto možnosť z niekoľkých dôvodov.

- Na danej platforme budú pravdepodobne spustené viaceré programy. Analýza dát s využitím rekurzie je pomerne náročná na pamäťové prostriedky. Vzhľadom na plánovaný hardware predpokladáme, že veľkosť operačnej pamäte systému môže byť značne obmedzená a pre využitie rekurzie nedostatočná.
- 2. Druhým dôvodom je jednoduchosť implementácie a čitateľnosť kódu.

Fungovanie zhlukovania ilustruje nasledujúci pseudokód:

1:	procedure FINDCLUSTER(<i>analyzedPixels</i>)	
2:	$startPoint \leftarrow findStartPoint()$	
3:	$cluster \leftarrow emptySet$	
4:	$\mathbf{for} \ pixel: analyzedPixels \ \mathbf{do}$	
5:	$\mathbf{if} \ belongsToCluster(pixel) \ \mathbf{then}$	
6:	$cluster \leftarrow cluster.addToSet(pixel)$ return $cluster$	

Vidíme, že na začiatku sa naplnia potrebné premenné počiatočnými dátami. Do premennej "startPoint" sa pomocou procedúry "findStartPoint()" vloží poloha, odkiaľ

bude snímka analyzovaná. Samotný zhluk je reprezentovaný premennou "cluster", ktorá je na začiatku inicializovaná ako prázdny set hodnôt. V našom prípade rátame s tým, že set môže obsahovať iba jedinečné hodnoty. Pri prechádzaní celého analyzovaného poľa pixelov naplníme zhluk bodmi, ktoré doň patria. Príslušnosť bodu do zhluku vyhodnotí procedúra "belongsToCluster". Nakoniec procedúra "findCluster"vráti naplnenú premennú "cluster"ktorá obsahuje všetky body nájdeného zhluku.

4.3 Gáborov filter

Priestorové frekvencie a ich orientácia sú dôležitými charakteristikami textúr v obrazoch. [14] Gáborove filtre, pomenované po Maďarsko-Britskom fyzikovi Denisovi Gáborovi, [15, 16] sú pásmové filtre, ktoré sa používajú pri spracovaní obrazu na extrakciu vybraných črtov či analýzu textúry a podobne. [17] Podľa článku Features extraction using a gabor filter family [18] má Gáborov filter optimálne vlastnosti pre lokalizovanie objektov v obraze. Tieto filtre boli použité v rôznych aplikáciách, ako sú analýza dokumentov, hľadanie hrán, kódovanie obrázkov a mnohé ďalšie. [19]

5 Problémy

Jedným z možných problémov v misii Mini-EUSO je, že máme k dispozícii pomerne málo pixelov (48 x 48). Preto by mohli nastať komplikácie pri detekcii vlny, ako napríklad:

- neodhalíme celú vlnu kvôli tomu, že je v nejakom mieste prerušená, napríklad vplyvom rušivých elementov a podobne,
- v špeciálnych prípadoch nájdeme namiesto vlny priesečníky chrbtov viacerých vĺn.

Pri reálnej misii - JEM-EUSO budeme mať k dispozícii podstatne viac pixelov, a tieto problémy by sa tak mali dať pohodlne odstrániť, keďže granularita obrázku bude oveľa vyššia. S väčším počtom pixelov prichádza aj zvýšenie náročnosti spracovania výsledných snímkov. To predstavuje ďalší problém. Zvýši sa pamäťová, ale aj výkonová náročnosť, keďže za približne rovnaký čas budeme musieť spracovať viac dát. To si bude vyžadovať značnú optimalizáciu pri nasadení do systému, ktorý využíva kamery s väčším rozlíšením. Avšak riešenie optimalizácie bude až jedným z posledných bodov v projekte. Optimalizácia bude riešená len ak bude naozaj nevyhnutná.

6 Opis metód

V tejto kapitole sa budeme venovať metódam, ktoré sme vyvinuli za účelom vytvorenia a spracovania simulovaných výsledkov experimentu Mini-EUSO. Pri spracovaní využívame niekoľko metód:

- metódy na vytvorenie simulačných dát
- metódu na vyhľadanie počiatočného bodu
- metódu na vyhľadanie vlny v simulovaných dátach
- metódy na vizualizáciu simulovaných dát a výsledku hľadania vlny

6.1 Vytvorenie simulačných dát

Pri generovaní vstupných dát pracujeme najmä s objektom Matrix. Je to nami vytvorený objekt, predstavujúci dvojrozmernú maticu hodnôt. V tomto objekte sú implementované aj ďalšie funkcie potrebné na analýzu dát obsiahnutých v samotnom objekte. Príkladom sú funkcie getMax, getMin, či getMiddleValue. Ako z názvov vyplýva, sú to funkcie na získanie maximálnej, minimálnej a strednej hodnoty matice.

Pri tvorbe simulačných dát je ako prvé potrebné vygenerovať prázdnu snímku. Fotografia airglow žiarenia, pozorovaného z obežnej dráhy Zeme, obsahuje len šum. Šum by mal čo najvernejšie napodobňovať reálne dáta. V reálnych fotografiách vrchnej vrstvy atmosféry totiž vidíme šum, ktorý zodpovedá Poisonovej distribúcii. Preto sme s využitím knihy Numerical recipes in C [20] vytvorili funkciu, ktorá generuje čísla z Poisonovho rozdelenia. S pomocou tejto funkcie ďalej tvoríme prázdne snímky tak, že pre každý bod obrázku (48 x 48 pixelov) vygenerujeme číslo z Poisonovej distribúcie. Po naplnení jednej matice túto prirátame k výslednej matici. Keďže kamera produkuje snímky rýchlosťou 400 000 snímok za sekundu, postup opakujeme 16 000 krát. Dostávame tak akumulované dáta za $\frac{1}{25}$ sekundy. Následne vygenerujeme maticu, ktorá obsahuje vlnu. Túto maticu prirátame do výslednej snímky. Takto vygenerovanú snímku považujeme za jednu snímku kamery, ktorú budeme neskôr analyzovať.

Generovanie vlny je založené na predpoklade, že vlny sa budú javiť ako rovinné vlny. To môžeme predpokladať preto, lebo kamera experimentu Mini-EUSO dokáže pozorovať oblasť o rozlohe len 250 x 250 km. Cunami vlny sa šíria naprieč celým oceánom, čo zahŕňa oblasti o rozlohe niekoľko tisíc kilometrov. Zakrivenie týchto vln je pomerne malé, a teda na úseku 250 km sa javia ako rovinné vlny. V prvom priblížení generujeme tieto vlny len na základe funkcie sínus. Ide preto o netlmené vlnenie so zadanou periódou a amplitúdou. Reálna vlna však nie je netlmená a jej amplitúda sa prirodzene zmenšuje. Z toho dôvodu v druhom priblížení implementujeme verziu s tlmenými kmitmi. Tlmenie bude lineárne. Táto verzia bude tiež v závere použitá pre overenie presnosti rozpoznávacieho algoritmu. V treťom priblížení budeme generovať vlny, na ktoré použijeme funkciu vlnového balíka. Tu sa tlmenie stane omnoho prirodzenejším. Na vygenerovanie vlny a jej zobrazenie do matice potrebujeme poznať hodnotu jednotlivých bodov obrázka. Preto chrbát vlny stotožníme s referenčnou priamkou, ktorú umiestnime do obrázka a na základe vzdialenosti jednotlivých bodov od tejto priamky vyrátame hodnotu konkrétneho bodu. Takto môžeme jednoducho meniť sklon či posun vlny iba úpravou parametrov priamky.

6.1.1 Netlmená vlna

Ako bolo spomenuté vyššie, netlmené vlnenie využívame v prvom priblížení. Je to základný a najjednoduchší model vlny. Keďže potrebujeme poznať hodnotu každého bodu na obrázku, musíme prejsť celú maticu. Pre každý bod vyrátame hodnotu na základe vzorca 6.1.

$$I = A * \sin\left(\frac{Z * 2\pi}{B} + \frac{1}{2}\pi\right) \tag{6.1}$$

Premenné vo vzorci 6.1 predstavujú:

- I intenzita na danom bode
- A amplitúda vlny
- Z vzdialenosť bodu od referenčnej priamky
- B vlnová dĺžka

Amplitúdu vlny rátame ako percento strednej hodnoty šumu v prázdnej snímke. Teda podľa vzorca 6.2

$$A = strVal * perc \tag{6.2}$$

Stredná hodnota a jej výpočet je implementovaný v triede Matrix. Ráta sa ako priemerná hodnota na jednom bode. Zrátame preto hodnoty všetkých bodov a vydelíme celkovým počtom bodov. Percentá sú zadávané ako desatinné čísla, teda napríklad 0,5 predstavuje amplitúdu vlny o veľkosti 50% zo strednej hodnoty. Vzdialenosť bodu od priamky označená ako Z je vyrátaná podľa vzorca 6.3.

$$Z = \left| \frac{|ax + by + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right| \tag{6.3}$$

V tomto vzorci a, b, a c predstavujú parametre priamky. Hodnoty premenných x a y určujú súradnice bodu. Keďže súradnice zadávame v pixeloch, aj celková vzdialenosť bodu od priamky je v pixeloch.

6.1.2 Tlmená vlna

Netlmená vlna predstavuje nerealistický model vĺn cunami. Spôsobuje tiež problém pri rekonštrukcii a vyhodnotení správnosti rekonštrukcie vlny. Pri rekonštrukcii hľadáme parametre vlny, ktoré reprezentujú jej sklon a polohu, teda posun. Tieto by mali byť približne rovnaké ako parametre referenčnej priamky. Fakt, že vlny sú netlmené a amplitúda je stále rovnaká spôsobuje, že na snímke nachádzame zakaždým iný vrchol vlny. Preto je potrebné implementovať vlnu, ktorá bude tlmená. Toto tlmenie nám zaručí, že nájdeme stále rovnaký vrchol, pretože hľadáme najvyšší vrchol na obrázku, a ten sa meniť nebude. Pre tento účel upravíme vzorec 6.1 pre výpočet intenzity na jednom bode. Úpravu popisuje rovnica 6.4

$$I = \frac{A}{D} * \sin\left(\frac{Z * 2\pi}{B} + \frac{1}{2}\pi\right) \tag{6.4}$$

Parameter D predstavuje tlmiacu premennú a je závislý na vzdialenosti od priamky podľa rovnice 6.5

$$D = \frac{Z}{2} + 1 \tag{6.5}$$

Prirátanie hodnoty 1 je potrebné preto, aby sa nestalo, že budeme deliť amplitúdu nulou v prípade bodov ležiacich priamo na priamke. Tieto body budú mať vďaka prirátaniu hodnoty 1 najvyššiu amplitúdu.

6.1.3 Vlnový balík

Vlnový balík je funkcia, pomocou ktorej simulujeme prirodzené tlmenie vlny. Táto funkcia zabezpečí utlmenie v určitom rozsahu, teda vlna je ako keby položená na nehybnej hladine mora. Pre výpočet intenzity jedného bodu na obrázku využívame vzorec 6.6

$$I = e^{\frac{-(Z-A)^2}{B}} * C * \cos\left(\frac{Z}{D} + E\right)$$
(6.6)

Parametre vzorca 6.6:

- I výsledná intenzita na pixely
- e eulerovo číslo
- Z vzdialenosť bodu od referenčnej priamky
- A,B,C,D,E konštanty pre dosiahnutie vhodného tvaru vlny

Keďže vychádzame z článku Hickey [21], parametre priamky odhadneme, aby sa výsledná krivka generovaná vlnovým balíkom čo najviac podobala na funkciu z obrázku 10a v spomínanom článku. Obrázok 6–1 zobrazuje pôvodnú krivku a krivku generovanú našou funkciou vlnového balíka.



Obrázok 6–1: Porovnanie priebehu zmeny produkcie žiarenia s vlnovou dĺžkou 630 nm z [21] označeného na obrázku červenými krížikmi s generovaným vlnovým balíkom

6.2 Vyhľadanie počiatočného bodu

Pod pojmom počiatočný bod rozumieme bod na obrázku (pixel), z ktorého začneme prostredníctvom zhlukovacej metódy hľadať vlnu. Tento bod je však potrebné identifikovať čo najlepšie, aby bolo možné prostredníctvom nasledujúcich metód správne určiť body, ktoré na snímke predstavujú nájdenú vlnu. Hľadanie je z toho dôvodu zamerané na vyhľadanie pixela, ktorý má najvyššiu intenzitu. Inač povedané, hľadáme chrbát vlny, a preto je potrebné nájsť pixel s najvyššou intenzitou. Rátame aj s možnosťou, že v dátach bude viacero pixelov vybudených na túto maximálnu úroveň, preto hľadáme nielen jedno maximum na snímke, ale všetky, ktoré sa tam nachádzajú. Naše riešenie následne využije prvý z nájdených bodov avšak v prípade potreby je možné jednoducho spracovať aj ďalšie body.

Táto metóda teda vracia List pozícií, ktoré predstavujú polohy maxím, z pravidla o veľkosti 1. Poloha bodu je v našom riešení reprezentovaná objektom "Position", ktorý obsahuje x-ovú a y-ovú súradnicu bodu v obrázku.

Na začiatku metódy si vyhľadáme hodnotu maxima. Na toto hľadanie používame klasický algoritmus, teda prechádzame celým poľom dát a vzájomne porovnávame jednotlivé body aby sme zistili, ktorá hodnota predstavuje nami hľadané maximum.

Následne na to prechádzame pole znovu, avšak s tým, že porovnávame jednotlivé hodnoty pixelov s hodnotou maximálneho pixela. Ak sa hodnoty zhodujú, vytvoríme si nový objekt typu "Position", do ktorého vložíme súradnice nájdeného maxima, a vložíme tento "Position" objekt do výsledného listu. Z vykonaných simulácií vyplýva, že zvyčajne je na obrázku iba jedno maximum. To znamená, že implementácia využívajúca len prvý prvok z výsledného listu – naša implementácia – je postačujúca.

Táto metóda je súčasťou objektu "Matrix", ktorý predstavuje maticu dát vytvorenú jednou snímkou kamery experimentu Mini-EUSO. Keďže je súčasťou objektu
"Matrix", nepotrebuje pre svoju činnosť žiadne vstupné parametre.

6.3 Vyhľadanie vlny v simulovaných dátach

Ako už bolo spomínané vyššie, na vyhľadanie vlny v simulovaných dátach využívame zhlukovaciu metódu. V implementácii je nazvaná "findCluster" a vyžaduje dva parametre. Prvým parametrom je tzv. "percentage", ktorý predstavuje threshold. Je to desatinné číslo vyjadrujúce požadované minimálne nasýtenie pixela oproti strednej hodnote. Druhým parametrom je objekt typu "Matrix", nazvaný "matrixToAnalyze". Ako už aj z názvu vstupného parametra vyplýva, tento objekt predstavuje dáta, v ktorých sa vlna bude hľadať.

Naša zhlukovacia metóda je neinvazívna, teda nemení vstupné dáta pri svojom behu. Preto nepotrebujeme duplikovať dáta pred hľadaním vlny. Na zaznamenanie zhluku reprezentujúceho atmosferickú gravitačnú vlnu sme si vytvorili vlastnú triedu nazvanú "Cluster". Táto trieda je potomok triedy HashSet<Position>. Toto dedenie nám zaručí, že každá pozícia, teda každý pixel obrázku, sa v nájdenom zhluku môže nachádzať iba raz. Vďaka tejto vlastnosti HashSet-u nemusíme pri vkladaní pixelov do zhluku kontrolovať, či sa daný pixel už náhodou v zhluku nenachádza. V prípade, že by toto bolo implementované inak a neriešili by sme vlastnú kontrolu prítomnosti, veľmi ľahko by sa do nájdeného zhluku dostali niektoré pozície viac ako raz. Takáto situácia by viedla k značnému spomaleniu programu kvôli väčšej náročnosti na prechádzanie veľkého množstva údajov pri ďalšom spracovaní. Mala by však aj za následok vznik nadmerných nárokov na pamäť. Návratová hodnota metódy "findCluster" je typu "Cluster".

Na začiatku vyhľadávania vlny si vytvoríme prázdny objekt typu "Cluster". Následne zistíme polohy maximálne vybudených pixelov. Prvú polohu z množiny polôh maximálne vybudených pixelov priamo pridáme do výsledného zhluku. Na základe strednej hodnoty pre analyzované dáta vyrátame referenčnú hodnotu. Táto hodnota sa bude podieľať na rozhodovaní, či daný pixel môže byť vyhodnotený ako súčasť zhluku alebo nie. Táto referenčná hodnota je rátaná prostredníctvom rovnice 6.7

$$ref = \frac{dataMid}{100} * percentage \tag{6.7}$$

V tejto rovnici **ref** reprezentuje referenčnú hodnotu, **dataMid** predstavuje strednú hodnotu, vyrátanú z analyzovaných dát a **percentage** predstavuje minimálnu úroveň nasýtenia ako bolo spomenuté vyššie. Všetky pixely, ktoré budú mať hodnotu nasýtenia vyššiu ako je **ref** môžu byť súčasťou zhluku. Ďalšou podmienkou pre určenie príslušnosti do zhluku je poloha momentálne analyzovaného pixela. Ak sa aspoň jeden pixel z už existujúceho zhluku nachádza v tesnej blízkosti analyzovaného pixela, môže byť tento zaradený ako súčasť zhluku. Podmienkou teda je, že pixel musí susediť minimálne s jedným pixelom z už existujúceho zhluku.

Celá snímka je analyzovaná po kvadrantoch, pričom stred súradnicovej sústavy tvorí prvý vložený pixel. Je to zároveň pixel, ktorý je najviac vybudený. Analýza prebieha pre každý kvadrant v dvoch krokoch. Prvým krokom je analýza po riadkoch a druhým je analýza po stĺpcoch. Takýmto prístupom zabránime prípadným chybám. V každom z ôsmich krokov analýzy sa prechádza jeden pixel za druhým a ako prvé sa vyhodnocuje jeho nasýtenie. Ak splní podmienku nasýtenia, pokračuje sa zistením, či existuje aspoň jeden pixel, ktorý s ním susedí a zároveň už bol označený ako súčasť hľadaného zhluku. Po splnení aj druhej podmienky je poloha analyzovaného bodu vyhlásená za súčasť zhluku.

Analýza končí, keď sú všetky kvadranty preskúmané po riadkoch aj po stĺpcoch. Následne metóda vráti objekt typu "Cluster" naplnený polohami pixelov patriacich do hľadaného zhluku.

7 Overenie fungovania zhlukovacej metódy

Na overenie fungovania zhlukovacej metódy potrebujeme zaviesť metodiku overenia.

7.1 Predpoklady

Predpokladáme, že priemerná veľkosť nájdeného zhluku by mala rásť s rastúcou amplitúdou vlny, a tiež klesať so zväčšujúcim sa thresholdom.

7.1.1 Odôvodnenie predpokladov

Keďže s rastúcou amplitúdou vlny sa pixely zobrazujúce chrbát vlny vybudia viac, metóda by mala nájsť viacero pixelov spĺňajúcich podmienky príslušnosti do zhluku. Z obrázku 7–1 je zrejmé, že ak hľadáme pixely s hodnotou 0,8 a viac, pri vlne sinxich dokážeme nájsť menej ako pri vlne 2sinx a pri vlne $\frac{1}{2}sinx$ nenájdeme žiadne pixely. V poslednom prípade bude veľkosť zhluku rovná 1, pretože najjasnejší pixel je automaticky pridaný do prázdneho zhluku.



Obrázok 7-1: Rôzne amplitúdy vlny [22]

Z obrázku 7–1 je tiež zrejmé, že ak budeme zvyšovať threshold, veľkosť nájdeného zhluku by mala klesať. To vyplýva z tvaru sínusovej vlny. Napríklad, pri hodnote thresholdu 1 nájdeme pre vlnu sinx len úplné vrcholy vĺn, pre 2sinx nájdeme menší počet pixelov ako pri hodnote thresholdu 0,8. Pre $\frac{1}{2}sinx$ opäť nenájdeme žiadne vhodné pixely, a preto bude veľkosť clustra rovná 1.

7.2 Overenie

Aby sme overili, či sa zhlukovacia metóda správa podľa našich predpokladov, pripravili sme simulácie zahŕňajúce rôzne amplitúdy vĺn, rôzne thresholdy a rôzny počet generovaní. Simulácia spočíva vo vygenerovaní vstupných dát, nájdení zhluku a analýzy tohto zhluku. Pre vytvorenie nasledujúcich grafov sme spomínanú simuláciu urobili n krát pre jednu amplitúdu, aby sme dostali jeden bod grafu. Každý bod grafu teda predstavuje inú amplitúdu vlny a priemerný počet pixelov v nájdenom zhluku pri tejto amplitúde a danom tresholde. Stĺpec amplitúda v nasledujúcich tabuľkách obsahuje hodnoty, ktoré boli použité pri výpočte amplitúdy vlny. Napríklad, číslo 0,05 predstavuje 5% zo strednej hodnoty šumu, 0,2 predstavuje 20% zo strednej hodnoty šumu atď.

Generované vlny boli podobné ako na obrázku 3-5. Líšili sa len amplitúdou a šumom. Na obrázkoch 7-2, 7-4 a 7-6 sú zobrazené nájdené zhluky pre príslušné thresholdy. Nájdené zhluky sú na obrázkoch zoradené podľa amplitúdy tak, ako to ilustruje Tabuľka 7-1.

Tabuľka 7–1: Ilustrácia usporiadania zhlukov v obrázkoch 7–2, 7–4 a 7–6 podľa veľkosti amplitúdy v zhluku

0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
0.30	0.35	0.40	0.45	0.50



Obrázok 7–2: Nájdené zhluky pre threshold 100

Tabuľka 7–2: O	verenie fungovania	zhlukovacej	metódy -	threshold	100,	n 10
----------------	--------------------	-------------	----------	-----------	------	------

Threshold	Amplitúda	Priemer.Veľkosť clustra	Počet generovaní (n)
	$0,\!05$	408	
	0,10	449	
	0,15	384	
	0,20	402	
100	0,25	379	10
100	0,30	428	10
	0,35	325	
	0,40	404	
	0,45	316	
	0,50	444	



Obrázok 7-3: Vzťah veľkosti nájdeného zhluku k amplitúde vlny, threshold 100

Keďže threshold predstavuje percentuálny násobok strednej hodnoty analyzovaného obrázka, z Tabuľky 7–2 a Obrázku 7–3 môžeme vidieť, že do zhlukov sa nám pri thresholde 100 dostávalo veľa šumu a amplitúda veľmi neovplyvňovala veľkosť nájdeného zhluku. Toto je spôsobené práve nízkym thresholdom, teda do zhlukov sme zahŕňali všetky pixely, ktoré boli vybudené na väčšiu hodnotu ako je stredná hodnota dát v danej snímke. V zhlukoch sme teda pozorovali najširšiu časť vlny, a keďže všetky vlny mali rovnakú vlnovú dĺžku, veľkosť clustra je približne konštantná.



Obrázok 7–4: Nájdené zhluky pre threshold 110

Tabuľka 7–3: Overenie	fungovania	zhlukovacej	metódy -	threshold	110, n	10
-----------------------	------------	-------------	----------	-----------	--------	----

Threshold	Amplitúda	Priemer.Veľkosť clustra	Počet generovaní (n)
	0,05	1	
	0,10	14	
	0,15	238	
	0,20	266	
110	0,25	329	10
110	0,30	231	10
	0,35	309	
	0,40	289	
	0,45	325	
	0,50	383	



Obrázok 7–5: Vzťah veľkosti nájdeného zhluku k amplitúde vlny, threshold 110

Tabuľka 7–3 a obrázok 7–5 zobrazujú situáciu pri použití thresholdu 110. Počet generovaní je nezmenený. Jeden bod grafu predstavuje priemerný počet pixelov v zhluku pri danej amplitúde. Priemerovali sme 10 hodnôt.

Zväčšenie thresholdu nám čiastočne potvrdilo jeden z predpokladov, a to ten, že amplitúdy pod thresholdom dosahujú minimálnu veľkosť clustra rovnajúcu sa hodnote 1. V tomto prípade ide o amplitúdu 0,05. Amplitúda, ktorá je na rozhraní (0,1) vykazuje veľmi malý priemerný počet bodov v zhluku, čo je uspokojivý výsledok. Dáta sú však ešte pomerne rozšumené a na grafe z obrázku 7–5 môžeme vidieť neočakávaný pokles pri hodnote amplitúdy 0,3.



Obrázok 7–6: Nájdené zhluky pre threshold 120

Tabuľka 7–4:	Overenie	fungovania	zhlukovacej	metódy -	threshold	120, 1	n 10
--------------	----------	------------	-------------	----------	-----------	--------	------

Threshold	Amplitúda	Priemer.Veľkosť clustra	Počet generovaní (n)
	0,05	1	
	0,10	1	
100	0,15	1	
	0,20	6	
	0,25	161	10
120	0,30	222	10
	0,35	262	
	0,40	282	
	0,45	248	
	0,50	293	



Obrázok 7-7: Vzťah veľkosti nájdeného zhluku k amplitúde vlny, threshold 120

Pri ďalšom zväčšení thresholdu nám tabuľka 7–4 a graf na obrázku 7–7 ukazujú, že naše predpoklady sa zdajú byť správne. Veľkosti amplitúdy pod thresholdom, v tomto prípade 0,05; 0,1 a 0,15, dosahujú očakávanú minimálnu hodnotu 1. Hraničná veľkosť amplitúdy 0,2 dosahuje rovnako veľmi malú hodnotu, čo tiež spadá do našich predpokladov. Na obrázku 7–7 však môžeme stále vidieť neočakávaný pokles pri amplitúde 0,45. Predpokladáme, že je to len štatistická chyba, preto zrealizujeme ešte jednu simuláciu, pri ktorej zväčšíme počet generovaní pre jeden bod grafu z 10 na 100. Threshold ostáva nastavený na hodnotu 120.

Threshold	Amplitúda	Priemer.Veľkosť clustra	Počet generovaní (n)
	0,05	1	
	0,10	1	
	$0,\!15$	1	
	0,20	8	
190	0,25	161	100
120	0,30	210	100
	0,35	246	
-	0,40	275	
	0,45	292	
	0,50	311	

Tabuľka 7–5: Overenie fungovania zhlukovacej metódy - threshold 120, n $100\,$



Obrázok 7–8: Vzťah veľkosti nájdeného zhluku k amplitúde vlny, threshold 120, n100

Posledná simulácia nám ukázala, že chyba, ktorá sa vyskytla bola len štatistická – vzorka bola príliš malá. Pri počte iterácií generovania pre jeden bod grafu rovnom 100 vidíme, že metóda na hľadanie zhlukov pracuje presne podľa našich očakávaní. So zvyšujúcou sa amplitúdou rastie počet bodov v nájdenom zhluku. To pozorujeme v tabuľke 7–5 a na obrázku 7–8.

Ak sa pozrieme na všetky simulácie súčasne, vidíme, že priemerný počet bodov v nájdenom zhluku je nepriamo úmerný veľkosti thresholdu, čo potvrdzuje náš druhý predpoklad. Z týchto výsledkov môžeme tiež vyvodiť aj správnosť generovania vstupných dát. Vlna vkladaná do šumu predstavuje želanú sínusovú krivku.

8 Rozpoznanie vlny

Rozpoznávanie vlny vykonávame pomocou rekonštrukčnej metódy, ktorej výsledkom je nájdenie parametrov vlny. Keďže vieme, akú vlnu do obrázku vkladáme, môžeme po zrekonštruovaní vlny povedať, nakoľko presne pracuje náš rekonštrukčný algoritmus. Taktiež pri vyhodnocovaní použijeme histogramy, ktoré budú zobrazovať rozdelenie parametrov a a b rekonštruovanej priamky.

8.1 Predpoklady

Pri vyhodnotení potrebujeme poznať presné hodnoty parametrov vlny, aby bolo možné povedať nakoľko presné sú rozpoznávacie metódy. Túto presnosť potom vyjadríme pomocou parametra γ_{68} a pomocou nájdenia chyby dvoch tretín štatistickej distribúcie.

Prvým predpokladom je, že rozdelenie parametrov *a* a *b* sa bude podobať gausovej krivke, a preto bude symetrické okolo istej hodnoty. Táto hodnota by mala byť rovnaká alebo aspoň čo najpodobnejšia hodnote, ktorú sme použili pri vkladaní vlny do obrázku. Referenčná priamka pozdĺž ktorej sme generovali vlnu, používala rovnicu 8.1.

$$ax + by + c = 0 \tag{8.1}$$

Metóda na výpočet parametrov priamky zo zhluku nájdených bodov vracia parametre pre rovnicu 8.2.

$$y = A + Bx \tag{8.2}$$

Parametre a a b z rovnice 8.1 sa nezhodujú s parametrami A a B z rovnice 8.2, keďže ide o dve rôzne formy rovnice priamky. (Z dôvodu uľahčenia rozpoznania priamok, sme zámerne v rovniciach použili veľké a malé písmená pre názvy parametrov). Preto je potrebné použiť nasledujúce úpravy 8.3.

$$ax + by + c = 0$$

$$ax + by = -c$$

$$by = -c - ax$$

$$y = -\frac{c}{b} - \frac{a}{b}x$$

(8.3)

Z rovnice 8.3 potom môžeme vyjadriť parametre A a B pre rovnicu 8.2, ako je to zobrazené v rovniciach 8.4 a 8.5.

$$A = -\frac{c}{b} \tag{8.4}$$

$$B = -\frac{a}{b} \tag{8.5}$$

Pri overení presnosti budeme meranie opakovať niekoľkokrát pre rôzne uhly referenčnej priamky, preto sa vstupné parametre budú meniť. Pre ilustráciu uvedieme príklad: Ak sú vstupné parametre nastavené podľa rovníc 8.6.

$$a = -1$$
 $b = 0.5$ $c = 20$ (8.6)

Očakávame, že metóda rozpoznávania vráti parametre A a B tak, ako sú uvedené v rovnici 8.7

$$A = -40 \qquad B = 2 \tag{8.7}$$

Vkladaná vlna môže mať rôznu vlnovú dĺžku, inak povedané, oblasť z nej identifikovaná môže zaberať rôznu časť obrázku. Predpokladali sme, že tvar vybranej vlny by mohol ovplyvniť výsledky v prípade, že vlna je smerovaná pod iným uhlom ako 90 či 0 stupňov. Nájdený zhluk totiž v iných prípadoch tvorí lichobežník, a preto aproximovaná priamka môže byť vychýlená.

Ďalším predpokladom je, že čím širší bude nájdený zhluk, tým bude pozorovaná väčšia odchýlka v nájdených parametroch. Táto odchýlka sa bude meniť aj vplyvom amplitúdy vloženej vlny a tiež vplyvom zvoleného thresholdu. Očakávame, že čím väčšia bude amplitúda, tým presnejšie výsledky dostaneme. S narastajúcim thresholdom sa bude zmenšovať nájdený zhluk a tým pádom bude užší. To by malo priniesť pozitívny vplyv na výsledky, teda zvyšovať ich presnosť, avšak len do určitého momentu, keď sa do zhluku dostane primálo bodov na presné určenie parametrov vlny.

8.2 Hľadanie parametrov vlny

Pre vyhľadanie parametrov vlny sme sa rozhodli použiť metódu najmenších štvorcov. [23] Táto metóda pomerne presne aproximuje priamku, ktorá predstavuje reprezentáciu nájdeného zhluku. Keďže všetky informácie potrebné pre rekonštrukciu priamky máme uložené v triede Cluster.java, využijeme ju aj pre vytvorenie metód, ktoré vyrátajú parametre rekonštruovanej priamky. Najpodstatnejšími funkciami sú samozrejme tie, ktoré vrátia výsledky rekonštrukcie. Sú to metódy getA() a getB(), pričom A a B v názve metód referujú na parametre priamky z rovnice 8.2. V tejto triede sme použili vzťahy podľa Weisteina [24]. Na výpočet parametra A sme použili rovnicu 8.8 a na výpočet parametra B sme použili rovnicu 8.9.

$$A = \bar{y} - B\bar{x} \tag{8.8}$$

$$B = \frac{SS_{xy}}{SS_{xx}} \tag{8.9}$$

V rovnici 8.8 \bar{y} a \bar{x} predstavujú priemerné hodnoty súradníc všetkých bodov v zhluku. Vo vzorci 8.9 sme použili označenia SS_{xy} a SS_{xx} , ktoré sú vyjadrené rovnicami 8.10 a 8.11

$$SS_{xy} = \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})$$
(8.10)

$$SS_{xx} = \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2 \tag{8.11}$$

8.3 Metodika analýzy

Pre určenie spolahlivosti algoritmu potrebujeme analyzovať určité množstvo známych obrazov, aby bolo možné aplikovať štatistické ukazovatele. Ako bolo spomenuté vyššie, týmito ukazovateľmi budú parameter γ_{68} a chyba dvoch tretín štatistickej distribúcie. Rozhodli sme sa analyzovať 1000 snímok obsahujúcich vlnu. Tento balík snímok predstavuje jedno meranie, z ktorého vyjadríme štatistické ukazovatele. Postupnou analýzou dvanástich balíkov pre každý z vybraných uhlov, rozanalyzujeme výsledky pre rôzne amplitúdy vlny a thresholdy pre clustrovaciu metódu. Analyzovať budeme postupne balíky s amplitúdou 0.06, 0.12, 0.24 a 0.48. Každá amplitúda bude analyzovaná troma thresholdami s hodnotami 100.25, 103 a 105. Celá takáto analýza sa aplikuje na päť rôznych uhlov vkladanej vlny, a to 0°, 30°, 45°, 80° a 90°. Vznikne nám teda 60 samostatných simulácií a celkovo bude analyzovaných 60 000 snímok. Pre vyhladenie výsledkov sme uskutočnili aj rozsiahlejšie merania na vzorke 10 000 snímok v jednom balíku. Ukázalo sa však, že aj 1000 snímok je dostatočných pre analýzu účinnosti vyhľadávania a prináša značné zrýchlenie. Vďaka tomuto zrýchleniu môžeme uskutočniť analýzu pre väčšie množstvo prípadov v rovnakom čase.

8.3.1 Parameter γ_{68}

 γ_{68} je označenie parametra, pomocou ktorého určíme, nakoľko presné výsledky sme dosiahli. Ide o hľadanie najpresnejších výsledkov a ich zoradenie podľa presnosti. Pre výpočet γ_{68} si potrebujeme zvoliť jeden ukazovateľ, na ktorý túto metódu budeme aplikovať. V našom prípade pôjde o uhol zrekonštruovanej priamky. Preto potrebujeme pri každom výsledku zistiť odchýlku nájdeného uhla od očakávaného. Zoradíme tieto odchýlky od najmenšej po najväčšiu, a v zozname zoradených odchýlok je 680. odchýlka rovná γ_{68} , keďže analyzovaných bolo 1000 prípadov. Ukazovateľ γ_{68} hovorí o tom, aký presný je analyzovaný parameter. Výsledok "5"môžeme interpretovať nasledovne: "68% výsledkov má menšiu odchýlku ako 5". V našom prípade sa bude jednať o odchýlku uhla čo znamená, že budeme pracovať so stupňami.

8.3.2 Chyba dvoch tretín štatistickej distribúcie

Táto metóda nám ukáže, aký rozptyl má 66% najčastejších hodnôt. Čím menší rozptyl dostaneme, tým je metóda konzistentnejšia. Pre určenie tohto ukazovateľa potrebujeme zoradiť vygenerované hodnoty a zistiť medián hodnôt. Následne nájdeme hodnotu, ktorá predstavuje dolnú hranicu (33% od mediánu smerom dole) a ďalšiu, ktorá predstavuje hornú hranicu (33% smerom hore).

9 Vyhľadávanie vlny v obraze - tlmená vlna

Pre vyhodnotenie presnosti hľadania spracujeme dáta postupne pre rôzne analyzované uhly. Kvôli množstvu a podobnosti viacerých grafov, uvedieme len vybrané grafy a ostatné môžeme nájsť v prílohe A v elektronickej podobe. V tabuľkách 9-1, 9-2, 9-3, 9-4 a 9-5 využívame nasledujúce skratky pre názvy stĺpcov:

- γ_{68} označenie stĺpca obsahujúceho ukazovateľ γ_{68} ,
- DH skratka pre označenie "Dolná Hranica", týka sa chyby dvoch tretín štatistickej distribúcie,
- HH skratka pre označenie "Horná Hranica", taktiež pre ukazovateľ Chyba dvoch tretín štatistickej distribúcie,
- med. medián
- Thres. threshold zhlukovacej metódy, ktorý bol využitý pri analýze a
- Ampl. amplitúda analyzovanej vlny.

9.1 Uhol 0°

Amplitúda 0,06 predstavuje podobne ako v predošlých prípadoch veľkosť vlny, ktorá sa dvíha o 6% nad priemernú hodnotu šumu. Keďže využívame sínusovú vlnu s vlnovou dĺžkou kratšou ako je strana zorného poľa (obrázku), na obrázkoch sa objavuje hneď niekoľko vrcholov. Pre jednoznačnú identifikáciu sme použili tlmenú sínusovú vlnu, viď rovnicu 6.4, a teda na obrázku sa nachádza iba jeden vrchol vlny, ktorý má uvedenú amplitúdu 6%. Ostatné vrcholy sú menšie, preto algoritmus analyzuje stále rovnaký vrchol. Na obrázku 9–1 vidíme príklad analyzovaného snímku.



Obrázok 9-1: Tlmená vlna s amplitúdou 0,06

Threshold 100.25 Takýto nízky threshold je pomerne citlivý. Zhluky, ktoré nachádza metóda v tomto prípade sú vždy široké, pretože akceptujeme takmer všetko čo je nad strednou hodnotou obrázku. Nie je teda problém nájsť zhluk aj pri nízkej amplitúde. Viď obrázok 9-2



Obrázok 9–2: Nájdený zhluk pri amplitúde 0,06 a thresholde 100,25

Pri tomto thresholde dosiahol parameter γ_{68} hodnotu 0.25ř. Môžeme teda povedať, že 68% výsledkov malo chybu menšiu ako **0.25°**. Štatistické rozdelenie hodnôt



parametra A z analyzovaných obrázkov pre tento prípad zobrazuje obrázok 9-3.

Obrázok 9–3: Histogram parametra A pre amplitúdu 0,6 uhol 30°
a threshold 100.25

Štatistické rozdelenie hodnôt parametra B zobrazuje obrázok 9–4.



Obrázok 9–4: Histogram parametra B pre amlitúdu 0,6 uhol $0^{\circ}a$ threshold 100,25





44

Z obrázkov 9-3 a 9-4 môžeme usúdiť, že náš predpoklad tvaru rozdelenia bol správny, ale pre jednoznačnosť uvádzame aj obrázok 9-5, na ktorom vidíme preloženie histogramu Gausovou krivkou. Očakávaná hodnota pre parameter A bola 24 a pre parameter B 0. Na základe spomenutých obrázkov môžeme usúdiť, že algoritmus pracuje podľa očakávaní, teda hodnoty sú distribuované okolo správnych hodnôt. Uhly pre dolnú a hornú hranicu ukazovateľa chyby dvoch tretín štatistickej distribúcie sa od skutočnej hodnoty odchyľujú len o 0,25°. Metóda sa javí konzistentná. Medián má hodnotu -0,008°, čo je veľmi malá odchýlka od očakávanej hodnoty 0. Tieto hodnoty môžeme vidieť aj v tabuľke 9-1.

Threshold 103 je už menej citlivý. Zhluky, ktoré nachádza metóda v tomto prípade sú užšie. Stále nie je problémom nájsť zhluk aj pri nízkej amplitúde 6%. Viď obrázok 9-6



Obrázok 9–6: Nájdený zhluk pri amplitúde 0,06 a thresholde 103

Pri tomto thresholde dosiahol parameter γ_{68} tiež hodnotu 0.25. Môžeme povedať, že 68% výsledkov malo chybu menšiu ako **0.25°**. Chyba dvoch tretín štatistickej distribúcie ostáva na úrovni 0,25°v oboch smeroch. Medián má hodnotu 0,004°, čo je veľmi presný výsledok. **Threshold 105** je najmenej citlivý aký sme použili. Zhluky, ktoré nachádza metóda v tomto prípade sú rôzne, niekedy veľmi úzke, čo nám vyhovuje, no inokedy sú to len náhodné zhluky. Viď obrázky 9-7 a 9-8



Obrázok 9–7: Nájdený správny zhluk pri amplitúde 0,06 a thresholde 105



Obrázok 9–8: Nájdený chybný zhluk pri amplitúde 0,06 a thresholde 105

Pri tomto thresholde dosiahol parameter γ_{68} hodnotu 2,43. Môžeme konštatovať, že 68% výsledkov malo chybu menšiu ako **2,43°**. Táto odchýlka je doposiaľ najväčšia. Je to spôsobené použitím nízkej amplitúdy a veľkého thresholdu. Aj rozptyl hodnôt v dvoch tretinách štatistickej distribúcie je väčší (od -3,58°do 0,88°).

Pri zvyšovaní amplitúdy vlny môžeme pri uhle 0°pozorovať očakávané správanie. Výsledky sa stabilizujú a dostávame čoraz presnejšie hodnoty. Tento progres môžeme pozorovať v tabuľke 9-1. Pri najvyššej použitej amplitúde dokonca dostávame úplne presné výsledky pre všetky thresholdy. To je spôsobené dokonalosťou nájdeného zhluku, ktorý je zobrazený na obrázku 9-9



Obrázok 9–9: Nájdený zhluk pri amplitúde 0,48

Pri amplitúde 0,48 je distribúcia chyby nulová. To môžeme vidieť na obrázkoch 9-10 a 9-11. Keďže distribúcia je nulová, v histograme sa nachádza iba jeden stĺpec.







Obrázok 9-11: Histogram parametra B pri amplitúde 0,48 a uhle 0°

Tabuľka 9–1: Výsledky analýzy uhla nájdeného zhluku - pôvodná vlna s uhlom 0°

Thres.		10	$0,\!25$			1	03	105				
Ampl.	γ_{68}	DH	med.	HH	γ_{68}	DH	med.	HH	γ_{68}	DH	med.	HH
0,06	0.25	-0.24	-0.008	0.25	0.25	-0.25	0.004	0.24	2.43	-3.58	-0.81	0.88
0,12	0.14	-0.13	0.003	0.13	0.13	-0.14	-0.01	0.12	0.21	-0.21	-0.02	0.19
0,24	0.04	-0.03	0	0.04	0.16	-015	-0.001	0.15	0.09	-0.09	0	0.09
0,48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

9.2 Uhol 30°

Pri analýze dát vygenerovaných z rekonštrukcie vlny so sklonom 30° môžeme na základe tabuľky 9-2 povedať, že algoritmus sa správa rovnako ako pri rekonštrukcii vlny so sklonom 0° . Rovnako ako v predchádzajúcom prípade, kombinácia vysokého thresholdu s nízkou amplitúdou spôsobuje väčšie odchýlky od skutočnej hodnoty. Tu však nenastala situácia, kedy by sa hodnoty presne zhodovali so zadanými hod-

notami. To je spôsobené veľkosťou obrázka. Keďže máme k dispozícii len 48 x 48 pixelov, zhluk, ktorý smeruje iným smerom ako 0°alebo 90°bude mať vždy nerovné okraje a jeho tvar spôsobí odchýlku v meraní. Táto chyba je však veľmi malá, približne 0,12°. Takáto malá odchýlka pre nás nepredstavuje problém. Túto nerovnosť môžeme pozorovať na obrázku 9-12

Tabuľka 9–2: Výsledky analýzy uhla nájdeného zhluku - pôvodná vlna s uhlom 30°

Thres.		10	0,25		103				105			
Ampl.	γ_{68}	DH	med.	HH	γ_{68}	DH	med.	ΗH	γ_{68}	DH	med.	HH
0,06	0.2	29.78	29.97	30.17	0.21	29.78	29.98	30.18	0.95	27.79	29.66	30.24
$0,\!12$	0.14	29.87	29.999	30.13	0.14	29.87	30	30.13	0.13	29.85	29.99	30.12
$0,\!24$	0.1	29.89	29.99	30.09	0.1	29.91	30.01	30.11	0.09	29.9	29.98	30.08
0,48	0.07	29.92	29.98	30.05	0.07	29.94	30.003	30.07	0.08	29.94	30.01	30.09



Obrázok 9-12: Nájdený zhluk so sklonom 30° a amplitúdou 0.48

Pri pohľade na obrázok 9-12 a tabuľku 9-2 vidíme, že jeden z našich predpokladov nebol správny. Konkrétne ide o predpoklad, že skosenie okrajov nájdeného zhluku bude ovplyvňovať presnosť hľadania. Zhluk je na koncoch skosený, no výsledky meraní tým nie sú ovplyvnené. Toto zistenie je však pozitívne, pretože metóda je menej závislá od tvaru nájdeného zhluku ako sme pôvodne očakávali. Na druhej strane aj toto meranie potvrdzuje, že rast veľkosti amplitúdy pozitívne vplýva na presnosť rozpoznávania. Distribúcia chyby sa pohybuje okolo zadanej hodnoty, hľadanie je teda stále uspokojivo presné.

9.3 Uhol 45°

Tabuľka 9–3: Výsledky analýzy uhla nájdeného zhluku - pôvodná vlna s uhlom 45°

Thres.	100,25				103				105			
Ampl.	γ_{68}	DH	med.	HH	γ_{68}	DH	med.	HH	γ_{68}	DH	med.	HH
0,06	1.26	43.68	43.82	43.95	0.46	44.47	44.61	44.76	1.98	38.96	43.74	44.81
$0,\!12$	1.24	43.72	43.81	43.89	0.77	44.18	44.28	44.38	0.51	44.44	44.54	44.65
$0,\!24$	1.19	43.79	43.84	43.87	0.96	43.99	44.08	44.17	0.81	44.16	44.2	44.24
0,48	1.15	43.85	43.85	43.85	1.15	43.85	43.85	43.85	1.04	43.91	44.01	44.11

Pri pohľade na tabuľku 9–3 začíname pozorovať neočakávané správanie výsledkov. Pri predchádzajúcich veľkostiach uhla, boli výsledky správne distribuované, t.j. okolo reálnej hodnoty. So zvyšujúcou amplitúdou rástla aj presnosť vyhľadania. Pri uhle 45°sa však metóda začína správať neočakávane. Distribúcia sa posúva nižšie a nie je rozdelená okolo reálneho uhla, ale okolo menšieho uhla. Presnosť vyjadrená ukazovateľom γ_{68} sa pri thresholde 100.25 správa stále podľa očakávaní, no pri zvyšujúcom sa thresholde badáme neočakávanú zmenu. So zvyšujúcou sa amplitúdou vlny klesá presnosť rozpoznania. Môžeme si tiež všimnúť, že pri thresholde 105 a amplitúde 0,06 vzniká veľká chyba, podobne ako pri uhle 0°. Obrázky 9–13 a 9–14 dokazujú, že ide o rovnaký fenomén ako pri uhle 0°.





Obrázok 9–13: Nájdený zlý zhluk pri amplitúde 0,06 a thresholde 105 v uhle 45°

Obrázok 9–14: Nájdený dobrý zhluk pri amplitúde 0,06 a thresholde 105 v uhle 45

Vplyvom nízkej amplitúdy a vysokého thresholdu dostávame zhluky ideálne pre analýzu, ktoré reprezentuje obrázok 9-14, ale aj také, z ktorých nie je možné určiť akým smerom vlna smeruje. Tie zobrazuje obrázok 9-13.

V tomto bode nie je jasné čo spôsobuje ono neočakávané správanie. Musíme sa teda pozrieť na ďalšie dáta, aby sme videli širšie súvislosti.

9.4 Vyššie uhly

Už na prvý pohľad v tabuľkách 9-4 a 9-5 vidíme, že neočakávané správanie pozorované pri uhle 45° je prítomné aj pri väčších uhloch. Dokonca je tu ešte výraznejšie, a ak porovnáme tabuľky 9-4 a 9-5 medzi sebou zbadáme, že so zvyšujúcim sa uhlom, pod ktorým snímame vlnu, sa táto chyba zvýrazňuje. Môžeme si všimnúť, že výsledky z tabuľky 9-5 sa na prvý pohľad javia úplne zmätočne. Pri pohľade na obrázok 9-15, ktorý ilustruje nájdený zhluk v uhle 80° pri amplitúde 0.48 vidíme, že zhlukovacia metóda našla cluster podľa zadania.



Obrázok 9–15: Nájdený zhluk pri amplitúde 0,48 a uhle 80°

Problém nastáva pri rekonštrukcii referenčnej krivky z nájdeného zhluku.

Tabuľka 9–4: Výsledky analýzy uhla nájdeného zhluku - pôvodná vlna s uhlom 80°

Thres.	100,25				103				105			
Ampl.	γ_{68}	DH	med.	HH	γ_{68}	DH	med.	HH	γ_{68}	DH	med.	HH
0,06	12.8	67.04	67.36	67.69	4.74	75.13	75.37	75.61	6.58	57.66	74.77	78.17
0,12	12.76	67.13	67.34	67.56	8.18	71.74	71.92	72.1	5.49	74.43	74.58	74.75
0,24	12.82	67.11	67.26	67.41	10.39	69.54	69.68	69.82	8.76	71.17	71.29	71.41
0,48	12.9	67.04	67.15	67.27	11.63	68.32	68.42	68.52	10.75	69.19	69.29	69.39

Situácia sa vyjasňuje pri pohľade na obrázok 9-16 a do tabuľky 9-5 na príslušné miesto - amplitúda 0.48, threshold 105. Vidíme, že metóda našla vo všetkých prípadoch uhol 0°. Z toho vyplýva, že metóda najmenších štvorcov aproximuje body na horizontálnu priamku. Správnost implementácie sme overili vložením dát do nástroja Origin, ktorý určil parametre priamky rovnako ako nami implementovaný program.



Obrázok 9–16: Nájdený zhluk pri amplitúde 0,48 thresholde 105 a uhle 90°

Metóda najmenších štvorcov hovorí, že vidíme malý úsek zo širokej horizontálnej čiary. Tento efekt by sme mohli odstrániť otočením analyzovanej matice o 90°. Potrebu otáčania matice môžeme zistiť napríklad sčítaním počtu rôznych hodnôt y - ových a x - ových súradníc. Ak je počet rôznych y - ových hodnôt (pixelov) väčší, uhol zhluku bude väčší ako 45°. Nakoniec k uhlu, ktorý vypočíta metóda najmenších štvorcov prirátame 90°a dostaneme skutočný uhol vlny.

Tabuľka 9–5: Výsledky analýzy uhla nájdeného zhluku - pôvodná vlna s uhlom 90°

Thres.	100,25			103				105				
Ampl.	γ_{68}	DH	med.	HH	γ_{68}	DH	med.	HH	γ_{68}	DH	med.	HH
0,06	88.5	-3.62	-0.004	3.64	85.4	-11.68	-0.49	11.11	62.12	-67.81	-38.03	17.36
0,12	88.96	-2.65	0.15	2.48	88.37	-3.7	0.09	3.93	87.57	-5.85	0.32	5.98
0,24	89.4	-1.45	0.05	1.49	89.42	-1.17	-0.01	1.22	88.76	-2.97	-0.22	2.77
0,48	90	-0.16	0	0.1	89.05	-1.93	-0.06	2	90	0	0	0

10 Vyhľadávanie vlny v obraze - simulácia letu misie Mini-EUSO

Pri vyhľadávaní tlmenej vlny v obraze sme zistili, že nami zvolená metóda pracuje s uspokojivou presnosťou. Ďalším krokom je simulácia letu misie Mini-EUSO. Jej cieľom je overiť schopnosť detegovať prítomnosť vĺn cunami prostredníctvom UV kamery experimentu Mini-EUSO, ktorá bude umiestnená na palube Medzinárodnej vesmírnej stanice ISS. Ako prvé je potrebné simulovať zvlnenie airglow žiarenia spôsobené vlnou cunami a jeho vývoj v čase. Ako bolo spomenuté v predchádzajúcich kapitolách, zvlnenie airglow žiarenia vyvolané vlnou cunami popísal článok Hickey [21] a jeho tvar je zobrazený na obrázku 6-1. Pre lepšiu predstavu tvaru je generovaná vlna zobrazená v 3D priestore na obrázkoch 10-1 a 10-2, ktoré zároveň popisujú jej polohu. Na obrázku 10-3 je táto poloha zobrazená aj na mape. Vlna sa nachádza v južnom pacifickom oceáne, čo simuluje zvyčajný výskyt cunami vĺn.



Obrázok 10–1: Vlna v airglow žiarení generovaná ako vlnový balík v zobrazení 3D - pohľad z uhla



Obrázok 10–2: Vlna v airglow žiarení generovaná ako vlnový balík v zobrazení 3D - pohľad z boku

Google 38°00'00.0"S 128°00'00.0"W



Obrázok 10-3: Pozícia generovanej vlny na mape

Pohyb vlny a jej vývoj v čase, bol získaný z modelu vytvoreného v Ústave experimentálnej fyziky SAV v Košiciach. Následne bola získaná dráha ISS prostredníctvom SSC Locatora [25]. Po zlúčení týchto modelov boli vybrané výseky samotnej vlny tak, ako by ju videla UV kamera experimentu Mini-EUSO. Za pomoci našich vizualizačných nástrojov sme vytvorili obrázky 10-4, 10-5 a 10-6, aby sme mali lepší prehľad o tom, čo sme schopní vidieť neskôr už v reálnych dátach. Na tieto výseky sme aplikovali naše metódy na rozpoznávanie cunami vĺn v airglow žiarení. Nájdené zhluky sú na obrázkoch 10-7, 10-8 a 10-9. Na tomto mieste uvádzame len niekoľko vybraných obrázkov a ostatné nájdete v prílohe B.



Obrázok10-4:Zosní-Obrázok10-5:Zosní-Obrázok10-6:Zosní-maná vlna v airglow žia-maná vlna v airglow žia-maná vlna v airglow žia-maná vlna v airglow žia-rení 1rení 2rení 3

Tabuľka 10-1: Výsledky analýzy snímok zo simulovaného letu Mini-EUSO

Thres.	125							
Ampl.	γ_{68}	DH	med.	HH				
$0,\!55$	6,68	4,32	7,8	13,65				

V tabuľke 10-1 vidíme hodnoty pozorovaných štatistických parametrov pre simuláciu reálnych podmienok. 68% výsledkov malo chybu menšiu ako 6,68°. To môžeme považovať za dobrý výsledok. Rozptyl hodnôt v dvoch tretinách štatistickej dis-



Obrázok 10 – 7: Zhluk zo**Obrázok 10 – 8**: Zhluk zo**Obrázok 10 – 9**: Zhluk zosnímky 10-4 pri thres-snímky 10-5 pri thres-snímky 10-6 pri thres-holde 125holde 125holde 125

tribúcie je pomerne veľký, až 9,33°, avšak veľké množstvo analyzovaných obrazov obsahovalo len veľmi malý výsek vlny, prípadne spodnú časť vlny, ktorá nepredstavovala jej chrbát ale sedlo. Domnievame sa, že práve tento fakt spôsobil spomínanú nepresnosť.

11 Záver (zhodnotenie riešenia)

Práca prezentuje overenie možnosti a vhodnosti využitia experimentu Mini-EUSO a jeho vysoko citlivej UV kamery na hľadanie atmosférických gravitačných vln v airglow žiarení Zeme, vyvolaných vlnami cunami. Keďže experiment Mini-EUSO ešte nie je na Medzinárodnej vesmírnej stanici ISS, boli na základe doterajších poznatkov kolaborácie EUSO a iných členov vedeckej komunity, ktorí sa venujú detekcii vĺn cunami, vytvorené metódy pre simuláciu šumu pozadia a samotných gravitačných vĺn. Vlny boli generované pozdĺž referenčnej priamky v troch podobách. Prvou a najjednoduchšou podobou bola netlmená sínusová vlna. Druhou boli tlmené sínusové kmity a treťou bola funkcia využívajúca vlnový balík na čo najvernejšiu simuláciu vĺn. Pre hľadanie týchto vĺn bola využitá zhlukovacia metóda a na rekonštrukciu parametrov referenčnej priamky sme využili metódu najmenších štvorcov. Overenie sme vykonali realizáciou množstva simulovaných meraní pri rôznych nastaveniach priamky, teda sklonu a posunu vlny, tiež aj parametrov vyhľadávacej metódy a rôznych amplitúdach vlny. Prostredníctvom parametra γ_{68} sme vyjadrili presnosť vyhľadávania. Zistili sme, že zhlukovacia metóda pracuje dostatočne presne, no metóda najmenších štvorcov vnáša do výsledkov chybu. Pri analýze vĺn s uhlom menším ako 45° bolo meranie veľmi presné, no so zvyšujúcim sa uhlom sme pozorovali aj zväčšovanie odchýlky nameraného uhla. Táto chyba je spôsobovaná vlastnosťou metódy najmenších štvorcov, ktorá aproximuje zadané body na horizontálnu čiaru. Pri uhle 90°sme dostávali výsledky s odchýlkou blížiacou sa 90°a dokonca pri najvyššej skúmanej amplitúde (48% zo strednej hodnoty šumu) bola táto odchýlka rovná presne 90°. Tvar nájdeného zhluku bol interpretovaný ako malý výsek širokej horizontálnej čiary namiesto úzkej vertikálnej čiary. Túto chybu je možné korigovať prostredníctvom natočenia snímky na základe vlastností nájdeného zhluku a následného prirátania uhla 90°k výsledku rekonštrukcie. Pre tieto simulované merania sme využili model vlny tlmeného sínusu. Po zistení, že naša metóda pre hľadanie vĺn pracuje správne, sme uskutočnili simulácie letu experimentu Mini-EUSO na palube

Medzinárodnej vesmírnej stanice ISS. V týchto simuláciách sme na základe modelu šírenia sa nami hľadanej vlny a trajektórie ISS vytvorili snímky, ktoré sme analyzovali s využitím našej metódy hľadania vĺn. Hľadanie bolo úspešné s pomerne malou odchýlkou, len 6,68°. Na obrázku 11–1 vidíme sumár simulácie, kde sú vyznačené významné elementy, ako je maximum vlny, minimum vlny a najjasnejší pixel, ktorý bol využitý ako počiatočný bod hľadania zhluku.

Simulované meranie Mini-EUSO z ISS nad vlnou v Tichom oceáne



Obrázok 11-1: Výsledok práce

Preukázala sa tak vhodnosť využitia experimentu Mini-EUSO na detekciu vĺn v airglow žiarení vyvolaných vlnami cunami. Z pozorovania výsledkov simulácií vyplýva, že pre takúto detekciu by sa dali využiť aj kamery s menším rozlíšením, napríklad 16x16 pixelov, ale vhodnejšie by bolo rozšíriť zorné pole kamery, napríklad na 800x800km z terajších 250x250km. Tak by sa zvýšila šanca na zachytenie vlny. Takéto zorné pole je z nízkej obežnej dráhy Zeme pomerne veľké, preto by bolo
vhodnejšie umiestniť pozorovacie satelity na vyššiu obežnú dráhu.

V budúcnosti bude hľadaný optimálny model fungovania konštalácie satelitov pre rozpoznávanie gravitačných vĺn tvorených vlnami cunami. Využitie malého počtu pixelov nie je viazané len na misiu Mini-EUSO. Kamery s nízkym rozlíšením budú priestorovo aj hmotnostne nenáročné a mohli by byť využité vo väčšom množstve. Tieto malé kamery by tvorili satelity, ktoré by sa vypustili do vesmíru a plocha pokrytia by podstatne stúpla. Keďže pri jednom lete by bolo možné vypustiť hneď niekoľko malých satelitov, náklady na inštaláciu takéhoto detektoru by boli podstatne zredukované. Táto sieť satelitov by potom mohla slúžiť nielen na detegovanie atmosferických gravitačných vĺn, ale aj na iné účely.

Literatúra

- [1] NASA National Aeronautics and Space Administration, Visible Earth A catalog of NASA images and animations of our home planet ATMOSPHERIC GRAVITY WAVES AND INTERNAL WAVES OFF AUSTRALIA [online].
 2003 [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: https://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=69463
- [2] MAKELA, J. J., P. LOGNONNÉ, H. HÉBERT, et al. Imaging and modeling the ionospheric airglow response over Hawaii to the tsunami generated by the Tohoku earthquake of 11 March 2011. Geophysical Research Letters [online].
 2011, 38(24), [cit. 2016-10-30]. DOI: 10.1029/2011GL047860. ISSN 00948276. Dostupné z: http://doi.wiley.com/10.1029/2011GL047860
- [3] RICCI, Marco, Marco CASOLINO a Pavel KLIMOV. Mini-EUSO: a pathfinder for JEM-EUSO to measure Earth's UV background from the ISS. In: Pos.sissa.it
 [online]. The Hague, The Netherlands: The 34th International Cosmic Ray Conference, 2015 [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: http://pos.sissa.it/archive/ conferences/236/599/ICRC2015_599.pdf
- [4] LARSSON, Oscar. Mini-EUSO: Measurement of the Earth's UV background emission from the ISS as a pathfinder for the JEM-EUSO mission. In: Icrr.u-tokyo.ac.jp [online]. Tokyo: TeV Particle Astrophysics Conference, 2015 [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/indico/ getFile.py/access?contribId=126&sessionId=10&resId=0&materialId= slides&confId=23
- [5] ADAMS, J. H., S. AHMAD, J. -N. ALBERT, et al. JEM-EUSO: Meteor and nuclearite observations. Experimental Astronomy [online]. 2015, 40(1), 253-279
 [cit. 2016-10-30]. DOI: 10.1007/s10686-014-9375-4. ISSN 0922-6435. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s10686-014-9375-4

- [6] MINI-EUSO: A HIGH-RESOLUTION, HIGH-SPEED AND ULTRA-SENSITIVE ULTRAVIOLET IMAGING INSTRUMENT FOR DYNAMIC EARTH AND ATMOSPHERE OBSERVATION FROM SPACE MINI-EUSO, scientific document for French ANR 2014
- [7] MACKOVJAK, Simon, Andrii NERONOV, Pavol BOBÍK, Marián PUTIŠ a Luis DEL PERAL. Progress of UV background analysis from EUSO-Balloon data [online]. EUSO-Balloon Progress Meeting, Torino, Italy: ISDC, University of Geneva, Versoix, Switzerland, Department of Space Physics, IEP SAS, Košice, Slovakia, 2014 [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: http://jemeuso.space. saske.sk/mackovjak_EB_UVbg_Torino_jan2015.pdf
- [8] BOBÍK, Pavol, K. SHINOZAKI, K. KUDELA a S. PASTIRCAK. Background distribution at FS [online]. Madrid: JEM-EUSO simulation meeting, 2012 [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: http://jemeuso.space.saske.sk/BG_ distribution_at_FS_P_Bobik.pdf
- [9] JEM-EUSO Extreme Universe Space Obesrvatory onboard Japanese Experiment Modu: Optics Outline [online]. Japan: JEM-EUSO Collaboration, 2015 [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: http://jemeuso.riken.jp/en/about11.html
- [10] DUDA Richard O., HART Peter E. USE OF THE HOUGH TRASFORMTION TO DETECT LINES AND CURVES IN PICTURES Technical Note 36 April 1971 Dostupné z: http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a457992. pdf
- [11] ANNE SOLBERG INF 4300 Hough transform [online] [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: http://www.uio.no/studier/emner/matnat/ifi/INF4300/h09/ undervisningsmateriale/hough09.pdf
- [12] Hough transform. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: https://en. wikipedia.org/wiki/Hough_transform

- [13] Edge detection. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: https://en. wikipedia.org/wiki/Edge_detection
- [14] PRASAD, V. Shiv Naga a Justin DOMKE. Gabor Filter Visualization. In: University of Maryland [online]. University of Maryland, 2005 [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: http://www.cs.umd.edu/class/spring2005/cmsc838s/ assignment-projects/gabor-filter-visualization/report.pdf
- [15] Dennis Gabor. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: https: //en.wikipedia.org/wiki/Dennis_Gabor
- [16] Gabor filter. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: https: //en.wikipedia.org/wiki/Gabor_filter
- [17] TRAPP R. The Computer Vision Lab at GET University of Paderborn Department of Electrical Engineering GET - Grundlagen der ElektroTechnik Associated Member of the Heinz Nixdorf Institute (HNI), Gabor Filters Dostupné z: http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/TRAPP1/ filter.html
- [18] ZHENG D., Zhao Y., Wang J. FEATURES EXTRACTION USING A GABOR FILTER FAMILY [online]. Beijing: State Key Laboratory of Intelligent Technology and SystemsDepartment of Computer Science and TechnologyTsinghua University, 2004 [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: https://onedrive.live.com/?cid=8522988C417C6CDA&id= 8522988C417C6CDA%21513&parId=root&o=OneUp
- [19] WELDON T. P., HIGGINS W. E., and DUNN D. F., Gabor filter design for multiple texture segmentation, Optical Engineering, vol. 35, no. 10, pp. 2852-2863, Oct. 1996.

- [20] PRESS, William H. Numerical recipes in C: the art of scientific computing
 [online]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1992 [cit. 2016-10-30]. ISBN 05-214-3108-5. Dostupné z: http://www2.units.it/ipl/students_ area/imm2/files/Numerical_Recipes.pdf
- [21] HICKEY Michael P., Atmospheric Gravity Waves and Effects in the Upper Atmosphere Associated with Tsunamis 667, 32, [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: http://www.intechopen.com/books
- [22] KISELEV, Sergey. Trigonometric Functions: The Sine Function Varying the Amplitude [online]. online: Sergey Kiselev, 1997 [cit. 2017-01-28]. Dostupné z: https://courses.cit.cornell.edu/phys101/math/trigonometric.html
- [23] BUŠA, Ján, Viktor PIRČ a Štefan SCHRÖTTER. Numerické metódy, pravdepodobnosť a matematická štatistika [online]. Košice: FEI TU v Košiciach, 2006 [cit. 2017-04-02]. ISBN 80-807-3632-4. Dostupné z: http://web.tuke. sk/fei-km/sites/default/files/prilohy/1/statnuma4.pdf
- [24] WEISSTEIN, Eric W. Least Squares Fitting. [online]. mathworld: wolfram, 2017 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: http://mathworld.wolfram.com/ LeastSquaresFitting.html
- [25] SSC LOCATOR FORM, Standard Interface Spacecraft/Time Range Selection [online], 2017 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: https://sscweb.gsfc.nasa.gov/ cgi-bin/Locator.cgi

Zoznam príloh

- **Príloha A** CD médium záverečná práca v elektronickej podobe, prílohy v elektronickej podobe, výsledky simulácií v elektronickej podobe, zdrojové kódy.
- Príloha B Obrázky vygenerované pri simulovanom lete Mini-EUSO na palube ISS. Označenie obrázkov je podľa indexu časového kroku. Dĺžka kroku je 10 sekúnd.

Príloha B

Obrázky vygenerované pri simulovanom lete Mini-EUSO na palube ISS

Obrázok B.1: Obrázok B.2: Obrázok B.3: Obrázok B.4: Obrázok B.5: Snímka 306 Snímka 304 Snímka 305 Snímka 307 Snímka 308



Obrázok B.6: Obrázok B.7: Obrázok B.8: Obrázok B.9: Obrázok B.10: Snímka 311 Snímka 309 Snímka 310 Snímka 312 Snímka 313



Obrázok B.11: Obrázok B.12: Obrázok B.13: Obrázok B.14: Obrázok B.15: Snímka 314 Snímka 315 Snímka 316 Snímka 317 Snímka 318



part and all and	s		
ur Hall			

Obrázok B.16:Obrázok B.17:Obrázok B.18:Obrázok B.19:Obrázok B.20:Snímka 319Snímka 320Snímka 321Snímka 322Snímka 323



Obrázok B.21:Obrázok B.22:Obrázok B.23:Obrázok B.24:Obrázok B.25:Zhluk 305Zhluk 306Zhluk 307Zhluk 308Zhluk 309



Obrázok B.26: Obrázok B.27: Obrázok B.28: Obrázok B.29: Obrázok B.30:

Zhluk 310

Zhluk 311

Zhluk 312

Zhluk 313

Zhluk 314



 Obrázok B.31:
 Obrázok B.32:
 Obrázok B.33:
 Obrázok B.34:
 Obrázok B.35:

 Zhluk 315
 Zhluk 316
 Zhluk 317
 Zhluk 318
 Zhluk 319



Obrázok B.36: Zhluk 320



Obrázok B.37: Zhluk 321



Obrázok B.38: Zhluk 322



Obrázok B.39:Obrázok B.40:Obrázok B.41:Obrázok B.42:Obrázok B.43:Snímka 603Snímka 604Snímka 605Snímka 606Snímka 607



Obrázok B.44: Obrázok B.45: Obrázok B.46: Obrázok B.47: Obrázok B.48:

Snímka 608

Snímka 609

Snímka 610

Snímka 611 Sní

Snímka 612



Obrázok B.49:Obrázok B.50:Obrázok B.51:Obrázok B.52:Obrázok B.53:Snímka 613Snímka 614Snímka 615Snímka 616Snímka 617

en provinsi en el surt		Contrast.	ALC: NO.
	and the second second		

Obrázok B.54:Obrázok B.55:Obrázok B.56:Obrázok B.57:Obrázok B.58:Snímka 618Snímka 619Snímka 620Snímka 621Snímka 622



Obrázok B.59:Obrázok B.60:Obrázok B.61:Obrázok B.62:Obrázok B.63:Snímka 623Snímka 624Snímka 625Snímka 626Snímka 627



Obrázok B.64: Snímka 628



Obrázok B.65:Obrázok B.66:Obrázok B.67:Obrázok B.68:Obrázok B.69:Zhluk 606Zhluk 607Zhluk 608Zhluk 609Zhluk 610

|--|--|--|--|--|

Obrázok B.70:Obrázok B.71:Obrázok B.72:Obrázok B.73:Obrázok B.74:Zhluk 611Zhluk 612Zhluk 613Zhluk 614Zhluk 615



 Obrázok B.75:
 Obrázok B.76:
 Obrázok B.77:
 Obrázok B.78:
 Obrázok B.79:

 Zhluk 616
 Zhluk 617
 Zhluk 618
 Zhluk 619
 Zhluk 620



Obrázok B.80: Obrázok B.81: Obrázok B.82: Obrázok B.83: Obrázok B.84:

Zhluk 621

Zhluk 622

Zhluk 623

Zhluk 624

Zhluk 625



Obrázok B.85: Obrázok B.86: Obrázok B.87: Obrázok B.88: Obrázok B.89: Snímka 904 Snímka 905 Snímka 906 Snímka 907 Snímka 908



Obrázok B.90:Obrázok B.91:Obrázok B.92:Obrázok B.93:Obrázok B.94:Snímka 909Snímka 910Snímka 911Snímka 912Snímka 913



Obrázok B.95:Obrázok B.96:Obrázok B.97:Obrázok B.98:Obrázok B.99:Snímka 914Snímka 915Snímka 916Snímka 917Snímka 918



Obrázok B.100Obrázok B.101Obrázok B.102Obrázok B.103Obrázok B.104:

Snímka 919

Snímka 920

Snímka 921

Snímka 922

Snímka 923



Obrázok B.105: Snímka 924 . Obrázok B.106:

Snímka 925

		a shakara	
 an all and a second	a the second second second		

Obrázok B.107Obrázok B.108Obrázok B.109Obrázok B.110Obrázok B.111:

Zhluk 907

Zhluk 908

Zhluk 909

Zhluk 911

Zhluk 910



Obrázok B.112Obrázok B.113Obrázok B.114Obrázok B.115Obrázok B.116:

Zhluk 912

Zhluk 913

Zhluk 914

Zhluk 915 Zhlu

Zhluk 916



Obrázok B.117Obrázok B.118Obrázok B.119Obrázok B.120Obrázok B.121:

Zhluk 917

Zhluk 918

Zhluk 919

Zhluk 920

Zhluk 921



Obrázok B.122: Zhluk 922



Obrázok B.123: Zhluk 923



Obrázok B.124: Zhluk 924