# UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY



# IDENTIFIKÁCIA ZRKADLOVÝCH ODRAZOV V SVETELNÝCH KRIVKÁCH KOZMICKÉHO ODPADU POMOCOU METÓD STROJOVÉHO UČENIA

Diplomová práca

Bc. Andrej Paluch

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY



# IDENTIFIKÁCIA ZRKADLOVÝCH ODRAZOV V SVETELNÝCH KRIVKÁCH KOZMICKÉHO ODPADU POMOCOU METÓD STROJOVÉHO UČENIA

Diplomová práca

Študijný program:	Aplikovaná informatika	
Študijný odbor:	Aplikovaná informatika	
Školiace pracovisko:	Katedra aplikovanej informatiky	
Školiteľ:	Mgr. Daniel Kyselica	
Konzultant:	Mgr. Jiří Šilha, PhD.	

Bratislava, 2023

Bc. Andrej Paluch



Univerzita Komenského v Bratislave Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

#### ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Meno a priezvisko študenta:	Bc. Andrej Paluch	
Študijný program:	aplikovaná informatika (Jednoodborové štúdium,	
	magisterský II. st., denná forma)	
Študijný odbor:	informatika	
Typ záverečnej práce:	diplomová	
Jazyk záverečnej práce:	slovenský	
Sekundárny jazyk:	anglický	

Názov: Identifikácia zrkadlových odrazov v svetelných krivkách kozmického odpadu pomocou metód strojového učenia Specular glints identification in space debris photometric data using machine learning methods

Masívne horné raketové stupne a nefunčné satelity, ktoré sú súčasťou populácie Anotácia: kozmického odpadu, sa skúmajú nakoľko sú potenciálnymi cielmi budúcich misiií na odstránenie odpadu z obežnej dráhy okolo Zeme. Známe rotačné vlastnosti a ich zmena s časom sú kľúčové pre plánovanie a dizajnovanie takýchto misií. Frekvencia rotácie ako aj smer osi rotácie sa dajú získať rôznymi metódami z pozorovaní z povrchu. Pre túto prácu relevantný typ dát sú fotometrické série, tzv. svetelné krivky, kedy sa meria zmena jasnosti objektu s časom. Svetelné krivky obsahujú veľké množstvo informácií o objekte vrátane jeho rotačných vlastností, povrchových vlastností a tvaru. Všeobecne sa očakávajú dva typy opdrazov slnečného žiarenia od povrchu objektov odpadu, difúzne a zrkadlové, v niektorých prípadoch aj ich kombinácia. V prípade difúzneho odrazu detekujeme vo svetelných krivkách jemný nárast a pokles signálu, kde vo väčšine prípadov takýto signal očakávame pri raketových stupňoch. Pri zrkadlovom odraze, často viditeľnom pri družiciach, sa v svetelnej krivke prejaví signál, alebo niekoľko signálov, ktoré trvajú relatívne krátko a májú ostré maximum, ktoré možno popísať pomocou napr. Lorentzovej funkcie. Vďaka času a konkrétnej geometrie medzi pozorovateľom-objektomslnkom, kedy sa takéto maximum prejaví, možno vypočítať pre daný silne odrazivý povrch jeho normálu. Takýmto spôsom je možne identifikovať os rotácie objektu v danom momente pozorovania. Okrem toho, už samotná prítomnosť zrkadlových odrazov pomáha charakterizovať vlastnosti povrchu objektu, čo je nevyhnutné pre neznáme objekty v prípade výskumu. Hlavný cieľ práce kandidáta/-tky bude otestovať rôzne typy metód strojového

učenia na testovacích svetelných krivkách odpadu obsahujúcich zrkadlové odrazy v signále. Úloha bude identifikovať prítomnosť takéhoto signálu. Na trénovanie a validáciu možno využiť tri typy dát, vlastné syntetické dáta, verejný katalóg fotometrických kriviek udržiavaný Oddelením Astronómie a Astrofyziky KAFZM FMFI UK (www.sdlcd.space-debris.sk) a verejný katalóg MMT (mmt9.ru/satellites/). Okrem toho, akonáhle sa identifikuje prítomnosť zrkadlových odrazov v krivke odpadu, úlohou kandidáta bude tento signál oddeliť od pôvodnej krivky, pričom vzniknuté dva signály, difúzny a zrkadlový, sa môžu ďalej použiť na analýzu rotácie a charakterizáciu povrchu.



#### Univerzita Komenského v Bratislave Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

Ciel': Prehľad metód strojového učenia aplikovateľných na daný problem. Aplikácia vybraných metód na identifikáciu prítomnosti zrkadlových odrazov vo fotometrických krivkách kozmického odpadu. Tvorba syntetických trénovacích svetelných kriviek s použitím Gaussovej a Lorentzovej funckie. Využitie reálnych pozorovaní na dotrénovanie a validovanie siete. Dekovolúcia zrkadlového a difúzneho signálu prítomného vo svetelných krivkách kozmického odpadu.

Literatúra: Z. Wu et al., "Single-Image Specular Highlight Removal via Real-World Dataset Construction," in IEEE Transactions on Multimedia, vol. 24, pp. 3782-3793, 2022, doi: 10.1109/TMM.2021.3107688. Karpov et al., Mini-MegaTORTORA Wide-Field Monitoring System with Subsecond Temporal Resolution: Observation of Transient Events, Proceedings of a conference held at Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia 3-7 October 2016, Astronomical Society of the Pacific, 2017, p.526

Vedúci:	Mgr. Daniel Kyselica	
Konzultant:	Mgr. Jiří Šilha, PhD.	
Katedra:	FMFI.KAI - Katedra aplikovanej informatiky	
Vedúci katedry:	prof. Ing. Igor Farkaš, Dr.	
Dátum zadania:	08.12.2022	

Dátum schválenia: 08.12.2022

prof. RNDr. Roman Ďurikovič, PhD. garant študijného programu

študent

vedúci práce

Čestne prehlasujem, že túto diplomovú prácu som vypracoval samostatne len s použitím uvedenej literatúry a za pomoci konzultácií u môjho školiteľa.

Bratislava, 2023

Bc. Andrej Paluch

# Poďakovanie

# Abstrakt

Masívne horné raketové stupne a nefunčné satelity, ktoré sú súčasťou populácie kozmického odpadu, sa skúmajú nakoľko sú potenciálnymi cielmi budúcich misiií na odstránenie odpadu z obežnej dráhy okolo Zeme. Známe rotačné vlastnosti a ich zmena s časom sú kľúčové pre plánovanie a dizajnovanie takýchto misií. Frekvencia rotácie ako aj smer osi rotácie sa dajú získať rôznymi metódami z pozorovaní z povrchu. Pre túto prácu relevantný typ dát sú fotometrické série, tzv. svetelné krivky, kedy sa meria zmena jasnosti objektu s časom. Svetelné krivky obsahujú veľké množstvo informácií o objekte vrátane jeho rotačných vlastností, povrchových vlastností a tvaru. Všeobecne sa očakávajú dva typy opdrazov slnečného žiarenia od povrchu objektov odpadu, difúzne a zrkadlové, v niektorých prípadoch aj ich kombinácia. V prípade difúzneho odrazu detekujeme vo svetelných krivkách jemný nárast a pokles signálu, kde vo väčšine prípadov takýto signal očakávame pri raketových stupňoch. Pri zrkadlovom odraze, často viditeľnom pri družiciach, sa v svetelnej krivke prejaví signál, alebo niekoľko signálov, ktoré trvajú relatívne krátko a májú ostré maximum, ktoré možno popísať pomocou napr. Lorentzovej funkcie. Vďaka času a konkrétnej geometrie medzi pozorovateľom-objektom-slnkom, kedy sa takéto maximum prejaví, možno vypočítať pre daný silne odrazivý povrch jeho normálu. Takýmto spôsom je možne identifikovať os rotácie objektu v danom momente pozorovania. Okrem toho, už samotná prítomnosť zrkadlových odrazov pomáha charakterizovať vlastnosti povrchu objektu, čo je nevyhnutné pre neznáme objekty v prípade výskumu. Hlavný cieľ práce kandidáta/-tky bude otestovať rôzne typy metód strojového učenia na testovacích svetelných krivkách odpadu obsahujúcich zrkadlové odrazy v signále. Uloha bude identifikovať prítomnosť takéhoto signálu. Na trénovanie a validáciu možno využiť tri typy dát, vlastné syntetické dáta, verejný katalóg fotometrických kriviek udržiavaný Oddelením Astronómie a Astrofyziky KAFZM FMFI UK (www.sdlcd.spacedebris.sk) a verejný katalóg MMT (mmt9.ru/satellites/). Okrem toho, akonáhle sa identifikuje prítomnosť zrkadlových odrazov v krivke odpadu, úlohou kandidáta bude tento signál oddeliť od pôvodnej krivky, pričom vzniknuté dva signály, difúzny a zrkadlový, sa môžu ďalej použiť na analýzu rotácie a charakterizáciu povrchu.

Kľúčové slová: vesmírny odpad, strojové učenie, spekulárne odrazy

# Abstract

Massive upper stages and non-functional spacecraft are investigated because they are potential future targets for the Active Debris Removal missions. The known attitude states and their evolution over time are essential for the planning of such mission. Rotation rates, as well direction of the rotation axis can be extracted by using different methodologies and observation methods. In this work we will be focusing on the analysis of the photometric series, referred to as light curves, which are consecutive measurements of brightness of the object over time acquired by ground-based telescope. Light curves contain a rich amount of information including the object's rotation properties, as well surface and size characteristics of the object. We expect two types of reflections for the sunlight, which is impacting the object, diffuse and specular (mirror-like). In the light curves the signal caused by diffuse reflection will appear as smooth curvature and usually it has two to four distinguished maxima during one rotation. For the signal caused by specular reflection, a glint, there is usually present one to multiple sharp maxima following shape of Lorentzian function. The time when such maxima appear can indicate the exact geometry given surface of the object had during glint, hence helps to estimate the rotation axis direction during time of observation. Additionally, presence of specular glints helps to characterize object's surface properties, especially for space debris object of unknown origin. The major task for the possible candidate will be to test different types of machine learning methods to identify efficiently and accurately the presence of specular glints in the space debris light curves. Used for training and validation purposes can be two different types of data sources, own photometric catalogue of space debris maintained by Division of Astronomy and Astrophysics (www.sdlcd.space-debris.sk) and

publicly available MMT catalog (mmt9.ru/satellites/). Additionally, once the specular glint is identified in the data set, it should be removed from the main signal, where both, the specular and the diffuse components could potentially be further used, e.g., for the attitude and surface characterization analysis.

### Keywords: space debris, machine learning, glints

# Obsah

1	Mo	tivácia		1
<b>2</b>	2 Úvod		3	
	2.1	Vesmí	rny odpad	3
		2.1.1	Definícia	3
		2.1.2	Obežné dráhy	4
		2.1.3	Trend	6
	2.2	2.2 Svetelné krivky		7
		2.2.1	AGO70	9
		2.2.2	Katalóg svetelných kriviek vesmírneho odpadu (SDLCD)	9
		2.2.3	katalóg Mini-Mega-TORTORA (MMT)	10
	2.3 Fourierová transformácia		11	
		2.3.1	Fourierová transformácia	12
		2.3.2	Diskrétna Fourierová transformácia	13
		2.3.3	Fourierové rady	13
3	Kla	sifikáci	a signálu metódami strojového učenia	15
	3.1 Random forest		16	
		3.1.1	Bootstrap agregácia	16
		3.1.2	Náhodnosť výberu príznakov	16
		3.1.3	Stavba stromov	17
		3.1.4	Agregácia predpovedí	17
		3.1.5	Odhad chyby mimo vzorky (Out-of-Bag)	17

# Zoznam obrázkov

2.1	typy obežných dráh.	6
2.2	Evolúcia počtu objektov podľa typu [7]	7
2.3	Evolúcia počtu objektov na jednotlivých orbitách [7]	7
2.4	Svetelná krivka so spekulárnymi zábleskami [4]	8
2.5	70cm ďalekohľad AGO v Modre	9
2.6	Fázový diagram svetelnej krivky objektu Titan 3C Transtage	
	$\rm R/B$ (74039C). Fotometrické merania boli získané teleskopom	
	AGO70 v noci 15.10.2017	10
2.7	monitorovací systém Mini-Mega-TORTORA	11

Zoznam tabuliek

# Kapitola 1

# Motivácia

Za viac ako 60 rokov vesmírnych aktivít sa na obežnej dráhe zeme nazbieralo obrovské množstvo nefunkčných a už viac nechcených objektov. Vesmírny odpad, ako tieto objekty nazývame, pozostáva predovšetkým z nefunkčných satelitov, použitých raketových stupňov a fragmentov z kolízií. So súčasným rastúcim trendom raketových štartov a misií nasadenia na orbitu sa počet objektov na orbite rapídne zväčšuje. Pravdepodobnosť kolízie sa tak stáva skutočnou hrozbou pre súčasne ale aj budúce misie. Možné riešenia už boli navrhnuté a mnohé objekty z populácie vesmírneho odpadu boli navrhnuté ako potenciálne ciele budúcich misií na odstránenie odpadu z obežnej dráhy okolo zeme. Kľúčovými pre plánovanie takýchto misií sú fotometrické série, nazývane svetelné krivky, zachytávajúce zmenu jasnosti objektu z časom. Svetelné krivky nám vedia odhaliť mnohé informácie o pozorovanom objekte vrátane jeho rotačných a povrchových vlastnosti. Príznačným javom pri fotometrických pozorovaniach sú zrkadlové odrazy, ktoré sú časté pre družice. Z ich prítomnosti môžeme okrem rotácie objektu získať aj dodatočné vlastnosti o jeho povrchu, čo vie byť veľmi dôležité pri neznámych objektoch.

V tejto práci sa zameriavame na tvorbu syntetických svetelných kriviek, ktoré realisticky modelujú správanie vesmírneho odpadu počas jednej rotačnej periódy. Hlavným cieľom je však vytvoriť model, ktorý pomocou vybraných metód strojového učenia dokáže identifikovať prítomnosť zrkadlových odrazov vo fotometrických krivkách vesmírneho odpadu.

Na natrénovanie modelu sa použijú syntetické svetelné krivky. Jeho sku-

točná úspešnosť však bude otestovaná na skutočných svetelných krivkách z verejných katalógov SDLCD a MMT. Okrem toho sa v práci venujeme aj dekonvolúcií difúzneho a sekulárneho signálu v svetelných krivkách ktoré obsahujú zrkadlové odrazy.

# Kapitola 2

# Úvod

### 2.1 Vesmírny odpad

V tejto sekcií sa v stručnosti pozrieme na problematiku vesmírneho odpadu. Uvedieme si, čo to je vesmírny odpad, kedy a ako vzniká, do akých kategórií sa delí a prečo pre nás predstavuje problém, ktorým sa má zmysel zapodievať.

#### 2.1.1 Definícia

Vesmírny odpad definujeme ako všetky človekom vytvorené objekty vrátane ich fragmentov, ktoré sa nachádzajú na obežnej dráhe zeme alebo spätne vstupujú do atmosféry, a ktoré už nie sú funkčné, resp. Už viacej nemajú účel [7].

Objekty vesmírneho odpadu môžeme rozdeliť do dvoch základných skupín. Prvou skupinou sú objekty, pre ktoré vieme spätne dohľadať kedy a kde boli vypustené na orbitu, a poznáme tak ich pôvod. Druhou skupinou sú tie, pre ktoré toto možne nie je. Objekty z druhej kategórie nazývame ako neidentifikované, zatiaľ čo objekty z prvej kategórie vieme podrobnejšie kategorizovať nasledovne [7]:

- Náklad, vesmírne objekty určené na vykonávanie špecifických úloh vo vesmíre s výnimkou štartu. Táto kategória zahŕňa prevádzkové satelity, ako aj tiež kalibračné objekty.
- Objekty súvisiace s nákladom misie resp. Objekty ktoré boli potrebné pre fungovanie nákladu a keď už viac neboli potrebné boli vypustené do

vesmíru. Typické príklady sú kryty optických zariadení, alebo nástroje astronautov.

- Zvyšky fragmentácie nákladu, ktorých vznik je možné dohľadať k jedinečným udalostiam. Jedná sa o objekty ktoré vznikli neúmyselným vypustením nákladu do vesmíru, predovšetkým pri explóziách alebo zrážkach.
- Zvyšky fragmentácie nákladu, ktorých vznik nie je jasný ale ich orbitálne alebo fyzikálne vlastnosti však umožňujú koreláciu zo zdrojom.
- Časti rakety, ktoré sú určené pre vykonávanie funkcií súvisiacich so štartom. Napríklad sa jedná o rôzne orbitálne stupne nosných rakiet.
- Objekty súvisiace s misiou rakety, objekty, ktoré slúžili pre fungovanie tela rakety a potom boli zámerne vypustené. Bežným príkladom sú kryty a motory.
- Telá rakiet, alebo ich časti, ktoré boli vypustené neúmyselne a ich pôvod je možné dohľadať k jedinečným udalostiam. Táto kategória zahŕňa aj objekty, ktoré vznikli pri výbuchu nosnej rakety.
- Telá rakiet, alebo ich časti, ktoré boli vypustené neúmyselne a ich pôvod nie je jasný ale ich orbitálne alebo fyzikálne vlastnosti však umožňujú koreláciu zo zdrojom.

### 2.1.2 Obežné dráhy

Po štarte bývajú satelity alebo vesmírne lode najčastejšie umiestnené na jednu z niektorých konkrétnych obežných dráh okolo zeme. Existuje mnoho faktorov, ktoré rozhodujú o tom, ktorá dráha by bola pre satelit najvhodnejšia, v závislosti od toho, čo má satelit dosiahnuť. Rozlišujeme nasledujúce typy obežných dráh [11]:

- Geostacionárna obežná dráha (GEO):
- Nízka obežná dráha (LEO):

- Stredne obežná dráha (MEO):
- Slnečnosústredená obežná dráha (SSO)
- Geostacionárna prechodová obežná dráha (GTO)
- Vysoko eliptická obežná dráha (HEO)

Satelity na geostacionárnej obežnej dráhe (GEO) obiehajú Zem nad rovníkom zo západu na východ po smere rotácie Zeme a pohybujú sa presne rovnakou rýchlosťou ako Zem. Vďaka tomu sa zo Zeme javia stacionárne. Aby sa dokonale prispôsobili rotácii Zeme, rýchlosť GEO satelitov by mala byť približne 3 km za sekundu vo výške 35 786 km, čo je oveľa ďalej od povrch v porovnaní s väčšinou satelitov. Na GEO sú umiestňované satelity, ktoré musia byť neustále nad jedným konkrétnym miestom nad Zemou, ako sú napríklad telekomunikačné satelity.

Nízka obežná dráha Zeme (LEO) je dráha, ktorá je relatívne blízko zemského povrchu. Normálne je v nadmorskej výške nie viac ako 1 000 km, čo je málo v porovnaní s inými obežnými dráhami. Na rozdiel od satelitov v GEO, satelity LEO nemusia vždy sledovať určitú cestu okolo Zeme rovnakým spôsobom. To znamená, že v LEO je viac dostupných trás pre satelity, čo je jeden z dôvodov, prečo je LEO veľmi bežne používanou obežnou dráhou. LEO najviac využívajú snímkovacie satelity, ktorým nízky vzdialenosť od povrchu umožňuje snímať obrázky s veľkým rozlíšením.

Stredná obežná dráha (MEO) zahŕňa širokú škálu obežných dráh kdekoľvek medzi LEO a GEO. Slnečnosústredená obežná dráha (SSO) je zvláštnym druhom polárnej dráhy. Satelity na tejto dráhe sa pohybujú nad polárnymi oblasťami, a sú synchrónne so slnkom. Geostacionárna prechodová obežná dráha (GTO) je, využívaná ako prechodová dráha. Nachádza sa voči ostatným dráham tak, aby prechod z nej bol čo najefektívnejší. Objekty na Vysoko eliptickej obežnej dráhe (HEO) majú typickú vlastnosť, že sa pohybujú veľmi rýchlo perigeu a spomalia pri prechádzaní apogeom.



Obr. 2.1: typy obežných dráh.

### 2.1.3 Trend

Za počiatok vesmírneho veku považujeme 4 Október 1957, kedy bol na obežnú dráhu vypustený prvý satelit Sputnik 1. Už od počiatku sa na orbite nachádzalo viac vesmírneho odpadu ako funkčných satelitov [7].

Za viac ako 60 rokov vesmírnych aktivít sa uskutočnilo viac ako 6050 štartov, ktoré viedli k vytvoreniu približne 56450 sledovaných objektov na obežnej dráhe, z ktorých asi 28160 stále zostáva vo vesmíre a je pravidelne sledovaných pomocou americkej vesmírnej sledovacej siete (US SSN) a udržiavaných v ich katalógu. Tento katalóg zahŕňa objekty veľkosti približne 5-10 cm na nízkej obežnej dráhe (LEO) a od 30 cm do 1 m na geostacionárnych (GEO) výškach. Len malý zlomok - približne 4000 - sú dnes nepoškodené, prevádzkyschopné satelity [9]. Na orbite sa však nachádza ďaleko viac malých objektov, ktoré kvôli svojej veľkosti nedokážu byť detegované a katalogizované. Odhaduje sa 130 miliónov objektov veľkosti od 1 mm do 1 cm a jeden milión objektov veľkosti od 1 cm do 10 cm [10].

Hlavným dôvodom prečo vesmírny odpad pre nás predstavuje problém je že by mohol naraziť do funkčných vesmírnych objektov, čím by okrem ich znefunkčnenia došlo aj k fragmentácií a vzniku ďalšieho vesmírneho odpadu. Na Obr. 2.2 môžeme vidieť ako sa s časom vyvíja počet sledovaných objektov vesmírneho odpadu na orbite. Môžeme si všimnúť, že trend s ktorým tento počet rastie je exponenciálny. Z rovnakým trendom tým pádom rastie aj pravdepo-



Obr. 2.2: Evolúcia počtu objektov podľa typu [7].



Obr. 2.3: Evolúcia počtu objektov na jednotlivých orbitách [7].

dobnosť kolízií.

### 2.2 Svetelné krivky

Svetelná krivka je graf, ktorý zobrazuje jas objektu za určité časové obdobie. Mieru jasnosti objektov vyjadrujeme pomocou hviezdnej veľkosti tzv. magnitúdy. Hodnoty magnitúdy nemajú jednotku. Stupnica je logaritmická a definovaná tak, že objekt s jasnosťou 1 magnitúda je presne 100-krát jasnejší ako objekt s jasnosťou 6 magnitúd. Teda pokles magnitúdy o jedna znamená približne 2.512 krát menšiu jasnosť pričom najjasnejšie objekty dosahujú záporne hodnoty. Astronómovia rozlišujú dve rôzne definície jasnosti: zdanlivú a absolútnu. Zdanlivá jasnosť popisuje jas objektu, pričom sa berie do úvahy vzdialenosť od pozorovateľa, zatiaľ čo pri absolútnej jasnosti sa berie do úvahy

Základom astronomickej fotometrie vesmírneho odpadu je zbierať slnečné svetlo odrazené od povrchu objektu smerom k pozorovateľovi alebo senzoru. Jas objektu sa mení v závislosti od vzdialenosti a vzájomnej geometrie definovanej fázovým uhlom. Fázový uhol je uhol medzi pozorovateľom, objektom a slnkom. To ako je objekt jasný v konkrétnom okamihu silne súvisí s jeho vzdialenosťou, prierezom C, odrazovými vlastnosťami a ďalšími povrchovými vlastnosťami ako je drsnosť a pórovitosť [13]. V zásade sa očakávajú dva typy odrazov slnečného žiarenie od pozorovaných objektov:

- difúzny
- zrkadlový

Zrkadlové odrazy sú tie, ktoré bežne asociujeme s vysoko lesklými povrchmi akým je napríklad práve zrkadlo. Väčšina povrchov vesmírneho odpadu má však istý level drsnosti povrchu, takže pozorované odrazy sú kompozíciou odrazov od mnohých malých plôšok orientovaných rožnými smermi. Takéto správanie je popísané Lambertovou distribúciou. Vo všeobecnosti povrchová odrazivosť môže byť komplexnejšia ako len kombinácia zrkadlovej a difúznej zložky, avšak táto kombinácia vie byť veľmi dobrou aproximáciou [1].



Obr. 2.4: Svetelná krivka so spekulárnymi zábleskami [4].





Obr. 2.5: 70cm ďalekohľad AGO v Modre

### 2.2.1 AGO70

AGO70 je 70cm Newtonovský ďalekohľad, ktorý sa nachádza v Astronomickom a geofyzikálnom observatóriu AGO v Modre. Systém prevádzkuje a vlastní Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave. Má niekoľko paralelných vedeckých programov s primárnym zameraním na charakterizáciu vesmírneho odpadu od nízkych obežných dráh (LEO) až po dráhy vo vysokých nadmorských výškach ako sú HEO a GEO. Ďalekohľad má nasledujúce parametre [8]:

Dizajn ďalekohľadu	Newtonovský
Montáž	rovníková
Kamera	CCD
Veľkosť pixela $[\mu m]$	24
Rozmery [pix]	$1024 \ge 1024$
Hlavné zrkadlo [mm]	700
Ohnisková vzdialenosť [mm]	2962
Ohniskový pomer	f/4.2
Zorné pole [arc-min]	28.5 x 28.5
Okamžité zorné pole [arc-sec/pix]	1.67

## 2.2.2 Katalóg svetelných kriviek vesmírneho odpadu (SDLCD)

Z pozorovaní na observatóriu AGO v Modre vytvorila Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave katalóg svetelných kriviek vesmírneho odpadu. Hlavným inštrumentom pre vznik tohto katalógu boli práve pozorovanie z ďalekohľadu AGO70. Katalóg poskytuje archív zdanlivých rotačných periód vybraných objektov a ich vývoj v čase. K dispozícii sú aj ďalšie informácie ako je fázové diagramy a ich amplitúdy alebo odrazové vlastnosti pozorovaných objektov. Katalóg svetelných kriviek sa ďalej používa na fotometriu BVRI a určenie vzdialenosti. V Apríli 2020 obsahoval katalóg 543 svetelných kriviek pre 356 objektov [13].

74039C\_20171015\_R\_2\_3\_4



Obr. 2.6: Fázový diagram svetelnej krivky objektu Titan 3C Transtage R/B (74039C). Fotometrické merania boli získané teleskopom AGO70 v noci 15.10.2017

### 2.2.3 katalóg Mini-Mega-TORTORA (MMT)

V tejto práci budeme okrem dát z SDLCD pracovať aj zo svetelnými krivkami z verejného katalógu MMT. Mini Mega Tortora (MMT) je širokopásmový monitorovací systém s deviatimi kanálmi na optické pozorovanie oblohy. Namontovaný je v pároch na piatich stojanoch a je ovládaný Špeciálnym astrofyzikálnym observatóriom Ruskej akadémie vied. Výskum a pozorovania sú zamerané na detegovanie meteorických udalostí a sledovanie satelitov. Systém je umiestnený na Kaukaze a je schopný zachytiť objekty s úrovňou jasu až do 10 magnitúdy. Pri pozorovaniach je použitý expozičný čas 0.1 sekundy, výsledná svetelná krivka je následne spracovaná a publikovaná v online MMT katalógu. Každý záznam v katalógu obsahuje [13]:

• Svetelné krivky v štandardnej a zdanlivej magnitúde

- Vzdialenosť
- Graf zmeny fázového uhla
- Periódu svetelnej krivky

Všetky odpozorované objekty sú tiež kategorizované podľa typu na [13]:

- Aktívne vesmírne lode
- Nefunkčné vesmírne lode
- Kozmické lode bez špecifikácie o funkčnosti
- Raketové stupne
- Fragmenty po štarte
- Fragmenty z deštrukcie
- Fragmenty bez špecifikácie vzniku

Katalóg v súčasnosti obsahuje 479015 záznamov a 13886 jedinečných objektov. Katalóg neobsahuje chyby meraní a údaje o ruských objektoch, tie sú prístupné iba na vyžiadanie.



Obr. 2.7: monitorovací systém Mini-Mega-TORTORA

### 2.3 Fourierová transformácia

Fourierova transformácia je významná matematická operácia používaná pri spracovaní a analýze signálu. Jej význam spočíva v transformovaní signálu z časovej oblasti do frekvenčnej oblasti. Umožňuje nám vyjadriť funkciu ako súčet sínusových zložiek, čím sa odhalí frekvenčný obsah pôvodnej funkcie. Fourierová transformácia má množstvo využití pri spracovaní svetelných kriviek. Medzi hlavné z nich patria:

- Detekcia periody Transformáciou svetelnej krivky do frekvenčnej oblasti dokážu astronómovia ľahko identifikovať dominantné frekvencie a odhaliť tak prítomnosť periodických javov. To je rozhodujúce pri detekcií rotačnej periody.
- Odstránenie šumu Svetelné krivky môžu byť často zašumené. Pomocou Fourierovej transformácie môžeme oddeliť šum od signálu tým že sa zameriame na dominantné frekvencie.
- Kompresia údajov V niektorých prípadoch možno Fourierovú transformáciu použiť aj na kompresiu údajov. Namiesto ukladania celej svetelnej krivky, ktorá môže pozostávať aj s tisícok bodov, si vieme uložiť vybraný počet frekvencií, ktoré tvoria podstatu signálu.

#### 2.3.1 Fourierová transformácia

Spojitú Fourierovú transformáciu definujeme nasledovne:

$$\hat{f}(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i x \xi} dx$$

Tento vzorec popisuje transformáciu signálu v časovej doméne f(t) do frekvenčnej domény, reprezentovanej  $F(\Omega)$  vzhľadom na uhlovú frekvenciu  $\Omega$ . Inverzná operácia, ktorá obnovuje pôvodný signál z jeho frekvenčnej reprezentácie, sa vykonáva prostredníctvom inverznej Fourierovej transformácie:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \cdot e^{j2\pi ft} \, df$$

### 2.3.2 Diskrétna Fourierová transformácia

Pre diskrétne signály vzorkované v diskrétnych časových intervaloch, akými sú aj svetelné krivky, sa používa diskrétna Fourierova transformácia (DFT):

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$$

Tu X[k] predstavuje DFT sekvencie x[n] pri frekvenčnom indexe k a N je celkový počet vzoriek. Pôvodný signál vieme získať pomocou inverznej DFT:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] \cdot e^{j\frac{2\pi}{N}kn}$$

### 2.3.3 Fourierové rady

Fourierové rady sú matematický nástroj, ktorý nám umožňuje aproximovať periodickú funkciu sumou série trigonometrických funkcií, spravidla sínusov a kosínusov. Myšlienka Fourierovho radu je založená na princípe, že každá periodická funkcia môže byť aproximovaná súčtom nekonečného počtu sínusových a kosínusových funkcií s rôznymi frekvenciami. Tieto frekvencie sú celočíselnými násobkami základnej frekvencie pôvodnej periodickej funkcie. Všeobecná rovnica Fourierového radu periodickej funkcie f(x) s periódou T je daná nasledovne:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos\left(\frac{2\pi nx}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nx}{T}\right) \right]$$

 $a_0$  je priemerná hodnota funkcie za jednu periódu.  $a_n$  and  $b_n$  sú koeficienty, ktoré určujú amplitúdy kosínusového a sínusového členu, a sú vypočítane podľa nasledujúcich vzorcov:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cos\left(\frac{2\pi nx}{T}\right) dx$$
$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \sin\left(\frac{2\pi nx}{T}\right) dx$$

Po aplikovaní Fourierovej transformácie a identifikácii dominantných frekvencií možno použiť Fourierovu sériu na reprezentáciu pôvodnej svetelnej krivky v zmysle týchto frekvencií. Pri spracovaní dát do katalógu SDLCD boli použité Fourierové rady 8 rádu [13]. To znamená že jednotlivé svetelné krivky vieme reprezentovať ako 8 dvojíc sínus plus kosínus, ktoré majú rôzne periódy.

# Kapitola 3

# Klasifikácia signálu metódami strojového učenia

Klasifikácia signálu vie byť komplexná úloha, najmä v oblastiach, ako sú komunikácia, zdravotníctvo či astrofyzika. Problémy vznikajú v dôsledku prirodzenej povahy signálov, ktorými sú:

- Šum Signály sú často kontaminované šumom, ktorý môže byť spôsobený okolitým prostredím alebo chybami meracích prístrojov.
- Vysoká dimenzionalita Mnohé signály, ako sú časové rady alebo spektrogramy sa môže skladať z veľkého množstva bodov. Efektívne spracovanie datasetov obsahujúcich takéto signály môže predstavovať výzvu.
- Časové a priestorové závislosti Signály, najmä vo forme časových radov, majú sekvenčné závislosti. Štandardné algoritmy strojového učenia tieto vzťahy nemusia zachytiť.
- Nerovnováha tried Určité triedy signálov môžu byť nedostatočne zastúpené, čo vedie k skresleným predpovediam. Toto je obzvlášť problematické pri aplikáciách, ako je detekcia porúch alebo anomálií, kde je dôležité odhaliť zriedkavé udalosti.

Algoritmy strojového učenia sú v posledných rokoch hojne využívane v oblasti klasifikácie signálu a v mnohých ďalších. Obzvlášť populárnym sa vďaka svojej úspešnosti pri klasifikácií signálu stalo súborové učenie. Súborové učenie zahŕňa kombináciu predpovedí viacerých jednotlivých modelov s cieľom zlepšiť celkový výkon a robustnosť.

## 3.1 Random forest

Náhodný les, alebo náhodný rozhodovací les je súborová metóda strojového učenia vhodná pre klasifikáciu, regresiu a iné úlohy. Spomedzi ostatných metód sa javí byť na úlohu klasifikácie svetelných kriviek najideálnejšia [12]. Princíp tejto metódy spočíva vo vytvorení viacerých rozhodovacích stromov počas trénovania. Celkový výsledok je trieda, ktorá bola zvolená najväčším počtom rozhodovacích stromov pri klasifikácií, alebo priemerná hodnota predikcií rozhodovacích stromov pri regresií.

Vo všeobecnosti, Stromy ktoré sú veľmi hlboké, majú tendenciu učiť sa veľmi nepravidelné vzory. Pretrénujú svoje tréningové dáta, čo znamená, že majú nízky bias, ale veľmi vysoký rozptyl. Náhodné lesy predstavujú spôsob, ako spriemerovať výstupy viacerých hlbokých rozhodovacích stromov, ktoré sú trénované na rôznych častiach tej istej trénovacej množiny, s cieľom znížiť rozptyl. Toto je však spojené s miernym zvýšením biasu a určitou stratou interpretovateľnosti, v konečnom výsledku však výrazne zlepšuje výkonnosť výsledného modelu.

### 3.1.1 Bootstrap agregácia

Bootstrapping je metóda založená na výbere náhodných vzoriek zo vstupných údajov, na ktorých sa trénuje konkrétny model strojového učenia. Každá vzorka sa vyberá s opakovaním, čo znamená, že niektoré dátové body sa môžu vo vzorke objaviť viackrát, zatiaľ čo iné vôbec. Na začiatku teda každý strom dostane svoju vlastnú jedinečnú trénovaciu množinu, na ktorej bude natrénovaný.

#### 3.1.2 Náhodnosť výberu príznakov

Pri zostavovaní každého stromu sa na každom uzle vyberá náhodná podmnožina príznakov. Táto náhodnosť zaručuje, že jednotlivé stromy budú menej korelované a tiež sa znižuje riziko pretrénovania na špecifické príznaky.

#### 3.1.3 Stavba stromov

Každý rozhodovací strom sa trénuje na svojej bootstrap vzorke, a nezávisle od ostatných. V každom uzle strom hodnotí najlepší bod rozdelenia na základe kritéria, ako je entropia (pre klasifikáciu), resp. redukcia rozptylu (pre regresiu). Stromy sa vytvárajú do plnej hĺbky alebo kým nie je splnená ukončovacia podmienka, napr. minimálny počet vzoriek v liste stromu.

### 3.1.4 Agregácia predpovedí

Po tréningu všetkých stromov sa predikcie agregujú na vytvorenie konečného výstupu. Pri klasifikačných úlohách sa používa väčšinové hlasovanie, zatiaľ čo pri regresii sa počíta priemer výstupov.

### 3.1.5 Odhad chyby mimo vzorky (Out-of-Bag)

Na odhad presnosti modelu algoritmus využíva dátové body, ktoré neboli vybraté do žiadnej bootstrap vzorky. Vďaka tomu môžeme spoľahlivo overiť presnosť modelu bez nutnosti vytvárania samostatnej validačnej množiny. Kapitola 4

Návrh a implementácia

# Literatúra

- J. Africano, P. Kervin, Doyle Hall, P. Sydney, J. Ross, Tamara Payne, S. Gregory, K. Jorgensen, Kandy Jarvis, Tracy Parr, G. Stansbery, and Edwin Barker. Understanding photometric phase angle corrections. *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP*, 587:141, 07 2005.
- [2] Andrew D. Dianetti and John L. Crassidis. Light Curve Analysis Using Wavelets.
- [3] Yuchen Jiang, Shaoming Hu, Junju Du, Xu Chen, Hai Cao, Shuqi Liu, and Shuai Feng. Inversion of Space Debris Material by Synthetic Light Curves. Aerospace, 10(1):41, January 2023.
- [4] N. Koshkin, E. Korobeynikova, L. Shakun, S. Strakhova, and Z.H. Tang. Remote sensing of the envisat and cbers-2b satellites rotation around the centre of mass by photometry. *Advances in Space Research*, 58(3):358–371, 2016.
- [5] Tong Liu and K. Ulrich Schreiber. Photometric space object classification via deep learning algorithms. Acta Astronautica, 185:161–169, 2021.
- [6] Yuri Matsushita, Ryohei Arakawa, Yasuhiro Yoshimura, and Toshiya Hanada. Light curve analysis and attitude estimation of space objects focusing on glint. 12 2019.
- [7] ESA Space Debris Office. Esa's annual space environment report, 2023.
- [8] J. Silha, S. Krajcovic, M. Zigo, J. Toth, L. Kornos, P. Zigo, J. Simon,
  S. J. Setty, T. Flohrer, and B. Jilete. AGO70 Telescope, Slovak Optical

System for Space Debris Research, Surveillance, and SLR Tracking Support. In *First International Orbital Debris Conference*, volume 2109 of *LPI Contributions*, page 6034, December 2019.

- [9] The Europe space agency (ESA). About space debris. https:// www.esa.int/Space\_Safety/Space\_Debris/About\_space\_debris, Accessed: 2.1.2024.
- [10] The Europe space agency (ESA). Space debris by the numbers. https://www.esa.int/Safety\_Security/Space\_Debris/Space\_ debris\_by\_the\_numbers, Accessed: 2.1.2024.
- [11] The Europe space agency (ESA). Types of orbits. https://www.esa.int/ Enabling\_Support/Space\_Transportation/Types\_of\_orbits, Accessed: 2.1.2024.
- [12] Pelin Yildirim, Kökten Ulaş Birant, Vladimir Radevski, Alp Kut, and Derya Birant. Comparative analysis of ensemble learning methods for signal classification. In 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), pages 1–4, 2018.
- [13] Šilha J., Zigo M., Hrobár T., Jevčák P., and Verešvárska M. Light curves application to space debris characterization and classification. In 8th European Conference on Space Debris, 2021.