

БРАНИСЛАВ БАЈАТ*
ДРАГОЉУБ ШТРБАЦ**

УТИЦАЈ ИЗВОРА ПОДАТАКА НА ТАЧНОСТ ДИГИТАЛНОГ МОДЕЛА ТЕРЕНА

Садржај: У раду је дат преглед савремених метода прикупљања података за потребе израде Дигиталних Модела Терена (ДМТ), као и тачност података која ове методе обезбеђују. На примеру дигиталног модела добијеног дигитализацијом картографског садржаја основне државне карте, и теренских мерења ГПС технологијом и аерофотограмметријских мерења приказан је поступак оцене оваквих база података о рељефу.

Кључне речи: тачност ДМТ-а, методе мерења, тачност мерења.

Abstract: The overview of the contemporary data acquisition methods for Digital Terrain Models (DTM), as well as the accuracy of data provided by these methods, are given in this article. The procedure of the accuracy estimation for DTM, which is produced by digitising of topographic maps and test points, obtained by GPS technology and aerophotogrammetric terrain surveying, is presented.

Key words: DTM accuracy, data acquisition methods, measuring accuracy.

Увод

Технологија израде дигиталних модела терена (ДМТ) последњих година све више заокупља пажњу многобројних корисника овакве врсте података о простору. Осим што је начињен велики помак у појави нових технологија за прикупљање података на терену (LIDAR¹, InSAR², GPS³, дигитална фотограмetriја) које су омогућиле добијање високо квалитетних база података о рељефу, формирано је и тржиште ових производа. У нашој земљи је од ове године на располагању и први комерцијални производ овога типа, дигитални модел терена картографског порекла који покрива целу територију државе са просечном резолуцијом од 30 m.

Овакве базе података захтевају и развој метода и поступака који ће омогућити оцену њиховог квалитета. Иако се проблематика квалитета и тачности ДМТ разматра тридесет година уназад, у свету за сада не постоји недвосмислено усвојена методологија оцене квалитета (тачности) ДМТ-а.

* др **Бранислав Бајат** дипл.геод.инж. доцент, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Институт за геодезију

** **Драгољуб Штрбац** дипл. географ, истраживач-програмер за ГИС, Географски институт "Јован Цвијић" САНУ

¹ Light Detection And Ranging (енгл.)

² Interferometric Synthetic Aperture Radar (енгл.)

³ Акроним за систем за глобално позиционирање

Заједничка карактеристика многобројних дефиниција ДМТ-а јесте да је: "ДМТ нумеричка и математичка представа терена добијена коришћењем одговарајућих висинских и положајних мерења, сагласних по густини и распореду са тереном, тако да висина било које тачке на обухваћеном терену може аутоматски да се добије интерполацијом уз одговарајућу тачност" (Ayeni O.O., 1982). Из ове дефиниције могу се уочити две најважније компоненте ДМТ-а:

- Скуп репрезентативних тачака, меморисаних у бази, које представљају површ терена,
- Алгоритми за интерполацију нових тачака.

Обе компоненте су у узајамној спрези, јер начин организације података одређује алгоритме за интерполацију и обрнуто.

Седмдесетих година прошлог века интерес истраживача који су се бавили развојем концепта ДМТ-а био је највише усмерен на избор оптималне интерполационе методе. Међутим, појавом софтверских пакета базираних на различитим алгоритмима за интерполацију, који су давали готово идентичне резултате, тежиште се полако пребацује на други сегмент, а то су подаци који чине ове базе ДМТ-а (Ackermann F., 1995).

Тачност и економичност мерења, квалитет база података, њихово тестирање и верификација, као и начин презентације информација о квалитету постају главна тема истраживања и развоја концепта ДМТ-а. Ова чињеница захтева потребу за израдом извештаја о квалитету ДМТ, у циљу обезбеђивања детаљне информације корисницима на основу којих ће бити могућа оцена погодности ДМТ података за многобројне примене. У овом раду су анализирани различити извори података за израду ДМТ-а као и њихов утицај на тачност ДМТ-а са посебним освртом на Основну Државну Карту размере 1:5 000.

Анализа квалитета дигиталних модела терена

Појава дигиталних модела терена као новог начина представљања рељефа убрзо је изазвала и појаву и развој поступака за верификацију њиховог квалитета. Тако је контрола квалитета ДМТ-а постала саставни део процеса његове израде и подразумева пројектни задатак и употребу одговарајућег хардвера, програмских пакета и процедура (Caruso V.M., 1987). Сврха постојања извештаја о контроли квалитета је да обезбеди кориснику производа детаљне информације уз помоћ којих ће проценити његову погодност за одређену намену (Morrison J. L., 1995).

Утицај нагиба терена на квалитет ДМТ-а Проф. Акерман са Универзитета у Штутгарту је седмдесетих година прошлог века спровео прве експерименте са моделима високе резолуције за инжењерске потребе. Он је дошао до линеарне зависности између тачности ДМТ-а и густине мерених тачака исказане формулом:

$$\sigma_z^2 = \beta^2 + (\alpha \times d)^2 \quad (1)$$

где је:

σ_z - средња грешка интерполоване висине,

α - фактор које се односи на карактеристике терена,

d - средње растојање између мерених тачака,

β - тачност мерених висина - улазних података.

Вредности за параметар α до којих је проф. Акерман дошао су:

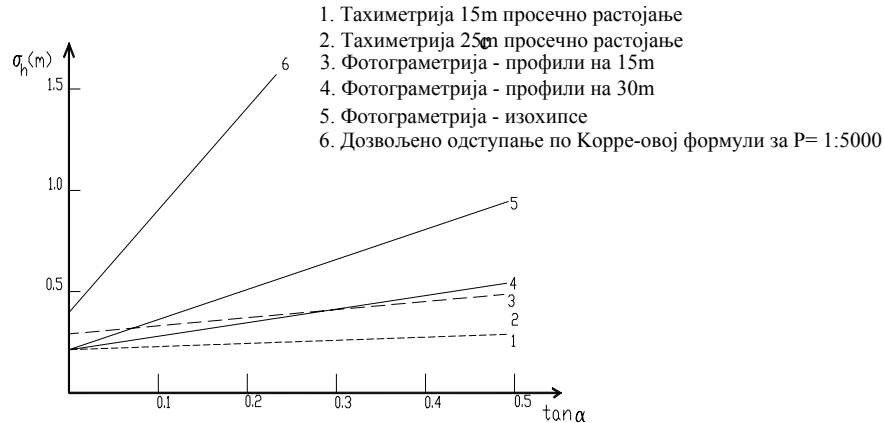
$\alpha = 0.004$ за равничарске и терене са благим нагибима

$\alpha = 0.010$ за "средње" терене.

$\alpha = 0.022$ за "тешке" терене.

Иако спецификација атрибута за терене није дата експлицитно, формула (1) има врло практичну употребу код ДМТ-а високе резолуције (ОЕЕРЕ, 2000). Битно је истаћи да је Акерман уочио функционалну везу између нагиба терена и грешке у моделу.

Акерман је такође уочио функционалну зависност тачности висина изохипси добијених из ДМТ са нагибом терена (Слика 1). Тачност је приказана и у функцији од методе прикупљања података и густине мерених тачака.



Слика 1. Тачност мерења висина за различите методе снимања у функцији нагиба терена (Ackermann F., 1978)

Полазећи од становишта да је нагиб терена пресудни параметар у оцени тачности висинске представе терена, Ли Зилин је развио општи модел оцене тачности ДМТ-а (Li Z., 1993б), чија формула гласи:

$$\sigma_{DEM}^2 = K_1 \sigma_z^2 + K_2 \left(1 + \frac{4d}{W}\right) \times (d \tan S)^2 \quad (2a)$$

где је:

σ_{DEM}^2 - средња квадратна грешка висина у ДМТ-у,

σ_z^2 - средња квадратна грешка мерених висина тачака (улазни подаци),

K_1 - константа чија вредност зависи од примењене интерполационе методе,

K_2 - константа чија вредност зависи од топографских карактеристика терена,

d - димензија гريدне ћелије⁴,

S - средња вредност нагиба терена,

W - таласна дужина терена која је дата формулом:

$$W = (H_{\max} - H_{\min}) \times \text{ctg} S \quad (2b)$$

где је:

H_{\max} - максимална висина терена

H_{\min} - минимална, висина терена.

- ⁴ Гريدна ћелија је елементарни део структуре података у облику правилне решетке.

Разлика ових висина на одређеном подручју често се назива “енергија” рељефа и она представља параметар вертикалног рашчлањења рељефа, односно потенцијалну енергију одређеног терена (Манојловић П. и Драгићевић С., 2002).

Формула за општи модел оцене тачности ДМТ-а има своју верзију и за ДМТ у којем су комбиновани подаци висина у гриду са подацима о структури рељефа (преломне линије, вододелнице, јаруге итд.) и гласи:

$$\sigma_{DTM}^2 = K_1 \sigma_z^2 + k_2 \times (d \tan S)^2 \quad (3)$$

Вредности коефицијената K_1 и K_2 одређене су емпиријски и износе 4/9 односно 5/768 (Li Z., 1993б).

Извори података за формирање ДМТ-а

До података за формирање ДМТ-а може се доћи на један од следећих начина:

- Превођењем у дигитални облик података постојећег картографског материјала (топографске карте и планови),
- Прикупљањем података једном од терестичких метода снимања терена (тахиметрија и GPS мерења),
- Коришћењем фотограметријске методе снимања терена (аналогне или дигиталне),
- Ласерским снимањем терена (LIDAR) као и коришћењем радарске технологије снимања InSAR.

Картографски извори за ДМТ С обзиром на чињеницу да постојећи картографски материјал представља скоро непресушни извор података за израду ДМТ база података свакако је битно назначити стандарде и процедуре који се користе за оцену тачности картографског материјала. Најинтересантнија је тачност геометријских информација које карте носе са собом. Она зависи од квалитета математичких елемената карте (пројекције, размере), квалитета базе премера (геодетске мреже), методе прикупљања податка (тахиметрија, фотограметрија, GPS снимање), врсте и квалитета мерних инструмента, а потом и од прибора и материјала, технолошких поступака картографске обраде и репродукцијске технике припреме, као и од деформација листова које настају у периоду њихове експлоатације. Према томе, геометријска тачност карте зависи од тачности премера и тачности картографско-репродукцијских радова.

При оцени геометријске тачности испитују се елементи који дефинишу хоризонтални, односно вертикални, положај тачке на карти, те се због картометријских особина плана, односно карте, за то користе правоугле координате и висине. То значи да је за меру тачности карата прихваћено одступање појединих тачака од њиховог стварног положаја по осовинама координатног система.

Оцена тачности добија се из разлика координата испитиваних тачака на карти са њиховим истинитим вредностима, односно вредностима координата вишег степена тачности за испитивање тачке. Експанзија картографске продукције у току 20. века довела је и до појаве стандарда који би требало да послуже за верификацију квалитета картографских производа

Међу најпознатије стандарде овог типа могу се убројити највише цитирани и у пракси и истраживањима најчешће коришћени, Амерички стандарди за крупно размерне топографске карте (Merchant D. C., 1987). Ови стандарди развијени су под покровитељством комитета за стандарде ASPRS⁵-а средином 80-тих година прошлог века. Они се односе на крупноразмерне топографске карте које су намењене за

⁵ American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (Америчко удружење за фотограметрију и даљинску детекцију)

инжењерске потребе. Овај документ је значајан пошто је по свом садржају и методологији представљао основу за развој будућег стандарда за оцену квалитета ДМТ. Такође су веома важне и следеће одреднице тог документа:

- Просторна тачност презентује се у природној величини,
- За меру тачности је узет момент другог реда (RMSE⁶),
- Специфицирана је и процедура за анализу квалитета карата.

Удокументу се по први пут уводи термин тест тачка. Под тим се подразумева тачка чије се просторне координате са карте упоређују са координатама добијеним мерењем на терену, или чији је извор хијерархијски веће тачности од тачности од иницијалних тачака којим је израђен ДМТ. За један лист карте препоручује се најмање 20 тест тачака. Овај стандард је усвојен од стране USGS⁷ и за оцену квалитете података ДМТ-а.

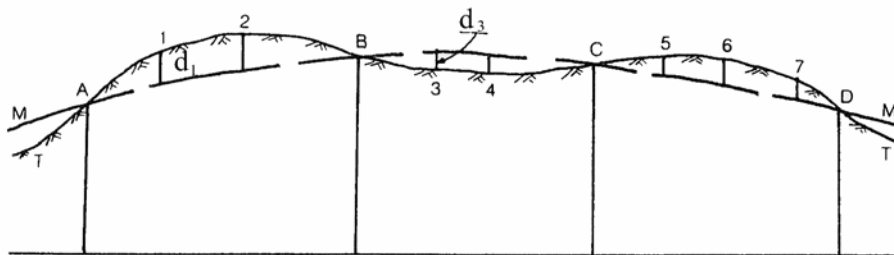
RMSE се рачуна из разлика просторних координата очитаних на карти у тест тачкама и њихових “истинитих” вредности, и то по формули:

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (4)$$

где је:

d_i – разлика висина у моделу и на терену,

n – број тест (контролних) тачака.



Слика 2. Одступање у висинама грида М и стварног терена Т

Услови које топографске карте морају да задовољавају у погледу хоризонталне тачности дати су у табели 1.:

Табела 1. Положајна тачност катрографских подлога (Merchant D. C.1987).

Тачност у положајном смислу (по Y или X координати) ;	
Дозвољена RMSE (m)	Размера плана/карте
0.0125	1: 50
0.025	1:100
0.050	1:200
0.125	1:500
0.25	1:1 000
0.50	1:2 000
1.00	1:4 000
1.25	1:5 000
2.50	1:10 000
5.00	1:20 000

⁶ Root mean square error (Централни моменат другог реда)

⁷ United States Geological Survey (Америчка агенција за геолошка истраживања)

Приказана тачност одговара картама прве класе, док за карте друге, односно треће класе, та вредност множи се са коефицијентом два, односно три.

За висинску тачност дозвољена RMSE је износ од једне трећине еквидистанце основне изохипсе на топографској подлози за јасно уочљиве тачке, односно једну шестина вредности еквидистанце за тачке које су картиране са пикиром и котом. Нумерички се то може приказати вредностима у табели (Табела 2). Вредности разлика које прелазе троструку вредност дозвољене RMSE сматрају се грубим грешкама.

Табела 2. Висинска тачност картографских подлога у функцији еквидистанце (Committee for Standards and Specifications, 1985).

Тачност у висинском смислу	
Еквидистанца (m)	Дозвољена RMSE (m)
0.05	0.015
0.1	0.03
0.5	0.15
1.0	0.30
2.0	0.61
2.5	0.76
5	1.52
10	3.04

Препорука приликом формирања скупа тест тачака за потребе вертикалне оцене тачности је да хоризонтална тачност тачака не прелази више од двоструке вредности дозвољене RMSE за положајну тачност (Табела 1). За распоред тачака се препоручује да оне буду распоређене дуж дијагонала листа карте, односно плана. За тачност одређивања висинских разлика између контролних тачака грешка мерења не би смела да буде већа од 1/20 еквидистанце. Препоруке и нормативи у земљама западне Европе врло су слични наведеним америчким стандардима (Koelbl O., 2001).

За оцене картографских ДМТ-а (ДМТ-а добијених из података са карата) користе тачке које су добијене са топографских подлога крупније размере, или фотограметријске ако размера снимања одговара крупнијој размери картирања, као и тахиметријски или ГПС технологијом снимљене тачке. ДМТ добијен из фотограметријских снимања такође се оцењује фотограметријским тачкама из крупније размере снимања, као и терестричким мерењима (тахиметрија, GPS).

Фотограметријски извори за ДМТ Последњих деценија је фотограметријска метода постала доминантна метода директног прикупљања података за израду ДМТ-а. Предност фотограметријске методе је у могућност да се мерени подаци прогушћују у складу са захтевима које ДМТ треба да испуни. С друге стране, велика предност ове методе је и висока тачност прикупљених података. Подаци о терену добијени овом методом знатно су већег ранга тачности него подаци добијени из картографског материјала.

Тачност мерених података у фотограметрији зависи од многобројних фактора, а као најчешће помињани стандард појављу се следеће формуле добијене емпиријским путем (Kraus K., 1989):

за сигнализане тачке (мерења у моделу):

$$\text{положајна: } \sigma_{xy} = \pm 8 \mu\text{m} \times R_s, \quad R_s - \text{именилац размере снимка,}$$

$$\text{висинска: } \sigma_z = \pm 8 \%_{00} \times hl, \quad \text{за нормалну и широкоугаону камеру,}$$

$$\sigma_z = \pm 0.01\% \times hl, \text{ за супер широкоугаону камеру,}$$

где је:

hl - висина лета.

За детаљне тачке на ове вредности треба додати грешку која одражава несигурност у дефиницији тачке $\sigma_{(def)}$ која се креће у распону од 0.07 до 1.0 метар, па би коначна формула гласила:

$$\begin{aligned} \text{положајно: } \sigma_{xy} &= \sqrt{\sigma_{xy(sig)}^2 + \sigma_{(def)}^2} \\ \text{висински: } \sigma_z &= \sqrt{\sigma_{z(sig)}^2 + \sigma_{(def)}^2} \end{aligned} \quad (5)$$

Код аналитичких стереореституционих инструмената тачност мерења се повећава за 25%.

Осим мерења дискретних тачака терена, не треба заборавити да се у процесу стереореституције могу директно извучити изохипсе. За њихову висинску тачност користи се већ наведена Корре-ова формула:

$$\sigma_H = \sigma_z + \sigma_G \times \tan S \quad (6)$$

где је :

S - нагиб терена,

σ_z – висинска тачност континуирано извучених линија која услед динамичког процеса мерења има следеће вредности,

$$\sigma_z = \pm 0.25\% \times hl, \text{ за нормалну и широкоугаону камеру,}$$

$$\sigma_z = \pm 0.3\% \times hl, \text{ за супер широкоугаону камеру.}$$

σ_G – положајна тачност мерења континуално извучених линија и износи:

$$\pm 100 \mu m \times R_S, \text{ за крупноразмере карте,}$$

$$\pm 0.2 mm \times R_K, \text{ за ситноразмерне карте (R_k-именилац размере картирања).}$$

За грубу процену често се користи формула:

$$\sigma_z = \pm 0.3\% \times hl \quad (7)$$

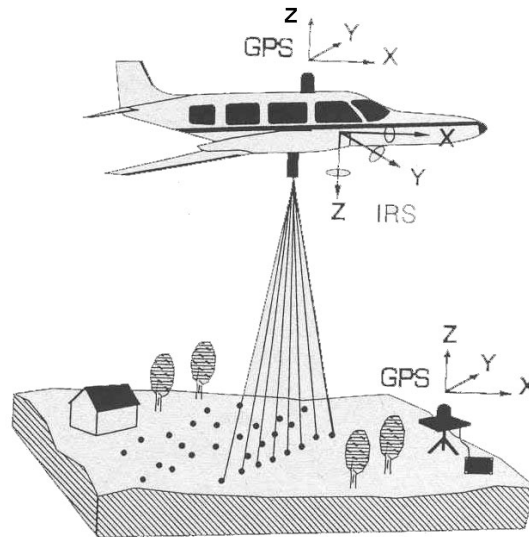
За потребе израде ортофотоа, врше се мерења по профилима, односно у растеру, и ту се за висинску тачност мерених података усваја формула:

$$\sigma_z = 0.1 - 0.15\% \times hl \quad (8)$$

Крајем осамдесетих година почиње нова ера у фотограметрији развојем технологије дигиталних фотограметријских станица. Развој дигиталне фотограметрије, а тиме и експанзија ортофото продукције, у први план је ставила израду ДМТ као неопходних података за добијање ових производа.

Са становишта прикупљања података за израду ДМТ-а, ова технологија је интересантна јер нуди могућност аутоматског генерисања висина у моделу. Висине се обично мере у гриду или по задатим профилима са задатим кораком. Овај процес се обавља просечном брзином од 150 тачака у секунди, што омогућава оператеру да за 10 минута обави посао за који је на аналитичком стереоплотеру потребно од 6 до 8 сати (Gooch M.J., Chandler J.X., 2001). Поред оваквог начина прикупљања података омогућена су и мануелна мерења у моделу. Аутоматско прикупљање података захтева и обавезну накнадну обраду података; у првом реду због филтрације података који не припадају терену (вештачки објекти, вегетација), а затим и због тога што алгоритми који то аутоматски обављају на појединим областима могу бити и неуспешни. Разлог за то су квалитет скенираног фотографског материјала, нагле промене нагиба површи, итд.

Ласерско снимање терена Ласерско скенирање терена (ALS⁸ или LIDAR) је нова технологија прикупљања података за потребе израде ДМТ-а. Овај технологија је почела да се развија у задњих десет година и врло брзо је у развијеним земљама Европе и САД у појединим сегментима и потисла фотограметријску методу, како по захтевима тачности тако и по трошковима везаним за реализацију.



Слика 3. Ласерско снимање терена

С обзиром на то да се ради о новој технологији, која се још динамично развија, врло је тешко говорити о неким општим мерама тачности. Значајно је истаћи неке од особености ласерског скенирања терена које су интересантне са становишта ДМТ продукције.

Овом методом могуће је обезбедити велику густину мерених података са високом тачношћу. Снимање се врши из ваздухоплова (авиони, хеликоптери) са висина од 20 до 6000 метара. Најчешће се ради о висинама лета око 1000 метара (Слика 3). Висина је врло битан параметар пројектовања снимања, јер се минимални размак мерених података (размак у растеру) добија из следеће формуле:

$$\Delta d = hl \cdot \gamma / 2000 \quad (9)$$

где је:

hl – висина лета,

γ – угао расипања ласерског зрака изражен у милирадијанима.

Уобичајена вредност за γ је 1 mrad, тако да се минимални размак добија из односа $hl/2000$.

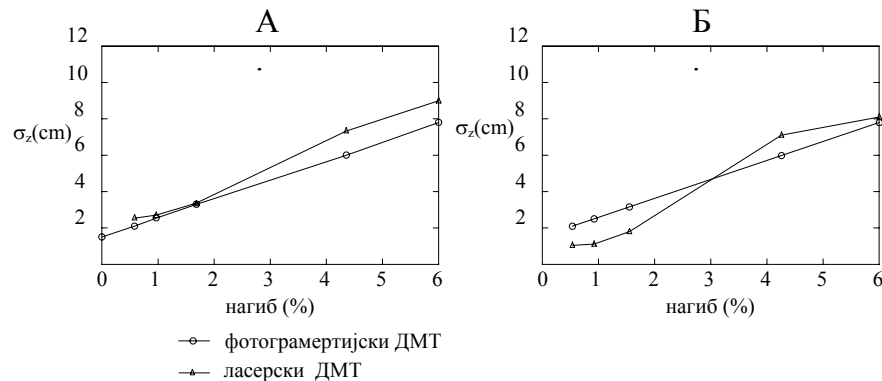
У свету тренутно постоји неколико произвођача ове опреме који имају различите стандарде тачности како позиционе тако и висинске (Baltsavias E. P., 1999б) а неки од њих су приказани у табели 3.

⁸ Airborne Laser Scanning (Ласерско скенирање терена из летилице)

Табела 3 Тачност различитих система за ласерско снимање терена

Назив система	Хоризонтална тачност (m)	Висинска тачност (cm)
ALTM 1020 Aero Asahi	0.1% <i>hl</i>	<15
TopoSys	0.05% <i>hl</i>	<15
Nakanihon	1 (на висини лета 200 m)	10-25 (<i>hl</i> = 200 m)
FLI-MAP II	<0.10	<10
ScaLARS	1 (на висини лета 700 m)	<20 (<i>hl</i> = 700 m)
AeroScan	0.30	20
RAMS	0.30	30
DATIS	1	15
HawkEye	3	30

Посебно је интересантно да је позициона тачност од 2 до 5 пута мања од висинске тачности. Урађена су многобројна независна истраживања у циљу упоређивања тачности ДМТ-а добијених из података прикупљених фотограметријском и ласерском методом. Резултати једног од упоредних тестова приказани су на слици 4 (Kraus K., Pfeifer N., 1998).



Слика 4. График зависности стандардних грешака висина мерених фотограметријски и ласерски и нагиба терена

Висинска тачност ДМТ-а добијеног ALS технологијом одговара тачности ДМТ-а добијеног фотограметријским мерењима за размере снимања R_s=1:7000 и R_s=1:10000 (Слика 4А.). Уклањањем систематских грешака, које се у првом реду односе на грешке позиционирања ваздухоплова који се добија из GPS и INS⁹ мерења за терене са нагибом мањим од 30% ALS технологија даје боље резултате (Слика 4Б.).

Занемарујући утицај нагиба терена очекивана тачност мерења ласерима је од 5cm до 20cm (односи се првенствено на грешку GPS позиционирања ваздухоплова и мерења растојања) са погоршањем од 0.5-2cm за сваких додатних 100m висине лета (ово се односи на углове скенирања до 30°) (Baltsavias E.P., 1999a).

Ласерски системи нових генерација омогућавају продирање ласерских снопова кроз вегетацију, тако да је могуће добити ДМТ без обзира на обраслот терена растињем, што је иначе велики проблем код фотограметрије. Добијена тачност за ДМТ тачке у шумовитим теренима може се изразити формулом (Kraus K., 2000):

⁹ Inertial Navigation Sensors (Инерцијални навигациони системи)

$$\sigma_z(cm) = \pm \sqrt{18 + 120 \tan S} \quad (10)$$

gde je:

S нагиб терена.

Досадашњи покушаји да се из ласерских мерења директно добијају изохипсе показали су се као недовољно квалитетни са становишта геоморфолошких приказивања детаља. За такву сврху препоручује се комбиновање ових података са другим изворима података (додатна GPS мерења или фотограметријска мерења) (Kraus K. Pfeifer N., 1998).

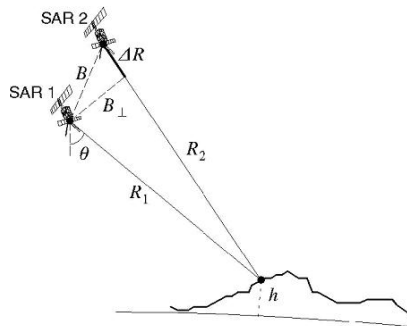
LIDAR технологија има велики потенцијал како у прикупљању података за израду ДМТ, тако и за израду дигиталних модела површи. У комбинацији са фотографским сензорима она обезбеђује богате информације о геометрији објеката који се налазе на терену, што ће је врло брзо избацити у први план код аквизиције података за крупноразмерне 3Д-ГИС апликације.

Радарска мерења као извор података за ДМТ Упоредо са LIDAR технологијом развијала се технологија радарске интерферометрије (InSAR). Мерења података о висинама терена базирана су на принципу мерења стереопаралаксе сигнала радара чија је таласна дужина реда величине неколико центиметара што омогућава њихово продирање кроз облаке и несметан рад без обзира на метеоролошке услове (Слика 5). За ову технологију је интересантно да нуди могућност коришћења широког дијапазона летелица, за разлику од ласерске технологије, тако да је NASA ову технологију прикупљања података о терену применила и на Shuttle Radar Topographic Mapper мисији већ 1999. године.

Тачност ДМТ мерења InSAR технологијом одређена је са три основна фактора:

- тачност одређивања фазе радарских сигнала,
- тачност одређивања положаја летелице,
- атмосферски услови.

У поређењу са LIDAR технологијом SAR интерферометрија има само нешто мањи ниво тачности, али је много економичнија за прикупљање података за ДМТ који покривају већа подручја, посебно за територије које нису изграђене и на којима нема вегетације. Системи као што су на пример Star-3i под идеалним условима могу да покрију подручје од 30 000 km², за само један дан снимања (Mercer J. B., Schnick S., 1999). Посебно је интересантно да мерења радарском технологијом могу да се обављају у правилним растерима, тако да је гريدни ДМТ добијен на овакав начин практично резултат интеграције мерених података без примене интерполације.



Слика 5. InSAR снимање терена за потребе израде ДМТ

У табели 4. је дато поређење параметара InSAR технологије комерцијалног система Star -3i који је оперативан летелицама типа LearJet од 1997 године са LIDAR технологијом (Mercer B., 2001).

Табела 4 Упоредни параметри InSAR i LIDAR технологије

Параметар	INSAR (Star-3i)	LIDAR
Висина лета	6000m - 9000m	300m – 1800m
Брзина лета	750km/час	~200km/час
Угао захватања	30°-60°	+/- 20° (35° max)
Ширина захвата (на тлу)	5 – 8km	0.7 – 1 km
Резолуција орторектификоване слике	2.5m	/
Резолуција мерења терена	2.5m, 5m, 10m	3 – 5m (0.5min)
Вертикална тачност ДМТ-а		
Апсолутна	1.0m	15-35cm
Релативна (1σ)	~30cm	/
Хоризонтална тачност ДМТ-а	2.5m	0.5-1.0m
Брзина аквизиције података		
Максимална (km ² /час)	4 000	~200
Просечна (km ² /час)	1 000	?

InSAR технологија отвара могућности за релативно брз и економичан начин формирања националних база података о висинама терена код земаља које немају развијени картографски материјал (Holland D., 2002).

Експериментална истраживања на тест подручју "Златибор"

Изложена теорија практично је примењена на реалним подацима. За тест подручје је узет централни део подручја Златибора, Краљеве воде (Слика 6), укупне површине 13.5 km² (два листа ОДК размере 1:5 000).



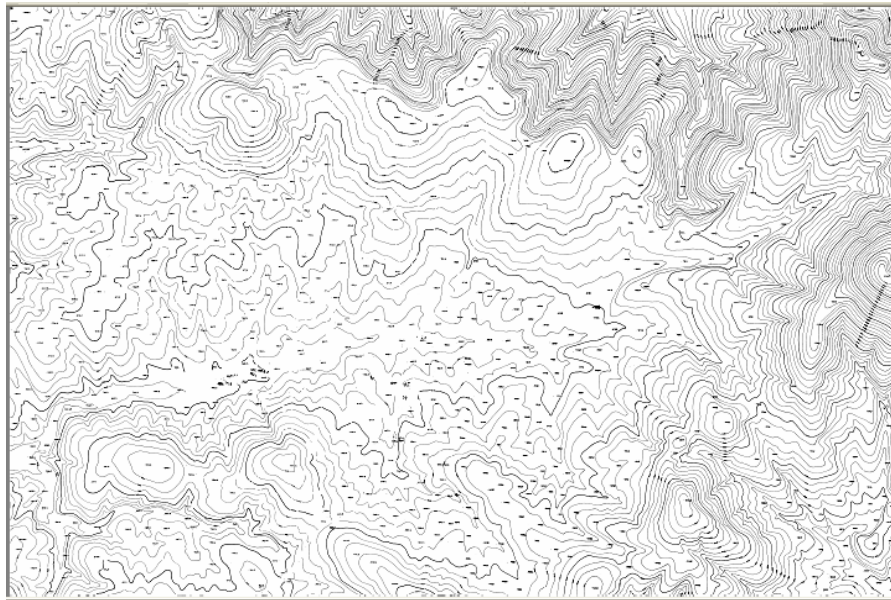
Слика 6. Панорама тест подручја "Златибор"

На основу категоризације дате у табели 5., тест подручје припада категорији умереног таласастог терена (Sakude et al, 1998). Срачуната стандардна девијација висина на датом подручју износи $\sigma_h = 37.68m$.

Табела 5. Категоризација терена на основу варијације висина

Категорија терена	σ_h	
	Стопе	Метри
Равничарски	<60	<18
Умерено таласаст	60-200	18-61
Нераван	200-800	61-243
Врло нераван	>800	>243

Дигитални модел терена тест подручја “Златибор” За потребе истраживања на наведеном тест подручју израђен је дигитални модел терена гريدне структуре са резолуцијом од 10m. Као извор података послужила је дигитализована Основна Државна Карта (ОДК) размере Р=1:5000. Добијени модел припада групи “картографских” ДМТ-а. Технолошки процес изаде ДМТ састојао се у дигитализацији скенираних орохидрографских олеата листова ОДК са ознакама 7В23-04 и 7В23-05 (Слика 7.) Висинска представа терена је добијена реституцијом фотограметријског материјала из 1983 године, континуираним извлачењем изохипси. Скенирање карата је обављено у Републичком Геодетском Заводу на скенеру ANATech Evolution.



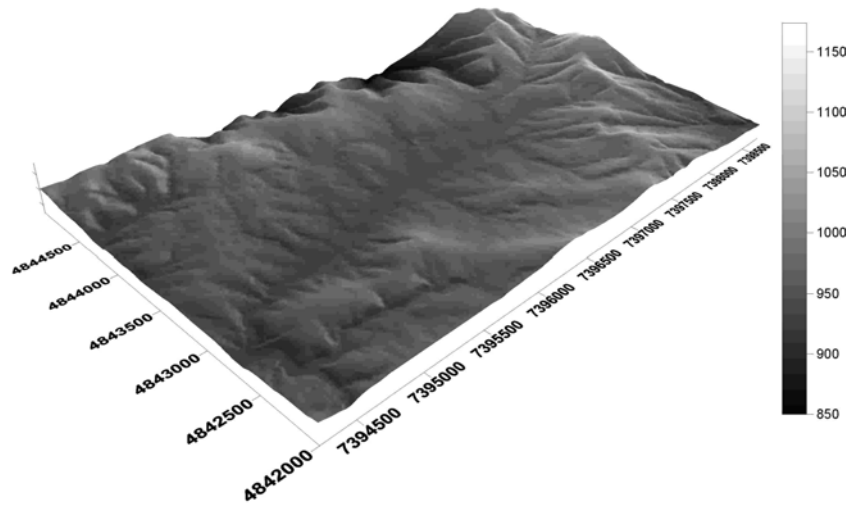
Слика 7. Приказ орохидрографске олеате тест подручја (листови ОДК са ознакама 7В23-04 и 7В23-05)

Резолуција скенираних подлога је 400dpi. Скениране подлоге су трансформисане у државни координатни систем помоћу афине трансформације другог реда. Трансформисане подлоге су путем I/GEOVEC програмског пакета фирме Интерграф полуаутоматски дигитализоване. На наведеним листовима није било

хидрографског садржаја, што је у многама олакшало поступак дигитализације, тако да је за векторизацију изохипси оба листа био потребан један радни дан. Грешке које су начињене у току овог процеса уклоњене су прегледом изохипси у 3Д моделу. У оваквим случајевима дигитализације, грешке су углавном везане за унос погрешне висине изохипсе. Линије изохипси су потом раздвојене у тачкасте ентитете уз помоћ екстензије развијене у Avenue програмском језику који је намењен развоју апликација у ArcView софтверском окружењу. Том приликом добијено је 233293 висинских тачака. Тај број тачака је потом редукован уз помоћ Douglas&Pucker-овог алгоритма за генерализацију линија (Sunday D., 2002).

Циљ редуције броја тачака које ће се користити за генерисање ДМТ, био је да се на тај начин симулирају тачке, које би се добиле у поступку класичне мануелне дигитализације изохипси. Поред изохипси, са картографске подлоге су дигитализоване и све појединачне карактеристичне тачке терена које су дате пикиром и котом. Сума ових тачака и тачака добијених из изохипси после њихове редуције чини укупну базу података која је коришћена за израду ДМТ-а.

За добијање грида прво је формиран ТИН¹⁰ применом стандардног алгоритма Delaunay-еве триангулације, а потом је урађена конверзија овако добијеног модела у гридну структуру.



Слика 8. 3Д приказ дигиталног модела тест подручја "Златибор"

GPS мерења тест тачака Сателитска мерења тест тачака извршена су паром једнофреквентних GPS пријемника фирме TRIMBLE и паром двофреквентних GPS пријемника фирме THALES. Оба пара пријемника, заједно са припадајућим антенама, карактерише могућност фазних мерења, односно постизања геодетски релевантне тачности позиционирања.

THALES пријемницима вршено је позиционирање тачака кинематичком методом у реалном времену (RTK¹¹), јер су се у склопу опреме налазили радио модеми и антене. Обрада података мерења брзе статичке и кинематичке методе извршена је комерцијалним софтверским пакетом GPSurvey V2.2 фирме TRIMBLE. Око 18% мерених тачака одбачено је током обраде због недовољно квалитетних координата насталих као резултат слабе сателитске геометрије, недовољног броја

¹⁰ TIN – Triangulated irregular network (Модел терена у облику мреже просторно повезаних неправилних троуглова)

¹¹ Real time kinematic (Метода мерења у реалном времену током кретања)

сателита, погрешне иницијализације или немогућности решавања фазних неодређености. У дефинитивну обраду укључено је укупно 280 мерених тачака.

Резултат дефинитивне обраде GPS мерења представљале су положајне координате и висине тачака које се номинално односе на референтни оквир усвојене почетне тригонометријске тачке Т-182 (ITRF96). С обзиром на то да је ДМТ тест подручја задат у државном референтном систему, у даљем поступку извршена је трансформација хоризонталних положаја и елипсоидних висина у државни координатни систем односно систем ортометријских висина.

Тачност висина измерених тест тачака добијена је статистичком обрадом података мерења и износи 3.5cm.

Фотограмметријска мерења тест тачака За потребе оцене тачности ДМТ-а коришћене су и тачке добијене из фотограмметријских мерења за потребе пројекта "Чајетина 2002", реализованог од стране Републичког Геодетског Завода Србије. Пројекат је обухватао израду дигиталног ортофотоплана размере R=1:1000 за део подручја општине Чајетина површине 1800 хектара. Размера снимања је била Rs= 1: 5000 и обављена је камером RМК 21/23 са константом $f = 207.96$ мм са просечном висином лета око 1040 м изнад терена. Дигитална реституција представе терена извршена је на инструментима првог реда WILD A10 у софтверском окружењу MapSoft 2000. Из базе података о висинама терена коришћени су само подаци о тачкама терена основног растера просечних димензија 15x15m. Укупан број фотограмметријских тачака је 46 021 и покрива највећи део тест подручја, изузетак је северозападни део подручја, који иначе није био обухваћен пројектом израде ортофотоа.

Висинска тачност детаљних тачака одређена је формулом:

$$\sigma_z = 0.1 - 0.15\%_0 \times hl \approx 15cm \quad (11)$$

Овај стандард фотограмметријских мерења омогућава да она буду коришћена као контролна мерења за испитивање квалитета "картографских" ДМТ-а.

Из укупног скупа тачака формирана су методом случајног узорка два скупа тачака (458 и 894 тачке) који равномерно покривају тест подручје. Случајни узорак тачака добијен је алгоритмом за случајан избор тачака.

Рачунање RMSE за дигитални модел терена "Златибор" Квалитет добијеног ДМТ оцењен је рачунањем RMSE на основу формуле (4) и то за на основу ГПС мерених података као и на основу два скупа тачака из фотограмметријских мерења. Добијене величине за RMSE су дате у табели 6.

Табела 6. Срачунате вредности за RMSE

	GPS (280 тачака)	Фотограмметријска мерења (458 тачака)	Фотограмметријска мерења (894 тачке)
RMSE	1.32 m	1.19 m	1.22 m

Закључак

Из резултата приказаних у табели 6 може се уочити да су оцене за RMSE сагласне, без обзира на методу одређивања тест тачака (GPS или фотограмметрија). Добијени резултати могу послужити и за оцену висинске тачности картографског материјала (Табела 2.) С обзиром на чињеницу да су добијени резултати за RMSE мањи од 1.5 m (дозвољена вредност за еквидистанцу 5 m), може се закључити да дигитализовани листови ОДК задовољавају критеријуме висинске тачности задате од

стране Committee for Standards and Specifications. То је значајно јер верификације тачности картографских подлога са топографским садржајем код нас у пракси никада нису спровођена.

ЛИТЕРАТУРА

- Ackermann F., (1978): **Experimental investigation into the accuracy of contouring through DTM**. Proceedings of Digital Terrain Modelling Symposium, St. Louis: 165-192.
- Ackermann F., (1995): **Techniques and Strategies for DEM Generation in Digital Photogrammetry**, an Addendum to the Manual of Photogrammetry of ASPRS:135-14.
- Ayeni O.O., (1982): **Optimum Sampling for Digital Terrain Models: A Trend Towards Automation**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.48, No.11: 1687-1694.
- Baltsavias E.P., (1999a): **A comparison between photogrammetry and laser scanning**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54 (2-3): 83-94.
- Baltsavias E.P., (1999b): **Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54 (2-3): 164-198.
- Caruso V.M., (1987): **Standards for digital elevation models**. Proceedings of the ACSM/ASPRS Annual Convention, Baltimore:159-166.
- Committee for Standards and Specifications, (1985): **Accuracy Specifications for Large-Scale Line Maps**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 51(2):195-199.
- Gooch M.J., Chandler J.H., (2001): **Failure prediction in automatically generated digital elevation models**. Computers and Geosciences, Vol.27 No. 8:913-920.
- Holland D., (2002): **Developing a national height database**. Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa <http://www.isprs.org/commission4/proceedings/pdfpapers/348.pdf>
- Li Z., (1993a): **Theoretical models of the accuracy of digital terrain models: An evaluation and some observations**. Photogrammetric Record 14 (82):.651-659
- Li Z., (1993b): **Mathematical models of the accuracy of digital terrain model surfaces linearly constructed from square gridded data**. Photogrammetric Record 14 (82):.661-673.
- Koelbl O., (2001): **Technical Specifications for the Elaboration of Digital Elevation Models**. EPFL, www.intesagis.it/Specifiche_Tecniche/DTM/DTM161_Spec_Apr01.PDF
- Kraus K., (1989): **Fotogrametrija 2**. Tehnička knjiga, Beograd.
- Kraus K., Pfeifer N., (1998): **Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 53(4): 193-203.
- Kraus K., (2000): **Photogrammetrie Band 3: Topographische Informationssysteme**. Dummler Verlag.
- Манојловић П., Драгићевић С., (2002): **Практикум из геоморфологије**. Географски факултет, Београд.
- Mercer J. B., Schnick S., (1999): **Comparison of DEMs from STAR-3i Interferometric SAR and Scanning Laser**. Proceedings of the ISPRS Workshop, La Jolla, CA, :127 – 134.
- Mercer B., (2001): **Comparing LIDAR and IFSAR: What can you expect?**. Proceedings of Photogrammetric Week 2001 Stuttgart: http://www.intermaptechnologies.com/PDF_files/paper_Stuttgart01_JBM3.pdf
- Merchant, D.C., (1987): **Spatial accuracy specification for large scale topographic maps**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 53:958-961.
- Morrison J.L., (1995): **Spatial data quality**. In: Guptill S.C., Morrison J.L.: Elements of Spatial Data Quality ch.1.:1-12, Pergamon
- OEEPE, (2000): **Precision Terrain Models for Civil Engineering**. Proceedings of the OEEPE Workshop on National Mapping Agencies and the Internet& Precision Terrain Models for Civil Engineering, Flotron A., Koelbl O. (ed.), Southampton.
- Sakude M., Schiavone G, Morelos-Borja H., Martin G., Cortes A. (1998): **Recent Advances on Terrain Database Correlation Testing**. SPIE '98 Vol. 3369
- Sunday D., (2002): **Polyline Simplification**. http://geometryalgorithms.com/Archive/algorithm_0205/algorithm_0205.htm
- Torlegard K., Ostman A., Lindgren R., (1986): **A comparative test of photogrammetrically sampled digital elevation models**. Photogrammetria No.41: 1-16

BRANISLAV BAJAT
DRAGOLJUB ŠTRBAC

S u m m a r y

**THE INFLUENCE TO SOURCE OF DATA FOR ACCURACY
ON DIGITAL TERRAIN MODELS (DTM)**

Quality estimation for DTM's products is necessary for providing detailed information for possible users while making decision on which of the available bases would satisfy their requirements for a certain application. Despite of different interpolation methods, which are provided by various DTM's software packages, the influence of these methods on DTM's accuracy is the same. Different data acquisition technologies for DTM production provide heterogeneous accuracy levels of DTMs. Thus, the information about data sources might be compulsorily part of metadata for DTMs products.