

Еталонирање терестричких ласерских скенера у лабораторијским условима

ДУШАН ПЕТКОВИЋ, Универзитет у Београду,
Грађевински факултет, Београд
МАРКО ПЕЈИЋ Универзитет у Београду,
Грађевински факултет, Београд

Резиме – Терестричко ласерско скенирање (ТЛС) представља методу брзог прикупљања велике количине података у виду „облака тачака“ који нам касније представља основу за приказивање реалног стања „објекта“ у виду тродимензионалног модела и вршење разних анализа над њим. Перманентни развој технологије, хардвера и софтвера у претходних 10-ак година је у великој мери утицао на експанзију методе ТЛС-а, и на квалитет података који добијамо као резултат њене примене. Методу ТЛС-а можемо декларисати као једну од „најмлађих“ метода која се користи у геодезији, грађевинарству, архитектури, просторном планирању и др. Међутим, методи ТЛС-а недостају јасно дефинисане и стандардизоване теренске процедуре као и методе испитивања и еталонирања инструмената и прибора који се користи. Такође, још увек не постоји међународни стандард који би унифицирао декларисање карактеристика инструмената од стране произвођача.

У овом раду је дат преглед свих процеса и прорачуна у циљу успостављања метролошког полигона за потребе еталонирања терестричко ласерских скенера. Приказана је и анализа података прикупљених приликом еталонирања три модела терестричко ласерских скенера.

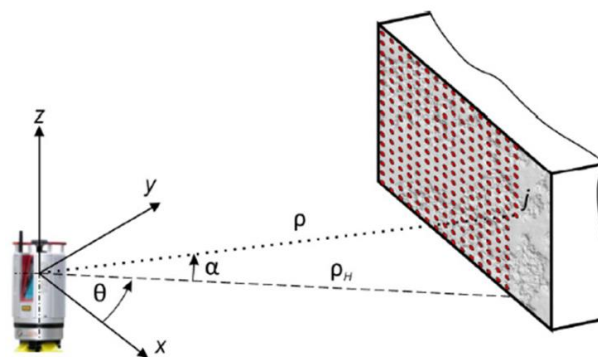
Кључне речи: терестричко ласерско скенирање, еталонирање, метрологија

1. УВОД

Терестричко ласерско скенирање представља методу прикупљања велике количине података за релативно кратко време. Улога ТЛС технологије у геодетском инжењерству се првенствено односи на утврђивање постигнуте геометрије инжењерских објеката (бране, тунели, индустријска постројења...), као и на геодетско осматрање објеката, уколико се скенирање врши у више епоха.

Терестричко ласерски скенер је високотехнолошки инструмент који као резултат процеса скенирања даје скуп тродимензионалних тачака који се назива облак тачака. Сам принцип одређивања координата применом ове технологије се не разликује од традиционалног геодетског принципа. За сваку тачку у облаку тачака везује се четвородимензионални податак и то [1]:

- 3D координате у координатном систему скенера (слика 1);
- информација о интензитету повратног зрачења.



Слика 1 - Принцип скенирања и резултати мерења код ТЛС методе [1]

Поред тога, свакој скенираној тачки се може придружити и RGB (Red Green Blue) вредност, на основу додатно интегрисаног CCD (Charged Coupled Device) сензора и одговарајуће оптике, која је саставни део већине модела скенера [1]. Иако скенер има доста додирних тачака са постојећим мерним системима у геодезији, сматра се посебном класом инструмената која има одређену методологију мерења и обраде података.

2. ЕТАЛОНИРАЊЕ ТЕРЕСТРИЧКО ЛАСЕРСКИХ СКЕНЕРА

Еталонирање је скуп поступака којима се, у одређеним условима, успоставља однос између вредности величина које показује мерило или мерни систем и одговарајућих вредности остварених еталонима [2]. Може се рећи и да је еталонирање основно средство у обезбеђивању следивости мерила. Мерило се еталонира из неколико разлога:

- ради успостављања и доказивања следивости;
- ради обезбеђивања конзистентности очитаних вредности са вредностима других мерила;
- ради одређивања тачних вредности мерених величина;
- ради успостављања поузданости мерила.

Еталонирање мерних инструмената се врши у акредитованим лабораторијама. Лабораторије за еталонирање располажу секундарним еталонима који су еталонирани са примарним еталонима Дирекције за мере и драгоцене метале, чиме је обезбеђена следивост еталонирања и мерења до Међународног система мерних јединица (*SI*). Еталонирање мора извршити одређено лице које ради у лабораторији са одговарајућим научним и стручним звањем.

Терестрички ласерски скенери, као и остали геодетски инструменти, морају бити еталонирани. Резултати геодетских радова користе стручњаци осталих инжењерских струка, па би грешка у резултатима као последица коришћења неадекватне геодетске опреме оставила велике последице на цео пројекат.

Основни циљ испитивања скенера у лабораторијским условима јесте утврђивање тачности резултата ТЛС опажања, тј. резултујућег облака тачака. Како је видно поље терестричко ласерских скенера 360° у хоризонталном смислу, и око 270° у вертикалном смислу (није обухваћено подручје испод скенера), процедура за испитивање мора бити дефинисана тако да је могуће извршити испитивање остварених резултата у свим правцима. Како би испитали тачност резултата ТЛС опажања у свим правцима, полигон за еталонирање терестричко ласерских скенера мора задовољити следеће захтеве:

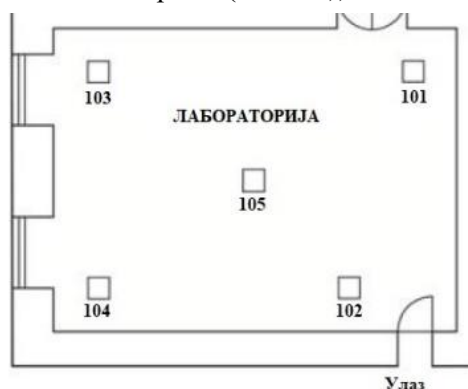
- полигон се састоји од мреже референтних маркица (произвођачи декларишу прецизност одређивања координата референтних маркица);
- референтне маркице морају имати добру просторну конфигурацију тј. морају бити правилно распоређени у свим правцима;
- координате референтних маркица морају бити одређене тачнијом методом тако да се њихове координате могу сматрати условно тачним у односу на резултате ТЛС скенирања.

Када говоримо о резултатима добијеним ТЛС методом, битно је напоменути да карактеристике инструмената дате од стране произвођача нису једнозначне и не могу се поуздано тумачити. Самим тим је веома тешко поређење различитих уређаја па чак и када се ради о истом произвођачу.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА

Експериментална истраживања су усмерена на успостављање адекватног метролошког полигона за потребе еталонирања терестричко ласерских скенера. Метролошки полигон је успостављен у оквиру Метролошке лабораторије Грађевинског факултета, Универзитета у Београду. Метролошка лабораторија је акредитована за мерење дужина и углова. Такође, лабораторија поседује контролисане услове средине, односно стабилне параметре температуре и влажности ваздуха [4].

Произвођачи декларишу тачност добијених резултата на одређеним растојањима: 25, 50 или 100 метара. Растојања током спровођења експеримента варирају у одређеном опсегу од 1 до 7 метара (у односу на централни стуб лабораторије на који се поставља скенер приликом еталонирања (слика 2)).



Слика 2 – Распоред стубова у лабораторији

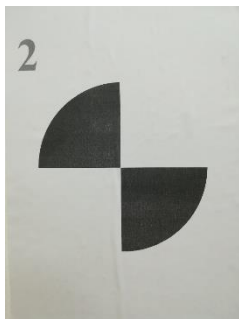
Полигон се састоји од значајног броја референтних маркица. Да би се резултати успостављања метролошког полигона сматрали еталонским у односу на декларисану вредност несигурности одређивања центра сигнала скенером потребно је задовољити принцип занемарљивости. Ова чињеница има за последицу избор инструмента и методе рада при реализацији мерења у мрежи.

Метролошки полигон за потребе еталонирања терестричко ласерских скенера успостављен је у неколико фаза:

1. Припремни радови
2. Мерења у мрежи
3. Обрада резултата.

3.1. Припремни радови

Припремни радови се односе на планирање самог експеримента. Под планирањем експеримента се подразумева припрема и постављање маркица на зид лабораторије на основу претходно дефинисаног плана распореда. Референтне маркице су у виду *Leica* равне црно-беле маркице кружног облика (слика 3). Ове маркице су штампани на специјалном папиру који омогућава лепљење истих на зидове лабораторије.



Слика 3 - Изглед референтне маркице

План распореда маркица је реализован у односу на димензије лабораторије. Димензије лабораторије су следеће: дужина 9.3 m, ширина 7 m, и висина 3.3 m. Поред димензија, на просторни распоред маркица је утицао и намештај лабораторије.

У лабораторији је, у оквиру овог експеримента, постављено укупно 74 референтних маркица правилно распоређених у форми грида на сва 4 зида и на плафону (слика 4). Нумерација маркица је релативно sukcesивна, осим у одређеним деловима лабораторије.



Слика 4 – Изглед успостављене мреже референтних маркица

3.2. Мерења у мрежи

У метролошкој лабораторији се налази 5 еталонских стубова са познатим координатама (слика 2). Њихове координате су одређене високопрецизним инструментом и за ову намену се могу сматрати условно тачним (табела 1).

Табела 1 – Координате стубова

| T_i | X [m] | Y [m] | Z [m] |
|-------|---------|---------|---------|
| 101 | 3.8450 | 0.7191 | -0.1033 |
| 102 | 2.7754 | -4.5037 | -0.0620 |
| 105 | 0.5186 | -2.2825 | -0.0644 |
| 104 | -2.6842 | -5.3265 | -0.0330 |
| 103 | -3.4270 | -0.3896 | -0.0652 |

Како би се обезбедила добра основа за испитивање скенера у виду контролне мреже референтних маркица, мерења у мрежи су извршена по следећој конфигурацији:

- мерења су извршена инструментом марке *Trimble 5603 DR200+ 3" Robotic Reflectorless Total Station*;
- како би се елиминисала грешка центрања инструмента, инструмент је постављан на стубове;
- током мерења није било ограничења у погледу упадног угла с обзиром на распоред стубова;
- на самом почетку гируса опажане су маркице постављене на сваком од стубова а затим референтне маркице sukcesивно од 1 до 74;
- извршена су мерења хоризонталног и вертикалног правца без мерења дужина

(иако их инструмент аутоматски региструје, дужине нису коришћене осим за добијање приближних координата);

- мерења су извршена гирусном методом у два гируса и са свих стубова;
- приликом реализације мерења поштовани су критеријуми за праћење и контролу мерења:
 - максимална дозвољена вредност двоструке колимационе грешке;
 - максимална дозвољена вредност разлике опажаних праваца у два гируса
- меморисање података је извршено аутоматски, у самом софтверу инструмента.

3.3. Обрада резултата мерења

Обрада резултата мерења подразумева оцену непознатих координата референтних маркица у координатном систему лабораторије по методи најмањих квадрата. Глобална статистика мерених величина је следећа:

- Број мерених величина: 642
- Број непознатих параметара: 231
- Број сувишних мерења: 411

Обрада је извршена у оквиру софтверског пакета *NemExpert*. Овај софтвер нема могућност *3D* изравнања па је извршено прво изравнање *1D* мреже а затим и *2D* мреже.

3.3.1. Изравнање *1D* мреже

Основни подаци о *1D* мрежи су:

- Укупан број тачака: 77
- Број датих тачака: 1
- Број мерених величина: 321
- Број непознатих параметара: 76
- Број сувишних мерења: 245
- Дефект мреже: 0

Датум мреже је дефинисан висином стуба 105. Тестирање адекватности модела показало је да је усвојени функционални, односно стохастички модел адекватан и да у мерењима нису присутне грубе грешке.

3.3.2. Изравнање *2D* мреже

Основни подаци о *2D* мрежи су:

- Укупан број тачака: 77
- Број датих тачака: 2
- Број мерених величина: 321

- Број непознатих параметара: 155
- Број сувишних мерења: 166
- Дефект мреже: 0

Датум мреже је дефинисан координатама стубова 101 и 104. Тестирање адекватности модела показало је да је усвојени функционални, односно стохастички модел адекватан и да у мерењима нису присутне грубе грешке.

3.4. Анализа резултата еталонирања

Несигурност је квантитативна мера квалитета резултата мерења која карактерише дисперзију вредности и омогућава да се резултати мерења упореде са другим резултатима, референцама, спецификацијама или стандардима.

Несигурност може да се одреди на разне начине. Шире коришћена и прихваћена метода, препоручена од стране *ISO* у *Evaluation of measurement data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, First edition 1995*, подразумева:

1. Идентификацију свих битних компоненти мерне несигурности
2. Одређивање стандардне несигурности сваке компоненте мерне несигурности
3. Одређивање комбиноване несигурности
4. Одређивање проширене несигурности

Под анализом резултата еталонирања се подразумева одређивање компоненти мерне несигурности. Код технологије ТЛС-а компоненте мерне несигурности су:

- мерна несигурност мерене дужине;
- мерна несигурност мереног хоризонталног правца;
- мерна несигурност мереног вертикалног правца.

Пре одређивања мерне несигурности компонената потребно је извршити трансформацију координата. Трансформација се врши на основу алгоритма Хелмертове шестопараметарске трансформације [3].

3.4.1. Одређивање мерне несигурности мерења дужине

Одређивање мерне несигурности мерења дужина се врши на основу следећег израза [5]:

$$m_r = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\Delta_j)^2}{n}}, \quad (1)$$

где је:
 $j=1,2, 3... n$;

$\Delta_j = D^E - D^M$ - разлика еталонске и мерене дужине;

D^E – еталонска вредност дужине;

D^M – вредност „мерене“ дужине срачунате из мерених величина трансформисаних у КС лабораторије

$$D^M = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2}. \quad (2)$$

3.4.2. Одређивање мерне несигурности мерења хоризонталних праваца

Мерна несигурност мерења хоризонталних праваца се израчунава на основу следећег израза [5]:

$$m_r = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\Delta_j)^2}{n}}, \quad (3)$$

где је:

$j=1,2, 3... n$;

$\Delta_j = \varphi^E - \varphi^M$ - разлика еталонске и мерене вредности хоризонталног правца;

φ^E – еталонска вредност хоризонталног правца;

φ^M – вредност „мереног“ хоризонталног правца срачунатог из мерених величина трансформисаних у КС лабораторије

$$\varphi^M = \arctan\left(\frac{\Delta X}{\Delta Y}\right). \quad (4)$$

3.4.3. Одређивање мерне несигурности мерења вертикалних праваца

Мерна несигурност мерења вертикалних праваца се израчунава на основу следећег израза [5]:

$$m_r = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\Delta_j)^2}{n}}, \quad (5)$$

где је:

$j=1,2, 3... n$;

$\Delta_j = \theta^E - \theta^M$ - разлика еталонске и мерене вредности вертикалног правца;

θ^E – еталонска вредност вертикалног правца;

θ^M – вредност „мереног“ вертикалног правца срачунатог из мерених величина трансформисаних у КС лабораторије

$$\theta^M = \arctan\left(\frac{\Delta Z}{\sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2}}\right). \quad (6)$$

3.4.4. Одређивање проширене мерне несигурности и анализа резултата

Проширена мерна несигурност (дужина, хоризонталних и вертикалних праваца) се одређује множењем одговарајуће вредности мерне несигурности са фактором k , који је у функцији од дефинисане расподеле и од задате вероватноће интервала поверења:

$$M_r = m_r \cdot k, \quad (7)$$

где је:

M_r - проширена мерна несигурност,

m_r - мерна несигурност.

Најчешћи избор вредности фактора је $k=2$ што одговара нормалној расподели и вероватноћи интервала поверења 95%, па у том случају формула (7) има следећи облик:

$$M_r = m_r \cdot 2. \quad (8)$$

Проширена мерна несигурност се користи код даље анализе срачунатих разлика. Разлике условно тачних (еталонских) и мерених вредности дужина, хоризонталних и вертикалних праваца Δ_j се анализирају упоређивањем њихове вредности са коресподентном вредношћу проширене мерне несигурности:

$$|\Delta_j| \leq M_r. \quad (9)$$

Ако услов дефинисан изразом (9) није испуњен онда се констатује да су одступања Δ_j значајна. У том случају препоручује се калибрација од стране произвођача или, уколико инструмент дозвољава, препоручује се унос и меморисање оцењене девијације као вредност корекције у уређају.

У случају задовољавања услова (9) не може се констатовати значајност разлика Δ_j , тј. резултати добијени приликом испитивања скенера су сагласни са еталонским вредностима (изворни резултати мерења су D, θ и φ а рачунским путем се долази до правоуглих координата X, Y и Z). Овај поступак је дефинисан

нацртом техничког комитета *ISO/TC 172/SC 6* из 2016. године [6].

4. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА И ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

Обрадом резултата мерења добијене су оцењене координате свих референтних маркица. Методологија експеримента условљава вредност положајне тачности тачака успостављене мреже референтних маркица и то са освртом на декларисане мере несигурности модела скенера.

Декларисана вредност несигурности одређивања положаја референтних маркица код скенера износи 2 mm. Да би успостављену мрежу користили као референтну (еталонску) за испитивање скенера положајна тачност тачака мреже не сме бити изнад 0.7 mm.

Табела 2 – Стандардна одступања

| σ [mm] | MIN | MAX | AVERAGE |
|---------------|-----|-----|---------|
| σ_p | 0.3 | 0.7 | 0.51 |
| σ_x | 0.1 | 0.4 | 0.24 |
| σ_y | 0.1 | 0.4 | 0.24 |
| σ_z | 0.3 | 0.4 | 0.37 |

Анализом резултата обраде, тј. анализом вредности положајне тачности координата (табела 2) као и коефицијента r_{ii} и коефицијената унутрашње и спољашње поузданости, из мреже референтних маркица је избачено девет тачака. То су тачке које су опажане само са једног стуба, као и тачке код којих је упадни угао био јако лош. Међутим, избацивање тачака није за последицу имало постојање рупа у одређеним деловима еталонске мреже.

На овако успостављеном полигону спроведено је метролошко испитивање три модела импулсних терестричко ласерских скенера. Испитани модели скенера припадају различитим генерацијама и произведени су у временском распону од 2006. године (модел *Leica HDS3000*) до 2014. године (модел *Leica p20*).

Метролошко испитивање скенера подразумева одређивање 3D координата референтних маркица у координатном систему скенера. На основу израза (1) – (8) извршена је анализа података еталонирања, тј. срачунате су вредности мерне несигурности и проширене мерне несигурности за сва три модела скенера. Остварени резултати су приказани у табелама 3 и 4.

Табела 3 – Мерна несигурност

| Модел скенера | Мерна несигурност мерења | | |
|----------------------------------|--------------------------|--------------|--------------|
| | дужине | хор. праваца | вер. праваца |
| FARO Focus3D | 2.5 mm | 1231.68 " | 59.31 " |
| Leica HDS3000 | 1.1 mm | 606.89 " | 95.43 " |
| Leica Geosystems ScanStation p20 | 1.7 mm | 284.06 " | 52.49 " |

Табела 4 – Проширена мерна несигурност

| Модел скенера | Проширена мерна несигурност ($k=2$) | | |
|----------------------------------|---------------------------------------|--------------|--------------|
| | дужине | хор. праваца | вер. праваца |
| FARO Focus3D | 5.0 mm | 2463.36 " | 118.62 " |
| Leica HDS3000 | 2.3 mm | 1213.77 " | 190.85 " |
| Leica Geosystems ScanStation p20 | 3.4 mm | 568.13 " | 104.97 " |

Следећи корак подразумева анализу свих разлика Δ_j за сваки од модела скенера у контексту испуњења услова дефинисаним изразом (9). Код сва три модела скенера су се појавиле разлике које одступају од вредности проширене мерне несигурности. Што се тиче анализе дужина, скенери *Faro* и *Leica HDS3000* имају безначајан број резултата који одскачу (1 до 2), док модел *p20* није показао присуство систематских утицаја код мерења растојања.

Када говоримо о анализи углова θ и φ , код сва три модела скенера су постигнути скоро идентични резултати у контексту конкретних резултата који одскачу. У питању су углови θ_{1-2} , θ_{1-3} и φ_{1-74} код модела *Faro* и модела *p20*, и углови θ_{1-2} , φ_{1-3} и φ_{1-74} код модела *HDS3000*.

На основу изложене анализе може се закључити да:

- је остварена положајна тачност задовољава постављене критеријуме и да се ова мрежа може користити као референтна за потребе испитивања терестричко ласерских скенера у лабораторијским условима;
- полигон за испитивање мора бити успостављен у лабораторији већих димензија како би се испитала оставрена превизност на већим растојањима на којима произвођачи и декларишу своје моделе скенера;
- велике вредности разлика код праваца настају искључиво због кратких дужина, што и јесте случај у овом експерименту;
- је потреба за стандардизованом процедуром испитивања скенера значајна с обзиром на то да се метода терестричког ласерског скенирања у све већем обиму употребљава у геодетском инжењерству;
- је потребно дефинисати методологије обраде мерених величина и критеријуме оцене квалитета постигнутих резултата;
- је потребно дефинисати стандард који би унифицирао начин декларисања карактеристика инструмената од стране произвођача.

ЗАХВАЛНИЦА

Овај рад је реализован у оквиру пројекта „Примена ГНСС И ЛИДАР технологије у

праћењу стабилности инфраструктурних објеката и терена“ (36009) који финансира Министарство за просвету и науку Републике Србије у оквиру програма Технолошког развоја за период 2011-2019. године.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пејић М. Примена технологије терестричког ласерског скенирања у геодезији, *Техника*, издање 64, бр. 2, стр. 13-18, 2010.
- [2] Мркић Р. *Геодетска метрологија*, Научна књига, Београд: Грађевински факултет Универзитета у Београду, 1991.
- [3] Пејић М, Божић Б, Аболмасов Б. Анализа метода геореференцирања података терестричког ласерског скенирања, *Техника*, издање 67, бр. 2, стр. 213-220, 2013.
- [4] Делчев С., Огризовић В., Гучевић Ј. *Прва метролошка лабораторија за еталонирање мерила угла и дужине*, Стручни рад, Београд: Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2013.
- [5] Пејић М. *Еталонирање терестричких ласерских скенера*, Радно упутство, Београд: Грађевински факултет Универзитета у Београду, Метролошка лабораторија за еталонирање мерила угла и дужине, 2017.
- [6] ISO/TC 172/SC 6, Geodetic and surveying instruments (2016). *Terrestrial laser scanners*, Committee draft, ISO-2016.

Laboratory procedure for terrestrial laser scanners calibration

Abstract – *Terrestrial Laser Scanning (TLS) is a method of rapidly collecting a large amount of data in the form of "point clouds" which represents the basis for presenting real state of the "object" in form of a three-dimensional model and performing various analyzes over it. Permanent development of technology, hardware and software in past ten years has had a lot of influence on the expansion of TLS technology such as on quality of data we receive as a result of its application. We can declare TLS method like one of the youngest technologies which is applied in geodesy, civil engineering, architecture, spatial planning etc. However, TLS disadvantages can be represented through undefined and non-standardized field procedures and methods for testing and calibration of instruments and equipment used. Also, there is still no standard that would unify the declaration instruments' characteristics procedure by the manufacturer.*

This paper gives an overview of all processes and calculations in order to establish metrological polygon for terrestrial laser scanners calibration. The paper also presents the results of analysis over data collected by examining three types of impulse terrestrial laser scanners.

Keywords: *terrestrial lasers scanning, calibration, metrology*