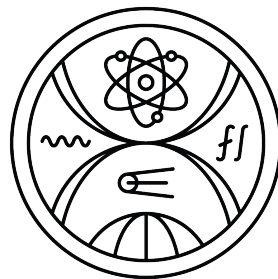


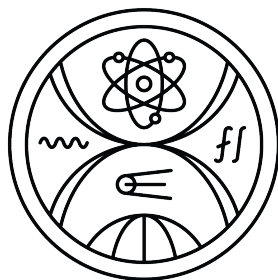
UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE  
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY



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

Diplomová práca

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.



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*

**Anotácia:** Masívne horné raketové stupne a nefunkčné satelity, ktoré sú súčasťou populácie kozmického odpadu, sa skúmajú nakoľko sú potenciálnymi cieľmi budúcich misií 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 odrazov 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 signál 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 majú 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 spôsobom je možné 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 tréningovanie 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](http://www.sdlcd.space-debris.sk)) a verejný katalóg MMT ([mmt9.ru/satellites/](http://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

---

**Cieľ:** Prehľad metód strojového učenia aplikovateľných na daný problém. Aplikácia vybraných metód na identifikáciu prítomnosti zrkadlových odrazov vo fotometrických krivkách kozmického odpadu. Tvorba syntetických tréningových svetelných kriviek s použitím Gaussovej a Lorentzovej funkcie. Využitie reálnych pozorovaní na dotréningovanie 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

# Pod'akovanie

# Abstrakt

Masívne horné raketové stupne a nefunčné satelity, ktoré sú súčasťou populácie kozmického odpadu, sa skúmajú nakoľko sú potenciálnymi cieľmi budúcich misií 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 odrazov 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 signál 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 majú 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 spôsobom je možné 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 tréning 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](http://www.sdlcd.space-debris.sk)) a verejný katalóg MMT ([mmt9.ru/satellites/](http://mmt9.ru/satellites/)). Okrem toho, ak náhle 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](http://www.sdlcd.space-debris.sk)) and

publicly available MMT catalog ([mmt9.ru/satellites/](http://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

<b>1</b>	<b>Motivácia</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Úvod</b>	<b>3</b>
2.1	Vesmírny odpad . . . . .	3
2.1.1	Definícia . . . . .	3
2.1.2	Trend . . . . .	4
2.2	Svetelné krivky . . . . .	6
2.3	Fourierová transformácia . . . . .	7
2.3.1	Spojité Fourierová transformácia . . . . .	7
2.3.2	Diskrétna Fourierová transformácia . . . . .	8

# Zoznam obrázkov

2.1	Evolúcia počtu objektov podľa typu [? ]. . . . .	5
2.2	Evolúcia počtu objektov na jednotlivých orbitách [? ]. . . . .	5
2.3	Svetelná krivka so spekulárnymi zábleskami [? ]. . . . .	7

# 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 vlastností. 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 natréňovanie 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 sekcii 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 [? ].

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 [? ]:

- 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.

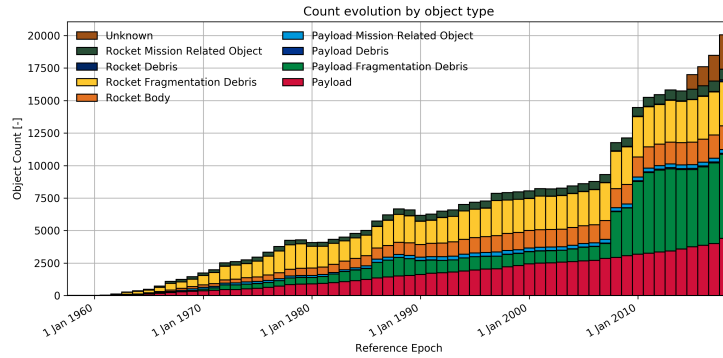
- Zvyšky fragmentácie nákladu, ktorých vznik je možné dohľadať k jedinečným udalostiam. Jedná sa o objekty ktoré vznikli neúmyselným vypustením nákladu do vesmíru, predovšetkým pri explóziách alebo zrážkach.
- Zvyšky fragmentácie nákladu, ktorých vznik nie je jasný ale ich orbitálne alebo fyzikálne vlastnosti 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 Trend

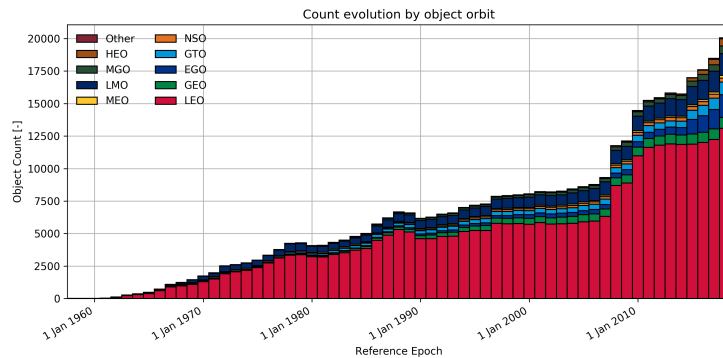
Za počiatok vesmírneho veku považujeme 4 Október 1957, kedy bol na obežnú dráhu vypustený prvý satelit Sputnik 1. Už od počiatku sa na orbite nachádzalo viac vesmírneho odpadu ako funkčných satelitov [? ].

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 [? ]. 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 [? ].



Obr. 2.1: Evolúcia počtu objektov podľa typu [? ].



Obr. 2.2: Evolúcia počtu objektov na jednotlivých orbitách [? ].

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. 2.1 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 pravdepodobnosť kolízií.

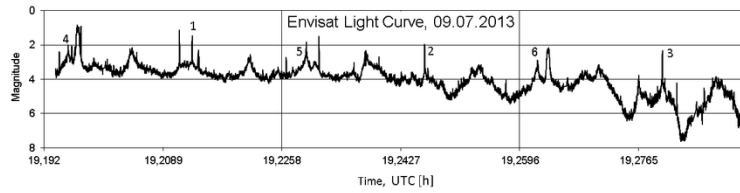
## 2.2 Svetelné krivky

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 štandardizovaná vzdialenosť.

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 [?]. 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 [?].



Obr. 2.3: Svetelná krivka so spekulárnymi zábleskami [? ].

## 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 periódy - Transformáciou svetelnej krivky do frekvenčnej oblasti dokážu astronómovia ľahko identifikovať dominantné frekvencie a odhaliť tak prítomnosť periodických javov. To je rozhodujúce pri detekciách rotačnej periódy.
- 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 Spojitá Fourierová transformácia

Spojité 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 diskkrétne signály vzorkované v diskrétnych časových intervaloch 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:

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

# Literatúra

- [1] 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] P. Duhamel and M. Vetterli. Fast fourier transforms: A tutorial review and a state of the art. *Signal Processing*, 19(4):259–299, 1990.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Tong Liu and K. Ulrich Schreiber. Photometric space object classification via deep learning algorithms. *Acta Astronautica*, 185:161–169, 2021.
- [7] Yuri Matsushita, Ryohei Arakawa, Yasuhiro Yoshimura, and Toshiya Hanada. Light curve analysis and attitude estimation of space objects focusing on glint. 12 2019.
- [8] ESA Space Debris Office. Esa’s annual space environment report, 2023.

- [9] The Europe space agency (ESA). About space debris. [https://www.esa.int/Space\\_Safety/Space\\_Debris/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](https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers), Accessed: 2.1.2024.
- [11] 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.