

KLASIFIKACIJA RABE POVRŠIN IZ VREDNOSTI INTENZITETE ODBITEGA LASERSKEGA ŽARKA

LAND USE CLASSIFICATION BASED ON THE INTENSITY VALUE OF THE REFLECTED
LASER BEAM

Mojca Kosmatin Fras, Maria Attwenger, Maja Bitenc

UDK: 528.8:711

IZVLEČEK

Pri zračnem laserskem skeniranju terena se hkrati z registracijo polarnih koordinat beleži tudi intenziteta odbitega laserskega žarka. Ker sam 3D lidarski oblak točk ne vsebuje informacij o tem, na katerih objektih točke dejansko ležijo, so meritve intenzitete pomemben podatek za identifikacijo objektov in pojavov v prostoru. To potrjuje slika barvno kodiranih vrednosti intenzitete, na kateri lahko razločimo posamezne pojave (asfaltna cesta, trava, zgradba itd.). V raziskavi smo analizirali vrednosti merjene intenzitete na primeru projekta Neusiedler See, ki je del transnacionalnega projekta SISTEMaPARC (Interreg IIIB). Preučevali smo, katere vrste rabe lahko na osnovi vrednosti intenzitete razločimo in tako izvedemo klasifikacijo rabe površin.

KLJUČNE BESEDE

zračno lasersko skeniranje, intenziteta, klasifikacija, normalizacija, raba površin

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.01

ABSTRACT

Airborne laser scanning of a terrain results, in addition to polar coordinate measurements, in intensity measurement of the reflected laser beam. Because the 3D lidar point cloud itself does not include information about the object types on which points are located, intensity measurements provide the important data for identification of objects and phenomena in the physical space. This is confirmed by the colour coded intensity value image, where particular objects (asphalt road, grass, building etc.) can be recognized. The measured intensity values have been analyzed within the Neusiedler See project case, part of a transnational project SISTEMaPARC (Interreg IIIB). We have investigated the land use classes that could be differentiated on the basis of intensity values thus enabling the land use classification.

KEY WORDS

airborne laser scanning, intensity, classification, normalization, land use

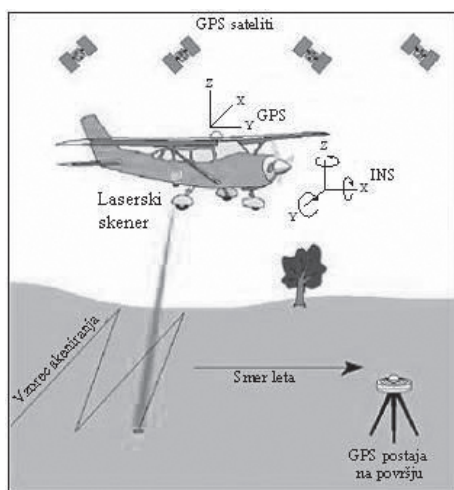
1 UVOD

Novjši sistemi zračnega laserskega skeniranja (ZLS) poleg beleženja podatkov, iz katerih se izračunajo 3D koordinate točk na skenirani površini, omogočajo tudi simultano beleženje vrednosti intenzitete odbitega laserskega žarka. Intenziteta nosi potencialno pomembne informacije o odbojnosti objektov, ki bi jih lahko, združene s 3D geometrijski podatki, koristno uporabili pri avtomatskem zaznavanju in identifikaciji med seboj različnih površin. Problem so mnogi moteči faktorji z izvorom v laserskem skenerju, atmosferi in na tarči, ki popačijo merjene vrednosti intenzitete in s tem onemogočajo neposredno uporabo meritev za rekonstrukcijo jakosti odboja

od tal. Različni strokovnjaki eksperimentalno preučujejo in analizirajo vrednosti intenzitete, da bi ugotovili vplive na meritve in zapisali najprimernejši model odbojnosti (Song et al., 2002; Lutz et al., 2003; Hasegawa, 2006). V raziskavi smo, na primeru podatkov zračnega laserskega skeniranja območja nacionalnega parka Neusiedler See, ki leži na meji med Avstrijo in Madžarsko, izmerjene vrednosti intenzitete najprej normalizirali in jih nato uporabili za klasifikacijo različnih rab površja, ki se pojavljajo na tem območju. To so predvsem travniki, polja, vinogradi in ceste.

2 Zračno lasersko skeniranje

Zračno lasersko skeniranje (ZLS), pogosto imenovano tudi lidar (**light detection and ranging**), je relativno nova, vendar hitro razvijajoča se metoda daljinskega zaznavanja, s katero pridobivamo 3D-informacije o zemeljskem površju in objektih ter pojavih na njem. Za zajem podatkov se uporablja aktivni senzor tj. laserski skener (LS), ki je vgrajen v dno nosilca - helikopterja ali letala (Slika 1).



Slika 1: Dinamičen zajem podatkov v misiji zračnega laserskega skeniranja (ALTM).

Laserski vir oddaja lasersko svetlobo, ki je ozko usmerjena, monokromatska in koherentna, proti napravi za odklon žarkov, od katere se odbije in usmeri proti tlom pod nosilcem. Ko se valovanje na tleh (največkrat) difuzno odbije od majhnega dela površja in se en del vrne nazaj v smeri senzorja, detektor LS zazna odboj in registrira čas potovanja žarka, kot odklona žarka v laserskem skenerju ter intenziteto odboja. Posredno prek časa potovanja laserske svetlobe se meri dvojna razdalja med senzorjem in površino, ki jo aproksimiramo kot točko, na kateri se je žarek odbil. Žarek se lahko na svoji poti odbije večkrat (npr. pri prodiranju skozi vegetacijo), laserski skenerji pa so zmožni registrirati različno število odbojev, najpogosteje sta to prvi in zadnji odboj (angl. first and last pulse). Za določitev prostorskih koordinat tako zajetih točk v referenčnem koordinatnem sistemu moramo poznati položaj in orientacijo senzorja LS v trenutku oddaje vsakega laserskega pulza. Položaj je določen s simultanimi meritvami po metodi diferencialnega

kinematičnega GPS-a, orientacija pa z inercialnimi meritvami (INS – Inertial Navigation System) treh kotov zasuka in kotnih pospeškov nosilca v prostoru.

Tehnologija zaenkrat ne zagotavlja dovolj natančne določitve koordinat v realnem času. Po končani zračni misiji se v procesu naknadne obdelave prek istega časovnega trenutka oddaje pulza združijo podatki LS (polarne koordinate) in podatki POS (Position and Orientation System – sistem za pozicijo in orientacijo) integriranih meritev sistemov GPS in INS. Za večjo relativno in absolutno natančnost 3D-koordinat lidarskih točk se v izračunu upoštevajo še kalibracijski podatki merskega sistema ZLS. Rezultat georeferenciranja so koordinate (X, Y, Z) v referenčnem koordinatnem sistemu za vsak odboj laserskega žarka, ki jih nato uporabimo za izdelavo končnih rezultatov ZLS, tj. za digitalni model reliefa, površja, stavb itd.

3 OPREDELITEV INTENZITETE ODBITEGA LASERSKEGA ŽARKA

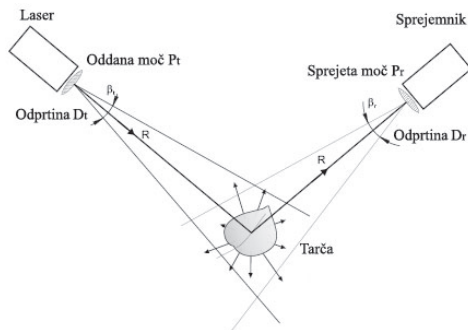
Sprejemnik senzorja (detektor) registrira čas potovanja proti sprejemniku odbite laserske svetlobe, kot odklona oddanega laserskega žarka in intenziteto odbitega žarka. Informacije o načinu beleženja intenzitete v posameznem laserskem merskem sistemu so težje dostopne (podajanje teh informacij ni v interesu razvijalcev sistema), zato je definicija intenzitete deloma nejasna. Po razlagi v literaturi je intenziteta registriranega odboja izražena s celoštevilčno vrednostjo. Meritev je proporcionalna številu fotonov, ki trčijo na fotodiode detektorja v določenem časovnem intervalu (v fiziki: moč). Tako npr. za Optechove sisteme po definiciji v Jonas (2002) velja, da se vrednosti merjene intenzitete nanašajo na jakost odbitega signala. Intenziteta zavzema vrednosti od 0 (šibak odboj) do 8160 (zelo močan odboj) in predstavlja relativno količino in ne nujno absolutne vrednosti meritve. Splošno je intenziteta (I_m) določena s pomočjo merjenja amplitude tistega dela odbitega ali od tarče oddanega valovanja, ki prepotuje razdaljo tarča-senzor in pade na sprejemni element senzorja LS-ja znotraj njegovega kota gledanja. Intenziteta se lahko zabeleži kot največja dosežena amplituda ali kot povprečje amplitude vrnjenega signala. Če upoštevamo dejstvo, da so vrednosti intenzitete brez merske enote in so meritve relativne, potem je smiselna in uporabna definicija intenzitete po Song et al. (2002) kot razmerje med jakostjo na detektorju LS-ja sprejete svetlobe (P_r) in jakostjo iz laserja oddane svetlobe (P_l).

3.1 Enačba radarja

S tako imenovano »enačbo radarja«, ki velja za vse aktivne senzorje, lahko izračunamo jakost oz. moč prejetega signala.

Laser vso svojo moč P_l (označena tudi s P_e) enakomerno oddaja skozi oddajno optiko s premerom odprtine D_l v majhnem kotu β in tako osvetli majhen (individualen) del površine A_{laser} . Če upoštevamo izgubo energije laserskega žarka pri potovanju skozi atmosfero in razmerje med velikostjo odtisa žarka na tleh A_{laser} (odvisna od vpadnega kota) ter velikostjo tarče¹ dA , dobimo jakost prestreženega signala na tarči. Nekaj signala se z absorpcijo na tarči izgubi, preostali del pa difuzno odbije. Jakost od tarče odbitega oz. izsevanega signala je odvisna od koeficienta odbojnosti ρ tarče, ta pa je določen z materialom tarče. Vzorec odbitega signala je lahko zelo

¹ Velikost tarče je efektivna površina vpada in odboja laserskega žarka na poljubnem objektu, ki leži na poti laserskega žarka proti tlom.



Slika 2: Skica geometrije zajema lidarskih točk (Wagner, 2005)².

zapleten. Če se signal odbije enakomerno porazdeljen v stožcu s prostorskim kotom Ω in se ta kot na razdalji R (tarča-senzor) prekriva z vidnim poljem sprejemnika, ki ima premer odprtine D_r , je moč prejetega signala dana z enačbo radarja. Ob upoštevanju vseh omenjenih faktorjev in dodatno še ob upoštevanju izgub signala v sistemu LS-ja (η_{sis}) ter v atmosferi (η_{atm}) zapišemo končno obliko enačbe moči sprejetega signala po (Wagner, 2005):

$$P_r = \left(\frac{P_t \cdot D_r^2}{4\pi \cdot R^4 \cdot \beta^2} \right) * \left(\frac{4\pi}{\Omega} \rho \cdot dA \right) * \eta_{sis} \cdot \eta_{atm} \quad (1)$$

P_r ... jakost sprejetega signala;

P_t ... jakost oddanega signala;

D_r ... premer odprtine sprejemne optike;

R ... razdalja tarča-senzor;

β ... divergenca laserskega žarka;

η_{sis} ... faktor prenosa žarka v sistemu;

η_{atm} ... faktor prenosa žarka v atmosferi;

Ω ... prostorski kot;

dA ... velikost tarče;

ρ ... koeficient odbojnosti tarče.

Faktorji v prvem oklepaju se nanašajo na laserski skener in faktorji v drugem oklepaju na tarčo. Slednje je zelo težko individualno izmeriti, zato jih združimo v en faktor, t. i. prečni prerez odboja laserskega žarka (angl. backscattering cross-section), ki je podrobneje razložen v podpoglavju 3.2.1.

Če pade žarek vertikalno na površino tarče ($\xi = 90^\circ$) in se od nje odbije homogeno ($dA = A_{laser}$), je velikost tarče določena z enačbo:

² Oddajnik in sprejemnik sta zaradi večje preglednosti geometrije zajema prikazana ločeno. Sicer ima LS monostatično konstrukcijo.

$$dA = A_{laser} = \pi \frac{R^2 \cdot \beta_t^2}{4}. \quad (2)$$

Če upoštevamo še, da je odboj laserskega žarka na večini tarč difuzen ($\Omega = \pi$), se moč signala na sprejemniku LS izračuna po enačbi:

$$P_r = \left(\frac{P_t \cdot D_r^2}{4R^2} \right) \cdot \eta_{sis} \cdot \eta_{atm} \cdot \rho \quad (3)$$

Iz enačbe (3) je razvidno, da je jakost sprejetega signala (odboja) obratno sorazmerna s kvadratom merjene razdalje (R) in ni več odvisna od divergence laserskega žarka (β).

Če se vpadni kot (ξ) laserskega žarka na tarčo razlikuje od 90° , se spremeni izraz za izračun velikosti odtisa laserskega žarka (enačba (2)) in je po Hug in Wehr (1997):

$$P_r = \left(\frac{P_t \cdot D_r^2 \cdot \cos \xi}{4R^2} \right) \cdot \eta_{sis} \cdot \tau_{atm}^2 \cdot \pi \cdot \rho \quad (4)$$

3.2 Vrednosti merjene intenzitete

Vrednost merjene intenzitete odbitega laserskega žarka je zapletena funkcija več spremenljivk, kot so:

- moč oddanega laserskega žarka (P_t);
- razdalja senzor-tarča-senzor ($2R$), ki je odvisna od višine terena in višine leta nosilca sistema;
- nadmorska višina območja zajema - vpliva na karakteristike materiala (npr. spreminjanje prisotnosti vlage v zemlji glede na n. m. v.);
- kot gledanja senzorja ZLS (angl. viewing angle);
- vpadni kot (ξ) laserskega žarka na tarčo;
- vrsta odboja (difuzni, zrcalni) laserskega žarka na tarči;
- koeficient odbojnosti tarče (angl. reflectivity);
- velikost tarče glede na velikost odtisa laserskega žarka na tleh;
- atmosferski pogoji - čisti ali megleni zrak (glede na količino vodne pare in aerosolov) vplivata na absorpcijo in lom valovanja (angl. air attenuation and diffraction);
- sevanje iz okolja, ki ima valovno dolžino blizu laserski svetlobi (sončna svetloba, odbita od tal in od delcev v ozračju, termalno sevanje površja Zemlje).

Zaradi teh vplivov so meritve intenzitete popačene in jih ni mogoče neposredno uporabiti za identificiranje oz. določanje tipa tarče (vrste materiala). Potrebne so poenostavitve, ki se jih nato preverja z različnimi eksperimentalnimi analizami podatkov.

Po **definiciji intenzitete**, da jo določa razmerje med močjo sprejete P_r in oddane P_t svetlobe, lahko za primer, ko je odboj difuzen in homogen ter je vpad žarka na tarčo pravokoten in z upoštevanjem

poenostavitev za isti merski sistem in za enake atmosferske pogoje, enačbo (3) zapišemo:

$$I_m \approx \frac{P_r}{P_i} = \frac{\rho}{R^2} \cdot konst. \quad (5)$$

Kjer je::

$$konst. = \frac{D_r^2}{4} \eta_{sis} \cdot \eta_{atm} \dots \text{konstanta.}$$

Merjene vrednosti intenzitete so tako odvisne od materiala tarče (koeficient odbojnosti ρ) in se manjšajo s kvadratom razdalje R . Iz enačbe (5) je razvidno, da bo imela ista površina ($\rho = konst.$), osvetljena in opazovana z istim aktivnim senzorjem ZLS-ja vendar na različnih razdaljah (R), različne vrednosti merjene intenzitete (I_m). Ker se vpadni kot ξ večinoma le malo razlikuje od 90° , je njegov vpliv na merjeno intenziteto majhen. Upoštevamo ga le v primeru zahtevane visoke natančnosti merjenja odbojnosti.

Vrednosti merjene intenzitete tako niso odvisne od spremenljivk, kot so moč oddanega žarka, atmosferski pogoji, sevanje iz okolja, kot gledanja sensorja ZLS, ampak so v največji meri odvisne od razdalje R in vrste tarče (glede na njeno odbojnost, usmerjenost, velikost). Razdalja R je merjena količina in jo poznamo za vsak registriran odboj laserskega žarka. Bolj zapleten je vpliv vrste tarče, ki združuje spremenljivke, zapisane v drugem oklepaju enačbe (1), in se imenuje prečni prerez odboja laserskega žarka σ (Wagner, 2005)

3.2.1 Prečni prerez odboja laserskega žarka

Prečni prerez odboja laserskega žarka je odvisen od koeficienta odbojnosti tarče (dielektične lastnosti), usmerjenosti tarče glede na vpadni kot in kot odboja laserskega žarka ter od velikosti tarče glede na velikost odtisa laserskega žarka na tleh. Kot nakazuje že samo ime, nam prečni prerez odboja poda efektivno površino interakcije laserskega žarka s tarčo, pri čemer sta upoštevani usmerjenost in odbojnost tarče (Jelalian, 1992, cit. po Wagner, 2005). Razumevanje spremenljivk, ki določajo prečni prerez odboja in so pomembne pri računanju jakosti sprejetega valovanja, je poglobitvenega pomena za analizo vrednosti intenzitete ter za ugotavljanje vplivov na meritve intenzitete.

Vpliv usmerjenosti tarče na merjeno intenziteto je odvisen od tipa odboja laserske svetlobe na tej tarči (difuzen, zrcalen ali pa odboja sploh ni). Ker je valovna dolžina laserske svetlobe ($\lambda = 1 \mu\text{m}$) majhna glede na hrapavost večine tarč pri ZLS, velja Lambertov odbojni zakon: žarek se odbije difuzno, na vse strani enakomerno, in velja $\Omega = \pi$ (Lambertova tarča) (Wagner, 2005). Tako je vpliv usmerjenosti tarče glede na smer odboja žarka na intenziteto zanemarljiv. Redke izjeme, kjer pride do zrcalnega odboja (površine obravnavamo kot gladke) in kjer moramo pri analizi intenzitete upoštevati smer odboja žarka, so območja, pokrita z ledom in snegom (Lutz et al., 2003). Čeprav kot med normalo (difuzne) tarče in smerjo sprejemnika (kot odboja laserskega žarka) nima vpliva na jakost sprejetega signala (P_r), pa je ta odvisna od kota med normalo (difuzne) tarče in smerjo vira svetlobe, torej od t. i. vpadnega kota. Večji kot je vpadni kot, večja

je osvetljena površina na tleh in s tem manjša gostota energije na tarči, ki se difuzno odbije na vse strani. Zato je manjši tudi tisti del odbite svetlobe, ki se zazna v sprejemniku LS. Izračun vpadnega kota je v realnih primerih (npr. listi drevesa, skalnato gorsko pobočje) zapleten. V enačbi po Lutz et al. (2003) potrebujemo podatke o orientaciji LS-sistema, ki poda smer laserskega žarka, in digitalni model višin (angl. DEM), s katerim sta določena nagib in usmerjenost tarče.

Vpliv velikosti tarče glede na velikost odtisa laserskega žarka na tleh je Wagner (2005) opisal za štiri primere tarč: majhne tarče (npr. list na drevesu), linearne tarče (npr. žica daljnovoda), razprostrte tarče (npr. cesta) in prostorninske tarče (npr. krošnja drevesa). Če predpostavimo, da tarča prestreže celoten žarek z divergenco β , je njena velikost kar enaka velikosti odtisa žarka. Velikost odtisa žarka na tej t. i. razprostrti tarči je za raven teren in za poljuben vpadni kot dana z enačbo v Baltsavias (1999). Velikost razprostrte tarče vpliva na merjeno intenziteto prek spremenljivke *vpadnega kota* (ξ).

Koeficient odbojnosti (ρ) za tarče z difuznim odbojem opišemo z razmerjem med odbito in sprejeto energijo na tarči. Njegova vrednost se spreminja glede na uporabljeno svetlobo in lastnosti materiala tarče. V preglednici 1 so zapisane tipične vrednosti koeficienta odbojnosti za različne materiale tarče in za valovno dolžino laserske svetlobe $1 \mu\text{m}$, ki je največkrat uporabljena v komercialnih LS. Ker so pogoji za merjenje neznani, je treba te vrednosti skrbno upoštevati (Wagner, 2005).

Vpliv odbojnosti tarče ($\rho_{\text{tarča}}$) na merjeno intenziteto je že po definiciji intenzitete (glej enačbo (5)) največji in najpomembnejši. Merjena intenziteta zaradi vpliva motečih faktorjev ni popolnoma v skladu s teoretičnimi vrednostmi za odbojnost materiala, ampak jim sledi relativno. Tako je mogoče ločiti različne materiale in bi lahko teoretično podatke o intenziteti odboja uporabili za razločevanje različnih površin. Pogoj je, da se odbojnosti in s tem vrednosti intenzitete teh površin dovolj razlikujejo med sabo. Raziskave na to temo so opisane v Hasegawa (2006) in Song et al. (2002).

4 ANALIZA INTENZITETE NA PRIMERU PROJEKTA NEUSIEDLER SEE

Zračno lasersko skeniranje nacionalnega parka Neusiedler See, ki leži na meji med Avstrijo in Madžarsko, je bilo opravljeno v okviru mednarodnega projekta SISTEMaPARC (program Interreg IIIB). Glavni namen projekta Neusiedler See je bil renaturalizacija območja, saj je v 20. stoletju zaradi neprimerne gospodarjenja z vodo in zemljišči prišlo do velikega upada števila naravnih mokrišč. Ker je površje parka relativno ravno, so za načrtovane hidrološke analize pomembne že centimetrске višinske razlike, ki jih lahko pridobimo s postopki zajema in obdelave meritev tehnologije ZLS. Rezultati analize so zapisani v diplomskem delu Chlaupke (2006). Dodatno smo na podatkih projekta Neusiedler See izvedli analizo intenzitete odbitega laserskega žarka (v nadaljevanju intenzitete), ki je predmet raziskave v diplomskem delu Bitenc (2007). Namen analize podatkov intenzitete je bil, ugotoviti možnost uporabe teh meritev za klasifikacijo različnih rab površja, ki se pojavljajo na obravnavanem območju: polja, travniki oz. druga nizka vegetacija, ceste (asfaltne in gramozne) in vinogradi.

Material	Reflectivity
Aluminium foil	0.8-0.9
Asphalt	0.2
Cement	0.4
Chromium	0.6
Copper	0.9
Maize leaf	0.9
Maple leaf	0.4
Platinum	0.45-0.6
Sandy soil - wet	0.15
Sandy soil - dry	0.3
Silty soil - dry	0.6
Snow	0.25
Stainless steel	0.2-06
Water - normal incidence	< 0.01
Water - grazing incidence	up to 0.3
Wheat stalks	0.9
Wheat heads	0.65
White oak leaf	0.65

Preglednica 1: Koefficient odbojnosti za različne materiale tarče pri valovni dolžini 1 μm (Wagner, 2005).

4.1 Podatki za analizo intenzitete

Za analizo intenzitete smo imeli na razpolago lidarske podatke južnega dela območja projekta Neusiedler See, ki so bili podani v projekcijskem sistemu UTM. Višine se nanašajo na elipsoid. Iz 3D-koordinat točk, ki so bile določene v procesu skrbnega georeferenciranja in za katere se je dodatno izračunalo polarne koordinate, smo izračunali digitalni model reliefa (DMR) in digitalni model površine (DMP). Višine DMR-ja se na celotnem obravnavanem območju spremenijo le za 15 m, kar pomeni, da je teren relativno raven. Če pri modeliranju ravnin upoštevamo vse zajete točke, pridobimo DMP, ki s svojo teksturo prikazuje pojave na terenu, kot so zgradbe, vegetacija (drevesa, grmičevje in vinogradi), drugi objekti (npr. avtomobili), in služi za podlago podatkom intenzitete – jim doda višinsko predstavo. Poleg lidarskih podatkov smo imeli na voljo še neobdelane digitalne slike.

Misija ZLS je bila opravljena z Optechovim merskim sistemom ALTM 2050, ki omogoča merjenje intenzitete prvega in zadnjega odboja in za katero veljajo naslednje splošne značilnosti:

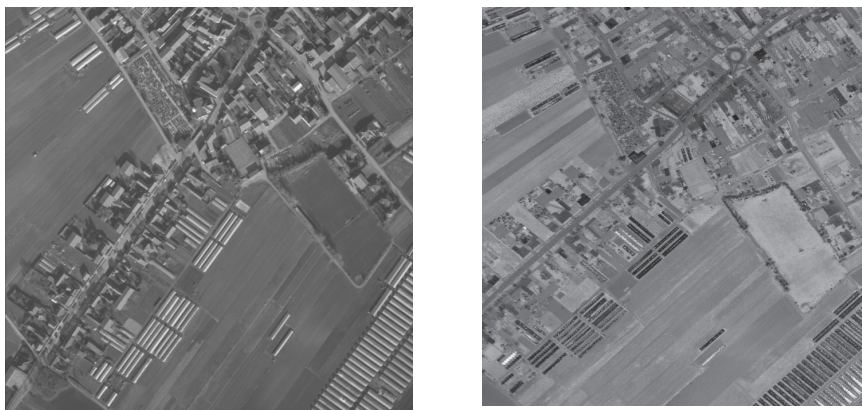
- Meritve intenzitete prikazujejo tipičen zvonast histogram.
- Razpon vrednosti intenzitete je od 4 do 255 pri povprečni višini leta 1100 m.
- Nižje kot je letelo letalo, večje so vrednosti intenzitete odboja.

Dejansko so bile vrednosti intenzitete v sprejemniku sistema ALTM 2050 kodirane z 12 biti. Največje vrednosti (torej do 4096), ki so jih imele točke z visoko odbojnostjo (vodne in zrcalne površine, steklo), so motile vizualizacijo slike intenzitete. Zato so v podjetju TopScan pri ASCII-izpisu omejili zalogo vrednosti na 255, ki omogoča 8-bitni prikaz podatkov intenzitete. Točkam

s prvotno najvišjimi vrednostmi je bila brez skaliranja dodeljena zgornja mejna vrednost 255. Odboji z zelo nizko/majhno vrednostjo intenzitete morajo biti izpuščeni, saj je meritev razdalje zaradi prešibkega signala geometrično nenatančna. V tem primeru so bili izločeni registrirani odboji, ki so imeli vrednost manjše od 4. V programu SCOP++ smo s preprosto interpolacijo intenzitete (metoda »Moving Planes«) in sivotonskim kodiranjem vrednosti izdelali sliko intenzitete (slika 3, desno).

4.2 Analiza intenzitete znotraj določenih pojavov

Na sliki intenzitete (slika 3, desno) so dobro vidne različne rabe tal. Dejansko vrsto rabe tal pa smo skušali določiti s pomočjo posnetkov, ki so bili zajeti istočasno z lidarskimi podatki z nemetričnim digitalnim fotoaparatom. Tako smo razločili in identificirali pojave zapisane v preglednici Preglednica 2. Oceno tipične vrednosti (oz. interval spreminjanja) intenzitete za določen pojav smo določili v programu GVE, ki omogoča barvno kodiran prikaz točkovnih podatkov in pregled vrednosti za posamezno točko. Pri ocenjevanju vrednosti intenzitete za objekte nad terenom smo pod lidarske točke položili DMP, na katerem je viden tip objekta (npr. hiša, vegetacija, avto) in njegov položaj na sliki intenzitete (npr. obris vegetacije, obod hiš). Tip in položaj pojavov na terenu (npr. polja, travnik, ceste) pa smo na sliki intenzitete ocenili s pomočjo digitalnih slik in intenzitete same. Natančnejša analiza vrednosti intenzitete v tem



Slika 3: Primer digitalne slike (levo) in slike intenzitete (desno) za isto območje.

Pojav		Ocena vrednosti intenzitete
Trava		76-107
Polja	zeleno	56-96
	rjavo	35-52
Vinogradi		4-134
Ceste	asfaltirana	14-47
	gramozna	50-68
Strehe zgradb		4-146
Objekti - rastlinjaki		4-255

Preglednica 2: Različni pojavi (objekti, raba tal) in ocena vrednosti intenzitete.

primeru ni bila mogoča, saj bi potrebovali dodatne podatke (npr. ortofoto), s katerimi bi locirali pojave na sliki intenzitete in tako omogočili natančnejšo ekstrakcijo vrednosti intenzitete za določen pojav.

Intenziteta se najbolj spreminja in zavzema širok interval vrednosti na objektih (hiše in rastlinjaki) in na območju vinogradov, kar potrjuje vpliv vpadnega kota (ξ) na merjeno intenziteto. Ta zaradi nagnjenosti površin (strehe hiš) oz. spreminjanja njihove orientacije, naklona (pri ukrivljenih strehah rastlinjakov, brajd vinogradov) zelo variira. Hitro in neurejeno spreminjanje intenzitete odboja laserskega žarka na rastlinjakih je še posledica prosojnosti materiala rastlinjaka (plastika), ki deloma prepušča laserske žarke, da se odbijejo od notranjih objektov. Intenziteta tako zavzema celoten razpon vrednosti od 4 do 255. Posamezne visoke vrednosti intenzitete se pojavijo na cestah in predstavljajo odboj laserskega žarka na avtu, beli cestni oznaki (sredinska črta, prehod za pešce), pokrovu kanalnih vodov itd. Ti materiali imajo namreč visok koeficient odbojnosti (preglednica 2). Ocenjene vrednosti intenzitete za pojave na terenu prav tako zavzemajo (pre)velike intervale, ki se med seboj prekrivajo.

S primerjavo slik intenzitete posameznih lidarskih pasov smo v nekaterih primerih ugotovili precejšnje razlike med njimi. Čeprav pasovi pokrivajo isto območje in slika intenzitete prikazuje iste pojave (odboj laserskega žarka na istem materialu, pojavu), se vrednosti merjene intenzitete razlikujejo. Z empiričnim primerjanjem intenzitete identičnih območji smo ugotovili, da je zamik vrednosti med pasovi posledica različne višine leta letala.

4.3 Analiza vplivov na merjeno intenziteto

Merjena intenziteta je odvisna od razdalje (R), vpadnega kota (ξ), ki je parameter v enačbi za velikosti tarče, ter koeficienta odbojnosti (ρ). Z analizo podatkov iščemo korelacijo med temi spremenljivkami.

$$I_m = f(R, dA(\xi), \rho) \quad (6)$$

Spremenljivka R je dana za vsako lidarsko točko, saj imamo podatke originalnih opazovanj polarnih koordinat. Pri upoštevanju vpliva dA predpostavljamo:

1. Pri klasifikaciji rabe tal obravnavamo le intenziteto terenskih točk. Ker je teren na območju Neusiedler See raven (glede na izračunani DMR), je vpadni kot enak kotu skeniranja. Ta se pri merskem sistemu ALTM2050 spreminja od 0° do $\pm 20^\circ$ in je s polarnimi koordinatami dan za vsako lidarsko točko. Torej velja $\xi = \Theta = [0^\circ, 20^\circ]$.
2. Laserski žarek se je odbil na homogeni površini, tj. na razprostrti tarči, in je tako velikost tarče vedno enaka velikosti odtisa žarka na tleh. Potem je velikost tarče $dA = A_{laser} = [20, 23]$ cm.

Vpliv spreminjanja vpadnega kota na spremembo velikosti tarče in s tem na merjeno intenziteto je majhen glede na vpliv razdalje (Sterzai, 2006). Upoštevamo še, da je v primeru ravnega terena vpadni kot (ξ) parameter merjene razdalje ($R = f(\xi)$). Zato vpliv vpadnega kota na merjeno intenziteto (oz. kota skeniranja) v nadaljevanju analize zanemarimo. Največji vpliv na vrednosti

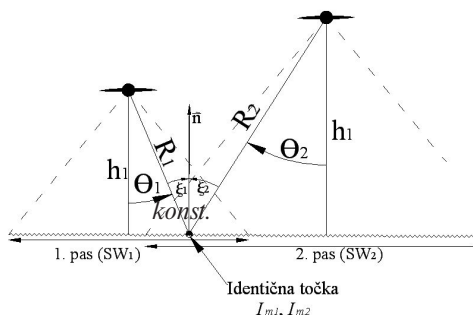
merjene intenzitete ima koeficient odbojnosti tarče, ki pa je nepoznan. Tudi teoretičnih vrednosti (Preglednica 1), ki se nanašajo na določen pojav, ne moremo uporabiti, ker nimamo in tudi ne moremo pridobiti vrednosti merjene intenzitete le za določen pojav (ekstrakcija I_m le za npr. polja ni mogoča). Enačbo (6) sedaj zapišemo:

$$I_m = f(R, \rho) \quad (7)$$

Ker se na obravnavanem območju pojavljajo različne rabe tal z različnimi koeficienti odbojnosti, neposredne korelacije med intenziteto odboja in razdaljo ni. Funkcije f v enačbi (7) se ne da določiti.

V tem primeru upoštevamo dejstvo, da je odbojnost lastnost materiala posameznega pojava in bi zato morale imeti položajno identične točke (tj. ležijo na istem pojavu), zajete v različnih lidarskih pasovih, enake vrednosti ρ ($\Delta\rho = 0$). Z analizo razlik merjenih vrednosti, ki se nanašajo na identične terenske točke dveh pasov ($\Delta I_m, \Delta R$)_{IDT}, smo skušali zapisati funkcijo spreminjanja merjene intenzitete (torej znotraj določenega pojava) v odvisnosti od spreminjanja razdalje senzor-tarča.

$$\Delta I_m = f(\Delta R), \Delta\rho = \quad (8)$$



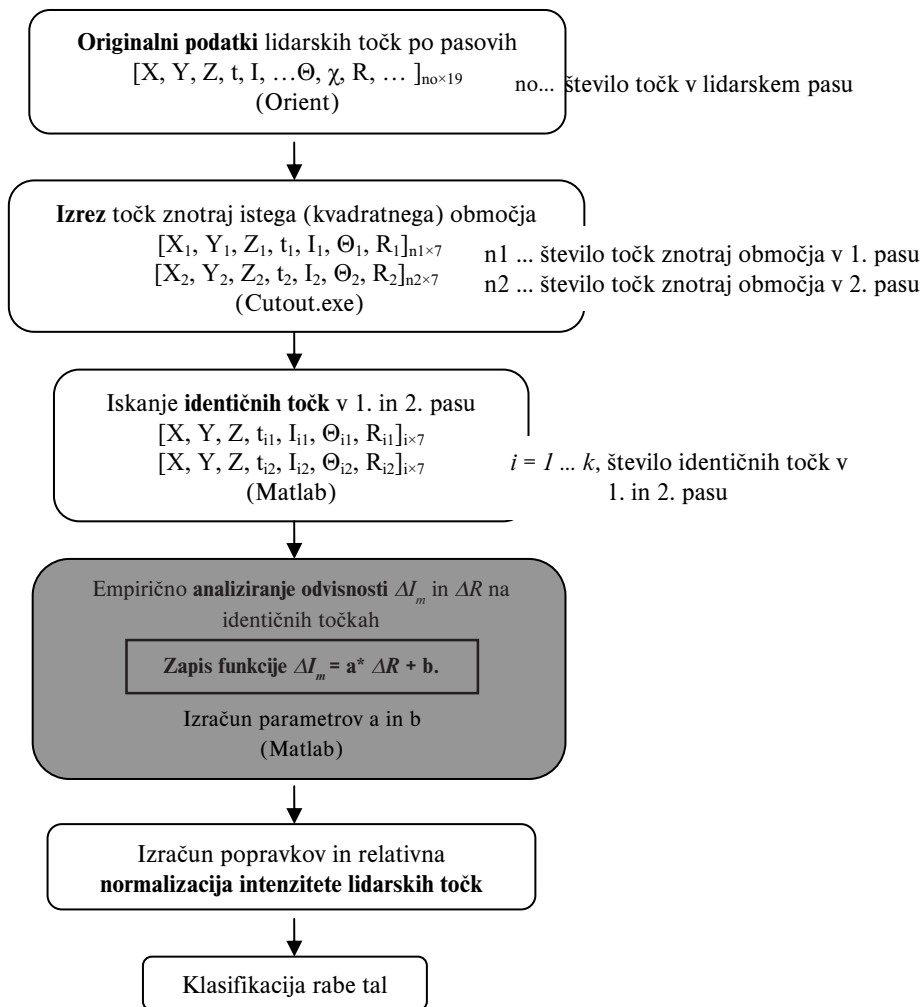
Slika 4: Skica geometričnih razmerij spremenljivk za identično točko v dveh lidarskih pasovih.

4.4 Popravki merjene intenzitete za identične točke

S popravki vrednosti (merjenih) intenzitet, ki se nanašajo na identične točke prvega in drugega pasu (torej $I_{IDT,1}^n$ in $I_{IDT,2}^n$), moramo zadostiti pogoju, da so razlike normaliziranih intenzitet identičnih točk 1. in 2. pasu enake nič.

$$I_{IDT,1}^n - I_{IDT,2}^n = 0 \quad (9)$$

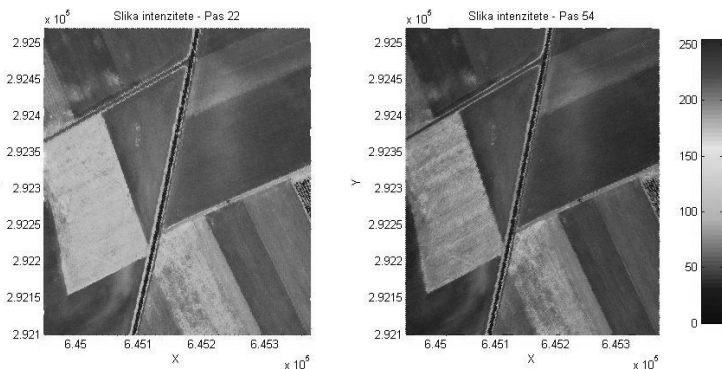
Potek empirične analize razlik spremenljivk za izračun normaliziranih vrednosti prikazuje spodnji diagram.



Slika 5: Diagram poteka empirične analize za normalizacijo intenzitete.

Prpriprava podatkov lidarskih točk

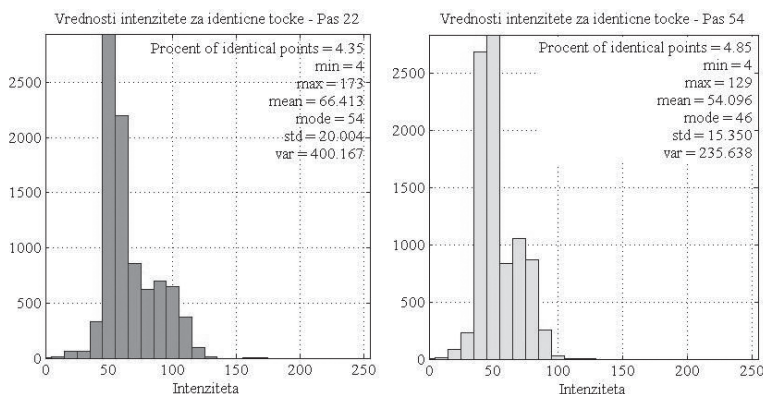
Originalni podatki lidarskih točk (razdalja in kot skeniranja) v tem primeru niso bili na voljo. Za potrebe analize jih je s programom ORIENT izračunal prof. Helmut Kager iz I. P. F. (Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung) na Dunaju. S programom Cutout.exe (avtorica Maria Attwenger, I. P. F.) smo znotraj kvadrata velikosti $420 \text{ m} \times 420 \text{ m}$ iz dveh prekrivajočih se lidarskih pasov izrezali lidarske točke. Če iz teh dveh setov točk izdelamo slike intenzitete in ju primerjamo, vidimo različne vrednosti (slika 6).



Slika 6: Primerjava slik merjene intenzitete na istih območjih iz dveh pasov (levo – pas 22, desno – pas 54).

Iskanje identičnih točk in analiza razlik spremenljivk

S pomočjo kode, zapisane v programskem paketu Matlab, smo v obeh lidarskih pasovih poiskali identične točke, ki po položaju (X, Y) med seboj niso oddaljene za več kot 10 cm (polmer odtisa laserskega žarka ima od 10 cm do 12,5 cm) in za katere tako predpostavljamo, da ležijo na istem pojavu (travniki, polje ...). Zato imata identični točki isto odbojnost in bi (teoretično) morala biti merjena intenziteta enaka. Dejansko temu ni tako, kar je vidno s primerjavo slik intenzitete istega območja iz dveh pasov. S primerjanjem histogramov je opazen zamik vrednosti intenzitete 1. pasu glede na 2. pas.



Graf 1: Histograma z vrednostmi intenzitete za identične točke (levo – pas 22, desno – pas 54).

Med identičnimi točkami izračunamo razlike merjenih spremenljivk in empirično analiziramo njihovo odvisnost.

- *razlika intenzitet:* $\Delta I_i^m = I_{i,2}^m - I_{i,1}^m \quad i = 1, \dots, k$ (10)

- *razlika razdalj:* $\Delta R_i = R_{i,2} - R_{i,1}$, (11)

kjer so:

k ... število identičnih točk v paru pasov;

ΔI_i^m ... razlika intenzitet za identično točko i ;

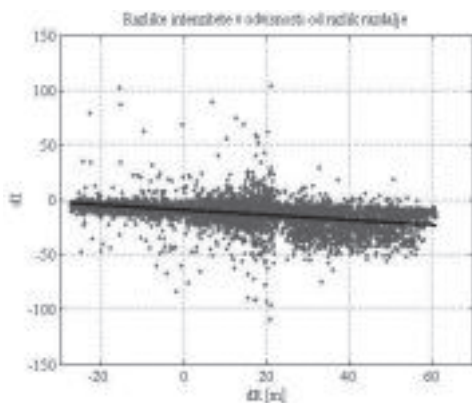
$I_{i,1}^m$ oz. $I_{i,2}^m$... vrednost intenzitete identične točke i v 1. pasu oz. 2. pasu;

ΔR_i ... razlika razdalj za identično točko i ;

$R_{i,1}$ oz. $R_{i,2}$... merjena razdalja za identično točko i v 1. pasu oz. 2. pasu.

Zapis funkcije

Ker razlike intenzitet iz dveh lidarskih pasov za identično točko (ΔI_i^m) niso enake pričakovani vrednosti nič, iščemo njeno funkcijsko odvisnost od spremenljivke ΔR_i (enačba (8)), ki je izrisana na spodnjem grafu (Graf 2).



Graf 2: Odvisnost razlike intenzitete od razlike razdalj.

Medtem ko med spremenljivkama *intenzitete* in *razdalje* ni nikakršne korelacije, kaže graf odvisnosti *razlike intenzitet* od *razlike razdalj* linearno odvisnost (Graf 2). Enačbo (8) sedaj zapišemo:

$$\Delta I_m = a * \Delta R + b \quad (12)$$

Ker sta razliki ΔI_m in ΔR izračunani s pomočjo identičnih točk, lahko neznan parametra a in b ocenimo z realizacijo vzorca identičnih točk po metodi najmanjših kvadratov. Izračunana koeficienta \tilde{a} in \tilde{b} imenujemo regresijska koeficienta, premico $\overline{\Delta I(\Delta R)} = \tilde{a} * \Delta R + \tilde{b}$ pa regresijska premica (graf 2 - črna črta). Vrednosti parametrov a in b natančneje določajo vpliv ΔR na ΔI_m in omogočajo izračun popravkov za merjene intenzitete.

4.5 Normalizacija intenzitete

S parametroma a in b , ki veljata za par lidarskih pasov, iz katerih so bile izrezane identične točke, izračunamo popravke merjene intenzitete $\overline{\Delta I(\Delta R)}$. Popravki so relativni, saj se nanašajo na razlike razdalj ΔR , zato se intenziteta enega *osnovnega* pasu (angl. master) ne spremeni, intenziteti drugega *podrejenega* pasu (angl. slave) pa popravek prištejemo oz. odštejemo. Spodnji možnosti

veljata v primeru, ko so razlike ΔR izračunane kot vrednosti drugega pasu minus vrednosti prvega pasu (2. pas - 1. pas).

$$1. \text{ možnost: } I_2 \text{ (2. pas - osnovni)} \quad (13)$$

$$I_1 \rightarrow I_1^n = I_{m,1} + \overline{\Delta I(\Delta R)}$$

$$2. \text{ možnost: } I_1 \text{ (1. pas - osnovni)} \quad (14)$$

$$I_2 \rightarrow I_2^n = I_{m,2} - \overline{\Delta I(\Delta R)}.$$

ΔR je za identične točke izračunan po enačbi (11), za vse ostale točke (v podrejenem pasu) pa:

$$1. \text{ možnost: } \Delta R = \overline{R_2} - R_1 \quad (15)$$

$$2. \text{ možnost: } \Delta R = R_2 - \overline{R_1}, \quad (16)$$

Kjer sta:

$\overline{R_1}$ oz. $\overline{R_2}$... povprečna vrednost razdalj lidarskih točk v 1. oz. 2. pasu;

R_1 oz. R_2 ... merjene razdalje lidarskih točk v 1. oz. 2. pasu.

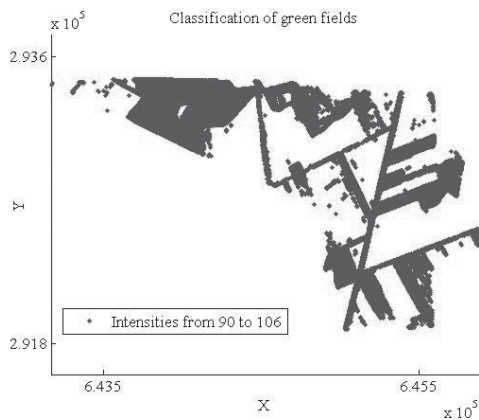
Sliki relativno normaliziranih intenzitet identičnih točk sta sedaj enaki in je razlika vrednosti (normaliziranih) intenzitet enaka nič. Dejansko so normalizirane vrednosti *podrejenega* pasu le zamaknjene glede na njegove merjene vrednosti, tako da je njihova razlika z intenziteto *osnovnega* pasu enaka nič. To potrjujeta (tudi) velikost parametrov a in b , kjer je a , s katerim je določen vpliv razlike razdalj, precej manjši od konstantnega člena (tj. parametra b).

	1. pas: 22	2. pas: 54 (osnovni)
Povprečna višina leta letala	1122,19 m	1137,01 m
Velikost območja	420 m × 420 m	
Število točk znotraj kvadrata	204 518	183 660
Število identičnih točk	8902	
Povprečje merjene intenzitete $\overline{I_i^m}$	66	54
Razlika intenzitete ΔI_i^m	-12 ± 10 (povprečje ± standardna deviacija)	
Parametra a in b	(-0,2278, -9,0596)	
Razlika relativno normalizirane intenzitete ΔI^r	0 ± 9	
Povprečje relativno normalizirane intenzitete	54	54 (ostane)

Preglednica 3: Pregled rezultatov normalizacije pasov 22 (podrejeni) in 54 (osnovni) - za identične točke.

5 KLASIFIKACIJA POJAVOV

Po Katzenbeisser (2002) je za primerjanje merjenih intenzitet nujna njena normalizacija na povprečno vrednost razdalje. Z opisano relativno normalizacijo intenzitete s pomočjo identičnih točk sicer popravimo merjene vrednosti za spreminjanje razdalj ΔR med pasovi in kot rezultat dobimo bolj homogeno, natančno in jasno sliko intenzitete lidarskih točk na zajetem območju. Vendar popravki skoraj ne vplivajo na spreminjanje intenzitete znotraj določenega pojava. Ker je razpon vrednosti intenzitete na določenem pojavu (npr. na travi) tako velik in se prekriva z vrednostmi drugih pojavov, je klasifikacija neuspešna. Na sliki (Slika 7) so poleg zelenih zelenih polj oz. travnikov prikazane še ceste in druga manjša območja in točke, ki sicer ležijo na polju.



Slika 7: Primer slike intenzitete za njene vrednosti od 90 do 106.

Čeprav so pojavi trava, orna zemlja in gramoz (pesek oz. prod) glede na rezultate raziskave v Hasegawa (2006) ločljivi med seboj, bi morali za natančnejšo in uspešnejšo klasifikacijo uporabiti dodatne podatke. Le laserske meritve ne zadostujejo. Drugače je npr. pri daljinskem zaznavanju z multispektralno kamero, kjer z več barvnimi kanali pridobimo dovolj informacij za avtomatsko klasifikacijo.

6 ZAKLJUČEK

Na merjenje intenzitete oz. na same vrednosti meritev vplivajo mnogi faktorji, kot so način registracije odboja v laserskem skenerju, stanje atmosfere, skozi katero potuje laserski žarek, vrsta materiala tarče in njen položaj, merjenje polarnih koordinat tarče (razdalja in kot skeniranja). Z različnimi laboratorijskimi eksperimenti ali glede na podatke, ki jih imamo na razpolago pri določenemu projektu, moramo normalizirati vrednosti intenzitete za te vplive. Glede na raziskave že omenjenih avtorjev naj bi bila intenziteta v največji meri odvisna od merjene razdalje senzor-tarča, odbojnosti materiala tarče in vpadnega kota, kar smo preizkušali na podatkih projekta Neusiedler See. Ker je teren obravnavanega območja relativno raven, je vpadni kot enak v LS registriranemu kotu skeniranja. Ugotovili smo, da ima zanemarljivo majhen vpliv na merjeno intenziteto. Podatki o vrsti materiala, torej o odbojnosti, ki pogojujejo vrednosti intenzitete, niso bili na voljo, zato smo v analizi uporabili meritve na identičnih točkah dveh prekrivajočih se pasov. Z izračunom linearne regresijske funkcije smo dokazali, da so razlike merjenih intenzitet med točkami dveh pasov v največji meri posledica razlik višin leta nosilca in so konstantne za

obravnani par lidarskih pasov. Vrednosti intenzitete so med seboj le zamaknjene za neko konstantno vrednost.

Z opisano relativno normalizacijo vrednosti intenzitete vseh vzdolžnih pasov (*podrejeni*) glede na prečni pas (*osnovni*), kot so bili zajeti v projektu Neusiedler See, bi bila slika intenzitete vseh prekrivajočih se lidarskih pasov bolj homogena in jasna. Razpon vrednosti intenzitete za posamezen pojav pa se ne spremeni. V prihodnji analizi bi bilo treba raziskati spreminjanje intenzitete znotraj določenega pojava (ne le relativno, glede na osnovni pas). S tem bi lahko natančneje in neposredno določili korelacijo med intenziteto in razdaljo, ki je za raven teren funkcija kota skeniranja (višina leta je konstantna), izračunali popravke intenzitete in nenazadnje (avtomatsko) klasificirali zelene pojave. Za ekstrakcijo vrednosti intenzitete, ki pripadajo določenemu pojavu, pa bi potrebovali dodatne informacije o položaju pojava v oblaku lidarskih točk. Te so dane npr. z digitalnim ortofotom, s katastrskimi podatki meja, terenskimi meritvami itd. Ugotovili smo, da le lidarski podatki ne zadostujejo.

Literatura in viri:

ALTM: spletna stran podjetja Optech, Kanada. <http://www.optech.ca/altmapps.htm> (15. 11. 2006)

Baltsavias, E.P. (1999). Airborne Laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS-Journal* 54, 2-3: 199-214.

Bitenc, M. (2007). Analiza podatkov in izdelkov zračnega laserskega skeniranja na projektu Neusiedler See. Diplomska naloga. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo.

Chlaupek, A. (2006). Die Erstellung eines digitalen Geländemodells des Nationalparks Neusiedler See - Seewinkel aus flugzeuggetragenen Laserscannerdaten zur Detektion natürlicher Senken. Diplomarbeit. Wien: Fakultät für Geowissenschaften, Geographie und Astronomie der Universität Wien.

Hug, C., Wehr, A. (1997). Detecting and identifying topographic objects in imaging laser altimeter data. *IAPRS*, Vol. 32, Part III-4 W2, Stuttgart, 17.-19. september 1997.

Jonas, D. (2002). Airborne laser scanning: developments in intensity and beam divergence. *AAM GeoScan Australia* http://www.aamhatch.com.au/resources/pdf/publications/technical_papers/11arspc_jonas.pdf (9. 12. 2006)

Katzenbeisser, R. (2002). Intensity. Technical note. TopoSys GmbH Ravensburg. <http://www.toposys.com/pdf-ext/Eng/TN-Intensity.pdf> (8. 12. 2006)

Lutz, E., Geist, T., Stötter, J. (2003). Investigations of airborne laser scanning signal intensity on glacial surfaces - utilizing comprehensive laser geometry modelling and orthophoto surface modelling (a case study: Svartiseibreen, Norway). In: *IAPRS*, 34(3/W 13). Dresden: 143-148. http://www.isprs.org/commission3/wg3/workshop_laserscanning/papers/Lutz_ALSDD2003.pdf (9. 12. 2006)

Hasegawa, H. (2006). Evaluations of LIDAR reflectance amplitude sensitivity towards land cover conditions. <http://www.gsi.go.jp/ENGLISH/RESEARCH/BULLETIN/vol-53/53-6.pdf> (8. 12. 2006)

Song, J.H., Han, S.H., Yu, K., Kim Y. (2002). Assessing the Possibility of Land-cover Classification Using Lidar Intensity Data. *IAPRS* 34, 4. Graz, 9.-13. september.

Sterzaj, P. (2006). Vprašanja glede članka in enačbe (online). Message to: Bitenc, M., 15. oktober 2006. Osebna komunikacija.

Wagner, W. (2005). Physical Principles of Airborne Laser Scanning. Paper from University Course: Laser scanning - Data Acquisition and Modeling. Institute of photogrammetry and remote sensing, TU Vienna, 6. 10.-7. 10. 2005.

Prispelo v objavo: 11. maj 2007

Sprejeto: 10. junij 2007

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras, univ. dipl. inž. geod.

FGG - Oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana

E-pošta: mfras@fgg.uni-lj.si

Maria Attwenger, univ. dipl. inž.

Amt der Tiroler Landesregierung, Herrengasse 1-3, 6020 Innsbruck, Austria

E-pošta: maria.attwenger@tirol.gv.at

Maja Bitenc, univ. dipl. inž. geod.

Geodetski inštitut Slovenije, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana

E-pošta: maja.bitenc@geod-is.si