

UPORABNOST PODATKOV SATELITSKEGA IN LETALSKEGA DALJINSKEGA ZAZNAVANJA ZA OPAZOVANJE IN KARTIRANJE VODNIH POVRŠIN

USEFULNESS OF SATELLITE AND AERIAL REMOTE SENSING DATA FOR MONITORING AND MAPPING OF SURFACE WATERS

Tatjana Veljanovski, Peter Pehani, Peter Lamovec, Krištof Oštir

UDK: 258.7:627.51(497.4)

IZVLEČEK

Prispevek prinaša pregled in primerjavo zmožnosti zaznavanja vodnih objektov ali vodnih površin z različnimi sistemi daljinskega zaznavanja: optičnimi in radarskimi satelitskimi senzorji ter optičnimi senzorji na letalih. Zmožnosti zaznavanja vode ocenjujemo z več vidikov, in sicer razlik v prostorski in spektralni ločljivosti posnetkov, zahtevnosti predobdelave in priprave posnetkov, načina obdelave oziroma analize posnetkov ter ustreznosti podatkov za vrsto in namen kartiranja. Pozornost namenjamo tudi vrednotenju uporabnosti podatkov daljinskega zaznavanja glede na uspešnost zaznave območij vode v heterogeno strukturiranih okoljih.

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.08

ABSTRACT

This article presents a review and comparison of the detection capability of water facilities or water surfaces with different systems of remote sensing: optical and radar satellite sensors, as well as optical sensors on aircraft. The capabilities of water detection are estimated from several aspects: differences in the spatial and spectral resolution of imagery, the complexity of imagery pre-processing requirements, and the method of analysis and interpretation feasibilities for the type and purpose of mapping. Particular attention is paid to evaluating the applicability of remote sensing data in light of the detection efficiency of water areas in heterogeneously structured environments.

KLJUČNE BESEDE

zaznavanje vode, klasifikacija vode, daljinsko zaznavanje, obdelava posnetkov, radarski in optični posnetki

KEY WORDS

water detection, classification for waters, remote sensing, image processing, radar and optical imagery

1 DALJINSKO ZAZNAVANJE IN POVRŠINSKE VODE

S senzorji daljinskega zaznavanja lahko opazujemo, merimo ali kartiramo objekte in pojave na zemeljskem površju. Raven podrobnosti, ki jo lahko opazujemo, je odvisna od prostorske ločljivosti zajetih podatkov, ta pa od višine letenja (opazovanje iz vesolja ali zraka) in zmogljivosti snemalnega sistema (senzorja). Katere lastnosti lahko določimo objektom in pojavom, je odvisno od spektralnih lastnosti snemalnega sistema, deloma pa tudi od časovne komponente snemanja površja (sezonski in meteorološki vplivi, kontinuiteta opazovanj). Opazovalne sisteme za daljinsko zaznavanje zemeljskega površja zato lahko delimo na:

- satelitske (nosilci so na vesoljskih plovilih in satelitih zunaj atmosfere Zemlje) in zračne (nosilci so na letalih, helikopterjih, balonih znotraj atmosferskega plašča);

- optične ali pasivne in radarske ali aktivne (optični zajemajo izsevano energijo Zemljinega površja v svetlem delu dneva, radarski za snemanje uporabljajo lastni vir elektromagnetnega valovanja in so zmožni snemati neodvisno od ure in vremena);
- mono- in večspektralne (pankromatski in/ali multispektralni zajem, število spektralnih kanalov je odvisno od lastnosti kamere in namena uporabe podatkov opazovalnega sistema);
- sisteme z enkratnim ali sistematičnim (redno ponavljajočim) načinom opazovanja (prožena snemanja, sistematičen velikopovršinski zajem).

Površinske vode (hidrološki objekti) na zemeljskem površju se pojavljajo v različnih razsežnostih, oblikah in z različnimi pojavnostnimi lastnostmi. Posamezni hidrološki objekti imajo razmeroma stalno in stabilno lego v prostoru, čeprav z bolj ali manj spreminjajočimi se mejami (morje, naravna in umetna jezera, glavni in stranski vodotoki, potoki, izviri) in vodnimi (fizikalnimi in kemijskimi) lastnostmi. Drugi so lahko pogojeni s sezonskimi in vremenskimi vplivi, zato je njihova umeščenost v prostoru spremenljiva (presihajoče jezero, močvirja, mlake, hudourniki, izredne visoke vode ipd.). Na podatkih daljinskega zaznavanja so vodne površine praviloma dobro in nesporno prepoznavne in določljive. Omejitve pa so lahko prostorska ločljivost daljinsko zaznanih podatkov, ki določa razmerje med velikostjo piksla in ravniyo podrobnosti opazovanega objekta (na primer pri manjših ali ozkih vodnih objektih), dejanska vidnost ali prepoznavnost (obrežno rastje zakriva stik vode in brega, problematično razločevanje sence in vode) ter čas (sezona ali izjemne razmere) zajema podatkov (suša, poplave). Od izbranega opazovalnega sistema in senzorja je torej odvisna položajna umeščenost in popolnost zaznave vodnih površin. S posebnim poudarkom na pravilnem razumevanju zmožnosti določitve vodnih površin v nadaljevanju tudi izpostavljamo ključne lastnosti optičnih in radarskih sistemov ter senzorjev.

1.1 Optični sistemi

Optični ali pasivni senzorji daljinskega zaznavanja zapisujejo v naravi obstoječo elektromagnetno energijo. To je energija, ki iz Sonca pride na Zemljo, se deloma odbije, deloma absorbira in nato znova izseva od površja skozi atmosfero. Za odbito Sončevo svetlobo to pomeni, da lahko snemamo samo podnevi, pogoj za lastno termično infrardeče sevanje pa je, da je sevanja dovolj za zaznavo z merilnimi instrumenti (Oštir, 2006).

Satelitski ali zračni (aero) sistemi zajema podatkov?

Izbiri za uporabo satelitskih ali zračnih nosilcev narekujejo želena prostorska ločljivost, značilnosti pokritosti površja, čas zajema in s tem povezana cena zajema. S senzorji, nameščenimi na letalih, lahko pridobivamo prostorsko zelo natančne podatke o zemeljskem površju. V sprejemljivih vremenskih razmerah za letenje lahko z njimi snemamo kadar koli in na katerem koli delu Zemlje. Večinoma senzorji na letalih beležijo elektromagnetno valovanje (EMV) v vidnem in izbranem infrardečem pasu spektra. Senzorji na satelitih omogočajo opazovanje v podrobnejši spektralni ločljivosti, pogosto tudi v več infrardečih in termalnih pasovih EM-spektra (multispektralni in hiperspektralni posnetki). To izboljša prepoznavanje in ločevanje lastnosti geografskih objektov na površju.

Odkrivanje vode na večspektralnih satelitskih in letalskih posnetkih

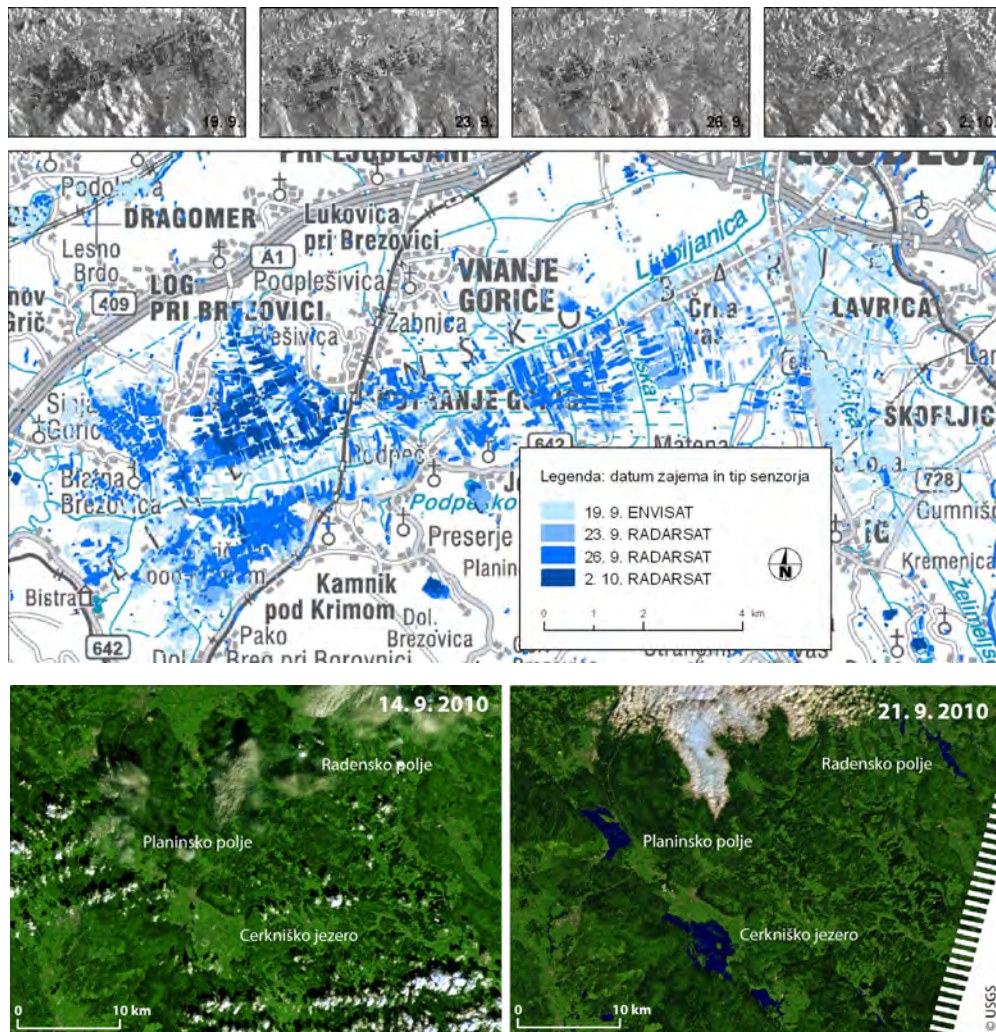
Vodne površine na večspektralnih optičnih posnetkih so dobro razvidne v vidnem, še bolj pa v infrardečem delu EM-spektra (slika 1). Čista in globoka voda v obeh delih spektra (pa tudi v termalnem) zavzema nizke intenzitetne vrednosti, zato se na prikazu posnetka kaže v temnih tonih (v vidnem delu spektra v modrih do modrozelenih). Vodne površine prepoznamo in izločimo v postopku klasifikacije. Ker se v vidnem delu spektra skozi barvni (intenzitetni) razpon izražajo tudi lastnosti vode, kot so primesi, globina, barvni odsev vodne površine, je klasifikacija praviloma obsežnejša in bolj zahtevna, kot če jo izvajamo v kanalih infrardečega spektra. V bližnjem infrardečem spektru ima voda izrazitejšo nizko odbojnost v primerjavi z drugimi tipi pokrovnosti površja, zato je prostorsko in semantično dobro določljiva.



Slika 1: Primeri upodobitve vodnih površin na radarskih in optičnih posnetkih, v vidnem in infrardečem (IR) delu spektra ter v različnih prostorskih ločljivostih. Primer prikazuje območje poplav na Ljubljanskem barju med vasema Lipe in Črna vas. Od zgoraj navzdol: radarski posnetek Radarsat-2 (prostorska ločljivost 12,5 m), optični posnetek RapidEye v vidnem delu spektra (kanali 321, ločljivost 6,5 m), RapidEye v bližnjem IR kanalu (kanal 5), RapidEye v psevdobarvnem (IR) kompozitu (kanali 532) ter letalski posnetek v barvnem IR-kompozitu (ločljivost 0,2 m).

1.2 Radarski sistemi

Radarski ali aktivni senzorji uporabljajo za snemanje lasten vir elektromagnetnega valovanja. Valovanje oddajajo v smeri proti opazovanim predmetom (površju) in beležijo intenziteto odbitega valovanja. Ker delujejo v mikrovalovnem delu elektromagnetnega spektra, lahko prodirajo skozi oblake, meglice, prah in dež, saj na valovanje teh – daljših – valovnih dolžin ne vpliva atmosfersko sipanje, ki je izrazito v optičnem delu spektra. Bistveni prednosti radarskih sistemov pred optičnimi sta zato neodvisnost od sonca kot vira svetlobe, zaradi česar lahko



Slika 2: zgoraj: primer zmožnosti opazovanja dinamike poplav 2010 na Ljubljanskem barju ne glede na vremenske razmere z radarskimi posnetki Envisat in Radarsat-2 s prostorsko ločljivostjo 12,5 m ter rezultat kartiranja v različnih datumih; spodaj: primer optičnih posnetkov pred dogodkom poplav 2010 in po njem s senzorjem Landsat ter meteoroloških omejitev za opazovanje z optičnimi senzorji. Stanje poplavljenosti kraškega zaledja je na obeh posnetkih dobro razpoznavno, medtem ko se nad Ljubljanskim barjem v kasnejšem datumu zadržuje oblačnost in popolnoma onemogoča vpogled v stanje.

značilnosti obravnavanega območja, lastnosti podatkov ali načina njihove obdelave. Podamo nekatere ključne lastnosti podatkov za namen kartiranja vodnih površin (poglavje 4) in s tem (z)možnosti uporabe takšnih podatkov v različnih aplikacijah.

2 NAČINI OBDELAVE SATELITSKIH IN LETALSKIH POSNETKOV

Namen obdelave podob je pripraviti posnetke tako, da bo interpretacija njihove vsebine omogočala kakovostno (vizualno in analitično) prepoznavanje geografskih objektov ali pojavov na površju Zemlje. Optimalna in obenem ustrezna obdelava podob je časovno in postopkovno smotrna za dani namen analize, lastnosti podatkov in naravnih okoliščin. Podatki, obdelani hitro, v skoraj realnemu času, so izredno pomembni pri opazovanju hitro spreminjajočih se dogodkov, kot so na primer naravne in od človeka povzročene nesreče, kjer sta hiter zajem podatkov in njihova takojšnja analiza ključnega pomena za ustrezno ukrepanje. Ravno nasprotno je pri opazovanju sprememb v daljšem časovnem obdobju, tam je priprava podatkov obsežnejša, saj moramo zagotoviti takšno primerljivost med posnetki, da zmanjšamo vplive razlik med posnetki, ki jih ne želimo obravnavati, in izboljšati lastnosti podob, ki omogočajo kakovostno prepoznavanje objektov in pojavov. Zato je radiometrična obdelava (atmosferaški popravki in popravki osvetlitve scene) tu obsežnejša in zahtevnejša.

Način obdelave posnetkov je torej odvisen od njihovih lastnosti in namena uporabe. Danes že lahko trdimo, da najboljše rezultate pri prepoznavanju geografskih objektov dobimo s kombinacijo podatkov različnih tehnologij in sistemov: satelitskih in letalskih podatkov, lidarskih podatkov, talnih meritev in ustrezno obdelavo vključenih podatkov.

2.1 Obvezni in priporočeni postopki obdelave

Koraki za obdelavo satelitskih in letalskih posnetkov so običajno dobro opredeljeni, vendar skoraj nikoli v celoti samodejni. Geometrični popravki terjajo vnos začetnih, oslonilnih točk, radiometrični popravki pogosto vsebujejo korak, pri katerem nastavljamo izbrane parametre, nadzorovana klasifikacija vključuje nabor učnih vzorcev z danega območja, ovrednotenje rezultatov vizualno kontrolo itn.

2.1.1 Optični posnetki

Visokoločljivi satelitski sistemi in nova generacija sprejemnikov GNSS, izboljšana navigacijska orodja, nameščena na novejših satelitih (na primer sledilci zvezd), ter nasploh stabilnejša struktura satelitov so znatno izboljšali zmožnost absolutnega položajnega umeščanja posnetkov. Posnetke novejših satelitov je tako mogoče prostorsko umestiti z natančnostjo nekaj pikselov tudi brez talnih oslonilnih točk, z eno samo oslonilno točko pa celo s podpikselsko natančnostjo (Fraser in Ravanbakhsh, 2009). Če želimo podatke daljinskega zaznavanja primerjati, prekrivati ali prostorsko analizirati tudi z drugimi viri podatkov, je natančno umeščanje v izbran koordinatni sistem obvezen korak obdelave posnetkov. To lahko opravimo z georeferenciranjem, registracijo ali ortorektifikacijo. Za dober rezultat štejemo, kadar je posnetek položajno umeščen s podpikselsko natančnostjo in je tako njegova vsebina položajno usklajena z drugimi (tudi prostorsko

natančnejšimi) viri. Pri zračnih ali aerosopnetkih je obdelava podatkov usmerjena predvsem v kakovostno ortorektifikacijo, usklajevanje kontrastov ali barvne intenzitete med posnetki ter ustvarjanje barvnih ali IR-kompozitov.

Nadaljnji postopki obdelave se lahko prilagajajo izbranemu namenu in pogojem uporabe. Celoten nabor postopkov, ki je na strani analitika, torej lahko zajema: natančno georeferenciranje ali ortorektifikacijo ter ustvarjanje mozaika in usklajevanje kontrastov (če je posnetkov več), radiometrične popravke (atmosferski popravki, topografska normalizacija, radiometrična standardizacija), izboljšanje podob za namen poudarjanja ali zabrisanja posameznih lastnosti (filtriranje), pretvorbo podob za namen natančnejšega proučevanja biofizikalnih lastnosti površja (izračun vegetacijskega indeksa, indeksa vlažnosti tal, stresa vegetacije ipd.), klasifikacijo (za prepoznavanje lastnosti in določitev geografskih objektov in pojavov), posplošitev in preverjanje rezultatov ter oceno kakovosti.

Optični posnetki	Priporočene lastnosti posnetka	Obvezna obdelava	Priporočena obdelava	Zmožnost kartiranja
Satelitski posnetki srednje ločljivosti (10–100 m)	Več- ali hiperspektralni, z enim ali več IR-kanali	- Georeferenciranje ali ortorektifikacija.	- Topografska normalizacija (odstranimo vpliv osvetlitve, tj. senc terena, ki imajo ponekod podobne spektralne lastnosti kot voda). - Glajenje z nizkoprepustnim filtrom (izboljšamo mejo med vodnimi objekti in kopnim). - Nadzorovana pikselska ali objektna klasifikacija (obvezno vključimo vidni in IR-del spektra). - Kontekstualna poklasifikacija (izločanje objektov po merilih oblike, velikosti ipd).	Velike vodne površine: morje, jezera, reke, linijski vodotoki, široki nad 5 m.
Satelitski posnetki visoke ločljivosti (1–10 m)	Več- ali hiperspektralni, z enim ali več IR-kanali	- Georeferenciranje ali ortorektifikacija. - Glajenje z nizkoprepustnimi filtri (zanemarjanje nepomembnih detajlov, homogenizacija teksture na vodnih površinah, glajenje meje med kopnim in vodo).	- Objektna klasifikacija (obvezno vključimo vidni in IR-del spektra). - Kontekstualna poklasifikacija (izločanje objektov po merilih oblike, velikosti, teksture, odnosov s sosednjimi objekti ali pojavi, tudi drugih podatkov, na primer podatkov DMR).	Velike in manjše vodne površine: morje, jezera, reke, linijski vodotoki, široki nad 1 m, manjši vodni objekti površine nekaj m ² (kali, lokve).
Satelitski in letalski posnetki zelo visoke ločljivosti (pod 1 m)	Večspektralni z bližnjim IR-kanalom	- Georeferenciranje ali ortorektifikacija. - Glajenje z nizkoprepustnimi filtri (zanemarjanje nepomembnih detajlov, homogenizacija teksture na vodnih površinah, glajenje meje med kopnim in vodo).	- Prevzorčenje na manjšo (a še primerno) prostorsko ločljivost (zmanjšamo količino podatkov in skrajšamo čas obdelave). - Objektna klasifikacija (obvezno vključimo vidni in IR-del spektra). - Kontekstualna poklasifikacija (izločanje objektov po merilih oblike, velikosti, teksture, odnosov s sosednjimi objekti ali pojavi, tudi drugih podatkov, npr. podatkov DMR).	Velike in majhne vodne površine: morje, jezera, reke, linijski vodotoki, široki nad 0,5 m, manjši vodni objekti površine nad 1 m ² (kali, lokve, manjši površinski izviri).

Preglednica 1: Obvezen in priporočen obseg obdelave optičnih satelitskih in letalskih posnetkov za prepoznavanje in kartiranje vodnih površin

Ortorektifikacijo moramo opraviti vselej, kadar posnetki niso zajeti v ali blizu nadirja. Radiometrične korekcije podatkov so priporočene vselej, kadar nameravamo v študiji uporabiti več posnetkov, želimo analizirati biofizikalne lastnosti površja ali izvajati ponovljive, primerjalne študije. Posebno pozornost pri prepoznavanju vode s postopkom klasifikacije v vidnem delu spektra je treba nameniti različnim možnim reprezentacijam vodnih površin na posnetku.

Lastnosti vode so odvisne od mehanskih in kemičnih primesi (prosojnosti, barve), globine, lastnosti dna in podobno ter se v vidnem delu spektra (moder, zelen in rdeč kanal) izražajo prek barve (od modre, rjave do zelene) in tona (od zelo temnih do zelo svetlih odtenkov). Klasifikacija v vidnem delu spektra je zato zahtevnejša, saj moramo v učne vzorce zajeti tako rekoč vse obstoječe primerke pojavljanja vode in jih obenem razločiti od objektov s sorodnimi spektralnimi lastnostmi (na primer sence večjih stavb, dreves, zaplate iglavcev). Preglednica 1 povzema obvezen in priporočen obseg obdelave optičnih satelitskih in letalskih posnetkov za prepoznavanje in kartiranje vodnih površin.

2.1.2 Radarski posnetki

Tudi pri radarskih posnetkih (Envisat, RADARSAT-2, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed) so v zadnjih letih parametri geometrije snemanja dobro znani, zato je georeferenciranje posnetkov enostavnejše, predvsem pa hitrejše. Če imamo ustrezen model višin ali DMR, lahko neposredno izvajamo tudi ortorektifikacijo. Ker so posnetki istega ali različnih senzorjev pogosto zajeti iz različnih smeri opazovanja, jih je vselej smiselno ortorektificirati. Tako odpravimo razlike zaradi različnih kotov opazovanja in zmanjšamo položajna odstopanja terena (lega gorskih vrhov, senc za vrhovi). Nekaterih lastnosti radarskih posnetkov, kot so zvrnjeni vrhovi, s tem sicer ne odpravimo, popravimo pa njihovo umeščenost v prostoru.

Videz radarskih posnetkov radiometrično izboljšujemo z različnimi filtri. Njihov izbor je odvisen od namena uporabe podatkov. Z nizkoprepustnimi filtri (na primer s filtrom povprečenja, mediane) blažimo prispevek zrnatosti, s čimer v analizi razpoznavanja vode znatno zmanjšamo delež (lažnega) zaznavanja vodnih površin majhnega obsega (nekaj pikslov). Deloma generaliziran pa je tudi rob objektov, kar poenostavlja nekatere korake, sicer značilne za fazo poklasifikacije (na primer glajenje in posploševanje). Z visokoprepustnimi filtri lahko nasprotno poudarimo robove objektov.

Intenziteta odbitega radarskega valovanja je odvisna od lastnosti površja Zemlje, kot sta hrapavost in dielektičnost, in tudi od značilnosti metode meritve, predvsem od kota gledanja. Interpretacija vsebine radarskih posnetkov je zaradi same tehnologije radarskega snemanja in posledično videza vsebine radarskih posnetkov mnogo bolj zapletena (manj intuitivna) od interpretacije optičnih posnetkov. Postopek predobdelave radarskih posnetkov je razmeroma preprost za namen prepoznavanja vodnih površin, na voljo pa moramo imeti ustrezno programsko orodje. Zaznavanje gladke (brez valov) vode je neproblematičen postopek, saj voda tu zavzema vrednosti z najnižjo intenziteto. Prepoznavo lahko izvedemo s katero koli tehniko klasifikacije: z določljivo praga zaznave vode ali na primer z objektno klasifikacijo. Pogosto pa je v fazi poklasifikacije treba opraviti še napredno filtriranje objektov, klasificiranih kot voda. Prisotnost senc, napačno klasificiranih kot voda, lahko odpravimo z upoštevanjem naklona terena in kota gledanja, za druge elemente izločevanja lahko uporabimo tudi morfološke in druge značilke objektov (na primer merilo najmanjše površine).

Karta vodnih teles, pridobljena iz radarskih posnetkov, bo sorazmerno z merilom (prostorsko ločljivostjo posnetka) vselej nekoliko (geometrično in semantično) nepopolna. Upoštevajte

naravo radarskih podatkov in načina njihovega pridobivanja, pa nam radarska tehnologija lahko ponuja neprecenljive informacije o kontinuiteti in prostorsko-časovnih spremembah opazovanega dogodka na širšem območju (primer opazovanja dinamike poplav 2010: Veljanovski s sod., 2011b, slika 2).

2.2 Kombinacija podatkov

Radarski in optični satelitski ter letalski podatki omogočajo pridobivanje informacij o obliki, položaju ter stanju vodnih objektov in pojavov na površju Zemlje, pri čemer sam postopek ni preveč zahteven. Ugotovitev kljub temu sprejmimo z nekaj zadržki. Zavedati se moramo, da iz podatkov optičnih sistemov lahko pridobimo marsikatero semantične podatke o površju, bo pa geometrična komponenta vselej nekoliko vprašljiva in v prostorskem smislu manj točna. Na zaznavo oblike in položaja objektov namreč vpliva dejstvo, da površje opazujemo iz zraka, da so objekti različnih višin, zaradi česar se prekrivajo različne rabe tal oziroma pokrovnosti. Pri razpoznavanju vodnih objektov v naravi je to zlasti moteče, ker obrežno rastje pogosto zakriva dejanski vodni rob, zato je tako rekoč nemogoče pridobiti natančne podatke o stanju (legi) »na tleh«. Za natančne študije bodisi za topografsko kartiranje ali hidrološke analize v velikem merilu bodisi pridobivanje realne ocene stanja velikih voda na tleh (na primer pri določanju skupnega obsega poplavljenega območja) je zato podatke satelitskih in letalskih sistemov smiselno kombinirati s podatki zračnega (aero)laserkega skeniranja, ki zaradi visoke gostote točk in zmožnosti prodiranja skozi vegetacijo omogočajo prikaz mikroreliefa oziroma stanja oblikovanosti in višin reliefa.

Druga smiselna kombinacija podatkov se nanaša na opazovanje stanja v izjemnih razmerah. V primeru nesreč, ki jih spremlja slabo vreme (oblaki), ali pa je posledica nesreče dim, opazovanje dogodka z optičnimi senzorji pogosto ni mogoče. V takšnih razmerah lahko opazujejo in pridobivajo podatke le radarski sistemi. Če poznamo njihove lastnosti, jih lahko pravilno interpretiramo in uporabimo.

3 PREDNOSTI IN OMEJITVE ZAZNAVANJA VODNIH POVRŠIN IZ VESOLJA IN IZ ZRAKA

V tem delu prispevka se bomo osredotočili na daljinsko zaznane podatke in izkušnje, ki smo jih pridobili med dosedanjim delom v okviru raziskav na ZRC SAZU in Centru odličnosti Vesolje-SI ter ob kartiranju poplav leta 2007 (Železniki) in leta 2010 (Ljubljansko barje in kraško zaledje). V okviru dveh proženj mednarodnega vesoljskega programa Vesolje in velike nesreče (International Charter Space and Major Disasters) smo pridobili seriji optičnih in radarskih satelitskih posnetkov: Landsat, SPOT, Formosat, RapidEye, WorldView-2, Envisat in RADARSAT-2 (prostorske ločljivosti med 30 in 2 m) ter ob poplavah 2010 tudi podatke zračnega letalskega snemanja poplavnih območij podjetja GEOIN d.o.o. v ločljivosti 0,2 m (naročnik snemanja je ARSO). Osnovni cilj pri obeh nesrečah je bil hitro kartiranje poplavljenih območij. Ta pogoj nam je omogočil, da smo različne podatke in zmožnosti prepoznavanja vodnih površin na različnih podatkih proučili z dveh vidikov:

- kakšna je ustreznost podatkov za hitro pridobivanje informacij (hitrost in stopnja obvezne

obdelave posnetkov) in kako zanesljivo informacijo o proučevanem pojavu pri tem dobimo ter

- katere so glavne pomanjkljivosti v postopku obravnave podatkov in v rezultatu ter kako lahko rezultate izboljšamo (priporočena obdelava).

Pokazalo se je, da lahko z radarskimi posnetki v skoraj realnem času dobimo zelo dober vpogled v položaj predvsem v naravnem okolju, ne moremo pa zaznavati poplavljenosti v urbanem okolju. Radarski posnetki srednje ločljivosti so zato nadvse primerni za sprotno opazovanje in spremljanje dogodkov v večjem površinskem merilu (na primer območje Ljubljanskega barja, kraškega zaledja). Z optičnimi satelitskimi posnetki dobimo zanesljiv in popolnejši vpogled v stanje poplavljenosti v urbanem in naravnem okolju, je pa obdelava podatkov zahtevnejša in daljša. Njihovo pridobivanje je omejeno na svetli del dneva in jasno nebo, kar pri nesrečah, kot so poplave ali plazenje zemljine, pomeni veliko verjetnost, da bo zajem posnetka med dogodkom ali po njem zaradi oblačnosti (pre)pozen. V tem primeru so več kot ustrezno nadomestilo zračni ali aeroposnetki, saj je odzivnost letal ali helikopterjev za snemanje v slabih vremenskih razmerah hitrejša, predvsem pa časovno bolj prilagodljiva. Zračni posnetki tudi najbolje zadovoljijo zahtevo po kartiranju dogodka z zadostno prostorsko natančnostjo, obenem pa so že tako uveljavljen vir podatkov, da je tudi vizualna interpretacija posnetka sprejemljiva za širok razpon uporabnikov. V nadaljevanju povzemamo še nekatere pomembne ugotovitve o uporabnosti podatkov daljinskega zaznavanja.

Izkušnje pri uporabi širokega nabora podatkov in analiz so omogočile, da v nadaljevanju podamo:

- primerjavo primernosti tehnologij daljinskega zaznavanja za zajem vodnih objektov in opazovanje poplav (aerofotogrametrija, satelitski sistemi);
- primerjavo načinov obdelave ter metode prepoznavanja in kartiranja vodnih objektov ali površin (primerjamo: metodo z določitvijo praga, nadzorovano objektno klasifikacijo ter strojno učenje) glede na pripravo (predobdelavo) podatkov, ki je potrebna, kakovost rezultatov in avtonomnost (stopnje samodejnosti) postopka;
- primerjavo prostorskih in spektralnih lastnosti podatkov in njihovo primernost za kartiranje v različnih merilih ter v različnih okoljih.

3.1 Primerjava primernosti tehnologij daljinskega zaznavanja za zajem vodnih objektov

Primerjavo tehnologij radarskega in optičnega satelitskega in zračnega zajema ter lidarskega skeniranja za kartiranje vodnih objektov prikazujemo s pregledom naslednjih vidikov: prostorske ločljivosti posnetkov, potencialne hitrosti pridobivanja podatkov (zajem podatkov, odzivnost sistemov), zmožnosti hitrega kartiranja oziroma hitre obdelave, kakovosti zaznave vodnih objektov ter primernosti uporabe rezultatov razpoznavanja vodnih objektov ob danih lastnostih posnetkov (preglednica 2).

Radarski posnetki (RAD) Optični posnetki (OPT)	Metoda razpoznavanja (metoda klasifikacije)		
Obdelava	Določitev praga	Objektna klasifikacija	Strojno učenje
Zahtevnost priprave (predobdelave) podatkov	Georeferenciranje (ortorektifikacija), glajenje z nizkoprepustnimi filtri.	Georeferenciranje (ortorektifikacija), glajenje z nizkoprepustnimi filtri, prevzorčenje v manjšo ločljivost (po potrebi).	Georeferenciranje (ortorektifikacija).
Prepoznavanje vodnih objektov	RAD: zelo dobro, prag je mogoče hitro, enostavno in nedvoumno določiti. OPT: srednje dobro, kombinirati je treba čim več spektralnih kanalov, da zožimo potencialen nabor pikselov, ki pomenijo vodo.	RAD: zelo dobro, stopnja segmentacije in pridobivanje učnih vzorcev nista problematična. OPT: zelo dobro, stopnjo segmentacije velja skrbno izbrati, za prepoznavanje različnih reprezentacij vodnih objektov je treba ustvariti več razredov učnih vzorcev.	RAD: zelo dobro, pripomore k prepoznavanju poplavljenih površin pod oblaki. OPT: dobro, učni vzorec poplavljenih in nepoplavljenih območij je treba skrbno pripraviti.
Dodatni pogoji, dodatni podatki	RAD: modeliranje in upoštevanje (eliminacija) lege senc. OPT: /	RAD: modeliranje in upoštevanje maske senc. OPT: priporočljivo je vključiti in upoštevati sloj NDVI.	RAD: DMR, mreža vodotokov, raba tal ipd. OPT: DMR, mreža vodotokov, raba tal, spektralni indeksi ipd.
Kakovost rezultatov (popolnost zaznavanja vodnih objektov)	RAD: Dobra razpoznavna v naravnem okolju, prešibka v urbanem okolju (obstoječe vodne površine niso zaznane). OPT: Sprejemljiva razpoznavna, praviloma nekoliko prevelika (med rezultati so tudi površine, ki v resnici niso voda).	RAD: Dobra v naravnem okolju, prešibka v urbanem okolju (obstoječe vodne površine niso zaznane). OPT: Dobra.	RAD: Dobra. Informacija s posnetka je pomembna v modelu odločanja. OPT: Dobra, zaradi upoštevanja pogojev drugih podatkov v modelu je prednost splošnejša in zveznejša zaznava vodnih okoliščin v naravi.
Stopnja avtonomnosti (samodejnosti) postopka	Visoka - določiti moramo prag zaznave.	Srednja - določiti moramo učne vzorce, ki odražajo stanje vodnih razmer, ki jih iščemo (velja za optične posnetke); - rezultate napačne klasifikacije je treba ročno popraviti (pokasifikacija), velja za optične posnetke.	Srednja - podatke moramo pripraviti v zapisu, ki ustreza okolju strojnega učenja; - določiti moramo učne vzorce; - prevesti model odločitev v grafični modelirnik.

Preglednica 3: Primerjava ustreznosti in zmožnosti metod klasifikacije optičnih posnetkov in načina obdelave podatkov

3.3 Zmožnost zaznave vodnih površin na različnih podatkih in v različnih naravnih okoliščinah

Na zmožnost zaznave vodnih objektov in površin na daljinsko zaznanih podatkih najbolj vpliva prostorska ločljivost podatkov. Višje prostorsko ločljivost kot imajo podatki, več podrobnosti na površju lahko prepoznamo in določimo. Identifikacijo objektov precej olajšajo njihove značilne spektralne lastnosti (v več spektralnih kanalih). Vodne površine so v IR-delu EM-spektra razmeroma nesporno določljive, saj so izražene z zelo majhno intenziteto v primerjavi z drugimi pokrovnostmi površja. S pravilno kombinacijo informacij iz posameznih spektralnih kanalov je mogoče določiti tudi vse različne pojavnosti vodnih površin v okolju. Zato je stopnja popolnosti zaznave vode iz večspektralnih posnetkov praviloma dobra. Omejitev za pridobivanje podatkov o vodah je lokacijska natančnost ali položajna umeščenost v topografskem smislu. Zaradi narave zajema daljinsko zaznanih podatkov (iz vesolja ali zraka) so na posnetkih razpoznavne silhuete pokrovnosti iz zračne perspektive. To pomeni, da pogosto ne vidimo dejanskega obrežja vodnih površin, ker je lahko zaraščeno in krošnje (ali sence) zakrivajo stanje na tleh. S podobnim položajem se srečujemo pri določitvi poplavljenih območij, ko visokorasle rastline ali strehe hiš segajo nad vodo. Takšnih površin v postopku prepoznave iz samih posnetkov namreč ne prepoznamo kot vodo. V takšnih primerih je nujno upoštevati natančno morfologijo terena oziroma lastnosti lokalne okolice in podatke kombinirati. Večspektralni optični posnetki so ob

pravilnem ravnanju in razumevanju lastnosti dober vir podatkov za velikopovršinski zajem vodnih površin in za primerjalne študije stanja v naravnem ter urbanem ali mešanem (heterogenem) okolju.

Lidarski podatki so z vidika izločanja vodnih teles primernejši za pripravo topografskih podatkov o geometriji vodnih teles in površin ter izračunu njihovih volumnov (na primer rečne struge, poplavne površine), in sicer posredno na podlagi upoštevanja pridobljenega DMR in poznane vodne gladine. Samo prepoznavanje vodnih površin iz lidarskih podatkov je mogoče, ni pa enostavno, saj se na izdelkih DMR/DMP podobno kot rečne struge prikazujejo na primer tudi ceste. Zaradi vertikalne prostorske komponente (višina tal ali objekta: DMR ali DMP) in zmožnosti prodiranja skozi vegetacijo (talni podatki, DMR) pa so podatki lidarskega snemanja, kot topografska informacija, v veliko oporo drugim podatkom daljinskega zaznavanja (za geometrično izpopolnjevanje geografskih objektov, interpretacijo in konceptualno prostorsko modeliranje).

Radarski posnetki so z vidika obdelave manj zahtevni, zato pa je njihova interpretacija bolj zapletena. Voda na radarskih posnetkih je nedvoumno določljiva, vendar se voda na posnetkih odraža (zazna) samo pri večjih vodnih površinah (v razmerju do prostorske ločljivosti podatkov) in mirnih vodnih gladinah. Zaznava vode je zlasti otežena v heterogeno strukturiranih okoljih, kjer visoki in visokoodbojni objekti povzročajo ojačan povratni signal. Takrat se vodne površine izražajo s povišano intenziteto, kar onemogoča dejansko zaznavo. Poznavanje vzrokov za prešibko in čezmerno zaznavanje vode na radarskih posnetkih ter okoliščin, v katerih se te pojavljajo, omogoča, da del opisanih napak (vplivov) odpravimo z modeliranjem odnosov z lokalno okolico in kombinacijo z drugimi podatki. Uspešna rešitev je tudi ugotavljanje vodnih površin in kartiranje s postopki strojnega učenja (Lamovec in Mikoš, 2011). Za pridobivanje informacij o vodnih objektih iz radarskih posnetkov velja, da bo zaznava vode popolna v naravnem okolju, delna v kmetijskem okolju in nepopolna v urbanem okolju. Ob tem vendarle ne gre prezreti pomena radarskih posnetkov pri sprotnem spremljanju dogodkov na širšem območju ob nesrečah, ki jih spremlja slabo vreme.

4 UPORABNOST PODATKOV DALJINSKEGA ZAZNAVANJA ZA RAZLIČNE NAMENE IN UPORABNIKE

Uporabnost tehnologije daljinskega zaznavanja pri zaščiti in reševanju se z večanjem prostorske ločljivosti in vse večje splošne razpoložljivosti prostorskih podatkov počasi približuje želeni uporabi: pomoč pri hitrem kartiranju dogodka v prostoru in s tem učinkovitejšemu operativnemu delu na terenu. Pri izvajanju učinkovitega reševanja in zaščite je pomembno dobro poznavanje okolice, ki jo lahko zagotovijo tudi vse bolj natančni posnetki površja in različne upodobitve (dostopnost in prehodnost terena, območje prizadetosti z nesrečo ipd.). V primeru naravnih nesreč so potencialni uporabniki vsi, ki se ukvarjajo z reševanjem, odpravljanjem posledic in načrtovanjem preventivnih ukrepov. Ugotavljamo, da je rezultate interpretacije podatkov daljinskega zaznavanja in izdelanih kart mogoče uporabiti pri samem reševanju le, če dosejajo zadostno natančnost in točnost določitve prostorske razporeditve dogodka na prizadetih

območjih ter če so dosegljive v nekaj urah. Predvsem slednje je velik izziv za trenutno stanje tehnologije (zajema, prenosa, obdelave in sistema dostave) na področju daljinskega zaznavanja. Večji pomen izdelkov kartiranja zato vidimo v oceni škode ter izboljšanju postopkov pri odpravljanju posledic nesreč in preprečevanju ponovitve. Velik pomen za reševanje in zaščito bi imeli tudi na enem mestu zbrani in pripravljeni referenčni (ali arhivski) podatki vseh vrst, ki bi zagotovili vsakokrat hiter dostop do informacij o stanju pred nesrečo za kateri koli del države.

Visoko ločljivi optični posnetki (zračni ali satelitski) in lidarski podatki o mikroreliefu so primerni za natančne hidrološko-hidravlične in hidrotehnične študije (Gosar s sod., 2007). Za izdelavo opozorilnih kart poplavne nevarnosti in načrtovanje omilitvenih ukrepov za izboljšanje poplavne varnosti so podatki o obsegu poplav, ki jih lahko pridobimo iz visoko in srednje ločljivih sistemov, pomembni tako za preverjanje ali izboljšanje hidroloških modelov kot zmanjševanje terenskega dela (beleženje poplavne meje na terenu se krči na posamična območja, kjer je identifikacija iz posnetkov nezanesljiva). Poleg tega je sprotno spremljanje poplav, torej časovne in prostorske razporeditve obsega, na večjih (regionalnih) ravneh najbolj smotno, pa tudi edino mogoče, s tehnologijo daljinskega zaznavanja. Potencial premagovanja nekaterih ovir pri kartiranju poplav iz samo satelitskih posnetkov je kombinacija daljinsko zaznanih podatkov, hidroloških modelov in strojnega učenja. Na primeru poplav 2007 v Železnikih sta jo prikazala Lamovec in Mikoš (2011).

Topografske karte vsebujejo geometrično in vsebinsko najnatančnejše informacije o geografskih objektih na površju Zemlje. Sedanje državne topografske karte niso ažurne, saj njihovo posodabljanje že vrsto let ni sistemsko urejeno oziroma se ne izvaja sistematično (Petrovič s sod., 2011). Zaradi zahteve po točnosti in popolnosti vsebine topografskih kart velikega merila je za pridobivanje informacij primerna le najvišja raven prostorske ločljivosti daljinsko zaznanih podatkov. Pri kartiranju in posodabljanju vodnih objektov na topografskih kartah je lahko težava nezveznost (prekinjenost) pri zaznavi linijskih vodnih objektov (vodni, rečni tokovi) ter tudi sama geometrična komponenta zaznave, saj so vodni objekti na satelitskih in zračnih posnetkih pogosto obdani z obrežnim rastjem, spremenljiva pa je tudi višina vodostaja. Zato bi bilo za potrebe posodabljanja topografskih kart nujno uporabiti kombinacijo virov podatkov (visokoločljivi satelitski ali zračni posnetki in lidarski podatki) ter združiti spektralne informacije in podatke o dejanski reliefni oblikovanosti za natančno razpoznavanje umeščenosti linijskih in površinskih vodnih objektov (Bric s sod., 2012). Pri sistematičnem obnavljanju topografskih kart iz zračnega fotogrametričnega in lidarskega zajema bi morali postaviti tudi stroge zahteve za radiometrično homogenost in konsistentnost serij snemanja optičnih posnetkov (znotraj cikla in med letnimi serijami), sicer se obdelava podatkov precej zaplete in obseg dela nesprejemljivo poveča.

5 SKLEP

Namen prispevka je bil orisati in prikazati bistvene prednosti in omejitve zaznavanja vodnih površin s tehnologijo daljinskega zaznavanja iz vesolja in iz zraka ter s tem spodbuditi razmislek o uporabnosti podatkov daljinskega zaznavanja za različne namene in uporabnike (civilno zaščito, hidrološke študije, kartografijo in drugo). Ali in kako so raznoliki daljinsko zaznani podatki uporabni za posamezno stroko, prepuščamo presoji strokovnjakov s teh področij. Naš namen

je bil odstreti ključna izhodišča za razumevanje vrednosti tovrstnega podatka, to je zmožnosti prepoznavanja in kartiranja vodnih objektov oziroma površin v geometričnem (točnost) in semantičnem (popolnost) smislu. Za to je pomembno poznavanje celotnega postopka, od nastanka posnetka, njegovih lastnosti in mogočih načinov obdelave, analize in interpretacije do razumevanja okoliščin in odnosov med objekti ter pojavi v naravi.

ZAHVALA:

Center odličnosti Vesolje, znanost in tehnologije je operacija, ki jo delno financirata Evropska unija, Evropski sklad za regionalni razvoj, ter Ministrstvo za izobraževanje, znanost, kulturo in šport Republike Slovenije. Večina radarskih in optičnih posnetkov, ki so omogočili praktično pridobivanje izkušenj, je pridobljena v okviru proženj mednarodnega solidarnostnega vesoljskega programa Vesolje in velike nesreče (International Charter Space and Major Disasters).

Literatura in viri:

Bric, V., Oven, K., Dežman Kete, V., Mesner, N., Žagar, T., Radovan, D., Petrovič, D., Kosmatin Fras, M., Grigillo, D., Veljanovski, T., Kanjir, U., Oštir, K., Gvozdanovič, T., Smole, D., Bitenc, M. (2012). Kombinirani visokoločljivostni postopki zajemanja, razpoznavanja in vzdrževanje prostorskih podatkov : raziskovalni projekt št. V2-1095 v okviru Ciljnega raziskovalnega programa »Konkurenčnost Slovenije 2006–2013«. Ljubljana: Geodetski inštitut Slovenije, Končno poročilo, 2012.

Fraser, C. S., Ravanbakhsh, M. (2009). Georeferencing Accuracy of GeoEye-1 Imagery. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 75(5), 634–638.

Gosar, L., Rak, G., Steinman, F., Banovec, P. (2007). Z LIDAR tehnologijo zajeta topografija v hidravličnih analizah vodotokov. Gradbeniški vestnik, 56, 115–123.

Henderson, F. M., Lewis, A. J. (1998). Principles and Applications of Imaging Radar, 3rd ed. New York (ZDA).

Lamovec, P., Mikoš, M. (2011). Analiza poplav z uporabo satelitskih posnetkov – primer hudourniške poplave v Selški dolini leta 2007. Geodetski vestnik, 55(3), 483–494.

Lamovec, P., Oštir, K. (2010). Uporaba strojnega učenja za določitev poplavljenih območij – primer poplav v Selški dolini leta 2007. Geodetski vestnik, 54(4), 661–675.

Oštir, K. (2006). Daljinsko zaznavanje. Ljubljana: Založba ZRC.

Oštir, K., Kokalj, Ž., Veljanovski, T., Rakovec, J., Žagar, N. (2011). Uporaba satelitskega daljinskega zaznavanja za napovedovanje in opazovanje poplav. V: Kuhar, M. (ur.): Raziskave s področja geodezije in geofizike 2010: zbornik predavanj. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2011, 87–89.

Petrovič, D., Podobnikar, T., Grigillo, D., Kozmus, K., Vrečko, A., Urbančič, T., Kosmatin Fras, M. (2011). Kaj pa topografija? Stanje in kakovost topografskih podatkov v Sloveniji. Geodetski vestnik, 55(2), 304–318. http://www.geodetski-vestnik.com/55/2/gv55-2_304-318.pdf.

Veljanovski, T., Kokalj, Ž. (2012). Objektno usmerjeno kartiranje poplav in njihova vloga v poselitvi osrednjega dela Ljubljanskega barja. V: Ciglič, R., Perko, D., Zorn, M. (ur.): Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2011–2012. Ljubljana: Založba ZRC, 2012, 63–72.

Veljanovski, T., Lamovec, P., Pehani, P., Oštir, K. (2011a). Comparison of three techniques for detection of flooded areas on ENVISAT and RADARSAT-2 satellite images. V: Geoinformation for disaster management, GI4DM 2011, Antalya: Talya Convention Center Antalya.

Veljanovski, T., Pehani, P., Kokalj, Ž., Oštir, K. (2011b). Zaznavanje poplav s časovno vrsto radarskih satelitskih posnetkov ENVISAT in RADARSAT-2. V: Zorn, M., Komac, B., Cigčič, R., Pavšek, M. (ur.): Neodgovorna odgovornost (Knjižna zbirka Naravne nesreče, 2). Ljubljana: Založba ZRC, 81–89. <http://giam.zrc-sazu.si/sites/default/files/Naravne-nesrece-02.pdf>.

Prispelo v objavo: 2. oktober 2012

Sprejeto: 15. oktober 2012

dr. Tatjana Veljanovski, univ. dipl. inž. geod.

ZRC SAZU, Inštitut za antropološke in prostorske študije, Novi trg 2, SI-1000 Ljubljana

Center odličnosti Vesolje-SI, Aškerčeva 12, SI-1000 Ljubljana

e-pošta: tatjanav@zrc-sazu.si

Peter Pehani, univ. dipl. inž. fiz.

ZRC SAZU, Inštitut za antropološke in prostorske študije, Novi trg 2, SI-1000 Ljubljana

Center odličnosti Vesolje-SI, Aškerčeva 12, SI-1000 Ljubljana

e-pošta: ppehani@zrc-sazu.si

Peter Lamovec, univ. dipl. inž. geod.

ZRC SAZU, Inštitut za antropološke in prostorske študije, Novi trg 2, SI-1000 Ljubljana

e-pošta: plamovec@zrc-sazu.si

izr. prof. dr. Kristof Oštir, univ. dipl. inž. fiz.

ZRC SAZU, Inštitut za antropološke in prostorske študije, Novi trg 2, SI-1000 Ljubljana

Center odličnosti Vesolje-SI, Aškerčeva 12, SI-1000 Ljubljana

e-pošta: kristof@zrc-sazu.si, kristof.ostir@space.si