

# **J2-9251 - M3Sat - Metodologija analize časovnih vrst satelitskih posnetkov različnih senzorjev**

**Povzetek opravljenega dela**

**Tatjana Veljanovski<sup>1</sup>, Bujar Fetai<sup>2</sup>, Matej Račič<sup>2</sup> in Krištof Oštir<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Znanstveno raziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti

<sup>2</sup>Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Avgust 2022

Študija je bila delno financirana s sredstvi Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije in sicer raziskovalnega projekta št. J2-9251. Stališča, izražena v tem dokumentu, nikakor ne morejo odražati uradnega mnenja financerja.

## Povzetek

Analiza časovnih vrst satelitskih posnetkov je trenutno glavni izziv na področju daljinskega zaznavanja in opazovanja Zemlje. Razpoložljivost satelitskih posnetkov in olajšan dostop do njih sta skupaj z vse večjimi računalniškimi zmogljivostmi privedla do znatne rasti pristopov, ki obdelujejo satelitske posnetke z metodami časovnih vrst. Možnost pridobivanja novih informacij in ugotavljanja prostorsko-časovnih vzorcev je spodbudila razvoj metod za ustvarjanje časovnih vrst in za analizo na podlagi podatkov iz enega ali več senzorjev. Vendar se časovna, spektralna, radiometrična in prostorska ločljivost med satelitskimi posnetki zelo razlikuje. Zato velika količina prosto dostopnih, vendar raznolikih satelitskih podatkov predstavlja številne izzive za raziskave.

Analiza časovnih vrst zahteva obdelavo več sto ali celo več sto tisoč satelitskih posnetkov. Kljub tehnološkemu napredku se obdelava še vedno sooča s številnimi težavami. Pri številnih aplikacijah je zaradi redkejšega zajema satelitskih podatkov in pogoste pokritosti z oblaki treba združevati podatke iz različnih misij, kot sta Sentinel (optični ali radarski) ali PlanetScope. Analize je mogoče z uporabo orodij za združevanje podatkov močno izboljšati, če ustrezno rešimo izzive harmonizacije časovnih vrst (tj. radiometrične skladnosti, povezanosti in doslednosti podatkov).

Za ustrezno analizo pojavov na Zemljinem površju je treba zagotoviti umerjene in konsistentne satelitske podatke. Cilj projekta je bil oceniti obstoječe postopke za analizo časovnih vrst, vključno z vplivom značilnosti podatkov časovnih vrst (radiometrične značilnosti in gostota) na analizo in uporabo časovnih vrst. Za doseganje glavnega cilja smo v projektu opredelili pet ciljev: razvoj generičnih metod za med-senzorsko usklajevanje podatkov, harmonizacija podatkov različnih senzorjev v enotno, dolgo in gosto časovno vrsto, prehod na množično obdelavo podatkov v oblaku, sistematično vrednotenje najnovejših algoritmov analize časovnih vrst ter opazovanje izbranih dogodkov in pojavov v Sloveniji.

V projektu smo se osredotočili na med-senzorsko usklajevanje, oblikovanje časovnih vrst ter oceno najbolj kritičnih točk pri prostorsko-časovnih analizah. Pomembni rezultati projekta so naslednji.

Najobsežnejša knjižnica satelitskih posnetkov Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat in PlanetScope za Slovenijo.

Postopki za pripravo in različne časovne vrste satelitskih podatkov, eno-senzorske, več-senzorske, kombinirane.

Programska knjižnica satimagets – razvili smo metodo in programsko kodo za splošni postopek združevanja in kalibracijo optičnih podatkov.

Izdelane časovne vrste in algoritme za obdelavo časovnih vrst smo implementirali in vrednotili na sedmih študijskih primerih.

V projektu smo izvedli mnogo preizkusov in z njimi pridobili dragocen vpogled v zmogljivosti harmonizacije satelitskih podatkov, v uporabnost časovnih vrst kot tudi v izzive in smeri razvoja novih pristopov v analizi časovnih vrst, ki ostajajo za nadaljnje raziskave.

## Metodologija

Program dela smo oblikovali glede na pet postavljenih raziskovalnih ciljev (C), ki smo jih obravnavali v delovnih sklopih (DS). Delovni sklopi za raziskavo so bili: DS1 Zbiranje podatkov in analiza postopkov združevanja več signalov in kalibracije, DS2 Izdelava dolgih in gostih časovnih vrst, DS3 Analiza časovnih vrst in DS4 Vrednotenje metodologije obdelave časovnih vrst za izbrane aplikacije.

**C1 Razvoj generičnih metod za med-senzorsko usklajevanje podatkov (DS 1.1 - 1.5).** Za doseg tega cilja smo zbrali in analizirali lastnosti podatkov različnih satelitskih senzorjev ter izdelali združene ali kalibrirane podatkovne nize.

Vzpostavili in uredili smo najboljšo zbirko satelitskih posnetkov Slovenije, ki vključuje posnetke različnih satelitskih misij: Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat 5-8 in PlanetScope (DS 1.1). Zbirka vsebuje vse razpoložljive posnetke, in sicer Sentinel-1 od leta 2014, Sentinel-2 od leta 2015, posnetke Landsat 5-8 od leta 1984 in PlanetScope od 2017. Satelitski posnetki Sentinel in Landsat pokrivajo celotno ozemlje Slovenije, PlanetScope pa le izbrana območja. Za shranjevanje, upravljanje in dostop do te velike količine podatkov (skupaj z različnimi produkti 26,8 TB) smo preizkusili zmogljivost baze podatkov, ki temelji na PostgreSQL in PostGIS.

Pripravili smo postopke za pregled in izdelavo statističnih povzetkov časovnih vrst na letni ravni (DS 1.2). Pri tem zbiramo podatke o številu vseh opazovanj, deležu neuporabnih podatkov, gostoti časovne vrste, največji časovni vrzeli [1]. Ker je pri uporabi satelitskih posnetkov ravnanje z neuporabnimi podatki (manjkajoče vrednosti, oblaki, sence oblakov) kritično za skoraj vse aplikacije, smo razvili in uvedli postopek, ki za vse podatke Sentinel-2 izračuna dodatno masko kakovosti in omogoča natančnejši opis neuporabnih vrednosti na posnetku in v časovni vrsti [1]. Za ostale podatke uporabimo maske, ki jih zagotavljajo ponudniki.

Vzpostavili smo okolje, ki s portala Copernicus Open Access Hub dnevno prenaša nove satelitske posnetke, te nato z lastno razvitimi postopki pripravimo za grajenje časovnih vrst (DS 1.3). Optične satelitske posnetke obdelamo z lastno procesno verigo STORM. Rešitev opravi tudi atmosferske popravke in izračuna izboljšano masko oblakov [1] ter poskrbi za združevanje posnetkov istih preletov [2, 3]. Tudi za radarske posnetke smo razvili in ovrednotili lastno procesno verigo [4, 5].

Rezultat zgornjih postopkov so bile konsistentno predobdelane in urejene časovne vrste satelitskih posnetkov za podatke satelitov Sentinel-2 in Sentinel-1, opremljene z dodatnimi podatki o uporabnih vrednostih in izračunanimi pripadajočimi produkti. Za posnetke PlanetScope in Landsat smo opravili samo del obdelav ter zagotovili omejen nabor indeksov.

**C2 Harmonizacija podatkov različnih senzorjev v enotno, dolgo in gosto časovno vrsto (DS 1.4 - 1.5, DS 2.1 - 2.3).** Pripravili smo različne in daljše časovne vrste harmoniziranih, tj. radiometrično skladnih in časovno zgoščenih satelitskih podatkov za analize.

Glavno raziskovalno vprašanje projekta je bilo ali je mogoče različne vire optičnih satelitskih podatkov usklajevati z generičnim postopkom (DS 1.4, DS 2.1). Ta cilj smo dosegli, razvili smo splošen (generičen) postopek za prostorsko-časovno radiometrično kalibracijo in harmonizacijo optičnih podatkov (DS 2.2) [6]. Analize postopka harmonizacije in vrednotenja smo opravili s podatki Sentinel-2 in PlanetScope za štiri izbrana območja, in sicer Kranj, Izolo, Jesenice in Radence za obdobje 2017 – 2019 (DS 1.5, DS 2.3) [7]. Vira satelitskih posnetkov smo uspešno združili tako na ravni spektralnih kanalov kot na ravni produkta (vegetacijski indeks NDVI). Postopek posnetke med seboj usklajuje tako, da določi parametre regresijskih premic njihovih grafov raztrosa, s katerimi nato modificira podatke PlanetScope. Po harmonizaciji so se vrednosti rastrov PlanetScope in Sentinel-2 ujemale.

Za opisani postopek smo razvili novo programsko knjižnico, sestavljeno iz več funkcij, od predobdelave do harmonizacije večsenzorskih satelitskih posnetkov. Razvita knjižnica *satimagets* je odprtokodna ter objavljena na platformi GitHub [6].

Rezultat so časovne vrste satelitskih podatkov, ki so gostejše in hkrati homogene. Izdelali smo časovne vrste tako na rastrskih podatkih (pikslih) kot na vektorskih podatkih (poligonih). Ker

harmonizacije nismo mogli izvesti na vseh rastrih (nekateri rastrski podatkovni sloji niso imeli parov ali pa so imeli previsoko oblačnost), smo za vmesne rastre parametre harmonizacije interpolirali. Ustvarjene časovne vrste smo časovno gladili, pri tem smo testirali različne tehnike, kot najbolj uspešni sta se izkazali metodi Whittaker-Eilers in Savitzky-Golay [7].

**C3 Prehod na množično obdelavo podatkov v oblaku (DS 2.4).** Obsežni in raznoliki satelitski podatki so privedli do problema masovnih podatkov (big data), ki zahteva nove pristope obdelave, vključno z obdelavo v oblaku. Za prehod je nujna uporaba robustne platforme in razvoj novih pristopov procesiranja.

V okviru projekta smo veliko količino satelitskih posnetkov različnih senzorjev delno ali v celoti obdelovali v oblaku. To je pripomoglo k učinkoviti izmenjavi podatkov, dostopu do podatkov in manipulaciji s podatki. Predobdelavo deloma izvajamo na storitvi Sentinel Hub. Programska koda satimagets je kot vhod uporabljala podatke lokalnega procesnega strežnika, medtem ko sta računanje in obdelava potekala deloma na namiznem deloma v lokalnem procesnem strežniku. Preizkusili smo tudi obdelave z globokim učenjem prek oblačne platforme Google Colaboratory in ugotovili, da je le ta primerna za manjše količine podatkov [8].

**C4 Sistematično vrednotenje najnovejših algoritmov analize časovnih vrst (DS 3.1 - 3.4).** Vrednotili smo vpliv priprave podatkov časovnih vrst in lastnosti časovnih vrst v izbranih analizah časovnih vrst ter za aplikacije opravljene v C5.

Testirali in ovrednotili smo delovanje in odpornost algoritmov za analizo časovnih vrst v odvisnosti od dolžine in gostote časovnih vrst, izbrane enote opazovanja (piksel, poligon) in vrste satelitskih podatkov (optični, radarski), prostorske ločljivosti posnetkov (visoko in zelo visoko ločljivi).

Dokazali smo zanesljivost orodja BFAST za določanje neupravičene rabe poljščin in trajnega travinja v odvisnosti od dolžine in gostote časovne vrste [9]. V nasprotju s priporočili uporabe modela BFAST smo pokazali, da je časovna vrsta za medletno razpoznavo proučevanih anomalij lahko tudi kratka (dve, tri rastne sezone). Preverili smo tudi orodje dtwSat za klasifikacijo pokrovnosti in določanje medletnih sprememb, in sicer na primeru reke Mure. Rezultati so bili dobri le v primeru obravnave več osnovnih razredov pokrovnosti, pri tem pa na gostoto časovne vrste model ni občutljiv. Orodje TimeSat smo testirali na primeru določitve osnovnih fenoloških faz. Orodje zahteva regularno (pravilno) časovno vrsto, z enakomernim intervalom, a kljub preureditvi časovne vrste rezultati niso bili smiselni in jih ni bilo mogoče povezati z referenčnimi podatki o fenofazah.

Opravili pa smo tudi klasifikacijo kmetijskih površin (vrste poljščin) [10] ter klasifikacijo travinja (intenzivna, ekstenzivna raba) [11] s strojnim učenjem, z modelom Random Forest. Gre za različna primera klasifikacije, pri obeh sta časovna vrsta in kakovosten učni vzorec ključnega pomena. Ugotovili smo, da mesečni podatek o stanju zadošča za osnovno klasifikacijo poljščin in rabe travnikov [10]. Medtem, ko za določanje specifičnih atributov, npr. število in čas košenj na travinju, potrebujemo bistveno večjo gostoto podatkov (tedenski interval), ki pa je samo z enim virom optičnih podatkov ne moremo zagotoviti [11, 12]. Testirali smo tudi odpornost klasifikatorja na enoto kartiranja, oba modela, razvita za obdelavo poligonov, sta dala primerljive rezultate tudi na ravni obdelave po posameznih pikslih [12]. To dokazuje dobro prenosljivost in robustnost obeh modelov, vendar pa je obdelava na pikslih računsko bistveno bolj potratna.

Klasifikacijo pokrovnosti v osnovne razrede smo izvedli tudi na mesečni časovni vrsti zelo visoko ločljivih podatkov PlanetScope, z modelom globokega učenja U-Net [13]. Študija je pokazala, da bi natančnost klasifikacije izboljšali z gostejšo časovno vrsto in prilagodljivostjo učenja letnim časom.

Pri vseh primerih je bila ključna priprava prečiščene časovne vrste. Dokler iz časovne vrste nismo odstranili neveljavnih vrednosti, algoritmi niso zagotavljali želenih rezultatov.

Z opravljenim sistematičnim vrednotenjem in navzkrižnimi primerjavami (različne vhodne časovne vrste, različne aplikacije časovnih vrst), smo pridobili zelo dober vpogled v pomanjkljivosti in omejitve ter poglobili razumevanje možnosti za praktično uporabo.

**C5 Opazovanje izbranih dogodkov in pojavov v slovenskem prostoru (DS 4.1 - 4.2).** Lastnosti vhodnih časovnih vrst smo z obstoječo lastno in tujo odprtokodno programsko opremo preverili za različne uporabe in namene.

Pripravljeni časovne vrste smo uporabili v več aplikacijah, in sicer: določanje neupravičene rabe poljščin in trajnega travinja, klasifikacija pokrovnosti in določanje medletnih sprememb, določanje osnovnih fenoloških faz, klasifikacija kmetijskih površin ter klasifikacija rabe travinja, določanje in štetje košenj na travnikih ter klasifikacija v osnovne razrede pokrovnosti. Aplikacije smo kot načrtovano izvedli v okviru tega projekta kot tudi v okviru dodatnih projektov, ki smo jih pridobili zaradi znanja, pridobljenega v tem projektu.

Pri določanju neupravičene rabe poljščin in trajnega travinja so bili rezultati povsem primerljivi z referenčnimi podatki ARSKTRP, predlagan postopek je za MKGP pomenil pomembno študijo zmogljivosti na samem začetku reforme Skupne kmetijske politike [9]. V obeh primerih klasifikacije pokrovnosti v več razredov na podatkih Sentinel-2 [10] in PlanetScope [13] smo dosegli visoko kakovost rezultatov. V primeru klasifikacije travnikov v dva razreda [11] pa je bila skupna natančnost sprva nižja, z razširitvijo vhodne časovne vrste na optično-radarsko časovno vrsto podatkov smo jo izboljšali.

V času trajanja projekta smo vzpostavili sodelovanje z vodilno svetovno skupino za analizo časovnih vrst iz satelitskih posnetkov na Inštitutu za geomatiko na Univerzi za naravne vire in uporabne znanosti o življenju (BOKU, Avstrija) in vzpostavili študijsko sodelovanje. Rezultat je tudi skupni članek [11].

## Literatura

- [1] Pehani, P., Veljanovski T., Kokalj, Ž., Oštir, K. 2022. Šest let arhiva podatkov Sentinel-2 za Slovenijo. | Six years of Sentinel-2 archive of Slovenia. *Geodetski vestnik*, 66 (2). COBISS.SI-ID [115534595](#)
- [2] Čož, N., Veljanovski, T., Kokalj, Ž. 2020. Testing of the compositing algorithm for Sentinel-2 products. Tehnično poročilo. COBISS.SI-ID [14932483](#)
- [3] Veljanovski, T., Čotar, K., Marsetič, A., 2019. Large scale mosaicing and compositing of PROBA-V satellite images. *Geodetski glasnik* 50. COBISS.SI-ID [45702189](#)
- [4] Pehani, P., Čož, N., Veljanovski, T., Kokalj, Ž., Lisec, A., Oštir, K. 2020. Automatic processing of Sentinel-1 sigma and coherence. Tehnično poročilo. COBISS.SI-ID [88491523](#)
- [5] Pehani, P., Čož, N., Veljanovski, T., Kokalj, Ž., Lisec, A., Oštir, K. 2021. Automatic processing of Sentinel-1 sigma and coherence including special cases and anomalies: technical report, version 2. Tehnično poročilo. COBISS.SI-ID [88491523](#)
- [6] Oštir, K., Račič, M., Fetai, B., Veljanovski, T., 2021. *Satellite image time series*. [S. l.: s. n.], cop. 2021. <https://github.com/EarthObservation/satimagets>. COBISS.SI-ID [116535811](#)

- [7] Veljanovski, T., Fetai, B., Račič, M., Oštir, K. Metodologija analize časovnih vrst satelitskih posnetkov različnih senzorjev. Tehnično poročilo. V tisku.
- [8] Fetai B., Račič M., Lisec A., 2021. Deep Learning for Detection of Visible Land Boundaries from UAV Imagery. *Remote Sensing*. COBISS.SI-ID [64902403](#)
- [9] Kanjir, U., Đurić, N., Veljanovski, T., 2018. Sentinel-2 based temporal detection of agricultural land use anomalies in support of common agricultural policy monitoring. *ISPRS international journal of geo-information*. COBISS.SI-ID [43706157](#)
- [10] Račič, M., Oštir, K., Peressutti, D., Zupanc, A., Čehovin Zajc, L., 2020. Application of temporal convolutional neural network for the classification of crops on Sentinel-2 time series. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. COBISS.SI-ID [95106563](#)
- [11] Potočnik Buhvald, A., Račič, M., Immitzer, M., Oštir, K., Veljanovski, T., 2022. Grassland Use Intensity Classification Using Intra-Annual Sentinel-1 and -2 Time Series and Environmental Variables. *Remote sensing*. COBISS.SI-ID [115487491](#)
- [12] Veljanovski, T., Potočnik Buhvald, A., Račič, M., Pehani, P., Oštir, K., 2020. Testiranje možnosti in izvedba kartiranja traviščnih habitatnih tipov z daljinskim zaznavanjem s poudarkom na ločevanju intenzivnih in ekstenzivnih travnikov. Končno poročilo. COBISS.SI-ID [116965123](#)
- [13] Marsetič, A., Kanjir, U., 2022. Klasifikacija pokrovnosti z uporabo globokega učenja na časovnih vrstah podatkov PlanetScope. Geografski informacijski sistemi v Sloveniji: Preteklost in prihodnost. COBISS.SI-ID [124791299](#)