

TEORETIČNA GOSTOTA LIDARSKIH TOČK ZA TOPOGRAFSKO KARTIRANJE V NAJVEČJIH MERILIH

THEORETICAL LIDAR POINT DENSITY FOR TOPOGRAPHIC MAPPING IN THE LARGEST SCALES

Mihaela Triglav Čekada, Fabio Crosilla, Mojca Kosmatin Fras

UDK: 528.8:528.93

IZVLEČEK

Gostota lidarskih točk na površinsko enoto je pomemben podatek pri naročanju lidarskih podatkov, ki odločilno vpliva tudi na ceno lidarskega snemanja. V članku najprej obravnavamo teoretični izračun minimalne gostote lidarskih točk, ki je potrebna za zajem topografskih podatkov v največjih merilih. Za ta namen smo uporabili teorem vzorčenja. Ker pa so topografski objekti in pojavi, ki so predstavljeni na topografskih kartah in v topografskih bazah, velikokrat pod vegetacijo (ceste, vodna telesa itd.), moramo poznati tudi delež prodiranja laserskih žarkov skozi vegetacijo za območje, kjer bomo zajemali topografske podatke. V raziskavi smo na testnem primeru na območju mesta Nova Gorica izračunali delež prodiranja laserskih žarkov za štiri različne vegetacijske tipe: redko mediteransko vegetacijo, gost termofilni listnati gozd, mešano vegetacijo (travniki, sadovnjaki in gozd) in pozidano območje. S povezavo teoretične minimalne gostote lidarskih točk in deleža prodiranja smo določili minimalno gostoto lidarskih točk za potrebe zajema podatkov na topografskih kartah največjih meril oziroma v topografskih bazah primerljive podrobnosti (od 1 : 1000 do 1 : 10.000).

KLJUČNE BESEDE

zračno lasersko skeniranje, lidar, topografija, gostota lidarskih točk, teorem vzorčenja

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.01

ABSTRACT

When ordering LiDAR data, LiDAR point density per surface unit is important information with decisive influence on the price of the LiDAR survey. The paper first deals with the theoretical calculation of the minimum LiDAR point density, necessary for the acquisition of topographic data of the largest scales. For this purpose the sampling theorem is used. However, since topographic objects (roads, water bodies, etc.) and phenomena represented on topographic maps and in topographic bases are in many cases located under vegetation, also the rate of laser beam penetration through vegetation for the area where the topographic data are to be gathered has to be known. In a research on a test case conducted in the area of the town Nova Gorica we calculated the rate of laser beam penetration for four different vegetation types: scarce Mediterranean vegetation, thick thermophilic deciduous forest, mixed vegetation (meadows, orchards and forest) and built-up area. By connecting the theoretic minimum LiDAR point density with the rate of penetration, we defined the minimum LiDAR point density for the needs of data acquisition on topographic maps of the largest scales or in topographic bases of comparable detail (from 1 : 1000 to 1 : 10,000).

KEY WORDS

airborne laser scanning, LiDAR, topography, LiDAR point density, sampling theorem

1 UVOD

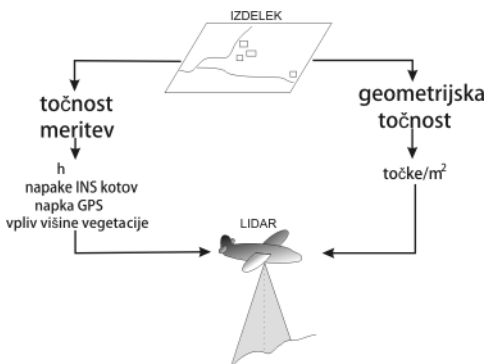
Tehnologija laserskega skeniranja je v zadnjem času pomembno posegla v način prostorskega zajema topografskih in drugih fizičnih podatkov o okolju (Shan in Toth, 2009). Lasersko skeniranje se v najširšem smislu deli na zračno lasersko skeniranje (ang. airborne laser scanning), terestrično lasersko skeniranje (ang. terrestrial laser scanning) in lasersko skeniranje iz kratkih razdalj (ang. short range laser scanning) (Kraus, 2007). Za lasersko skeniranje se pogosto uporablja sinonim lidarsko snemanje ali kratko lidar, ki izhaja iz angleškega opisa tehnologije (light detection and ranging, angl. okrajšava LiDAR). V članku obravnavamo zračno lasersko skeniranje in zanj uporabimo krajši termin lidar.

Glavni rezultati zračnih lidarskih meritev so oblaki georeferenciranih točk s podatki o redu odboja in intenziteti vrnjenega valovanja. Za zajem oziroma kasnejši kartografski prikaz topografske vsebine je treba iz oblaka lidarskih točk prepoznati posamezne objekte in pojave ter določiti robove med njimi (tj. robove, ki določajo stavbe, ceste ipd.). Natančnost določitve robov je med drugim odvisna od gostote lidarskih točk na površinsko enoto. V članku opisujemo raziskavo, s katero smo teoretično in empirično določali optimalno gostoto lidarskih točk za namene topografskega kartiranja v največjih merilih.

Čeprav se danes podatki zajemajo in obdelujejo v digitalni obliki, se za opredelitev stopnječnosti in podrobnosti podatkovne baze še vedno uporabljajo grafična merila, tako kot v analogni dobi kartografije. Merilo karte tako določa geometrijsko točnost podatkov, na podlagi katere lahko opredelimo tudi potrebno položajno točnost.

Zaradi jasnosti nekaterih pojmov, ki jih v članku uporabljamo, podajamo njihove opredelitve. Položajna točnost (ang. positional accuracy) prostorskih podatkov je element kakovosti, ki podaja stopnjo ujemanja rezultatov meritev z dejansko vrednostjo. Pojem natančnosti (ang. precision) meritev pomeni stopnjo razpršenosti rezultatov okoli srednje vrednosti in se običajno izraža s standardnim odklonom (ang. standard deviation). Meritve, ki so točne (ang. accurate), so hkrati pravilne (ang. true) in natančne (ang. precise).

Skupna položajna točnost (ang. overall positional accuracy) podatkov na karti je rezultat točnosti meritev in točnosti, s katero smo podatke zarisali na karto. Skupno položajno točnost podatkov lahko imenujemo tudi geometrijska točnost karte (Maling, 1989).



Slika 1. Končni izdelek opredeljuje parametre lidarskega snemanja.

Vnaprejšnjo (a priori) položajno točnost lidarske izmere lahko pred meritvami opredelimo na podlagi poenostavljenega modela napak (Triglav-Čekada et al., 2009) (slika 1). Izkustveno (a posteriori) položajno točnost pa lahko določimo z upoštevanjem rigoroznih modelov napak (Schenk, 2001; Beinat in Crosilla, 2002; Friess, 2006; Skaloud in Lichti, 2006) ali z izvedbo naknadnih kontrolnih meritev (Crosilla et al., 2005). Za položajno točnost lidarskih točk pred izvedbo transformacij med različnimi koordinatnimi sistemi lahko podamo splošno oceno planimetrične točnosti v velikosti nekaj decimetrov in višinsko točnost v velikosti okrog 1 decimetra, kot je opisal Maas (2003). Če uporabimo nizko leteče (500 m–800 m) lidarske snemalne sisteme z bolj natančnimi inercialnimi navigacijskimi sistemi (INS), se lahko povprečna planimetrična točnost izboljša tudi do 1 decimetra (Triglav-Čekada et. al, 2009).

Če se usmerimo na kartiranje podatkov, velja, da manjše, kot je merilo karte, manjši je vpliv točnosti meritev, v našem primeru lidarskih, na skupno položajno (geometrijsko) točnost podatkov na karti. To je posledica kartografske generalizacije, zaradi katere se položajna točnost upodobljenih podatkov zmanjša glede na izvorno zajete podatke.

Geometrijska točnost karte je omejena z grafično točnostjo v določenem merilu karte. V analognem obdobju kartografije je grafična točnost karte pomenila najmanjšo debelino črte, ki jo še lahko zarišemo na karti določenega merila. To je hkrati dimenzija najmanjših objektov, ki jih še lahko prikažemo na karti določenega merila, oziroma najmanjša dopustna razdalja med dvema grafičnima elementoma vsebine karte. Ti pogoji ločljivosti grafičnih elementov, kot je velikost točk, debelina linij, razdalje med linijami ipd., so glavni omejevalniki geometrijske točnosti predvsem pri merilih kart do 1 : 10.000, medtem ko ima pri manjših merilih glavni vpliv zopet kartografska generalizacija (poenostavljanje linij, prikaz s pogojnimi znaki, premikanje idr.). Kakšno lidarsko snemanje še omogoča izdelavo karte s predhodno določeno geometrijsko točnostjo oziroma kriterijem minimalne velikosti zajetih objektov, je odvisno od gostote lidarskih točk na enoto površine. Minimalna gostota lidarskih točk opredeljuje možnost zajema oblike objekta, določitev natančnosti zajema njegove oblike in možnost ločitve dveh bližnjih objektov med sabo. Ti parametri opredeljujejo tudi popolnost končnega izdelka. Minimalna gostota lidarskih točk vpliva tudi na tematsko točnost, kajti oblika objekta veliko pove tudi o njegovem razredu (npr. razlikovanje med stavbami in pločniki).

Poznavanje potrebne gostote lidarskih točk na enoto površine pred naročilom lidarskega snemanja je zelo pomembno, saj večja gostota lidarskih točk na enoto površine pomeni daljši čas snemanja in posledično višjo ceno snemanja. Namen tega članka je opredeliti optimalno gostoto laserskih točk za namen izdelave topografskih kart največjih meril (od 1 : 1000 do 1 : 10.000) oziroma ekvivalentnih topografskih baz velikih podrobnosti, in sicer na podlagi teoretičnih predpostavk in izvedene empirične raziskave.

Najprej bomo opredelili najmanjšo še zadovoljivo teoretično gostoto lidarskih točk na enoto površine prek upoštevanja geometrijske točnosti karte. V praksi moramo teoretično še zadovoljivo gostoto laserskih točk povečati, ker so objekti, ki jih želimo zajeti iz laserskih podatkov, velikokrat zakriti z različnimi tipi vegetacije. To velja še posebej, ko želimo zajeti mikrotopografijo (detajlni digitalni modeli reliefa), ki je prekrita z gostim gozdom. Takrat moramo uporabiti

lidarsko snemanje s precej večjo gostoto lidarskih točk na enoto površine (Reutebuch et al., 2003). Odstotek laserskih žarkov, ki prodrejo do posameznega višinskega razreda (npr. tal), je opredeljen z deležem prodiranja laserskih žarkov. Delež prodiranja laserskih žarkov je odvisen od tipa vegetacije (gostota in vrsta). Vrste vegetacije celo narekujejo, kdaj lahko pričakujemo večji delež enkratnih odbojev (odboji samo od vrhov dreves), kar lahko pomaga pri opredelitvi vrste vegetacije (Moffiet et al., 2005). Ko je delež prodiranja laserskih žarkov skozi vegetacijo zelo majhen, postane nezanesljiva tudi samodejna klasifikacija lidarskega oblaka točk na višinske razrede (Forlani in Nardinocchi, 2007).

Na testnem lidarskem oblaku točk s povprečno gostoto od 15 do 20 točk/m² smo določili deleže prodiranja za štiri različne vegetacijske tipe. Z upoštevanjem teoretične najmanjše gostote lidarskih točk glede na geometrijsko točnost izdelka in delež prodiranja žarkov smo v raziskavi opredelili optimalno gostoto laserskih točk za topografske karte v merilih od 1 : 1000 do 1 : 10.000 oziroma za baze primerljive podrobnosti.

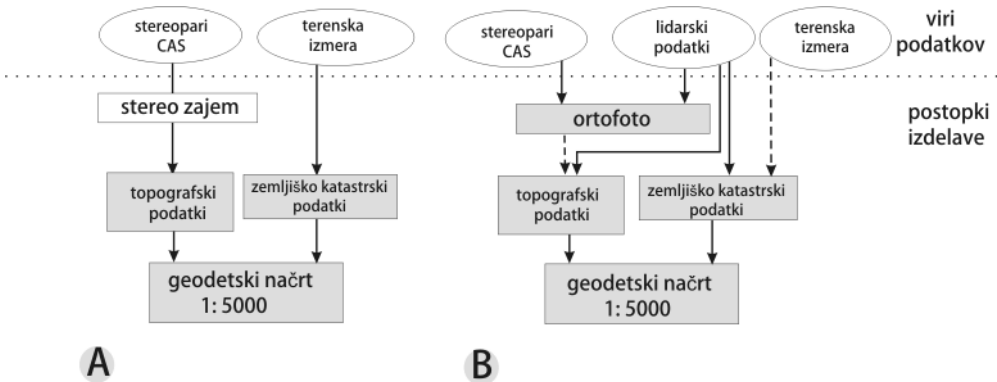
2 TOPOGRAFSKE KARTE V NAJVEČJIH MERILIH V SLOVENIJI

Lokalne skupnosti (občine) v Sloveniji za lokalno prostorsko načrtovanje (občinski prostorski načrti in občinski podrobni prostorski načrti) v glavnem uporabljajo karte v merilih od 1 : 1000 do 1 : 10.000. Z Zakonom o prostorskem načrtovanju (ZPNačrt, Ur. l. RS, št. 33/2007) so se, kot temeljna topografska podlaga za prostorsko načrtovanje, uveljavili geodetski načrti in tako zamenjali dosedanje topografske in pregledne katastrske načrte. Geodetski načrt je prikaz fizičnih struktur in pojavov na zemeljskem površju ter nad in pod njim v pomanjšanem merilu po kartografskih pravilih. Prikazana vsebina, njena popolnost, podrobnost in natančnost so odvisne od namena uporabe geodetskega načrta (Pravilnik o geodetskem načrtu, 2004). V geodetskih načrtih je topografija predvidoma predstavljena z naslednjimi sloji: ceste, železnice, vodna telesa (potoki, reke in jezera), meje različnih vegetacijskih tipov, stavbe, raba urbanega prostora (industrijsko, parkirišča, drugo), plastnice in drugo.

V skladu s Pravilnikom o znakih za temeljne topografske načrte (1982) je bila zahtevana grafična točnost temeljnih topografskih načrtov v Sloveniji 0,13 mm. Ta pravilnik po sprejetju Pravilnika o geodetskem načrtu (2004) sicer ne velja več, vendar vrednost zahtevane grafične točnosti lahko uporabimo kot mejno vrednost pri določanju geometrijske točnosti. Na splošno mora biti grafična točnost za različna kartografska merila boljša od 0,25 mm, s povprečno vrednostjo 0,2 mm (Maling, 1989). Na primer: ta povprečna vrednost 0,2 mm v merilu 1 : 1000 na terenu pomeni 0,2 m.

V Sloveniji zajemamo podatke za izdelavo in vzdrževanje topografskih kart največjih meril (v merilu 1 : 5000 in manjših merilih) in topografsko vsebino geodetskih načrtov (v merilu 1 : 5000) v glavnem s fotogrametrično stereorestitucijo (trirazsežni zajem) iz stereoparov Cikličnega aerosnemanja Slovenije (CAS) ali z vektorizacijo iz ortofota (dvorazsežni zajem). Načrte v merilih, ki so večja od 1 : 5000, pa v glavnem izdelujemo s terenskimi meritvami. Lidarska tehnologija omogoča zajem topografskih podatkov z veliko podrobnostjo in visoko točnostjo, torej bi bilo razumno, da se v Sloveniji lidarski podatki uporabljajo za državni sistem zajema in

vzdrževanja topografskih podatkov. Na sliki 2A je prikazan diagram sedanje metodologije za izdelavo geodetskih načrtov v merilu 1 : 5000, na sliki 2B pa je prikazan naš predlog, ki kot vir podatkov vključuje tudi podatke lidarskega snemanja.



Slika 2. Metodologija izdelave geodetskih načrtov v merilu 1 : 5000: A) obstoječa, B) predlagana.

Za zajem topografskih podatkov predlagamo naslednji možnosti:

- Lidarske podatke uporabimo kot osnovni vir za zajem topografskih podatkov in s tem nadomestimo zajem iz stereoparov CAS.
- Za zajem uporabimo kombinacijo lidarskih podatkov in ortofota, ki je izdelan iz sočasnega snemanja in z upoštevanjem višinskih lidarskih podatkov. Uporaba ortofota omogoča lažjo identifikacijo in razločitev objektov v oblaku lidarskih točk.

Lidarsko tehnologijo bi lahko vključili tudi za zajem zemljiškokatastrskih podatkov, tako da bi lidarske podatke uporabili za zajem terenskega stanja in kontrolo pravilnosti zemljiškokatastrskega prikaza. Terenskemu delu pa se v celoti ne bi mogli izogniti, saj bi bilo treba mejnike pred lidarskim snemanjem signalizirati, da bi jih v oblaku točk lahko zanesljivo prepoznali (Triglar Čekada, 2010).

3 TEORETIČNA NAJMANJŠA GOSTOTA LASERSKIH TOČEK

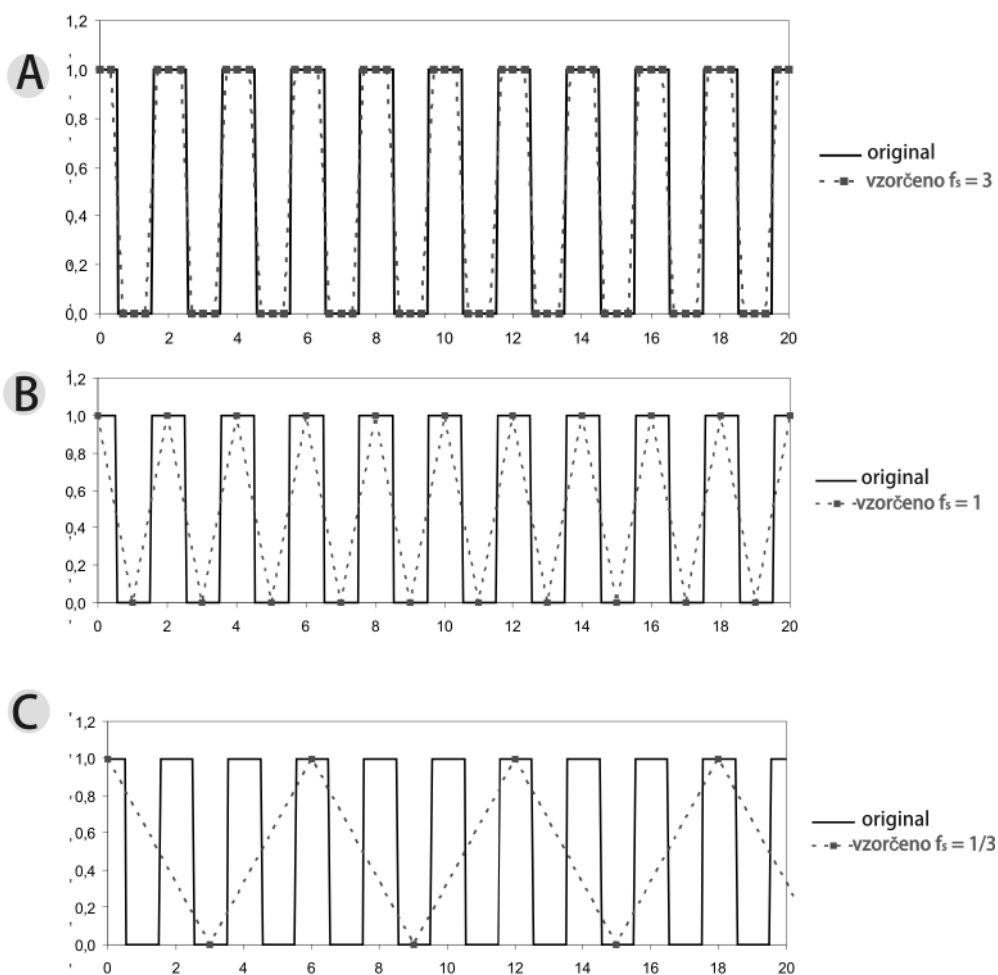
Za določitev teoretične najmanjše gostote laserskih točk, s katero lahko zajamemo topografske objekte iz lidarskih podatkov, bomo uporabili teorem vzorčenja, poznan tudi kot Nyquist-Shannonov teorem (Göpfert, 1987; Kraus, 2007), ki izhaja iz informacijske teorije. Uporabili bi lahko tudi nekatere druge teorije, na primer prenosno funkcijo modulacije (ang. modulation transfer function, MTF), ki opisuje uspešnost preslikave objekta na sliko oziroma film (Atkins, 2007), ali teorijo merilo-prostor (ang. scale-space theory), ki opisuje prikaz slike v različnih merilih prek družine enoparametričnih glajenih slik (Ali, 2009).

Teorem vzorčenja opredeljuje postopek vzorčenja analognega (zveznega) signala v diskretno (stopničasto) obliko, tako da pri pretvorbi ne izgubimo pomembnih informacij. Običajno se tako obravnavajo analogni signali, kot so zvočni (avdio) in slikovni (video) zapisi, vendar lahko

podobno obravnavamo tudi fizično (topografsko) realnost. Nyquist-Shannonov teorem pravi, da mora biti frekvenca vzorčenja (digitalizacije) signala (f_s) najmanj dvakratnik najvišje frekvence originalnega (analognega) signala (f_{max}), da lahko originalni zapis zadovoljivo rekonstruiramo iz vzorčenega zapisa (enačba 1). Minimalna frekvenca za še zadovoljivo vzorčenje se po avtorju Harryju Nyquistu, ki je to zakonitost prvi ugotovil in jo leta 1928 objavil, imenuje tudi Nyquistova frekvenca ($f_N = 2f_{max}$). Leta 1949 je teorem formalno potrdil in razširil Claude E. Shannon.

$$f_s \geq 2f_{max} \quad (1)$$

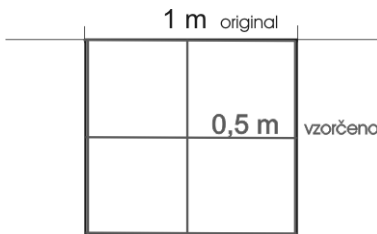
Načelo teorema vzorčenja najlaže ponazorimo s primerom. Na sliki 3 sta predstavljena zvezni signal in vzorčenje tega signala z različnimi frekvencami. Na sliki 3A je pojav diskretiziran s frekvenco vzorčenja, ki je trikratnik Nyquistove frekvence, na sliki 3B je pojav diskretiziran z



Slika 3. Primer vzorčenja signala (originalni signal je prikazan s polno črto, vzorčen signal pa s črtkano črto).

Nyquistovo frekvenco in na sliki 3C z eno tretjino Nyquistove frekvence. Opazimo, da lahko spremembe v signalu zaznamo s frekvencami, ki so enake Nyquistovi ali večje od nje (primera A in B). Pri frekvencah, ki so večje od Nyquistove, zaznamo tudi več podrobnosti na signalu (primer A).

Kako se to načelo vzorčenja lahko uporabi na digitalnih slikah, ki imajo rastrsko obliko in opredeljeno prostorsko ločljivost (v dveh razsežnostih prostora), je prikazano na sliki 4. Če je najmanjša velikost objekta v naravi, ki bi jo radi predstavili na sliki, enaka 1 m, moramo fotografirati s prostorsko ločljivostjo slikovnega elementa (piksela) največ 0,5 m v naravi. Kot smo že zapisali, je najmanjša dimenzija objekta, ki ga še lahko predstavimo na karti, opredeljena z geometrijsko točnostjo karte. Če želimo doseči grafično točnost 0,2 mm v merilu 1 : 5000, kar predstavlja geometrijsko točnost karte 1 m, moramo kot osnovni vir zajema uporabiti letalski posnetek s prostorsko ločljivostjo največ 0,5 m.



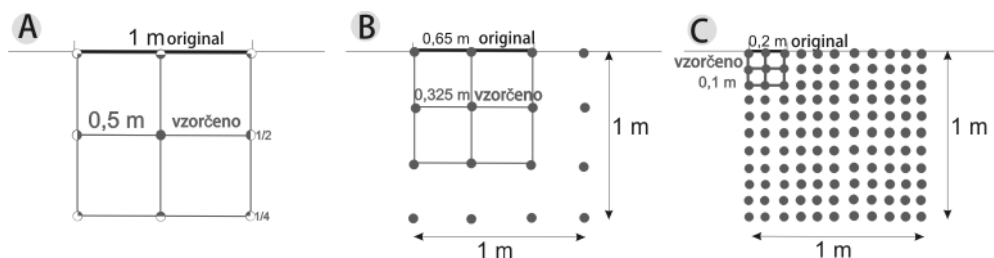
Slika 4. Dvorazsežno načelo Nyquistove frekvence, aplicirano na digitalni sliki.

Enako načelo lahko uporabimo za lidarske podatke. Pri teoretični izpeljavi najprej predpostavimo, da vse lidarske točke dosežejo tla in niso razpršene po različnih višinah ter da so enakomerno razporejene (lidarske točke v oblaku so sicer naključno razporejene, vendar jim lahko izračunamo povprečno gostoto na površinsko enoto). Da bomo zadostili geometrijski točnosti 1 m, moramo glede na Nyquistovo frekvenco opredeliti največjo še sprejemljivo oddaljenost med dvema točkama na 0,5 m, kar dosežemo z gostoto 4 lidarskih točk/m² (slika 5A). Kot lahko vidimo na sliki 5, moramo za pravi izračun gostote točk vokalne točke razdeliti med štiri kvadrate velikosti 1 m² in robne točke med dva kvadrata velikosti 1 m².

Teoretično najmanjšo gostoto lidarskih točk na enoto površine ρ_t , izraženo v številu točk/m², in geometrijsko točnost karte GA (opredeljene v metrih) povezuje naslednja enačba (2):

$$\rho_t = \frac{1}{(GA/2)^2} \quad (2)$$

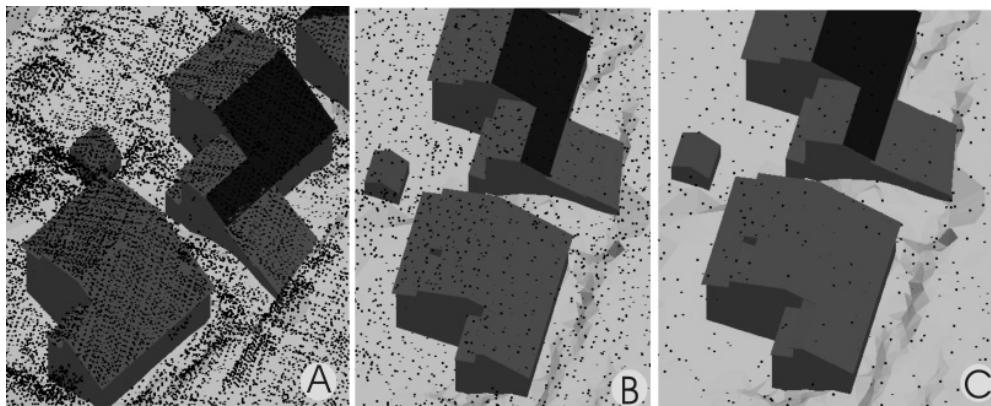
Za primer: z enačbo 2 je izračunana najmanjša teoretična gostota za grafično točnost 0,13 mm v merilu karte 1 : 5000 (zaokroženo) 10 lidarskih točk/m² (slika 5B). Za merilo karte 1 : 1000 z geometrijsko točnostjo 0,2 m (slika 5C) dobimo minimalno potrebno gostoto 100 lidarskih točk/m². Za take gostote točk postane lidar neekonomičen, zato predlagamo, da se ga v teh primerih morebiti nadomesti s terestričnim laserskim skeniranjem, seveda kjer je to mogoče (s stranskim zajemom podatkov).



Slika 5. Dvorazsežno načelo Nyquistove frekvence, aplicirano za lidarske točke.

Z enačbo 2 lahko opredelimo tudi najmanjšo gostoto lidarskih točk, s katero je mogoče predstaviti objekt najmanjših dimenzij, ki ga še lahko prikažemo na karti določenega merila. V enačbi 2 zamenjamo geometrijsko točnost GA z najmanjšo še predstavljeno dimenzijo na karti.

Na sliki 6 so kot primer predstavljene različne gostote lidarskih podatkov skupaj z digitalnim modelom reliefa in trirazsežnimi modeli enodružinskih hiš. Na sliki 6A z izvorno gostoto 20 točk/m² lahko v oblaku točk vidimo posamezne vzorce, ki predstavljajo srednje visoko vegetacijo. Na sliki 6B je prikazana gostota 10 točk/m². Na sliki 6C, kjer je oblak točk zredčen na gostoto 1 točka/m², pa opazimo težavo. Iz tako redkega oblaka točk robov streh namreč ni mogoče opredeliti. Prikazane trirazsežne stavbe so bile izdelane iz izvirnega oblaka točk z gostoto 20 točk/m².



Slika 6. Primeri različne gostote lidarskih točk: A) 20 točk/m², B) 10 točk/m² in C) 1 točka/m².

4 DOLOČITEV GOSTOTE LIDARSKIH TOČK V OBMOČJIH POD VEGETACIJO

Če želimo zajeti detajle objektov, ki so skriti pod vegetacijo (npr. stavbe pod drevjem, ceste v gozdovih), moramo prej opredeljeno teoretično najmanjšo gostoto lidarskih točk še povečati. Ena izmed možnosti je, da ob naročilu lidarskega snemanja naročimo zahtevano gostoto točk pod vegetacijo za vsak tip vegetacije posebej. Vendar je za načrtovanje lidarskega snemanja lažje, če naročimo povprečno gostoto lidarskih točk, saj tako omogočimo lažjo kontrolo po snemanju. Ob poznavanju deleža prodiranja laserskega žarka do tal lahko opredelimo najmanjšo potrebno in z ekonomičnega vidika optimalno gostoto lidarskih točk.

4.1 Testni primer

Test je bil izveden na lidarskem oblaku točk, ki pokriva 20 ha in stoji na območju Nove Gorice. Za zajem je bil uporabljen instrument ALTM3100. Lidarsko snemanje je bilo izvedeno v začetku aprila 2006, ko je vegetacija že olistana. Uporabljena je bila frekvenca laserskih pulzov 100 kHz in povprečna višina leta 1000 m nad tlemi. Uporabljeni INS-sistem je imel frekvenco 200 Hz in natančnost INS-kotov $0,02^\circ$ za kota nagibov (ang. roll) in naklonov (ang. pitch) ter $0,04^\circ$ za kot zasuka (ang. heading). Povprečna gostota lidarskega oblaka točk je od 15 do 20 točk/m².

Oblak točk smo glede na spremembe višine in reda odboja laserskega žarka polavtomatsko klasificirali s programom TerraScan na naslednje razrede: tla (zadnji odboj), nizka vegetacija (predzadnji odboj, višinsko v bližini razreda tla), srednja vegetacija (vegetacija, nižja od 2 m), visoka vegetacija (vegetacija, visoka med 2 m in 30 m), stavbe in napake.

4.2 Delež prodiranja laserskih žarkov skozi vegetacijo

Delež prodiranja smo preučevali v štirih vegetacijskih tipih (slika 7):

- (1) redka mediteranska vegetacija: grmičevje, redko listnato drevje; prevladujoče vrste: črnika (*Quercus ilex*), puhasti hrast (*Quercus pubescens*), črni gaber (*Ostrya carpinifolia*);
- (2) termofilni gozdovi mešanih listavcev z gostim prepletom drevesne vegetacije; prevladujoče vrste: hrast graden (*Quercus petraea*), javor maklen (*Acer campestre*), akacija (*Robinia pseudoacacia*), bela breza (*Carpinus betulus*);
- (3) mešana vegetacija: travniki, sadovnjaki in gozd;
- (4) pozidana območja: stavbe z vključenimi dekorativnimi vrstami grmovnic in drevesnic.

Na sliki 7 je pri prvih dveh vegetacijskih tipih prikazan še prečni prerez oblaka lidarskih točk, kjer lahko opazimo, da se vegetacijska tipa zelo dobro ločita.

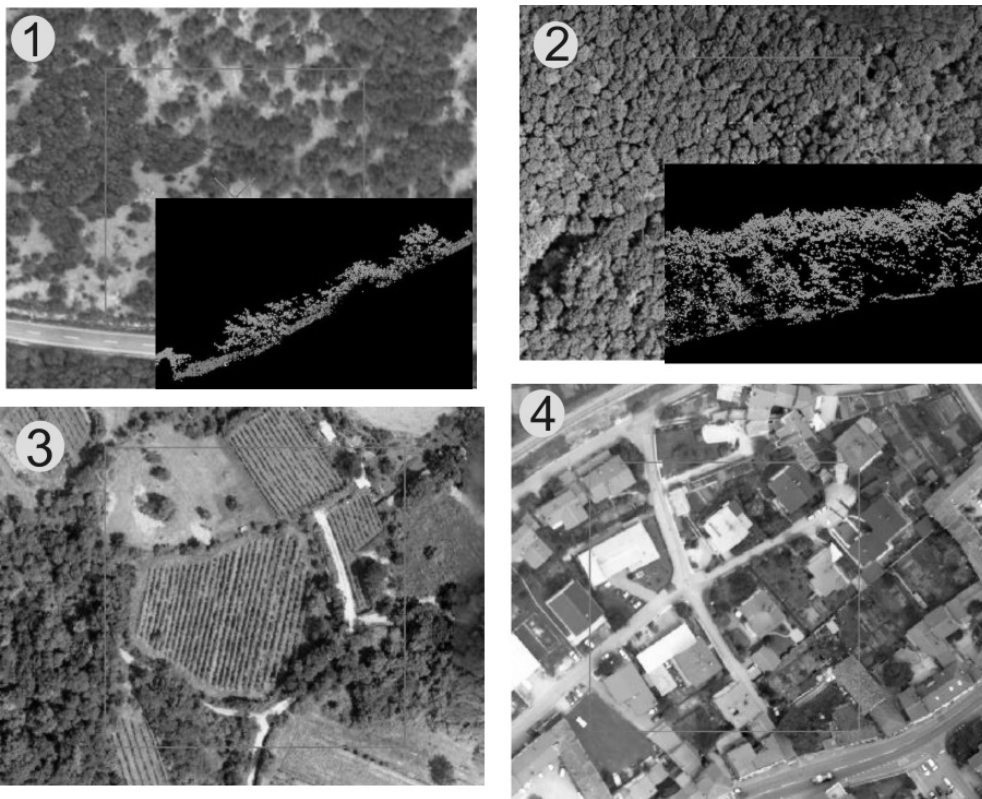
Za vsak vegetacijski tip smo izračunali skupno povprečno gostoto lidarskih točk na enoto površine in povprečne gostote točk v različnih klasificiranih razredih laserskih točk za 10 testnih območij. Vsako testno območje je bilo veliko 100 m x 100 m. Za prve tri vegetacijske tipe smo klasificirana razreda *stavb* in *napak* združili v razred *drugo*. V tem razredu je podana ocena deleža točk, ki ga ne moremo razporediti v noben drug razred. Pri četrtem vegetacijskem tipu (pozidana območja) postane razred *stavb* pomemben, zato smo ga obdržali kot ločen razred.

Ker uporabljeni oblak točk na območju Nove Gorice nima enakomerne gostote točk na enoto površine, smo povprečno izmerjeno gostoto točk izrazili v relativni vrednosti deleža prodiranja glede na skupno gostoto točk. Skupna gostota točk, ki predstavlja 100 %, je vsota vseh relativnih vrednosti posameznih klasificiranih razredov na istem testnem območju. Relativni deleži prodiranja laserskih točk skozi vegetacijo so predstavljeni v preglednici 1, originalne gostote točk pa so predstavljene v Triglav-Čekada (2009).

veg. tip	<i>tla</i>	<i>nizka veg.</i>	<i>srednja. veg.</i>	<i>visoka veg.</i>	<i>stavbe</i>	<i>drugo</i>
(1)	9±3	11±4	25±4	40±12		15±9
(2)	4±2	2±1	9±4	73±9		12±9
(3)	20±9	13±5	17±4	31±14		19±10
(4)	19±5	15±4	19±3	18±3	16±4	13±5

Preglednica 1. Delež prodiranja laserskih točk skozi vegetacijo s standardno deviacijo, izraženo v % vseh točk na enoto površine.

Večino detajla, ki ga lahko predstavimo na topografskih kartah, lahko zajamemo iz razredov *tla* in *nizka vegetacija* (ceste, poti, železnice, vodna telesa, obodi stavb, reliefne oblike). Zato smo ta razreda v preglednici 1 zapisali odebeljeno. V izpeljavi končne optimalne gostote točk smo razreda *tla* in *nizka vegetacija* združili v razred *združeno tla* (preglednica 2). Za vegetacijski tip (3) mešana vegetacija je v razredu *združeno tla* 33 % točk in za vegetacijski tip (4) pozidana 34 % točk. Za vegetacijski tip (1) redka mediteranska vegetacija pa je v razredu *združeno tla* 20 % točk. Najnižji delež prodiranja (6 %) v razredu *združeno tla* opazimo pri vegetacijskem tipu (2) termofilni gozdovi mešanih listavcev, kar je tudi pričakovano.



Slika 7. Tipični primeri preučevanih vegetacijskih tipov.

4.3 Izračun minimalne gostote lidarskih točk z upoštevanjem deleža prodiranja žarkov

Minimalno gostoto laserskih točk na enoto površine ρ_o lahko izračunamo na podlagi teoretično najmanjše gostote točk ρ_t in deleža prodiranja laserskih žarkov skozi vegetacijo PR za razred *združeno tla*, če predpostavimo, da se vse točke enega vegetacijskega razreda nahajajo na isti višini. Tako je optimalna gostota lidarskih točk:

$$\rho_o = \frac{\rho_t \cdot 100}{PR} = \frac{1}{(GA/2)^2} \cdot \frac{100}{PR} \quad (3)$$

V preglednici 2 so predstavljene minimalne gostote laserskih točk za štiri testirane vegetacijske tipe in dve merili topografskih kart. V drugem stolpcu so zapisani deleži prodiranja za klasificiran razred *združeno tla*. Za izračun optimalne gostote smo uporabili grafično točnost 0,2 mm. Za topografsko karto v merilu 1 : 5000 ta grafična točnost predstavlja geometrijsko točnost (GA) 1 m in tako dobimo teoretično najmanjšo gostoto ρ_t enako 4 točke/m². Z uporabo deleža prodiranja (enačba 3) pa dobimo optimalno gostoto točk med 12 in 20 točk/m² za pozidana območja, mešano vegetacijo in redko mediteransko vegetacijo. Žal gostoto 20 točk/m² večina ponudnikov podatkov lidarskega snemanja že obravnava kot nadstandardni izdelek, ki je tudi dražji.

Optimalna gostota točk bi pri merilu 1 : 1000 zrasla iz teoretične najmanjše gostote točk ρ_t 100 točk/m² na še večjo nepraktično vrednost, ki bi bila ekonomsko povsem neupravičena. Na primer za vegetacijska tipa mešane vegetacije in pozidana območja zanaša optimalna gostota točk 300 točk/m². Najvišja naročena gostota lidarskih točk v Sloveniji v okviru javnih naročil v zadnjih letih je bila okoli 30 točk/m² in se uporablja za izdelavo podrobnih poplavnih študij. Najbolj ekonomična pa bi bila uporaba lidarja za izdelavo topografskih kart merila 1 : 10.000 in manjših meril, saj potrebujemo relativno nizko minimalno gostoto točk.

veg. tip	združeno tla (PR)	1 : 10.000	1 : 5000
(1)	20 %	5	20
(2)	6 %	17	67
(3)	33 %	3	12
(4)	34 %	3	12

Preglednica 2. Predlagana minimalna gostota lidarskih podatkov v številu točk/m².

Velike razlike v deležu prodiranja laserskih točk v različnih vegetacijskih tipih potrjujejo tezo, da pri izračunu optimalne gostote točk deleža prodiranja laserskih žarkov ne smemo zanemariti. Razlika je še posebej očitna med termofilnimi gozdovi mešanih listavcev, kjer razred *združeno tla* doseže samo 6 % vseh lidarskih točk, in pozidanim območjem, kjer 34 % lidarskih točk doseže isti razred.

5 SKLEP

Pred naročanjem lidarskega snemanja je smiselno opredeliti gostoto lidarskih točk na enoto površine, ki je potrebna za posamezen namen uporabe lidarskih podatkov. Z ekonomičnega vidika je najboljša najmanjša še sprejemljiva gostota točk, saj se cena lidarskega snemanja z gostoto lidarskih točk praviloma povečuje. V članku smo se omejili na obravnavo zajema podatkov za namene topografskega kartiranja v največjih merilih (od 1 : 1000 do 1 : 10.000). Zajeti podatki morajo predvsem ustrezati geometrijski točnosti topografske karte v določenem merilu oziroma položajni točnosti topografske baze primerljive podrobnosti. Za določitev teoretične najmanjše gostote laserskih točk, s katero lahko zajamemo topografsko vsebino, smo smiselno uporabili Nyquist-Shannonov teorem vzorčenja in podali enačbo za njen izračun. Za primer smo izračunali najmanjšo teoretično gostoto lidarskih točk v merilu kart 1 : 5000 in 1 : 1000. Za karto v merilu 1 : 5000 je izračunana minimalna gostota 10 lidarskih točk/m², za karto v merilu 1 : 1000 pa je 100 lidarskih točk/m². Slednja vrednost je zelo visoka in ekonomsko nesprejemljiva. Ker pa topografski elementi (relief, ceste, vodna telesa ...) velikokrat ležijo pod vegetacijo, smo teoretično gostoto lidarskih točk razširili še z upoštevanjem deleža prodiranja laserskih žarkov pod vegetacijo. Na testnem primeru na območju Nove Gorice smo določili delež prodiranja za štiri vegetacijske tipe v olistanem delu leta: redka mediteranska vegetacija, gosta termofilna listnata drevesa, mešana vegetacija in pozidano območje. Na podlagi dobljenih rezultatov empirične raziskave smo podali predlog za optimalno gostoto lidarskih točk (za vse vegetacijske tipe razen gostega termofilnega gozda): od 12 do 20 točk/m² za karto v merilu 1 : 5000 in od 3 do 5 točk/m² za karto v merilu 1 : 10.000. Za celotno območje Slovenije, ki je več kot 50-odstotno pokrita z gozdom, bi bila uporaba lidarja za zajem topografije pod gozdom ekonomsko upravičena le za merilo 1 : 10.000 in manjša merila, seveda ob predpostavki, da bi uporabili samo lidarske podatke. Z nadaljnjimi raziskavami bi delež prodiranja laserskih žarkov za najbolj pogoste vegetacijske habitatne tipe (Jogan et al., 2004) za olistani in neolistani del leta za celotno območje Slovenije lahko natančneje opredelili iz obstoječih lidarskih podatkov, s čimer bi lahko optimizirali postopek načrtovanja in naročanja novih lidarskih podatkov za namene državnih projektov.

V tem članku opredeljena optimalna gostota lidarskih točk omogoča načrtovanje snemanja za potrebe izdelave topografskih kart oziroma topografskih baz primerljivih podrobnosti. Predstavljeno metodologijo lahko uporabimo tudi za druge prostorske podatkovne baze podatkov, ki se uporabljajo za lokalno prostorsko načrtovanje. V Sloveniji bi tako lahko opredelili tudi potrebno gostoto lidarskih točk za naslednje državne baze: Kataster stavb in nekatere sloje Zbirnega katastra gospodarske javne infrastrukture.

ZAHVALA

Pri delu smo uporabili lidarski oblak točk na območju Nove Gorice, ki je bil izdelan v okviru projekta INTERREG IIIA Slovenija-Italija 2000-2006 »HarmoGeo«, sofinanciranega od EU. Za pomoč pri identifikaciji prevladujočih vegetacijskih vrst na testnih območjih se zahvaljujemo Nataši Likar iz Mestne občine Nova Gorica. Zahvaljujemo se tudi recenzentom za skrben pregled članka in konstruktivne pripombe.

Literatura in viri:

- Atkins, B. (2007). *Modulation Transfer Function – what is it and why does it matter?* <http://photo.net/learn/optics/mtf/> (20. 2. 2010)
- Ali, T. A. (2010). *Building of robust multi-scale representations of LIDAR-based digital terrain model based on scale-space theory*. *Optics and Laser in Engineering*, 48(3), 316–319.
- Beinat, A., Crosilla, F. (2002). *A generalized stochastic model for the optimal global registration of lidar range images*. *ISPRS Commission III Symposium 2002 »Photogrammetric Computer Vision«, 9.–13. september 2002, Graz, Avstrija.*
- Crosilla, F., Beinat, A., Visintini, D., Fico, B., Sossai, E. (2005). *Likelihood and Accuracy Analysis of 3D Building Models from Airborne Laser Data*. *Proceedings of Italy-Canada 2005 Workshop on »3D Digital Imaging & Modelling: Application of heritage, industry, medicine & land«, 17. in 18. maj 2005, Padova, Italija.*
- Forlani, G., Nardinocchi, C. (2007). *Adaptive filtering of aerial laser scanning data*. *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Espoo, 12.–14. septembra, Finska.*
- Friess, P. 2006. *Toward a rigorous methodology for airborne laser mapping*. *Proceedings of International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW, 25.–27. januarja 2006, Castelldefels, Španija.*
- Göpfert, W. (1987). *Raumbezogene Informationssysteme*. Karlsruhe: Wichmann Verlag.
- Jogan, N., Kaligarič, M., Leskovar, I., Seliškar, A., Dobravec, J. (2004). *Habitatni tipi Slovenije HTS 2004, ARSO, Ljubljana*. <http://www.arso.gov.si/narava/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/HabitatniTipiSlovenije2004.pdf> (20. 2. 2010)
- Kraus, K. (2007). *Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans, 2nd edition*. Walter de Gruyter.
- Maling, D. H. (1989). *Measurements from maps: principles and methods of cartometry*. Oxford: Pergamon press.
- Maas, H.-G. (2003). *Planimetric and height accuracy of airborne laserscanner data: User requirements and system performance*. *Photogrammetric Week (ur. D. Fritsch), Proceedings, 49*. Wichmann Verlag.
- Moffiet, T., Mengersen, K., Witte, C., King, R., Denham, R. (2005). *Airborne laser scanning: Exploratory data analysis indicates potential variables for classification of individual trees of forest stands according to species*. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 59, 289–309.*
- Pravilnik o znakih za temeljne topografske načrte (1982)*. Ljubljana.
- Pravilnik o geodetskem načrtu*. Ur. l. RS, št. 40/2004.
- Reutebuch, S. E., McGaughey, R. J., Andersen, H-E., Carson, W. W. (2003). *Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy*. *Can. J. Remote Sensing, 29(5), 527–535.*
- Schenk, T. (2001). *Modelling and analyzing systematic errors in airborne laser scanners*. *Technical Notes in Photogrammetry N° 19, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus.*
- Shan, J., Toth, C. K. (2009). *Topographic laser ranging and scanning*. Taylor & Francis Group.
- Skaloud, J., Lichti, D. (2006). *Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning*. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 61, 47–59.*
- Triglav-Čekada, M., Crosilla, F., Kosmatin-Fras, M. (2009). *A simplified analytical model for a-priori lidar point-positioning error estimation and a review of lidar error sources*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 75(12), 1425–1439.*
- Triglav-Čekada, M. (2009). *Optimization of the data processing methodology and accuracy analysis of airborne laser scanning data applied for local spatial planning*. *Doktorska disertacija*. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Triglav Čekada, M. (2010). *Zračno lasersko skeniranje in nepremičninske evidence*. *Geodetski vestnik, 54(2), 181–194.*
- Zakon o prostorskem načrtovanju (2007)*. ZPNačrt, Ur. l. RS, št. 33/2007.

Prispelo v objavo: 10. marec 2010

Sprejeto: 9. avgust 2010

dr. Mihaela Triglav Čekada, univ. dipl. inž. geod.

Geodetski inštitut Slovenije, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana

E-pošta: mihaela.triglav@gis.si

prof. dr. Fabio Crosilla, Professor of Surveying and Digital mapping

University of Udine, Department of Georesources and Territory, Via Cotonificio 114, Udine, Italy

E-pošta: fabio.crosilla@uniud.it

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

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

E-pošta: mojca.kosmatin-fras@fgg.uni-lj.si