

Určovanie parametrov presnosti absolútneho trackera z merania v mikrosieti

Ing. Radoslav Choleva,
Stavebná fakulta STU v Bratislave

Abstrakt

Článok sa venuje novému prístupu testovania parametrov laser trackera s použitím variančných komponentov. Jedná sa o testovanie parametrov v mikrosieti, ktoré môžu vykonávať používatelia sami, bez špeciálnych pomôcok. V článku je uvedený stručný teoretický základ ohľadom testovania laser trackerov, pričom sú hlavne popísané normy, ktoré sa venujú danej problematike. Ďalej je popísaný experiment na určenie parametrov prístroja spolu so spracovaním meračných údajov. Prínosom metodiky je využitie variančných komponentov, ktoré sú interpretované ako parametre prístroja. Na záver sú popísané dosiahnuté výsledky s hodnotením celého experimentu a jeho využiteľnosti do budúcnosti.

Absolute Tracker Accuracy Parameters Determination from Micro-Network Measurement

Abstract

The article discusses a new approach to testing of laser tracker's parameters using variance components. It deals with testing parameters in a micro network, which users can perform without special equipment. Article provides a brief theoretical basis for testing of laser trackers highlighting standards that address the issue. Further, an experiment dealing with determination of the device parameters is described together with processing of measured data. The benefit of this methodology is the use of variance components, which are interpreted as device parameters. Finally, achieved results of the entire experiment are described with its usability for future.

Keywords: Testing, variance components, absolute tracker Leica AT403, micro net, accuracy

1. Úvod

Laser Tracker (LT) je súradnicový merací stroj pracujúci na princípe univerzálnych meracích staníc. Ide o meracie systémy, ktoré boli vyvinuté na presné meranie súradníc charakteristických bodov veľkých objektov [1]. LT je podľa normy [2] definovaný ako súradnicový merací systém, pri ktorom je cieľ (cieľová značka) sledovaný zväzkom laserových lúčov a jeho poloha je určená pomocou šikmej dĺžky a dvoch uhlov. Tieto dva uhly určujú horizontálny smer zámeru a výškový, resp. zenitový uhol (uhol od horizontálnej roviny, resp. zenitu) na určený bod. Jedná sa v podstate o priestorovú polárnu metódu, ktorá je dobre známa z rôznych aplikácií v geodézii. Hlavný rozdiel oproti univerzálnym meracím stanicám predstavuje presnosť určenia dĺžky týchto meracích systémov, ktorá sa pohybuje rádovo v mikrometroch. Je to z dôvodu, že na meranie dĺžok sa používa IFM (interferometer), ADM (Absolute distance meter) alebo AIMF (Absolute interferometer). Funkčné princípy uvedených spôsobov určovania dĺžky sú uvedené, napr. v [3], [4], [5].

LT môžeme považovať za relatívne nový merací systém, keďže prvý bol patentovaný v roku 1987 [6]. Za 30 rokov od svojho vzniku sa vývoj LT stále nezastavil a ďalej je smerovaný hlavne v oblasti absolútneho určovania dĺžky, modelovania zdrojov chýb prístroja a výpočtu neistôt, zlepšovania presnosti a dizajnu, testovania a štandardizácie.

Ako každý prístroj určený na meranie aj LT musí postupovať opakované testovanie a potvrdenie či spĺňa výrobcom deklarovanú presnosť. Pri každodennej manipulácii a prenášaní prístroja môžu nastať pochybnosti či nedošlo k zmene parametrov prístroja, a teda je nutné tieto parametre overiť.

2. Popis súčasného stavu

LT sa skladá z viacerých kľúčových subsystémov (komponentov): dvojosí systém na ciele (alhidáda s ďalekohľadom), uhlové snímače, dĺžkomerná jednotka (IFM, ADM, AIFM), mechanizmus na sledovanie cieľa (s riadiacou a vyhodnocovacou jednotkou), kompenzačná jednotka, cieľové značky a iné. Každý z týchto komponentov môže byť zdrojom chýb pri meraní, a preto musia byť testované či spĺňajú požadovanú presnosť. Tieto chyby vznikajú z nedokonalosti konštrukcie a vzájomného uloženia jednotlivých komponentov LT. Ako bolo spomenuté v úvode, tento článok sa zameriava iba na určenie presnosti merania smerov (uhlov) a dĺžok.

Po dlhú dobu neexistoval žiadny predpis, ktorá by zaviedol určitú normalizáciu v procese testovania. Výrobcovia pri overovaní parametrov prístroja postupovali podľa interných predpisov a postupov, ktoré nie sú bežne dostupné. Výsledkom snahy o normalizáciu bola americká norma ASME B89.4.19:2006 [8], ktorá bola niekoľko rokov jedinou normou, podľa ktorej sa bolo možné riadiť, a ktorá sa používa dodnes. Postupom času vošli do platnosti ďalšie dve normy. V roku 2011 nadobudla platnosť nemecká norma VDI/VDE 2617-10:2011 [9] a v roku 2016 medzinárodná norma STN EN ISO 10360-10:2016 [2]. V normách sú vo všeobecnosti špecifikované testy pre verifikáciu LT pomocou merania kalibrovaných testovacích dĺžok, sfér a plôch podľa špecifikácií od výrobcov. Tieto testy je možné realizovať iba s použitím určených guľových odrazových hranolov vyžadovanej presnosti. Na základe testov uvedených v normách môžu byť súčasne verifikované LT, ktoré používajú na meranie dĺžok ADM, interferometer alebo aj obe súčasne. Ďalej budú uvedené

jednotlivé spôsoby overovania presnosti LT, ktoré sú používané vo svete.

V rámci americkej normy ASME B89.4.19[8] sú uvedené tri druhy testov: dĺžkomerný, dvojpolohový a základnicový. Pri základnicovom teste je definovaných 35 rozličných kombinácií polohy kalibrovanej základnice a orientácie LT (rôzne natočenia laty a meranie z rôznych vzdialeností). Pri dvojpolohovom teste je zase definovaných 12 rozličných kombinácií pozície cieľovej značky a orientácie LT. V rámci dĺžkomerného testu je 5 kalibrovaných dĺžok meraných na koľajnici s posuvným vozíkom. Testy vychádzajú z princípu, pri ktorom sa rozdiel dĺžky kalibrovanej základnice a dĺžky základnice určenej pomocou LT porovnáva s krajinou dovolenou odchýlkou – MPE (Maximum Permissible Error). Hodnoty MPE udávajú výrobcovia pre každý model LT. Testy uvedené v ASME B89.4.19 sú citlivé na rôzne zdroje geometrických chýb LT, ale Muralikrishnan uviedol vo svojej práci [10], že niektoré z týchto postupov sú redundantné a zdokumentoval systematické chyby, ktoré neboli správne určené. Na základe toho popísal výhody používania asymetrických polôh základnice, ktoré by tieto problémy vyriešili.

V nemeckej norme VDI/VDE 2617-10 [9] sú uvedené 3 testy zamerané na určenie tvaru, rozmeru a polohy (probe size, probe form, probe location test) a priestorový test dĺžky (volumetric length test). Prvé tri testy sa vykonávajú pomocou merania 25-tich bodov vhodne rozmiestnených na guľu, ktorá má kalibrovanú veľkosť a tvar. Pri priestorovom teste dĺžky je LT umiestnený mimo priestor s rozmerom 10 m x 6 m x 3 m (odporúčaná, ale môže byť aj iný). V rámci tohto priestoru je odmeraných 96 dĺžok (definovaných normou), následne je LT presunutý do vnútra priestoru a odmeraných ďalších 9 dĺžok (celkovo 105). Ďalšou možnosťou pri tomto teste je premietnutie dĺžok na zvislú rovinu a následne ich odmerať z rôznych stanovísk LT (definované normou). V predmetnej norme je uvedená analýza výsledkov merania, pričom sa výsledné odchýlky opäť porovnávajú s MPE.

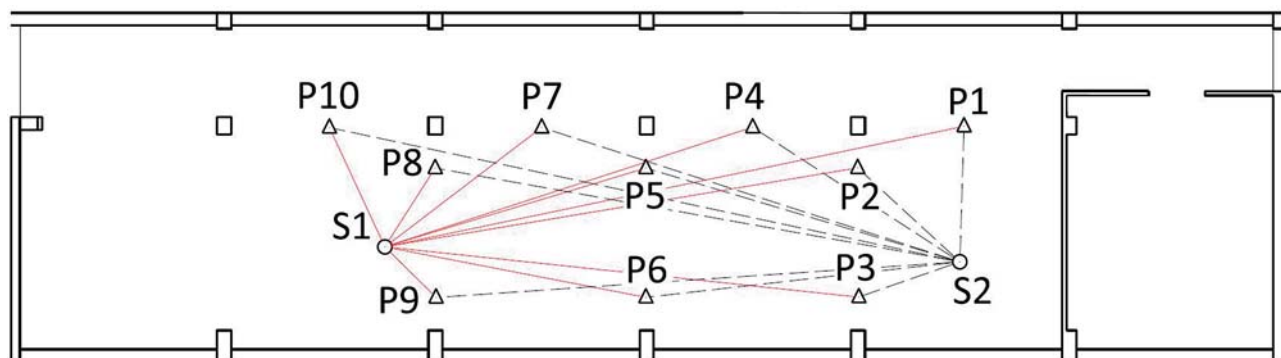
Medzinárodná norma STN EN ISO 10360-10 [2] kombinuje testy uvedené v predošlých dvoch normách a vhodne ich upravuje a dopĺňa. Testy na určenie tvaru a rozmeru pomocou kalibrovanej gule sú v podstate rovnaké ako vo vyššie uvedenej nemeckej norme. Pri ďalšom teste ide o meranie v dvoch polohách na fixované ciele (dvojpolohový test). Priestorový test dĺžky je rozdelený na dve časti – základný test a test definovaný užívateľom. Pri základnicovom teste je 41 rozličných kombinácií polohy kalibrovanej základnice a orientácie LT navrhnutých tak, aby boli citlivé na všetky známe zdroje chýb (pri LT používaných v čase uvedenia normy do platnosti). V druhej časti je

ďalších 64 kombinácií zvolených užívateľom. V norme sú navrhnuté dve sady týchto 64 kombinácií, ktoré môže užívateľ použiť alebo si môže zadať vlastné. Taktiež je v norme spomenuté, že môžu byť použité rôzne prídavné testy ako určovanie parametrov z merania v sieti bodov (network test), čo je využité aj v rámci tohto článku. Muralikrishnan vo svojej publikácii [11] uvádza silné a slabé stránky testov v nemeckej a americkej norme a detailnejšie popisuje testovacie procedúry v medzinárodnej norme (vtedy ešte len draft). Taktiež porovnáva spomenuté normy z hľadiska citlivosti testov na geometrické chyby LT, počtu testov a ďalších hľadísk.

Nová metodológia (Network base test – testovanie v mikrosieti) bola vyvinutá v NPL (Britský národný metrologický inštitút), ktorá môže byť vykonaná používateľmi LT bez špeciálneho vybavenia. Navyše táto metóda poskytuje kvantitatívne informácie o LT ako aj neistoty výsledkov. Testovanie v mikrosieti pozostáva z merania aspoň 15 bodov z piatich nezávislých stanovísk LT. Sieť bodov je blokovo vyrovnaná, kde výsledkom sú polohy bodov a stanovísk LT. Ak je použitých viacero stanovísk, potom môžu byť odhadnuté neistoty merania uhlov a dĺžok. Pri dôkladnom rozmiestnení bodov siete je možné odhadnúť okrem chýb merania dĺžok a uhlov aj ďalšie parametre (napr. parametre offsetov, excentricity uhlových snímačov, mierkový faktor dĺžky, atď [7]).

3. Testovanie laser trackeru

Navrhnutá metodika testovania spočíva v meraní veličín (vodorovných smerov, zenitových uhlov a šikmých dĺžok) v mikrosieti (miestny súradnicový systém), ktorá je realizovaná desiatimi piliermi s pevnou stabilizáciou. Mikrosieť (dvojrozmerná) sa nachádza v geodetickom laboratóriu (učebňa č. 321) Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave (obr. 1). Trojuholníky na obr. 1 znázorňujú merané body a krúžky znázorňujú stanoviská prístroja. Sieť bola meraná z voľných stanovísk, pričom konfigurácia a počet stanovísk, spolu s počtom skupín merania boli získané vypočítaním optimalizácie (A – optimalita) v programe PLS. A – optimalita slúži na minimalizáciu sumy disperzií odhadovaných parametrov pri minimálnom počte meraní. V tomto prípade je optimalizácia dôležitá kvôli tomu, aby samotné testovanie trvalo čo najkratšiu dobu pri zachovaní vyžadovanej presnosti. Optimálny plán merania zahŕňal meranie z dvoch stanovísk prístroja v dvoch skupinách na všetky body siete. Z toho vyplýva 40 meraných veličín a 16 nadbytočných meraní.



Obr. 1 Grafické zobrazenie geodetického laboratória s rozmiestnením bodov

Celý matematický model vychádza zo spracovania mera-
ných údajov pomocou metódy najmenších štvorcov apli-
káciou 2. lineárneho modelu – nepriame meranie vektor-
ového parametra. Charakteristiky prístroja (presnosť me-
rania dĺžok σ_D a presnosť merania vodorovného smeru σ_a)
sú získané spolu s odhadom parametrov mikrosiete. Kvôli
obmedzeniam geodetického laboratória (rozmiestnenie
pilierov), nebol vykonaný odhad presnosti merania verti-
kálnych uhlov. Keďže je konštrukcia vodorovného aj verti-
kálneho kruhu v podstate rovnaká, môže byť vyslovený
predpoklad, že ich presnosť, resp. chyba je rovnaká. Vý-
robcovia takisto uvádzajú iba jednu hodnotu presnosti
pre meranie smerov (uhlov) LT.

Odhad súradníc a stredných chýb súradníc bodov mi-
krosiete sa realizuje formou voľnej siete. Voľná sieť nie je
vopred fixovaná v žiadnej súradnicovej sústave (začiatok
je v ťažisku) a vychádza z podmienky, že výsledné (odhad-
nuté) parametre sú čo najbližšie k približným súradniciam.
Preto je potreba brať veľký ohľad na ich výpočet, prípadne
riešiť ich výpočet iteráčnym spôsobom.

Prínosom navrhnete metódy testovania je uváženie
variančných komponentov. Variančné komponenty sa po-
užívajú pri spracovaní heterogénnych meraní, napr. spá-
janie trojrozmerných geodetických sietí získaných rozlič-
nými kozmickými technikami, kombinácia družicových
a terestrických meraní a pod. Taktiež sa dajú využiť pri
kombinácii uhlových a dĺžkových meraní, čo je využité
v navrhutej metodike testovania LT. Na presnosť určo-
vania priestorovej polohy bodov pomocou LT má oveľa
väčší vplyv presnosť merania smerov, ktorá je výrazne hor-
šia ako presnosť merania dĺžok. Preto môže byť proble-
matické správne určiť apriórny odhad presnosti, resp.
správne určenie váh jednotlivých druhov meraní na od-
had neznámych parametrov. Avšak na základe spracova-
nia týchto heterogénnych meraní môžeme určiť aposteri-
órne charakteristiky presnosti samostatne, pre každú
skupinu meraní, pomocou odhadu variančných kompo-
nentov. Vo výsledku sa môžu variančné komponenty inter-
pretovať ako parametre prístroja (presnosť merania sme-
rov a dĺžok) odvodené z merania v mikrosieti.

Variančné komponenty sú v podstate násobné faktory,
ktoré korigujú apriórne informácie o presnosti jednotli-
vých súborov meraní. V tomto prípade predstavuje jeden
súbor meraní dĺžky a druhý súbor meraní vodorovné
smery. Po aplikácii variančných komponentov na metódu
najmenších štvorcov je cieľom dostať taký odhad nezná-
mych parametrov, ktorý bude rešpektovať rozličnú váhu
meraní (vyjadrenú variančnými komponentami).

Riešenie uvedenej situácie sa tradične uskutočňuje
v dvoch krokoch. Prvým krokom je odhad vektora varian-
čných komponentov $\hat{\theta}$ a následne vytvorenie modifikova-
nej kovariančnej matice $\Sigma_x(\hat{\theta})$. Druhým krokom je od-
had neznámych parametrov $\hat{\theta}$ s využitím modifikova-
nej kovariančnej matice $\Sigma_x(\hat{\theta})$. Vzťahy a postupy na výpo-
čet variančných komponentov uvádzajú Kubáček [12], prí-
padne Hefty [13]. Vo všeobecnosti môžeme mať m súbo-
rov nameraných údajov. Globálna kovariančná matica všet-
kých uskutočnených meraní x je vyjadrená v tvare:

$$\text{var}(x) = \text{var} \left(\begin{bmatrix} x^{(1)} \\ x^{(2)} \\ \vdots \\ x^{(m)} \end{bmatrix} \right) = \Sigma_x = \begin{bmatrix} \Sigma^{(1)} & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & \Sigma^{(2)} & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \vdots & \Sigma^{(m)} \end{bmatrix} = \quad (1)$$

$$= V^{(1)} + V^{(2)} + \dots + V^{(m)},$$

kde

$$V^{(j)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & \Sigma^{(j)} & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \vdots & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Uvedený zápis predpokladá, že jednotlivé čiastkové blo-
ky matice Σ_x , t. j. kovariančné matice $\Sigma^{(j)}$ vzťahujúce sa
k súboru meraní $x^{(j)}$, sú stanovené spoľahlivo a zodpove-
dajú reálnej presnosti j -teho súboru použitého v rámci
kombinácie ($j = 1, 2, \dots, m$). Všeobecne je možné modifikova-
vať vyjadrenie globálnej kovariančnej matice meraných
údajov v nasledujúcej podobe:

$$\text{var}(x) = \Sigma_x = V^{(0)} + \vartheta_1 V^{(1)} + \vartheta_2 V^{(2)} + \dots + \vartheta_m V^{(m)} = \quad (3)$$

$$= V^{(0)} + \sum_{j=1}^m \vartheta_j V^{(j)},$$

kde $\vartheta_j > 0$ sú variančné komponenty. Sú to násobné fakto-
ry, ktoré korigujú apriórne informácie o presnosti jednot-
livých súborov meraní. Blokované matice $V^{(0)}, V^{(j)}$ majú ro-
vnaký rozmer ako Σ_x a obsahujú ako jeden blok kovarianč-
nú maticu $\Sigma^{(j)}$.

Ak poznáme približné hodnoty vektora variančných kom-
ponentov ϑ , je možné uvedenú štruktúru kovariančnej
matice (3) získať linearizáciou kovariančnej matice $\Sigma_x(\vartheta)$:

$$\Sigma_x(\vartheta) = \Sigma_x(\vartheta_0) + \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial \Sigma_x(\vartheta)}{\partial \vartheta_j} \Big|_{\vartheta=\vartheta_0} \right) \delta \vartheta_j, \quad (4)$$

pričom

$$\Sigma_x(\vartheta_0) = V^{(0)}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Sigma_x(\vartheta)}{\partial \vartheta_j} \Big|_{\vartheta=\vartheta_0} = V^{(j)}, \quad (6)$$

$$\vartheta_0^T = (\vartheta_{0,1}, \dots, \vartheta_{0,m})^T, \quad \delta \vartheta_j = \vartheta_j - \vartheta_{j-1}. \quad (7)$$

Východisková kovariančná matica meraní x má tvar:

$$\Sigma_0 = \vartheta_{0,1} V^{(1)} + \vartheta_{0,2} V^{(2)} + \dots + \vartheta_{0,m} V^{(m)}, \quad (8)$$

potom základný vzťah na odhad variančných kompen-
tov je [12]:

$$\hat{\vartheta} = S^{-1}_{(M\Sigma_0 M)^+} (\gamma - \kappa), \quad (9)$$

kde $S^{-1}_{(M\Sigma_0 M)^+}$ je matica rozmerov $m \times m$, nazývaná aj kri-
teriálna matica, ktorej regulárnosť je nevyhnutná pre od-
had komponentov $\hat{\vartheta}$. Vektory γ a κ sú m -rozmerné vektor-
y, ktorých komponenty γ_j a κ_j ($j = 1, \dots, m$) sú vo vzťahu
k j -tej skupine nameraných údajov. Vyčíslenie matice
 $S^{-1}_{(M\Sigma_0 M)^+}$ a vektorov γ, κ spočíva v riešení nasledovných
vzťahov:

$$\gamma_j = x^T (M\Sigma_0 M)^+ V^{(j)} (M\Sigma_0 M)^+ x, \quad (10)$$

$$\kappa_j = \text{Tr} [(M\Sigma_0 M)^+ V^{(j)} (M\Sigma_0 M)^+ V^{(0)}], \quad (11)$$

kde matica M je daná výrazom:

$$M = I - A(A^T A)^{-1} A^T, \quad (12)$$

pričom:

A – matica plánu,

I – jednotková matica.

Pre Moore-Penroseovu pseudoinverziu matice $(M\Sigma_0 M)$ platí [12]:

$$(M\Sigma_0 M)^+ = \Sigma_0^{-1} - \Sigma_0^{-1} A(A^T \Sigma_0^{-1} A)^{-1} A^T \Sigma_0^{-1}. \quad (13)$$

Pre kovariančnú maticu odhadnutých variančných komponentov platí vzťah [12]:

$$\Sigma_{\hat{\beta}} = 2 \cdot S^{-1}_{(M\Sigma_0 M)^+}. \quad (14)$$

V niektorých konkrétnych situáciách sa však môžu vyskytnúť problémy v numerickom riešení, ide napríklad o záporné hodnoty odhadov variančných komponentov, čo odporuje definícii kovariančnej matice. Ďalším problémom, ktorý sa môže vyskytnúť je, že aj po viacerých iteráciách odhady nekonvergujú.

Uvedený postup spracovania bol použitý na testovanie prístroja Leica AT403. Použité prístroje a pomôcky počas experimentu zahrňovali LT Leica AT403 (v. č.: 393311) s kontrolnou jednotkou (obr. 2), statív, guľový odrazový hranol, súpravy na centrovanie odrazového hranola a počítač s programom Polyworks na riadenie LT. Tento prístroj používa na meranie dĺžok iba technológiu ADM, pomocou ktorej je možné absolútne určenie dĺžok s presnosťou rádovo v mikrometroch. Základné charakteristiky presnosti sú uvedené v tab. 1. Za hodnoty stredných chýb (angl. standard deviation) v tab. 1 sa považuje odmocnina z disperzie. Prístroj bol zapožičaný od spoločnosti *Noncontact Measuring Systems, s. r. o.* a kvôli náročnému časovému harmonogramu spoločnosti bolo možné vykonanie iba jedného merania (experimentu).



Obr. 2 Leica AT 403

Tab. 1 Charakteristiky presnosti prístroja Leica AT403

Parametre	Model prístroja AT403
Stredná chyba merania smerov udávaná výrobcom	+/- 7,5 μm + 3 $\mu\text{m}/\text{m}$
Stredná chyba merania smerov v uhlových jednotkách	1,9 ^{cc}
Stredná chyba určenia priestorových súradníc	+/- 7,5 μm + 3 $\mu\text{m}/\text{m}$
Stredná chyba merania dĺžok	5 μm

Pred meraním bolo potrebné vyriešiť problém centrácie odrazových hranolov na pilieroch. Odrazové hranoly používané pri meraní s LT sú vysoko presné guľové odrazové hranoly s magnetickým úchytom. Keďže sú tieto odrazové hranoly prispôbivé meraniam v primárnych aplikáciách, nie je možné ich jednoducho umiestniť do centračných podložiek používaných v geodézií. Preto bolo nutné vymyslieť spôsob stabilizácie odrazových hranolov na pilieroch, ktorý bude stabilný pri ich prenášaní a otáčaní počas merania. Súprava na centráciu odrazových hranolov (obr. 3) sa skladá z: centračnej podložky Zeiss, magnetického držiaku a redukcie medzi centračnou podložkou a magnetickým držiakom. Súprava je centračnou podložkou pripevnená k pilieru (pomocou skrutky). Do podložky je vložená redukcia z feromagnetického materiálu a prichytená pomocou upínacej skrutky. Následne je do redukcie vložený magnetický držiak (štandardná výbava LT), ktorý drží v redukcii pomocou magnetickej sily. Pomocou tejto súpravy je možné presúvať a otáčať odrazový hranol počas merania bez porušenia centrácie.

Experiment bol vykonaný dňa 21. 3. 2018 vo večerných hodinách, pričom meranie zodpovedalo plánu získaného optimalizáciou. Vykonanie experimentu trvalo približne dve hodiny, čo však bolo zapríčinené absenciou skúsenosti s prácou s daným typom prístroja a softvérom. Ďalší experiment by bolo možné realizovať pod jednu hodinu. Samotné meranie bolo ovládané pomocou softvéru PolyWorks v počítači. Keďže tento softvér nebol vyvíjaný pre geodetické účely, bolo nutné zdefinovať nový súradnicový systém a manuálne nastavovanie merania v dvoch polohách. Keďže LT obsahuje kompenzačnú jednotku, tak počas celého merania boli automatizované zaznamenávané hodnoty atmosférických veličín (teplota, vlhkosť, tlak). LT následne automatizovane kompenzoval merané dĺžky o vplyv týchto veličín. Výsledkom merania boli zápisníky meraných vodorovných smerov, zenitových uhlov a šikmých dĺžok z dvoch stanovísk prístroja na všetky body mikrosiete. Merané údaje boli ďalej spracované ako bolo popísané vyššie. Navyše je pri spracovaní prospešné zaradiť do súborného riešenia geodetickej úlohy aj metódy testovania odľahlých meraní. Je to z dôvodu, že ak súbor meraných veličín obsahuje odľahlé merania, tak zhoršujú kvalitu získaných odhadov. V tomto prípade bola na identifikáciu odľahlých hodnôt použitá jednoduchá metóda testovania vektora opráv [14]. Pri predpokladanom normálnom rozdelení pravdepodobnosti opráv je možné použiť obojstranné testovanie na hladine významnosti $\alpha = 5\%$. Na základe testovania bola zo súboru meraní odstránená jedna odľahlá hodnota s pravdepodobnosťou chybného rozhodnutia 5%.



Obr. 3 Centračná súprava

Tab. 2 Charakteristiky presnosti prístroja Leica AT403 získané pomocou variančných komponentov

	Odhadnutá hodnota	Stredná chyba odhadu
Stredná chyba merania dĺžok	6,7 μm	0,21 μm
Stredná chyba merania smerov	1,9 $^{\circ}$	0,62 $^{\circ}$

Tab. 3 Porovnanie charakteristík presnosti prístroja Leica AT403

	Dané výrobcom	Experiment	Rozdiel
Stredná chyba merania dĺžky	5 μm	6,7 μm	-1,7 μm
Stredná chyba merania smerov	1,9 $^{\circ}$	1,9 $^{\circ}$	0,0 $^{\circ}$

4. Výsledky experimentu

Výsledkom spracovania meraných údajov, ktoré je opísané v predchádzajúcej časti, sú stredné chyby vodorovných smerov a dĺžok spolu s vyčíslením presnosti týchto odhadov (tab. 2). V tab. 3 sa nachádza porovnanie hodnôt udávaných výrobcom a hodnôt získaných pomocou experimentu. Za ďalší výsledok je možné považovať parametre mikrosiete, v ktorej bol experiment vykonávaný. Medzi tieto výsledky patria súradnice bodov mikrosiete (Y, X) s ich kovariančnou maticou, resp. strednými chybami (σ_y, σ_x), polohovými chybami (σ_p) a parametrami stredných elíps chýb (tab. 4). Parameter a reprezentuje hlavnú polos elipsy, parameter b vedľajšiu polos elipsy a φ stočenie elipsy.

Na základe hodnôt uvedených v tab. 2 a tab. 3 je možné vidieť, že odhadnuté hodnoty parametrov prístroja sú veľmi blízke tým, ktoré udáva výrobca. Na základe hodnôt stredných chýb odhadov sa môžu samotné odhady považovať za významné, čo bolo overené pomocou štatistického testovania významnosti odhadnutých parametrov. Pri tomto teste sa posudzuje či je možné odhadnuté parametre vo všeobecnosti považovať rôzne od nuly, čo bolo v tomto prípade splnené.

Rozdiel v strednej chybe merania dĺžky (-1,7 μm) zodpovedá podmienkam počas vykonania experimentu. Vplyv

na výsledok môže mať napríklad prostredie, v ktorom bol experiment vykonávaný, kde neboli v celom priestore dodržané rovnaké atmosférické podmienky (rozličná teplota v rámci laboratória, prípadne jej nedostatočná kompenzácia). Taktiež umiestnenie laboratória na treťom nadzemnom podlaží nie je z hľadiska stability najvhodnejšie riešenie, pretože môže spôsobovať ďalšie zanášanie neistôt do výsledku. Nízke rozdiely medzi parametrami udávanými výrobcom a odhadnutými parametrami však ukazujú, že prístroj meria správne a LT je možné naďalej používať.

Ďalším výsledkom sú súradnice bodov mikrosiete a stanovísk (tab. 4), ktoré boli určené s vysokou presnosťou (do 10 μm , okrem bodu P6). Stredné chyby určenia súradníc stanovísk (S1, S2) dokonca dosahujú hodnoty pod 5 μm . Takúto vysokú presnosť je možné z veľkej časti pripísať samotnej presnosti prístroja (tab. 1).

Zlepšenie celého procesu testovania by mohol priniesť návrh na spôsob merania atmosférických veličín. Nesprávne určenie atmosférických veličín, resp. ich nedostatočné určenie (zatiaľ iba v mieste stanoviska prístroja) môže zanášať veľké neistoty do výpočtu parametrov prístroja.

Takisto je nutné preveriť použiteľnosť a opakovateľnosť spracovania pomocou variančných komponentov viacerými experimentami. Ako bolo už písané, pri niektorých kon-

Tab. 4 Súradnice s charakteristikami presnosti bodov mikrosiete

Číslo bodu	Y (m)	X (m)	σ_y (μm)	σ_x (μm)	σ_p (μm)	a (μm)	b (μm)	φ ($^\circ$)
P1	98,815732	515,020428	6,2	5,5	8,4	6,7	5,0	163,0
P2	99,996409	512,002167	6,2	5,0	8,0	6,3	4,9	187,1
P3	103,659856	512,032619	5,4	4,9	7,3	5,4	4,9	211,2
P4	98,842755	509,020191	8,1	5,3	9,7	8,1	5,3	205,3
P5	99,999856	505,984058	8,3	5,1	9,7	8,3	5,1	201,0
P6	103,665265	505,986288	10,4	4,9	11,5	10,4	4,9	202,0
P7	98,848526	503,025979	7,5	5,2	9,1	7,5	5,2	198,3
P8	99,999733	500,000123	6,0	5,3	8,1	6,4	5,0	167,0
P9	103,670381	500,025170	5,1	4,4	6,7	5,5	3,8	163,6
P10	98,852115	496,996773	6,9	5,6	8,9	7,3	5,0	230,4
S1	102,405577	498,732653	3,1	2,4	4,0	3,3	2,2	170,9
S2	102,824795	515,063152	3,9	2,8	4,8	4,2	2,4	228,6

figuráciách nemusia variančné komponenty viesť k správnejmu výsledku alebo môže byť celá úloha neriešiteľná.

5. Záver

Overovanie parametrov LT je vo všeobecnosti možné iba v špecializovaných laboratóriách a s požitím špeciálneho vybavenia. Ak si užívateľ chce overiť jeho parametre bez týchto obmedzení, môže použiť metódu overenia parametrov pomocou merania v mikrosieti. Pridanou hodnotou uvedenou v článku je použitie variančných komponentov, ktoré môžu byť interpretované ako charakteristiky prístroja. Použitá metóda dosiahla dobré výsledky pri porovnaní s údajmi udávanými výrobcem (tab. 3). Na potvrdenie správnosti takéhoto postupu je však nutné vykonať viaceré experimenty a taktiež zmeniť konfiguráciu mikrosiete. V tomto prípade bola mikrosieť obmedzená možnosťami geodetického laboratória, čo je nutné pri ďalších experimentoch vyriešiť. Tým pádom môže byť vykonaný odhad viacerých parametrov a pri priaznivejších podmienkach, čo vylepší uvedenú metodiku.

Ďalším výsledkom sú súradnice bodov mikrosiete, ktoré sú určené s vysokou presnosťou, čo by mohlo byť využité pri určitých aplikáciách a úlohách v geodézii. Ďalšie výskumy v tomto smere by mohli byť zaujímavé a priniesť ďalšie poznatky.

Podakovanie

Článok vznikol vďaka podpore Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied pre projekt VEGA-1/0506/18.

LITERATÚRA:

[1] KOPÁČIK A. et al.: Geodézia v priemysle. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave vo Vydavateľstve STU, 2016, 207 s.

- [2] STN EN ISO 10360-10:2016: Geometrical product specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) - Part 10: Laser trackers for measuring point-to-point distances.
- [3] RENISHAW: Interferometry explained. [online]. Dostupné na: <https://www.renishaw.com/en/interferometry-explained-7854>.
- [4] MURALIKRISHNAN, B. et al.: Laser trackers for large-scale dimensional metrology: A review, Precision Engineering, 44, 2015, pp. 13-28.
- [5] HARDING, K.: Handbook of Optical Dimensional Metrology. CRC Press. 480 s. ISBN 978-1-4398-5482-2.
- [6] LAU, K. C.-HOCKEN, R. J.: Three and five axis laser tracking systems. Patent č. US4714339A, 1987.
- [7] HUGHES, B. et al.: Laser tracker error determination using a network measurement. Meas Sci Technol, 22, 2011, pp. 1-23, DOI: 10.1088/0957-0233/22/4/045103.
- [8] ASME B89.4.19 - 2006: Performance Evaluation of Laser-Based Spherical Coordinate Measurement Systems.
- [9] VDI/VDE 2617 - Part 10: Accuracy of coordinate measuring machines - Characteristics and their checking - Acceptance and reverification tests of laser trackers.
- [10] MURALIKRISHNAN, B. et al.: ASME B89.4.19 Performance Evaluation Tests and Geometric Misalignments in Laser Trackers. J Res Natl Inst Stand Technol 2009, 114, pp. 21-35.
- [11] MURALIKRISHNAN, B. et al.: Choosing test positions for laser tracker evaluation and future standards development. Journal of the CMSC, 2011, 6, pp. 12-19.
- [12] KUBÁČEK, L.-KUBÁČKOVÁ, L.: Statistika a metrologie. Univerzita Palackého, Přírodovědecká fakulta, 2000.
- [13] HEFTY, J.: Globálny polohový systém v štvorrozmernej geodézii. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2004.
- [14] HAMPACHER, M.-ŠTRONER, M.: Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii. Praha: České vysoké učení technické, 2015.

Do redakcie došlo: 25. 2. 2019

Lektoroval:
prof. Ing. Martin Štroner, Ph.D.,
ČVUT v Praze