ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

OBOR GEODÉZIE, KARTOGRAFIE A GEOINFORMATIKA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Testování přesnosti měření délek na odrazné štítky přístroji Topcon GPT-7501

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Braun

Katedra speciální geodézie

Červen 2016

Martin Joska

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Joska Jméno: Martin Osobní číslo: 426282

Zadávající katedra: Katedra speciální geodézie

Studijní program: Geodézie a kartografie

Studijní obor: Geodézie, kartografie a geoinformatika

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Testování přesnosti měření délek na odrazné štítky přístroji Topcon GPT-7501

Název bakalářské práce anglicky: Testing the accuracy of distance measurement on reflective foil with Topcon GPT-7501

Pokyny pro vypracování:
Na laboratorní základně s interferometrem určete podrobný průběh chyb dálkoměru přístroje Topcon GPT-7501. Pro měření délek použijte odrazný štítek. Otestujte 6 přístrojů Topcon GPT-7501. Relativní chyby ze základny s interferometrem převeďte na absolutní chyby a porovnejte průběh chyb všech testovaných přístrojů.

Seznam doporučené literatury:
[1] Rueger, J.M.: Electronic Distance Measurement, 3. vyd. New York: Springer-Verlag, 1990. 266 s. ISBN 3-540-51523-2

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Jaroslav Braun

Datum zadání bakalářské práce: 23. 2. 2016 Termín odevzdání bakalářské práce: 20. 5. 2016

[redacted]
Podpis vedoucího práce

[redacted]
Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce" a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací".

23. 2. 2016
Datum převzetí zadání

[redacted]
Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma *Testování přesnosti měření délek na odrazné štítky přístroji Topcon GPT-7501* jsem vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jaroslava Brauna a za využití zdrojů, které uvádím v seznamu literatury.

V Praze dne …….. Podpis ……..

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu této bakalářské práce Ing. Jaroslavu Braunovi za pomoc a cenné rady, které mi v průběhu její tvorby poskytl a také za projevenou trpělivost a ochotu. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Zdeňku Vyskočilovi, Ph.D. za pomoc, rady a ochotu při měření.

Abstrakt

Bakalářská práce popisuje testování přesnosti dálkoměrů šesti přístrojů Topcon GPT–7501. K testování byla použita základna s interferometrem a pilířová základna s nucenými centracemi, obě umístěné na Fakultě stavební ČVUT v Praze. Na základně s interferometrem byly detailně určovány relativní chyby, které byly převedeny na absolutní chyby dálkoměrů pomocí měření na pilířové základně. Pro všechny přístroje byl zobrazen podrobný chybový průběh dálkoměru při měření na odraznou folii.

Klíčová slova

Topcon GPT–7501, Pulzní dálkoměr, Chybový průběh, Kalibrační základna, Pilířová základna, Relativní chyba, Absolutní chyba

Abstract

This bachelor’s thesis deals with the process of testing the accuracy of six Topcon GPT-7501’s distance meters. The testing was performed on distancemeter calibration bench with interferometer and laboratory pillar baseline with forced centration, both located at CTU, Faculty of Civil Engineering in Prague. In the thesis relative errors were determined at calibration bench with interferometer and afterwards converted to absolute errors at pillar baseline. For all instruments were determined detailed course of distance meter error for measuring at the reflective foil.

Keywords

Topcon GPT–7501, Pulse distance meter, Course of error, Distance meter calibration bench, Baseline, Relative error, Absolute error

Obsah

1. Úvod ... 7
2. Elektrooptické dálkoměry ... 8
2.1 Pulzní dálkoměr ... 8
3. Testované přístroje ... 10
4. Testovací základny ... 12
4.1 Kalibrační dráha s interferometrem ... 12
4.1.1 Interferometr ... 13
4.1.2 Vozík ... 15
4.2 Laboratorní pilířová základna ... 16
4.2.1 Určení rozměrů základny ... 17
5. Použité pomůcky ... 19
6. Postup testování ... 22
6.1 Teoretická příprava ... 22
6.1.1 Příprava měření na kalibrační dráze ... 22
6.1.2 Příprava měření na pilířové základně ... 23
6.2 Sběr dat na kalibrační základně ... 24
6.3 Sběr dat na pilířové základně ... 25
6.4 Měření na základně s interferometrem ... 25
6.5 Měření na pilířové základně ... 27
7. Zpracování měření ... 28
7.1 Zpracování a výpočet průběhu relativních chyb ... 28
7.2 Zpracování a výpočet absolutních chyb ... 32
7.3 Převod relativních chyb na absolutní chyby ... 34
8. Zhodnocení výsledků ... 37
8.1 Nalezené intervaly ... 37
8.2 Zhodnocení přístrojů ... 37
9. Závěr ... 39
10. Seznam zdrojů ... 40
11. Seznam obrázků ... 41
12. Seznam tabulek ... 42
13. Seznam grafů ... 43
14. Seznam příloh ... 44

1. Úvod

Správné určení délek je stěžejním úkolem pro většinu geodetických měření. S příchodem elektronických dálkoměrů ve třicátých a čtyřicátých letech 20. století a poté s jejich rychlým vývojem se měření vzdáleností v geodézii významně zrychlilo a zjednodušilo. V dnešní době jsou elektronické dálkoměry miniaturní a jsou běžně součástí totálních stanic. Jejich rychlost, přesnost a spolehlivost z nich dělá nejpoužívanější pomůcku pro měření vzdáleností.

Dálkoměry, stejně jako každý jiný měřicí přístroj, trpí různými vadami. Chyby dálkoměru se mohou projevovat na správnosti určené délky, neschopnosti změřit určitou délku nebo rozptylu hodnot při opakovaném měření. Chyby dálkoměrů lze určovat na pilířových základnách s nucenými centracemi, kdy porovnáním měřené délky s danou délkou jsou zjišťovány absolutní chyby. Pro určení podrobného chybového průběhu se využívají základny s interferometrem, kde porovnáváním rozdílů měřených délek dálkoměrem a interferometrem jsou určovány relativní chyby dálkoměru.

Cílem této bakalářské práce bylo otestovat 6 přístrojů Topcon GPT–7501 z jedné výrobní série, zapůjčených z Katedry speciální geodézie FSv ČVUT v Praze. Přístroje byly podrobeny podrobnému měření na základně s interferometrem a poté i na pilířové základně pro převod relativních chyb na chyby absolutní. Testováno bylo měření na odraznou fólii. Odrazná fólie byla zvolena z důvodu dřívějších problémů při měření na krátké vzdálenosti. U některých přístrojů se vyskytl problém, že přístroj neměřil délku v rámci určování sítě v průmyslové hale [1]. Toto selhání se opakovalo i později, ale konkrétní důvod nikdy nebyl zjištěn. Testovací měření by také mělo určit, v kterých délkových intervalech k tomuto jevu dochází.

Vzhledem ke skutečnosti, že přístroje jsou ze stejné výrobní série, bylo předpokládáno, že chybový průběh bude mít podobný trend u všech přístrojů. Dále bylo zkoumáno, zdali zjištěné velikosti chyb nebudou přesahovat hodnoty přesnosti deklarované výrobcem.

2. Elektrooptické dálkoměry

V geodetických totálních stanicích se používají elektrooptické dálkoměry fázové a pulzní. Fázové dálkoměry měří rozdíl fází vyslané a přijaté vlny, takzvaný fázový doměrek. Pulzní dálkoměry měří přímo tranzitní čas. V testovaných přístrojích je použit pulzní dálkoměr.

Přesnost dálkoměrů je výrobci charakterizována pomocí směrodatné odchylky:

$$\sigma_d = a\,mm + b \cdot \mathrm{ppm}, \tag{1}$$

kde člen *a* zahrnuje přesnost odečtu dálkoměru, maximální amplitudu krátkoperiodické cyklické chyby u fázových dálkoměrů, maximální efekt nelineárních na délce závislých chyb a přesnost nastavené součtové konstanty. Člen *b* je konstanta závislá na měřené vzdálenosti a zahrnuje rozsah frekvenčního driftu hlavního oscilátoru v pracovním teplotním rozsahu a maximální chybu, která může být způsobena omezením kroků výpočtu ppm [2].

2.1 Pulzní dálkoměr

Principem pulzního dálkoměru je přímé měření tranzitního času (τ), za který elektromagnetické vlnění urazí vzdálenost od svého zdroje k odrazné soupravě a zpět. Testovaný dálkoměr používá neviditelné infračervené světlo o přibližné vlnové délce (λ = 760 nm). Vzhledem k rychlosti světla (v ≈ 300 000 km/s) jsou na měření tranzitního času kladeny obrovské nároky. Pro určení délky s přesností 1 mm je potřeba změřit tranzitní čas s přesností 6,7 ns.

. Vzdálenost se vypočítá podle vzorce:

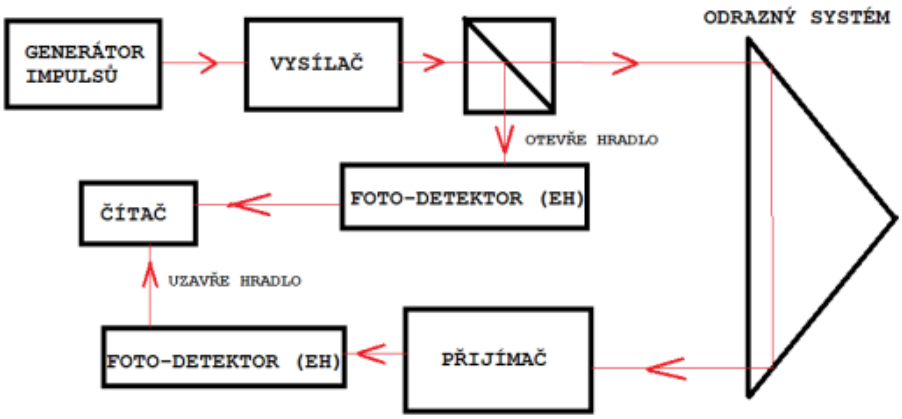
$$d = \frac{\tau * v}{2}, \tag{2}$$

kde: d = měřená vzdálenost,

τ = měřený tranzitní čas,

v = rychlost světla v daném prostředí.

Zdrojem světelného signálu je u Topcon GPT–7501 infračervená dioda. Při průchodu vysílací soustavou se část signálu oddělí a otevře elektronické hradlo. Po dobu, kdy je hradlo otevřené, počítá čítač generované impulzy. Hradlo se uzavře, jakmile do přijímače dorazí odražený ozvěnový signál. Uzavřením hradla se ukončí počítání impulzů. Ze znalosti časové prodlevy mezi generovanými impulzy je určen tranzitní čas a poté měřená vzdálenost. [2] Schéma na: (Obr. 1)



Obr. 1: Schéma pulzního dálkoměru [3]

3. Testované přístroje

Testované přístroje Topcon GPT–7501 byly zapůjčeny z Katedry speciální geodézie FSv ČVUT v Praze. Všech šest testovaných přístrojů s výrobními čísly: 7W1313, 7W1314, 7W1315, 7W1316, 7W1317 a 7W1318 pochází ze stejné výrobní série. Jedná se o bezhranolovou vteřinovou totální stanici s pulzním dálkoměrem. Výrobce se pyšní bezhranolovým měřením délek až na vzdálenost 2000m (s přesností σ_d= 5mm [4]). V hranolovém módu, ve kterém probíhalo testování, má přístroj dosah 3000m [4] na jediný hranol a přesnost σ_d= 2mm + 2ppm [5]. Přesnost čtení vodorovného úhlu je σ_φ= 0,3mgon [6] Totální stanice na: (Obr. 2).

Totální stanice je vybavena operačním systémem Windows CE. Nabízí dva programy pro měření. *TopSurf*, který je sofistikovanější, umožňuje řešení geodetických úloh a export uložených měřených dat. A *StandartMeas*, který je jednodušší a slouží pouze k měření vodorovných směrů, zenitových úhlů a délek. Neumožňuje ukládání měřených dat, ale byl použit při testování (kap. 6. Postup testování).

Obr. 2: Totální stanice Topcon GPT 7501

Přístroj lze ovládat pomocí dotykového displeje a klávesnice. Dále je vybaven klasickými ustanovkami (hrubou a jemnou), přičemž jemná ustanovka není nekonečná. Dalekohled zvětšuje 30x a minimální zaostřovací vzdálenost je 1,3 metru.

Maximum je v nekonečnu. Pro snadnější vytyčování také přístroj disponuje dvojicí vytyčovacích světel. Uložená data je možno stahovat přímo na flash disk, nebo je možné přístroj pomocí sériového portu propojit s počítačem.

Přístroje se používají v běžných aplikacích inženýrské geodézie – měření na stavbách, vytyčování, zaměřování podkladů pro projekt, měření posunů a přetvoření.

4. Testovací základny

Pro testy dálkoměrů přístrojů byly použity dvě délkové základny, které se nachází v laboratoři B028 v suterénu budovy B Fakulty stavební ČVUT v Praze. Jedná se o kalibrační dráhu s interferometrem a laboratorní pilířovou základnu.

4.1 Kalibrační dráha s interferometrem

K určení relativních chyb dálkoměru byla použita dráha dlouhá 24m vybavená samohybným vozíkem (Obr. 3) a interferometrem Renishaw ML10. Dráha je umístěná na ocelové konstrukci a v kroku 0,5 m je podepírána podpěrami, které slouží k výškovému a směrovému seřízení dráhy. Pojezdová plocha je vybavena vodícími pásky, pomocí kterých je napájen vozík s hranoly.

Postup testování na dráze spočíval v porovnání měření délek totální stanicí a interferometrem. Měření z interferometru bylo bráno jako správné a bezchybné vzhledem k měření z totální stanice. Přesnost, kterou disponuje interferometr, je na měřeném rozsahu minimálně o jeden řád vyšší.

Výpočet relativní chyby:

$$\varepsilon_i^R = (d_i^I - d_1^I) - \left(d_i^{TS} - d_1^{TS}\right), \tag{3}$$

kde: ε_i^R = relativní chyba dálkoměru pro určitou délku,

d_i^I = délka měřená interferometrem,

d_1^I = referenční délka pro interferometr,

d_i^{TS}= vodorovná délka z totální stanice,

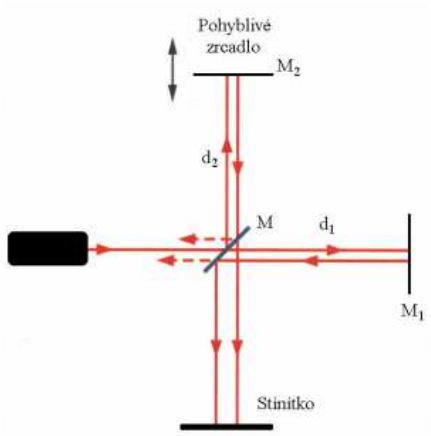
d_1^{TS}= referenční vodorovná délka pro totální stanici.

Referenční délka pro totální stanici byla vždy nejkratší vzdálenost, kterou daná totální stanice dokázala změřit. (kap. 6.).

Obr. 3: Testovací dráha s interferometrem (pohled od interferometru)

4.1.1 Interferometr

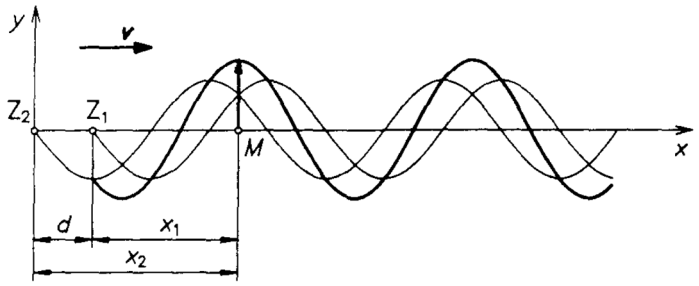
Laserové interferometry jsou zařízení určená mimo jiné pro měření délek s extrémní přesností. Až 10^{-20} m [11] (Experiment aLIGO v USA). Neměří absolutní délky, nýbrž souvislou změnu polohy odrazné soupravy. Princip interferometru (Obr. 4).



Obr. 4: Schéma interferometru

Laserový svazek je vyslán k polopropustnému zrcadlu M, které ho rozdělí na dva navzájem kolmé svazky, které pokračují k odražečům M_1 a M_2. Odražené svazky se opět setkají na M. Jelikož každý z paprsků urazil jinou vzdálenost (d_1, d_2), nachází se v jiné fázi. Jejich spojením vznikne interferenční obrazec (Obr. 5), který je měřen detektorem (CCD čip). Intenzita zachyceného interferenčního obrazce je přepočítávána na vzdálenost, o kterou se liší vzdálenosti d_1 a d_2 (x_1 a x_2), které laserové svazky urazily. Interferenční maxima vznikají, je-li fázový rozdíl d roven sudému násobku vlnové délky λ ($d=k\lambda$). Minima vznikají při lichém násobku

(d=(2k+1)·λ/2) [7]. Vzhledem k tomu, že se tímto způsobem měří pouze rozdíly vzdáleností, není možné změřit absolutní vzdálenost. Pokud není dodržena kontinuita měření (dojde k přerušení paprsku), dojde i k přerušení samotného měření.



Obr. 5: Interference posunutých vln [8]

Pro dosažení co největší přesnosti je při práci s interferometrem potřeba znát přesnou vlnovou délku světla, která se mění s vlastnostmi prostředí – fyzikální redukce délky. Měří se tedy teplota, tlak a relativní vzdušná vlhkost. V nejlepším případě by mělo být zajištěno, aby stejné podmínky platily po celé délce měření.

Použitý interferometr Renishaw ML10 má laser o vlnové délce λ = 638,8 nm (Obr. 6). Jedná se tedy o červený laser. Přesnost měření je podle výrobce σ_d= ± 0,5 ppm [9]. Během testování bylo měřeno s nižší přesností, protože podmínky po délce paprsku nebyly stejné (průvan). Stav prostředí byl měřen pouze jednou před každým měřením. Zvýšení teploty o 0,26°C, či snížení tlaku o 0,93 mbar zhorší přesnost měření o 0,25 ppm [9]. Podle kvalifikovaného odhadu Ing. Zdeňka Vyskočila, Ph.D. byla přesnost měření přibližně ± 10 ppm (na 10 m chyba 0,1 mm).

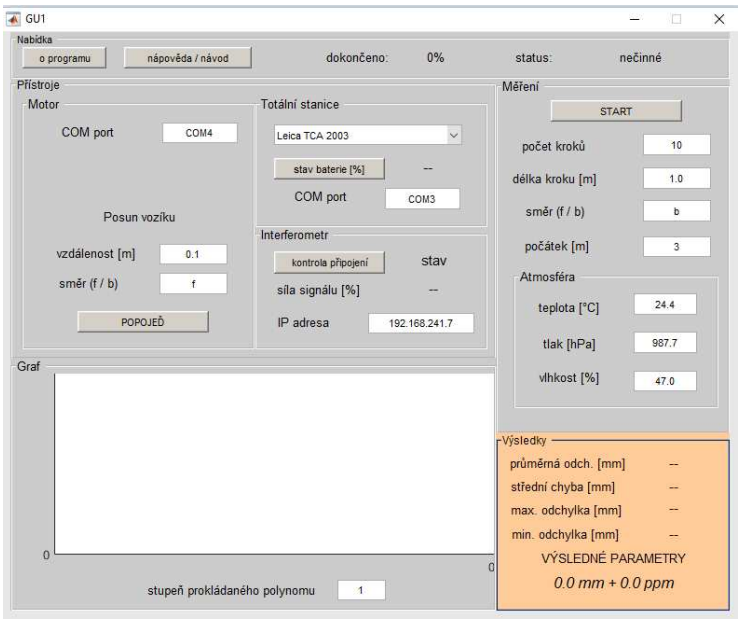
Obr. 6: Interferometr Renishaw ML10

4.1.2 Vozík

Vozík (Obr. 7) je vyroben z masivní ocelové desky. Po dráze se pohybuje na kolejnici pomocí krokového motorku. V předu je umístěn koutový odražeč pro interferometr. Uprostřed vozíku jsou nainstalovány strojírenské sáňky, na které byl v průběhu testování připevněn nástavec s odraznou fólií. Krokový motorek je ovládán řídící jednotkou, který přijímá povely přes bluetooth sériový port. Elektřina je do vozíku přiváděna pomocí dvou měděných pásků natažených na kolejnici. Z pásků je elektřina vedena do regulátoru, kde je sníženo napětí, které může být v rozmezí 4,5 V – 24 V, aby nedošlo ke spálení elektroniky.

Obr. 7: Pohyblivý vozík (pohled shora)

Vozíkem se dá manipulovat buď manuálně, nebo přes počítač pomocí programu, který vyvinul Bc. Vojtěch Pětník v rámci své bakalářské práce [10] (Obr. 8). Program umožňuje precizní posuny vozíku s přesností na milimetry.



Obr. 8: Program na ovládání vozíku [10]

4.2 Laboratorní pilířová základna

Pilířová základna byla použita pro zjištění absolutních chyb. Nachází se ve stejné laboratoři jako dráha s interferometrem. Je tvořena šestnácti betonovými pilíři (Obr. 9). Pilíře jsou vysoké 0,9 m a velikost hlav je 0,35 m x 0,35 m. Celková délka základny je 38,6 m. Od roku 2013 jsou na pilířích umístěny centrační desky (Obr. 10). Desky byly osazeny v přímce s maximální příčnou odchylkou 2 mm. Maximální převýšení mezi jednotlivými pilíři je 5 cm.

Výpočet absolutní chyby:

$$\varepsilon_i^A = D_i - \left(s_i * \cos(z_i) + K_f\right), \tag{4}$$

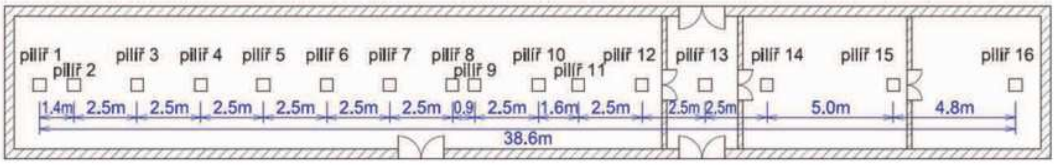
kde: ε_i^A = absolutní chyba dálkoměru,

D_i = skutečná vzdálenost mezi pilíři,

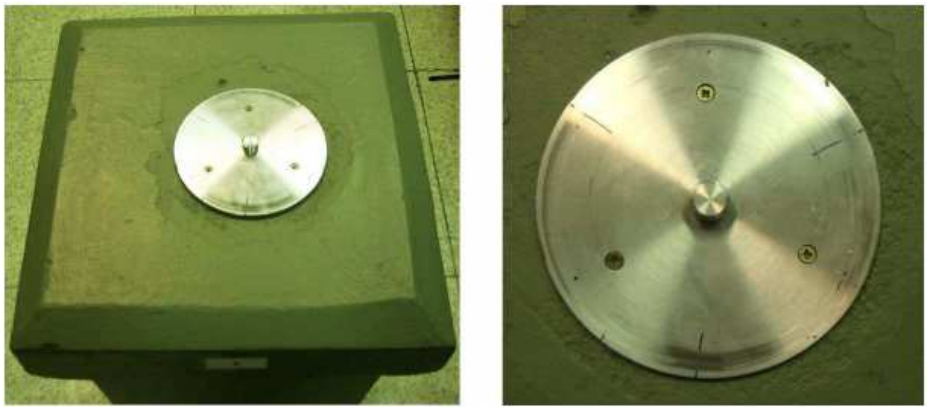
s_i = šikmá délka měřená totální stanicí,

z_i = zenitový úhel měřený totální stanicí,

K_f = konstanta fólie (kap. 6. Postup měření).



Obr. 9: Schéma pilířové základny



Obr. 10: Centrační deska na pilíři

4.2.1 Určení rozměrů základny

Pro účely testování dálkoměrů na základně bylo nutno určit délky mezi pilíři s lepší přesností než 0,05mm. K měření byl použit přístroj Leica Absolute Tracker AT401. Jedná se o velmi přesný přístroj s přesností měření: σ_{φ}= 0,15 mgon a σ_{d}= 5 µm [12]. Po dobu měření byl přístroj zapůjčen z VÚGTK společně s odrazným hranolem Leica RRR 1,5‘‘ (Obr. 11).

Obr. 11: Leica Absolute Tracker AT401 a hranol Leica RRR 1,5''

Ze čtyř stanovisek (pilíře č. 1, č. 10 a č. 16 + excentrické stanovisko) byly zaměřeny souřadnice pilířů. Po vyrovnání byly ze souřadnic určeny vzdálenosti mezi pilíři se směrodatnou odchylkou 0,02 mm. Pro zachování přesných délek je nutné používat stále stejné pomůcky (trojnožky, trn a odrazný hranol), aby nedocházelo k chybám z excentricity. Zatím poslední určení délek proběhlo v červnu 2015. Jeho výsledky (Tab. 1) jsou převzaty do této bakalářské práce. Základna byla vybudována a určena v rámci disertační práce Ing. Brauna [13].

Tabulka 1: Délky mezi pilíři a jejich směrodatné odchylky

Délka	Délka [m]	Směrodatná odchylka [mm]
5001-2	1,364241	0,012
5001-3	3,861424	0,012
5001-4	6,377915	0,012
5001-5	8,864986	0,012
5001-6	11,375446	0,012
5001-7	13,865328	0,012
5001-8	16,354818	0,012
5001-9	17,224140	0,012
5001-10	19,761701	0,015
5001-11	21,329632	0,012
5001-12	23,852736	0,012
5001-13	26,359642	0,012
5001-14	28,804889	0,012
5001-15	33,805376	0,012
5001-16	38,629970	0,015

5. Použité pomůcky

Kromě testovaných totálních stanic a interferometru byly použity další pomůcky:

Terč s odraznou fólií Leica

Tato práce se zabývá přesností měření délek na odrazné štítky (Obr. 12). Proto také byly všechny délky měřeny na tento terč. Terč, potažmo použitá fólie, má neznámou součtovou konstantu (pro běžná měření uvažována 0 mm), která musela být v průběhu testování určena pro zavedení absolutních chyb dálkoměru. Fólie má rozměry 60 mm x 60 mm a je umístěna v držáku Leica. Okolo fólie je nalepeno stínítko, aby bylo zajištěno měření pouze na fólii a ne na lesklou plochu držáku.

Obr. 12: Odrazná fólie Leica

Magnetická zarážka

Zarážka na magnetu byla umístěna na začátek dráhy (Obr. 13). Sloužila jako referenční bod pro počátek měření. Pokud došlo k přerušení měření interferometrem, nemuselo se celé měření opakovat. Vozíkem se dojelo k zarážce a interferometru se přiřadil staronový počátek s dostatečnou přesností (v řádu desetin milimetru).

Obr. 13: Zarážka na magnetu

Hranol Leica GMP 101 a trn Leica GZR3

Pro měření na pilířové základně bylo při měření na hranol vždy využito této soupravy (Obr. 14). Tyto pomůcky byly speciálně testovány a určeny pouze pro používání na této základně. Při tom byla zjištěna součtová konstanta hranolu - 16,4299mm. Testování bylo provedeno v rámci disertační práce [13], jejíž výsledky pro účely bakalářské práce přebírám. Trn Leica je vybaven trubicovou libelou, podle které se souprava urovnávala.

Obr. 14: Hranol Leica GMP 101 a trn Leica GZR3

Trojnožka Leica

Pro všechna měření byly použity trojnožky Leica (Obr. 15). Při měření na pilířové základně to byly dvě trojnožky speciálně vybrané pro tato měření. Používáním stejných trojnožek pro měření všemi šesti přístroji se docílilo, že měření nebylo ovlivněno excentrickou chybou trojnožek.

Obr. 15: Trojnožka Leica

Teploměr-barometr-vlhkoměr

K měření stavu atmosféry byl použit digitální přístroj pro měření atmosférického tlaku, teploty a relativní vlhkosti značky Comet. Rozsah pro měření teploty je -10°C až 50°C s přesností 0,5°C. Rozsah pro měření atmosférického tlaku je 600 hPa až 1100 hPa při teplotě 23°C s přesností 1,3 hPa + 0,06% z vstupního rozsahu. Přesnost určení relativní vlhkosti je 2,5% při teplotě 23°C [14].

Obr. 16: Digitální teploměr-barometr-vlhkoměr Comet

6. Postup testování

Cílem této práce bylo zjistit chybový průběh při měření krátkých délek, v rozsahu 2 m až 24 m na odrazné štítky, u přístrojů Topcon GPT–7501. Testování bylo rozděleno do dvou fází. První bylo zjištění relativních chyb dálkoměru neboli trendu chyb v závislosti na měřené délce. V druhé fázi byl zjištěný chybový průběh posunut do absolutních hodnot pomocí určení absolutních chyb dálkoměru na pilířové základně.

6.1 Teoretická příprava

Před samotným měřením bylo nutno vzhledem k požadavkům na přesnost výsledků určit parametry měření. Kolikrát se budou měřit délky s ohledem na jejich přesnost, v jakém intervalu a jaké pomůcky budou potřeba.

6.1.1 Příprava měření na kalibrační dráze

Vzhledem k předpokladu, že dálkoměry nebudou na určitém intervalu měřit, byl zvolen krok pro testování na dráze s interferometrem 0,2 m. Tím vznikne dostatečně hustý soubor měření, který umožní tyto intervaly podchytit, a zároveň celkový počet měření pro jedenu totální stanici (110 – 120) bude proveditelný v rozumném časovém úseku (cca 3h – 4h). Rychlost celého měření měla také vliv na přesnost interferometru, neboť s postupem času se aktuální stav (teplota, tlak, vlhkost) mohl stále více odchylovat od hodnot zadaných na začátku měření a zároveň se interferometrem měřilo na větší vzdálenost, kde přesnost měření logicky mírně klesá (rozptyl laserového paprsku). Při příliš dlouhém měření by tyto faktory mohly ovlivnit přesnost výsledků.

Počet opakování byl odvozen ze zákona hromadění směrodatných odchylek na základě předchozího měření s přístroji a požadované přesnosti. Při předchozích měřeních bylo zjištěno, že maximální směrodatná odchylka jednoho měření je 0,4 mm. Požadavek byl, aby se délky měřily se směrodatnou odchylkou 0,1 mm.

Určení počtu měření:

$$n = \frac{{\sigma_{d_{skut}}}^2}{{\sigma_{d_{pož}}}^2}, \tag{5}$$

$$n = \frac{0{,}16}{0{,}01} = 16,$$

kde: σ_{d_skut} = směrodatná odchylka jednou měřené délky (0,4 mm),

$\sigma_{d_pož}$ = požadovaná směrodatná odchylka (0,1 mm),

n = počet opakování.

Každá délka tedy byla měřena šestnáctkrát. Vodorovná délka se počítala z průměrné šikmé délky a průměrného zenitového úhlu.

6.1.2 Příprava měření na pilířové základně

Z měření v první fázi nebyly známy absolutní hodnoty chyb testovaných dálkoměrů, protože počáteční vzdálenost byla měřena právě testovaným dálkoměrem, čímž se do měření vnese chyba, kterou nelze zjistit. Za účelem určení absolutních chyb bylo provedeno měření na pilířové základně. Pro měření bylo vybráno 5 pilířů, na které se měřilo z 1. pilíře. Pilíře (č.3, č.4, č.7, č.8, č.11 Obr. 9) byly zvoleny tak, aby pokryly celý rozsah měřených délek na kalibrační dráze.

Měřily se opět šikmé délky a zenitové úhly, ale v obou polohách dalekohledu. Měření v obou polohách eliminuje excentrickou chybu přístroje ve směru měřené délky. V každé poloze bylo měřeno s opakováními, během kterých nebylo přecilováno. Počet opakování byl zvolen na základě úvahy o hodnotě směrodatné odchylky výběrové směrodatné odchylky měřené délky σ_d [15]. Výchozí vztah:

$$\sigma_d = \frac{\sigma}{\sqrt{2(n-1)}}, \tag{6}$$

kde: σ = směrodatná odchylka jednoho měření udaná výrobcem,

σ_d = směrodatná odchylka měření v jedné poloze.

Na základě předem dané podmínky, že směrodatná odchylka délky měřené v jedné poloze σ_d smí nabývat maximálně 10% hodnoty směrodatné odchylky σ, byl určen počet měření:

$$0{,}1\sigma = \frac{\sigma}{\sqrt{2(n-1)}}, \tag{7}$$

$$n = \frac{10^2}{2} + 1 = 51.$$

V každé poloze dalekohledu bylo tedy provedeno 51 měření a celkově bylo získáno 102 měření pro každou určovanou délku.

Délky se měřily na hranol Leica GMP 101 s přesně určenou součtovou konstantou (-16,4299 mm) [13] a na odrazný štítek. Součtová konstanta odrazného štítku byla spočítána a zavedena do výpočtu absolutních chyb.

Výpočet součtové konstanty:

$$K_{Fi} = d_i^H + K_H - d_i^F, \tag{8}$$

$$K_F = \frac{\sum(K_{Fi})}{n}, \tag{9}$$

kde: K_{Fi}= dílčí konstanta fólie z jednoho měření,

K_F = určovaná součtová konstanta fólie,

d_i^H = délka měřená na hranol,

d_i^F = délka měřená na fólii,

K_H = konstanta použitého hranolu,

n = počet měření.

6.2 Sběr dat na kalibrační základně

Protože se každá délka měřila šestnáctkrát, musel být použit měřičský program StandartMeas, který umožňuje opakovaná měření. V tomto programu ale přístroj neumí ukládat měřené hodnoty. Aby se nemusela při každé délce ručně přepisovat z displeje, byl přístroj propojen s počítačem a pomocí programu PuTTY byla získávána surová data (Obr. 17). Pro správné zobrazení dat bylo potřeba nastavit komunikační port v přístroji a na počítači na stejné hodnoty. Používané nastavení:

Rychlost přenosu: 9600 b/s

Datové bity: 8

Parita: non (žádná)

Počet stop bitů: 1

```
(+000018340m10000800+27311660g+000018340t60+0183-350**078(+000
78(+000017346m10000800+27311660g+000017346t60+0183-350**078(+0
*072(+000015350m10000790+27311660g+000015350t60+0183-350**072(-
0**075(+000016330m10000790+27311650g+000016330t60+0183-350**07
350**073(+000020330m10000780+27311660g+000020330t60+0183-350**
3-350**069(+000024320m10000760+27311640g+000024320t60+0183-350
183-350**069(+000026320m10000770+27311650g+000026320t60+0183-3
+0183-350**069(+000030314m10000760+27311640g+000030314t60+0183
60+0183-350**068(+000034308m10000770+27311640g+000034308t60+01
4t60+0183-350**071(+000038304m10000740+27311640g+000038304t60+
286t60+0183-350**069(+000042270m10000770+27311630g+000042270t6
44266t60+0183-350**070(+000044266m10000750+27311640g+00004426
0048238t60+0183-350**071(+000048238m10000740+27311640g+00004
000052220t60+0183-350**071(+000052220m10000740+27311640g+00005
g+000056196t60+0183-350**064(+000056196m10000740+27311630g+000
```

Obr. 17: Ukázka surových dat z testovaného přístroje

Data z interferometru byla vizualizována pomocí programu na ovládání interferometru od firmy Renishaw. Do programu byla před každým měřením zadána teplota, tlak a vlhkost, čímž došlo k přepočítání aktuální vlnové délky laseru. Program sice umožňuje ukládání a export měřených dat, ale vzhledem ke komplikovanosti bylo raději zvoleno prosté přepisování hodnot do tabulky.

6.3 Sběr dat na pilířové základně

Při měření na pilířové základně byl sběr dat omezen na pouhé opisování měřených hodnot z displeje. Měření bylo o hodně méně než při měření na kalibrační dráze.

6.4 Měření na základně s interferometrem

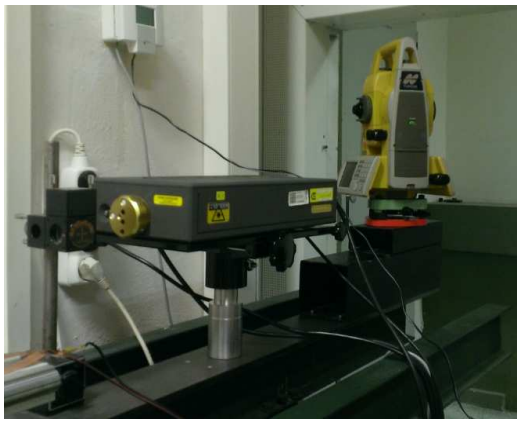
Trojnožka s testovaným přístrojem byla upevněna za interferometrem k ocelové konstrukci dráhy Obr. 18. Před měřením byl přístroj urovnán, byla zadána teplota a tlak a nastavena součtová konstanta 0mm. Interferometr se po zapnutí musel nechat přibližně 20 minut zahřát. Poté se vozíkem dojelo na konec dráhy a testovaným přístrojem se zacílilo na střed terče. Zacílení bylo po celou dobu měření neměnné. Pomocí ustanovek se interferometr nastavil tak, aby laser mířil na střed hranolu a přijímaný ozvěnový signál byl co nejvyšší. Síla signálu se pak zkontrolovala po celé délce dráhy přejetím vozíku dopředu. Cílem seřízení byla minimalizace rizika

přerušení paprsku v průběhu měření. Vozík se přisunul k zarážce a interferometru bylo přiřazeno nulové čtení.

Při měření se vozík posunoval po 0,2 m. Každá poloha byla změřena testovaným přístrojem a interferometrem. V případě, že by délka nebyla přístrojem změřena, metodou půlení intervalu by se našla nejbližší kratší a delší vzdálenost, kterou by změřil. Tím by byl zdokumentován interval, ve kterém přístroj nedokáže měřit na odrazný štítek. Od vzdálenosti přibližně 20,5 m (od interferometru) musel být vozík posouván ručně, protože na kolejnici chyběly měděné pásky. Vozík byl bez energie. Příklad měřených dat Tab. 2

Kvůli nerovnostem dráhy se několikrát stalo, že sebou vozík cuknul a tím došlo k přerušení měření interferometru. V takovém případě se měření zrestartovalo pomocí magnetické zarážky umístěné na začátku dráhy. Vozíkem se přijelo k zarážce a bylo obnoveno nulové čtení interferometru. Tím byla zajištěna dostatečně přesná návaznost měření.

Navzdory předpokladu, že totální stanice nebudou schopné změřit délky v určitých intervalech, nebyl tento jev pozorován a všechny testované přístroje měřily délky v celém testovaném rozsahu.



Obr. 18: Umístění přístroje během testování

Tabulka 2: Příklad měřených dat přístrojem č.6

Čtení interferometru	Čtení TS		
[m]	s [m]	z [g]	d [m]
0,1998918	1,4712	100,0222	1,4712
0,600922	1,8712	100,022	1,8712
0,801346	2,0716	100,0221	2,0716
1,00119	2,2714	100,0222	2,2714
1,201053	2,4712	100,0221	2,4712
1,401538	2,6716	100,0221	2,6716
1,601993	2,8722	100,0221	2,8722
1,80321	3,0734	100,0222	3,0734
2,004366	3,275	100,022	3,2750
2,204586	3,4752	100,022	3,4752
2,404675	3,6754	100,0219	3,6754

6.5 Měření na pilířové základně

Na pilířové základně se měřilo z prvního pilíře na 5 pilířů zvolených tak, aby měřené délky reprezentovaly soubor délek měřených na kalibrační dráze. Rozborem přesnosti bylo určeno, že se každá délka bude měřit 51krát v každé poloze. Hodnoty měřené v programu StandardMeas se rovnou přepisovaly do tabulky.

Pro měření se použily stejné trojnožky a stejný trn jako při určování rozměrů základny. Proto je měření prosto chyb z centrace. Pro přesné dotahování byly trojnožky šroubovány tak, aby rysky na centračních deskách koincidovaly s ryskami vyznačenými na trojnožkách. Tím se docílí, že trojnožka je vždy stejně dotažena a chyba v centraci je vždy stejná. Horizontace se prováděla pouze pomocí dvou stavěcích šroubů, díky čemuž budou cíle pro různá měření vždy ve stejné výšce. Trojnožka s trnem se horizontovala ve čtyřech navzájem kolmých polohách, trojnožka s přístrojem podle elektronické libely.

Přístroji (1, 2 a 3) bylo na všech pěti pilířích měřeno na hranol i na fólii. Přístroji (4, 5 a 6) bylo měřeno na hranol jen na nejdelší vzdálenost na pilíř č. 11 a zbytek měření byl realizován pouze na fólii. Bylo získáno 19 dvojic měření na hranol a fólii, ze kterých se později porovnáním určila součtová konstanta fólie. Nebylo tedy potřeba měřit na hranol na všech pilířích.

7. Zpracování měření

Naměřená data byla zpracovávána v tabulkovém editoru MS Excel 2015. Zpracování surových dat a výpočet robustního průměru byly prováděny ve výpočetním programu MATLAB 2015a.

V průběhu celého testování se měřily šikmé délky, které bylo před zpracováním nutno převézt na vodorovné:

$$d = s * \sin(z), \tag{10}$$

kde: s = šikmá délka,

z = zenitový úhel,

d = vodorovná délka.

7.1 Zpracování a výpočet průběhu relativních chyb

Pro určení relativních chyb bylo nejprve nutno zpracovat soubor surových dat (Obr. 17). K tomuto účelu byl použit jednoduchý skript v programu MATLAB, který z textu vybral pouze požadované informace (šikmé délky a zenitové úhly). Šikmé délky byly převedeny na vodorovné (Tab. 3).

Podle vzorce (3, kap. 4.1) byly vypočteny relativní chyby pro každý dálkoměr (Tab. 3) (Příloha 1).

Tabulka 3: Ukázka zpracování měřených dat pro vynesení do grafu

Čtení interferometru	Čtení TS			Rozdíl interferometr	Rozdíl TS	TS - interferometr	Vynášená délka
[m]	s [m]	z [g]	d [m]	[mm]	[mm]	[mm]	[m]
0,199891	1,4712	100,0222	1,4712	0	0,0000	0,0000	1,4712
0,600922	1,8712	100,0220	1,8712	401,0302	400,0000	1,0302	1,8722
0,801346	2,0716	100,0221	2,0716	601,4542	600,4000	1,0542	2,0727
1,001190	2,2714	100,0222	2,2714	801,2982	800,2000	1,0982	2,2725
1,201053	2,4712	100,0221	2,4712	1001,1612	999,9999	1,1613	2,4724
1,401538	2,6716	100,0221	2,6716	1201,6462	1200,3999	1,2463	2,6728
1,601993	2,8722	100,0221	2,8722	1402,1012	1400,9999	1,1013	2,8733
1,803210	3,0734	100,0222	3,0734	1603,3182	1602,1999	1,1183	3,0745
2,004366	3,2750	100,0220	3,2750	1804,4742	1803,7999	0,6743	3,2757
2,204586	3,4752	100,0220	3,4752	2004,6942	2003,9999	0,6943	3,4759

V Tab. 3 první sloupec obsahuje měření interferometru. Ve sloupcích 2, 3 a 4 jsou data z měření totální stanicí (šikmá délka, zenitový úhel a spočítaná vodorovná délka). Sloupce 5 a 6 obsahují relativní vzdálenosti vztažené k referenční (první měřené) délce. Sedmý sloupec zobrazuje relativní chyby pro jednotlivé vzdálenosti spočítané podle vzorce (3). V posledním sloupci je vynášená délka (do grafu), respektive délka, ke které se daná chyba vztahuje. Byla počítána:

$$d_i^v = d_1^{TS} + r_i^I, \tag{11}$$

kde: d_i^v = vynášená délka,

d_1^{TS}= referenční délka z totální stanice,

r_i^I = relativní vzdálenost z interferometru.

Tento postup byl zvolen z toho důvodu, že délka měřená testovaným přístrojem je zatížená neznámou chybou a nelze ji tudíž použít jako skutečnou délku, ke které se daná chyba vztahuje.

Po vykreslení grafu se některé hodnoty jevily hrubě odlišné od ostatních. Pokud hodnota vybočovala z celkového průběhu grafu, byla považována za hrubou chybu a byla vyřazena z výpočtu. Tyto chybné hodnoty se od ostatních hodnot lišily o několik milimetrů, výjimečně až téměř o centimetr. Chyby byly způsobeny opsáním nesprávné hodnoty z interferometru. Ze všech měření bylo dohromady vyřazeno 6 hodnot.

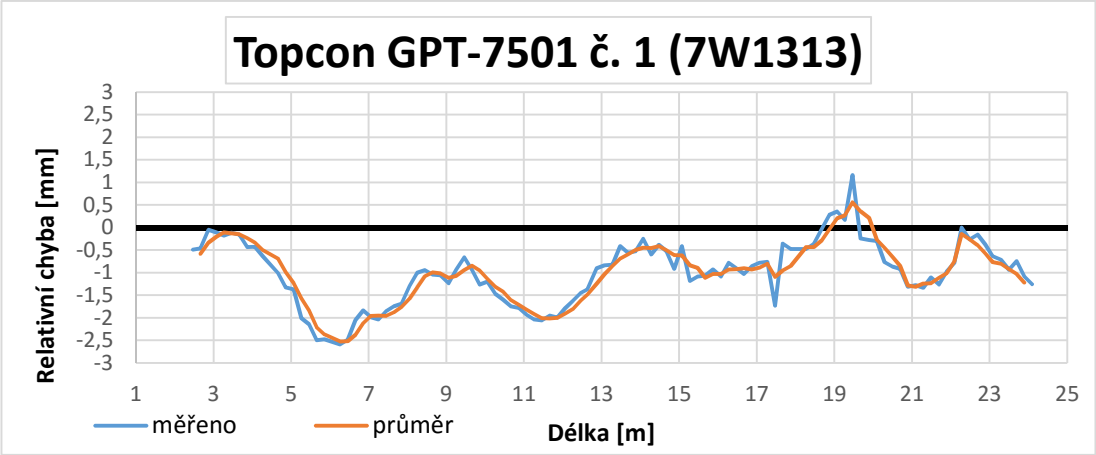
Pro plynulejší a hladší průběh trendu byl určen klouzavý průměr pro každé tři sousední hodnoty. Tím také došlo ke zmenšení souboru měření o 2 hodnoty.

$$H_i = \frac{h_{i-1} + h_i + h_{i+1}}{3}, \tag{12}$$

kde: H_i = zprůměrovaná hodnota,

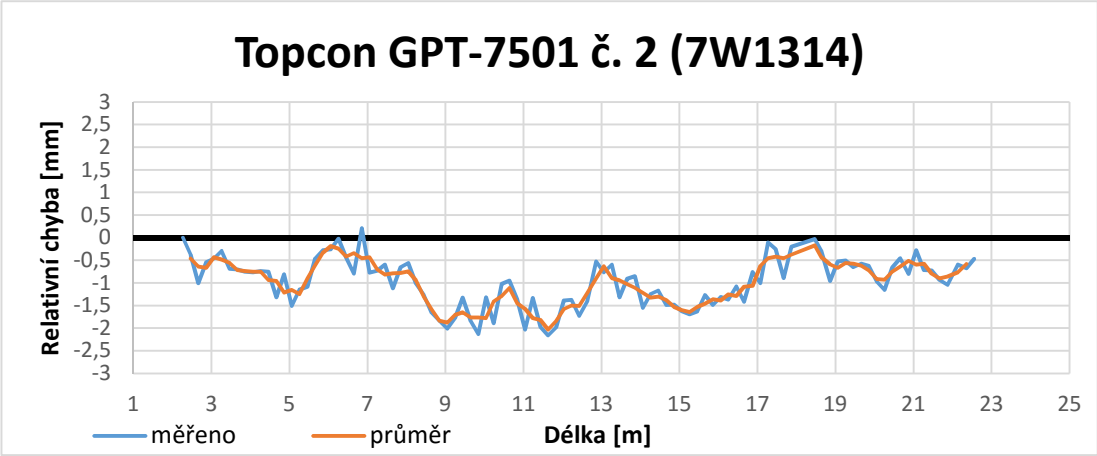
h = průměrované sousední hodnoty.

Následující grafy zobrazují zjištěný průběh relativních chyb a porovnání měřených hodnot a hodnot upravených klouzavým průměrem.



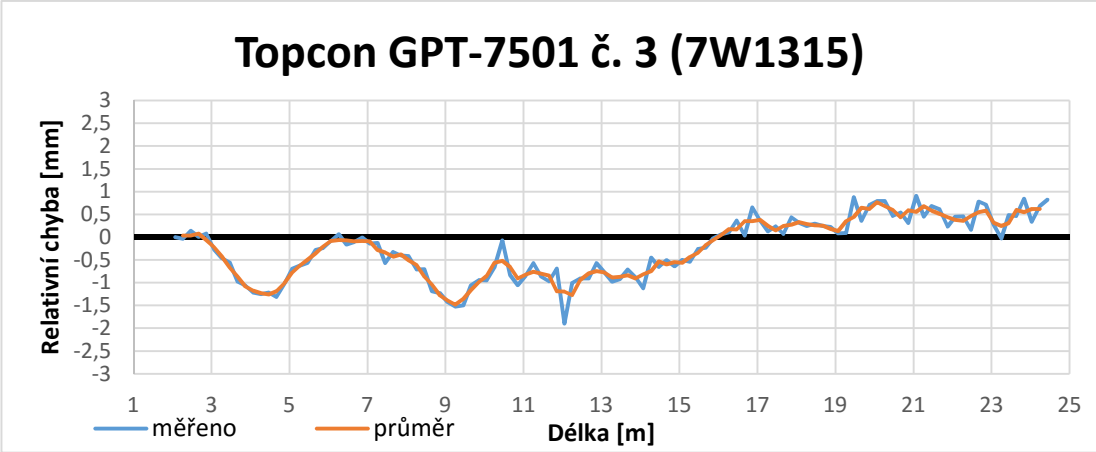
Graf 1: Průběh relativních chyb. Přístroj č.1

Přístrojem č. 1 byly měřeny délky v rozmezí od 2,47 m do 24,09 m. celkem bylo provedeno 108 měření, z nichž 2 byla chybná, a proto byla vyřazena z výpočtu. Rozptyl chyb byl po určení klouzavého průměru 3,08 mm.



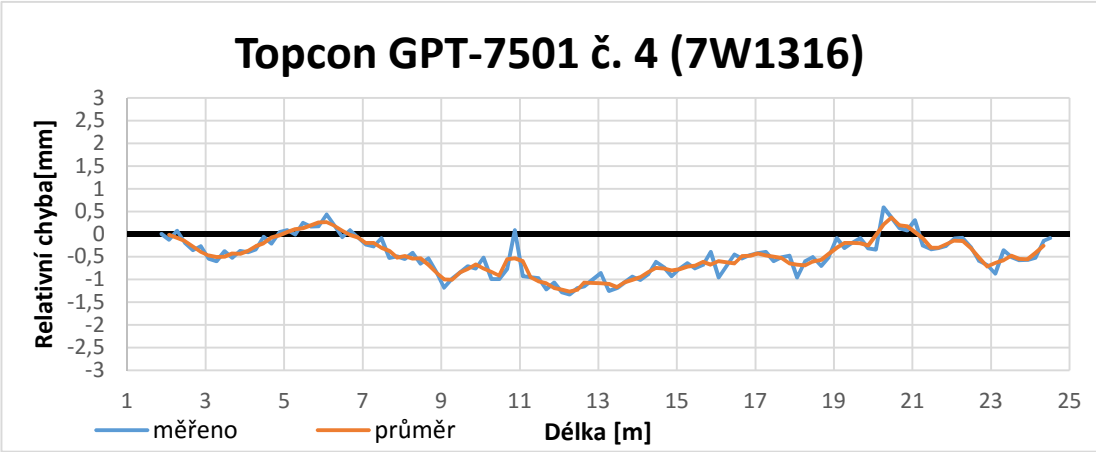
Graf 2: Průběh relativních chyb. Přístroj č. 2

Přístrojem č. 2 Bylo měřeno v rozmezí délek od 2,27 m do 22,56 m. Naměřeno bylo 101 délek. Rozptyl chyb byl 1,86 mm.



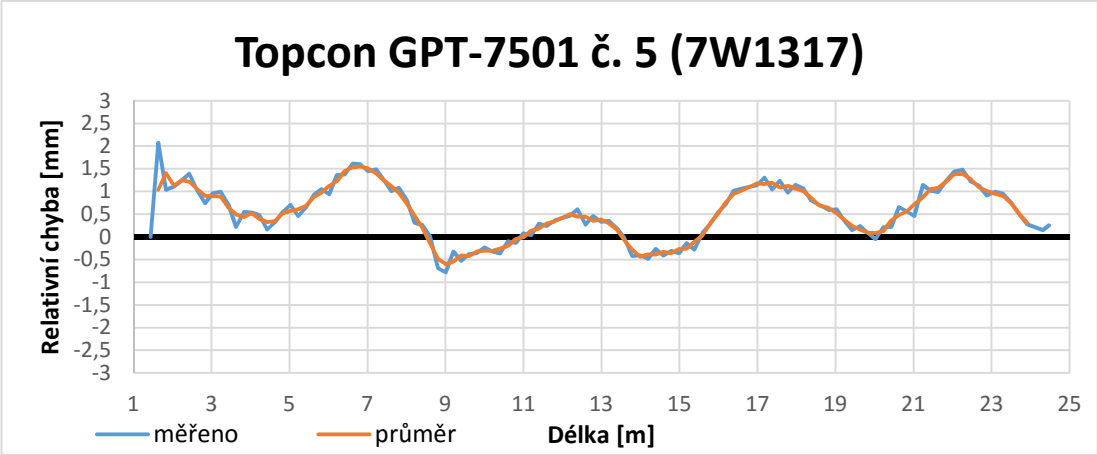
Graf 3: Průběh relativních chyb. Přístroj č. 3

Přístrojem č. 3 bylo naměřeno 113 délek v rozmezí od 2,07 m do 24,43 m. Rozptyl chyb byl 2,25 mm. Chybový průběh je harmonický s mírným nárůstem velikosti chyb a změnou trendu u délek větších než 16 m.



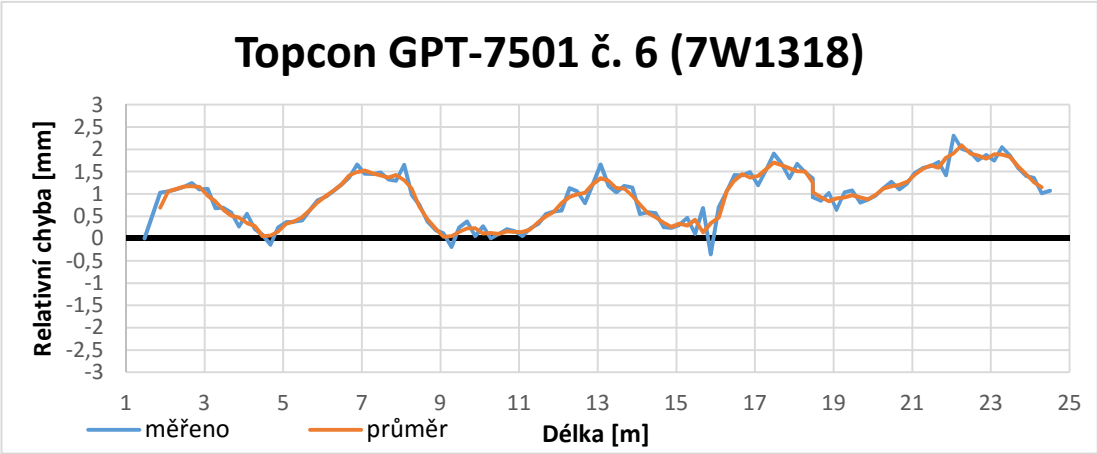
Graf 4: Průběh relativních chyb. Přístroj č. 4

Přístrojem č. 4 bylo naměřeno 114 délek v rozmezí od 1,87 m do 24,51 m. Ze všech měření byla vyloučena 2 chybná. Rozptyl chyb byl 1,63 mm. Chybový průběh byl hodně vyrovnaný, ale i přesto je patrná jistá harmonická změna trendu.



Graf 5: Průběh relativních chyb. Přístroj č. 5

Přístrojem č. 5 bylo změřeno 116 délek v rozmezí od 1,44 m do 24,48 m. Z výpočtu byla odstraněna 2 chybná měření. Rozptyl chyb byl 2,15 mm. Z grafu je patrný výrazný harmonický chybový průběh.



Graf 6: Průběh relativních chyb. Přístroj č. 6

Přístrojem č. 6 bylo změřeno 116 délek v rozmezí od 1,47 m do 24,50 m. Rozptyl chyb byl 2,05 mm. Průběh chyb je opět harmonický

7.2 Zpracování a výpočet absolutních chyb

Pro převod z relativních chyb na chyby absolutní bylo provedeno měření na pilířové základně s nucenými centracemi. Ukázka záznamu měření v Tab. 4 (Příloha 2).

Tabulka 4: Ukázka záznamu měření na pilířové základně

Přístroj 3					
pilíře	s [m]	z [gon]	d [m]	d [m] průměr	Konstanta fólie
3 P1 H	3,875	100,2160	3,875	3,875	
3 P2 H	3,875	299,7777	3,875		
		399,9937			-0,0012
3 P1 F	3,860	100,2274	3,860	3,860	
3 P2 F	3,860	299,7732	3,860		
		400,0006			
4 P1 H	6,390	100,1814	6,390	6,389	
4 P2 H	6,389	299,8188	6,389		
		400,0002			-0,0014
4 P1 F	6,375	100,1850	6,375	6,374	
4 P2 F	6,374	299,8093	6,374		
		399,9943			

Každé měření je označeno číslem pilíře, polohou dalekohledu (P1/P2) a typem cíle (H – hranol, F – fólie). Pro kontrolu byly počítány i součty zenitových úhlů v obou polohách dalekohledu (šedá pole ve třetím sloupci). Vodorovné délky z obou poloh byly průměrovány (pátý sloupec). V posledním sloupci jsou určeny dílčí konstanty fólie podle vzorce (8, kap. 6.1.2). Celkem jich bylo určeno 19. Z dílčích konstant se podle postupu vzorce (9, kap. 6.1.2) určila konečná hodnota konstanty fólie, viz. Tab. 5.

Tabulka 5: Konstanta použitého hranolu a určená konstanta fólie

konstanta folie:	-1,48	mm
konstanta hranolu	-16,4299	mm

Pomocí vypočtené součtové konstanty byly opraveny délky měřené na fólii. Porovnáním referenčních délek a určených délek byly vypočteny absolutní chyby (Tab. 6) (Příloha 3).

Tabulka 6: Výpočet absolutních chyb pro přístroj č. 2

Pilíř	Přístroj č. 2		K = konstanta			
	fólie bez K [m]	fólie [m]	hranol bez K [m]	hranol [m]	folie - hranol [m]	folie - pilíře [m]
3	3,8599	3,8584	3,8745	3,8580	0,0003	0,0030
4	6,3759	6,3744	6,3901	6,3736	0,0007	0,0035
7	13,8638	13,8623	13,8784	13,8620	0,0003	0,0030
8	16,3535	16,3520	16,3678	16,3514	0,0007	0,0028
11	21,3275	21,3260	21,3426	21,3261	-0,0002	0,0036

Tabulka obsahuje v druhém a čtvrtém sloupci naměřené délky z pilířové základny. Délky opravené o součtové konstanty hranolu nebo fólie jsou uvedeny ve sloupcích 5 a 3. Šestý sloupec vyjadřuje rozdíl mezi délkou změřenou na fólii a na hranol po zavedení součtových konstant. Teoreticky by se tato hodnota měla rovnat či blížit nule. Nesoulad může být způsoben náhodnými chybami dálkoměru při dvojím měření. Absolutní chyby dálkoměru jsou zaneseny v posledním sloupci a byly spočítány jako rozdíl délek měřených na fólii (3. sloupec) a skutečných délek mezi pilíři (Tab. 1).

7.3 Převod relativních chyb na absolutní chyby

Pro posun relativních chyb na absolutní byl použit výpočet robustním průměrem. Pro každý přístroj bylo určeno 5 absolutních chyb. K těmto chybám bylo ze souboru relativních chyb vyinterpolováno také 5 chyb.

$$\varepsilon_{interp} = \frac{d - d_1}{d_2 - d_1}(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) + \varepsilon_1, \tag{13}$$

kde: ε_{interp} = interpolovaná hodnota relativní chyby,

d = délka pro kterou se hodnota interpoluje,

d_1 = nejbližší menší délka ze souboru relativních chyb,

d_2 = nejbližší větší délka ze souboru relativních chyb,

ε_1 = hodnota relativní chyby pro délku d_1,

ε_2 = hodnota relativní chyby pro délku d_2.

Byl vytvořen rozdíl mezi absolutními chybami a vyinterpolovanými chybami. Rozdíly byly zprůměrovány a výsledná hodnota byla přičtena ke všem relativním chybám.

$$posun = \frac{\sum(\varepsilon_{interp} - \mathrm{E})}{5}, \tag{14}$$

kde: $posun$= posun,

E = absolutní chyba.

$$\varepsilon_i^P = \varepsilon_i + p, \tag{15}$$

kde: ε_i^P= soubor posunutých chyb,

ε_i = soubor původních relativních chyb.

Dále výpočet probíhá iteračně. Určí se váhová matice a určí se nový posun:

$$v_i = \varepsilon_{interp} - \varepsilon_{abs}, \tag{16}$$

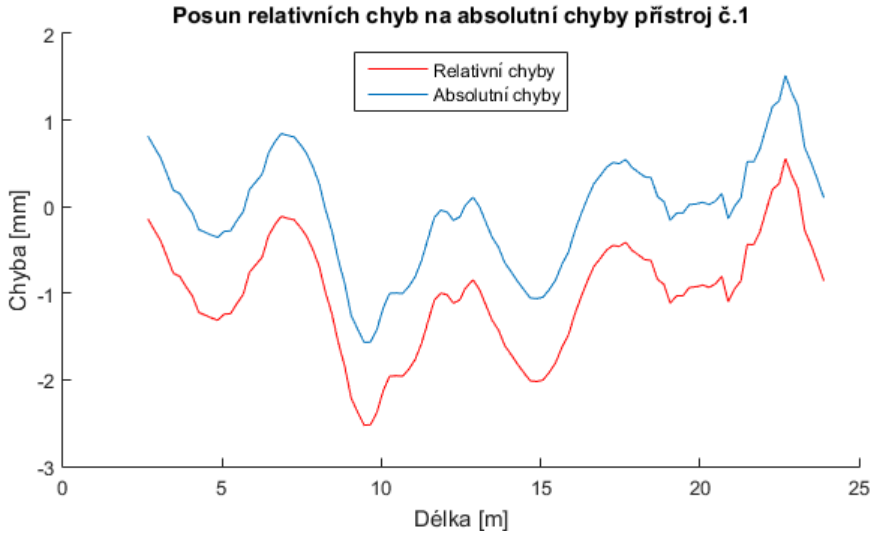
$$P_i = \frac{1}{{v_i}^2}, \tag{17}$$

kde: P = matice vah,

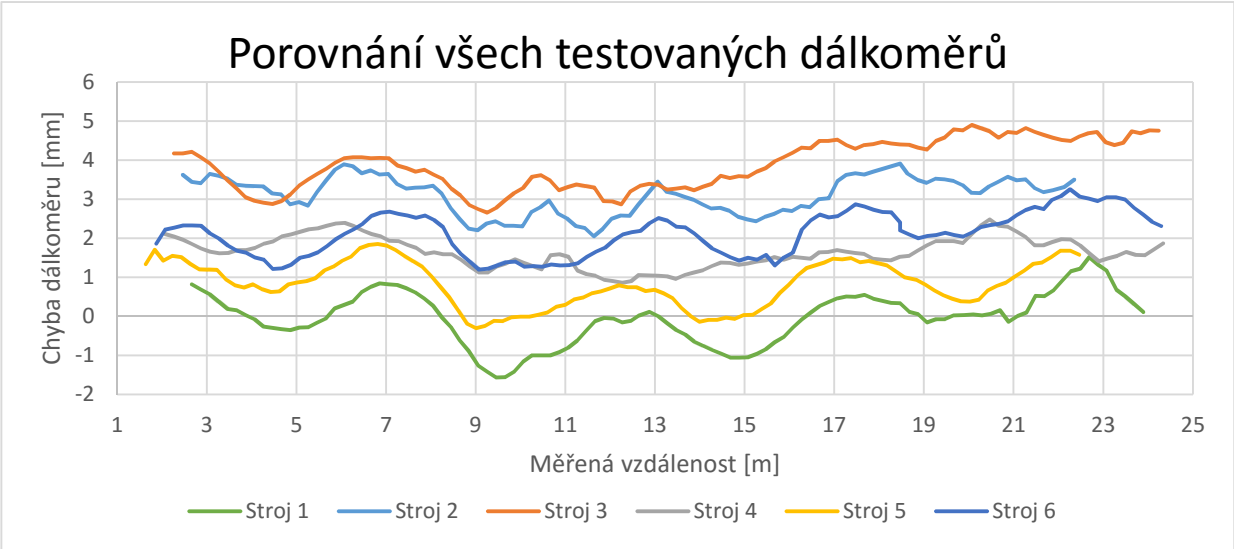
v = matice oprav (interpolované hodnoty - absolutní chyby).

$$posun = \frac{\sum(v \times P)}{\sum P}. \tag{18}$$

Výpočet se opakuje, dokud rozdíl nově spočítaného a předešlého posunu je větší než zvolená tolerance. Pro výpočet byla zvolena tolerance 0,00001 mm. Počet iterací byl maximálně 9. Celý výpočet probíhal v programu MATLAB (Příloha 4). Posun je zobrazen v Graf 7. Pro vzájemné porovnání byl vytvořen graf, do něhož byly vyneseny absolutní chyby všech šesti testovaných přístrojů, viz Graf 8.



Graf 7:Znázornění posunu z relativních chyb na absolutní chyby. Přístroj č.1



Graf 8: Porovnání absolutních chyb všech testovaných přístrojů

8. Zhodnocení výsledků

Bylo otestováno šest přístrojů Topcon GPT–7501. Testování bylo zaměřeno na určení chybového průběhu délek při měření na odrazné štítky a na nalezení intervalů, ve kterých přístroje nedokáží změřit délku.

8.1 Nalezené intervaly

Přes dodržení stanoveného postupu nebyly nalezeny žádné intervaly, kde by přístroje neměřily. Nebylo tedy zjištěno podobné selhání přístrojů, které popisuje [1]. Nelze však říci, že přístroje netrpí výrobní vadou. Testování probíhalo v laboratorních podmínkách, ale vada se může začít projevovat až při měření v horších podmínkách (tovární hala, měnící se počasí venku). Byl však splněn předpoklad, že se v tomto ohledu budou chovat všechny testované přístroje stejně, neboť pochází ze stejné výrobní série. Z grafů Graf 1 – 6 a Graf 8 je vidět, že data jsou spojitá a k žádnému výpadku měření tedy nedošlo.

8.2 Zhodnocení přístrojů

Zjištěný průběh chyb má u všech přístrojů podobný průběh. Velikost chyb se sinusově mění a od přibližně 19 m má mírně vzrůstající trend. U přístrojů č. 3 a č. 4 lze sledoval podobný trend, který se malinko liší od ostatních. Rozsahem chyb a jejich velikostí však i tyto přístroje zapadají mezi ostatní, viz (Graf 8).

Největší rozptyl relativních chyb byl zjištěn u přístroje č. 1, a sice 3,08 mm, viz Graf 1. Naopak nejmenší rozptyl (1,63 mm) byl zaznamenán u č. 4, viz (Graf 4).

Po zavedení absolutních chyb dosáhly nejlepších hodnot přístroje č. 1 (min. -1,57 mm, max. 1,51 mm) a č. 5 (min. -0,03 mm, max. 1,85 mm). Oba přístroje mají také velice podobný chybový průběh.

U přístroje č. 3 byly zjištěné chyby větší než 4 mm, což je dvojnásobek směrodatné odchylky udávané výrobcem (2 mm + 2 ppm). Nebyla tedy splněna přesnost měření deklarovaná výrobcem.

V rámci určování absolutních chyb byla z devatenácti měření určena součtová konstanta použité fólie. Do výsledku se také promítla excentricita nástavce s fólii. Výsledná hodnota -1,48 mm je tedy spíše součtovou konstantou celé soupravy (nástavec + fólie), než jen samotné fólie.

9. Závěr

Šest přístrojů Topcon GPT–7501 bylo podrobeno testování. Účelem testování bylo určit chybový průběh měřených délek při měření na odrazné štítky, popsat intervaly, ve kterých přístroje nejsou schopny změřit délku, a porovnat zjištěné chyby s daty poskytovanými výrobcem. Měření proběhlo ve dvou fázích. Na kalibrační dráze s interferometrem o délce 24 m a na pilířové základně o celkové délce 38,6 m. Kalibrační dráha byla využita v celé své délce. Na pilířové základně bylo využito jen prvních 22 m. Veškerá měření probíhala v hranolovém módu.

Nepodařilo se potvrdit hypotézu, že přístroje nebudou v určitých intervalech na odrazné štítky měřit. Kromě velmi krátkých vzdáleností (0 m – 2 m) se v tomto ohledu nevyskytly žádné komplikace.

Z testování chyb vyšly nejlépe přístroje č. 1 a č. 5. jejichž chyby se vešly do rozmezí -1,57 mm až 1,85 mm. Přístroj č. 3 jako jediný nesplnil výrobcem deklarovanou přesnost (2 mm + 2ppm) a byly u něj zaznamenány chyby až 4,90 mm. Z toho důvodu není vhodný pro použití k přesnějším měřením v geodézii. U ostatních přístrojů zjištěné chyby nepřekročily dvojnásobek udávané hodnoty. Zjištěná přesnost dálkoměrů přibližně odpovídá výsledkům prezentovaným v [3], kde se tyto dálkoměry testovaly při měření na odrazné hranoly.

Protože se jedná o přístroje stejného typu, navíc ze stejné výrobní řady, byl zjištěný průběh chyb u všech podobný. Všechny přístroje se také chovaly stejně z hlediska hledaných intervalů, kde nebudou měřit (žádné nebyly nalezeny). Tím byla potvrzena hypotéza, že přístroje budou mít podobné vlastnosti a budou-li vadné z hlediska výrobního procesu, budou vadné všechny.

Chybový průběh je u všech testovaných přístrojů harmonický a projevují se u něj nelineární, na měřené délce závislé chyby. Rozdíly mezi jednotlivými přístroji jsou způsobeny chybou určení vnitřní součtové konstanty přístroje. Z testování plyne, že pro přesná a kvalitní měření by měla být součtová konstanta určována pro každou dvojici (přístroj, odrazná souprava) zvlášť.

10. Seznam zdrojů

[1] Štroner, M. – Urban, R. – Braun, J.: Implementation of a high-accuracy spatial network for measurements of steel constructions. Slovak Journal of Civil Engineering, 2012, roč. 20, č. 1. ISSN: 1338-3973

[2] Rueger, J. M.: Electronic Distance Measurement, Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 3. vydání, Germany, 1990, ISBN: 978-3-540-51523-4

[3] Toulová, I.: Testování pulzních dálkoměrů na laboratorní základně. Praha, 2015. Bakalářská práce. ČVUT, Fakulta stavební. Dostupné online z: http://geo.fsv.cvut.cz/proj/bp/2014/iva-toulova-bp-2014.pdf. cit. 9.5.2016.

[4] Macro Surveying: Topcon GPT – 7501 Reflectorless Total Station. Dostupné online z: http://www.macrosurveying.com/topcon-total-station-/50-topcon-gpt-7501-reflectorless-total-station.html. cit. 9.5.2016.

[5] ČSN ISO 17123-4: Optika a optické přístroje - Terénní postupy pro zkoušení geodetických a měřických přístrojů - Část 4: Elektrooptické dálkoměry. Český normalizační institut, Praha, 2005.

[6] ČSN ISO 17123-3. Optika a optické přístroje - Terénní postupy pro zkoušení geodetických a měřických přístrojů - Část 3: Teodolity. Praha: Český normalizační institut, 2005.

[7] Fuka, J. – Havelka, B.: Optika a atomová fyzika, I. Optika, fyzikální kompendium pro vysoké školy, díl IV., SPN, Praha 1961. Dostupné online z: http://www.opto.cz/fuka_havelka/index.html#TOC1%7C. cit. 9.5.2016.

[8] Fyzika 007: Skládání vlnění. Dostupné online z: http://www.fyzika007.cz/mechanicke-kmitani-a-vlneni/skladani-vlneni. cit. 9.5.2016.

[9] Renishaw: Měřící systém ML10. Dostupné online z: http://www.renishaw.cz/cs/merici-system-ml10--6804. cit. 9.5.2016.

[10] Pětník, V.: Automatická kalibrace elektrooptického dálkoměru. Praha, 2015. Bakalářská práce. ČVUT, Fakulta stavební. Dostupné online z: http://geo.fsv.cvut.cz/proj/bp/2015/vojtech-petnik-bp-2015.pdf. cit. 9.5.2016.

[11] Public LIGO: Gravitational Waves and Precision Measurement. Dostupné online z: https://dcc.ligo.org/LIGO-G1000029/public. cit. 9.5.2016.

[12] Leica Geosystems: Leica Absolute Tracker AT401. Dostupné online z: http://www.leica-geosystems.es/downloads123/m1/metrology/AT401 /brochures/Leica%20Absolute%20Tracker%20AT401_en.pdf. cit. 9.5.2016.

[13] Braun, J.: Inovace přesných měření inženýrské geodézie v průmyslu. Disertační práce, FSv ČVUT v Praze, 2016.

[14] Comet: T7318 Interiérový snímač teploty, vlhkosti a atmosférického tlaku s výstupem RS232. Dostupné online z: http://www.cometsystem.cz/produkty/snimace-a-regulatory-teploty-vlhkosti-tlaku/t7318-interierovy-snimac-teploty-vlhkosti-a-atmosferickeho-tlaku-s-vystupem-rs232/reg-T7318#technical_dataa. cit. 9.5.2016

[15] Štroner, M. – Hampacher, M.: Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii (Processing and Analysis of Measurements in Engineering Surveying), Nakladatelství ČVUT, 1. vydání, Praha, 2011, ISBN: 978-80-01-04900-6.

11. Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma pulzního dálkoměru [3] 9

Obr. 2: Totální stanice Topcon GPT 7501 10

Obr. 3: Testovací dráha s interferometrem (pohled od interferometru) 13

Obr. 4: Schéma interferometru 13

Obr. 5: Interference posunutých vln [8] 14

Obr. 6: Interferometr Renishaw ML10 14

Obr. 7: Pohyblivý vozík (pohled shora) 15

Obr. 8: Program na ovládání vozíku [10] 15

Obr. 9: Schéma pilířové základny 16

Obr. 10: Centrační deska na pilíři 16

Obr. 11: Leica Absolute Tracker AT401 a hranol Leica RRR 1,5'' 17

Obr. 12: Odrazná fólie Leica 19

Obr. 13: Zarážka na magnetu 20

Obr. 14: Hranol Leica GMP 101 a trn Leica GZR3 20

Obr. 15: Trojnožka Leica 21

Obr. 16: Digitální teploměr-barometr-vlhkoměr Comet 21

Obr. 17: Ukázka surových dat z testovaného přístroje 25

Obr. 18: Umístění přístroje během testování 26

12. Seznam tabulek

Tabulka 1: Délky mezi pilíři a jejich směrodatné odchylky 18

Tabulka 2: Příklad měřených dat přístrojem č.6 27

Tabulka 3: Ukázka zpracování měřených dat pro vynesení do grafu 28

Tabulka 4: Ukázka záznamu měření na pilířové základně 33

Tabulka 5: Konstanta použitého hranolu a určená konstanta fólie 33

Tabulka 6: Výpočet absolutních chyb 34

13. Seznam grafů

Graf 1: Průběh relativních chyb. Přístroj č.1 30

Graf 2: Průběh relativních chyb. Přístroj č. 2 30

Graf 3: Průběh relativních chyb. Přístroj č. 3 31

Graf 4: Průběh relativních chyb. Přístroj č. 4 31

Graf 5: Průběh relativních chyb. Přístroj č. 5 32

Graf 6: Průběh relativních chyb. Přístroj č. 6 32

Graf 7:Znázornění posunu z relativních chyb na absolutní chyby. Přístroj č.1 36

Graf 8: Porovnání absolutních chyb všech testovaných přístrojů 36

14. Seznam příloh

Příloha 1: Záznam a zpracování měření relativních chyb

elektronicky (Měření_relativních_chyb.xlsx)

Příloha 2: Záznam a zpracování měření absolutních chyb

elektronicky (Měření_absolutních_chyb.xlsx)

Příloha 3: Výpočet absolutních chyb 45

Příloha 4: Skript na výpočet robustního průměru 47

Příloha 3: Výpočet absolutních chyb

Pilíř	Přístroj č. 1		K = konstanta			
	fólie bez K [m]	fólie [m]	hranol bez K [m]	hranol [m]	folie - hranol [m]	folie - pilíře [m]
3	3,8631	3,8616	3,8781	3,8616	-0,0001	-0,00017
4	6,3793	6,3778	6,3938	6,3773	0,0004	0,00012
7	13,8673	13,8658	13,8819	13,8655	0,0004	-0,00048
8	16,3564	16,3549	16,3712	16,3548	0,0001	-0,00009
11	21,3304	21,3289	21,3457	21,3292	-0,0004	0,00074

Pilíř	Přístroj č. 2		K = konstanta			
	fólie bez K [m]	fólie [m]	hranol bez K [m]	hranol [m]	folie - hranol [m]	folie - pilíře [m]
3	3,8599	3,8584	3,8745	3,8580	0,0003	0,0030
4	6,3759	6,3744	6,3901	6,3736	0,0007	0,0035
7	13,8638	13,8623	13,8784	13,8620	0,0003	0,0030
8	16,3535	16,3520	16,3678	16,3514	0,0007	0,0028
11	21,3275	21,3260	21,3426	21,3261	-0,0002	0,0036

Pilíř	Přístroj č. 3		K = konstanta			
	fólie bez K [m]	fólie [m]	hranol bez K [m]	hranol [m]	folie - hranol [m]	folie - pilíře [m]
3	3,8600	3,8585	3,8752	3,8587	-0,0003	0,0029
4	6,3745	6,3730	6,3895	6,3730	-0,0001	0,0049
7	13,8637	13,8622	13,8781	13,8617	0,0005	0,0031
8	16,3520	16,3505	16,3671	16,3507	-0,0002	0,0043
11	21,3263	21,3248	21,3420	21,3255	-0,0008	0,0048

Pilíř	Přístroj č. 4		K = konstanta			
	fólie bez K [m]	fólie [m]	hranol bez K [m]	hranol [m]	folie - hranol [m]	folie - pilíře [m]
3	3,8613	3,8598				0,0016
4	6,3776	6,3761				0,0018
7	13,8657	13,8642				0,0011
8	16,3545	16,3530				0,0018
11	21,3288	21,3273	21,3443	21,3278	-0,0005	0,0023

Pilíř	Přístroj č. 5		K = konstanta			
	fólie bez K [m]	fólie [m]	hranol bez K [m]	hranol [m]	folie - hranol [m]	folie - pilíře [m]
3	3,8623	3,8608				0,0006
4	6,3781	6,3766				0,0013
7	13,8661	13,8646				0,0007
8	16,3551	16,3536				0,0012
11	21,3292	21,3277	21,3450	21,3285	-0,0009	0,0019

Pilíř	Přístroj č. 6		K = konstanta			
	fólie bez K [m]	fólie [m]	hranol bez K [m]	hranol [m]	folie - hranol [m]	folie - pilíře [m]
3	3,8609	3,8594				0,0020
4	6,3772	6,3757				0,0022
7	13,8648	13,8633				0,0020
8	16,3540	16,3525				0,0023
11	21,3283	21,3268	21,3441	21,3276	-0,0009	0,0028

Příloha 4: Skript na výpočet robustního průměru

```
clc;
clear;

chyby_pil=[ %délka abs.chyba
];

chyby_dra=[%délka rel.chyba
];
figure
hold on
plot(chyby_dra(:,1),chyby_dra(:,2),'r')
title('Posun relativních chyb na absolutní chyby přístroj č.1')
xlabel('Délka [m]')
ylabel('Chyba [mm]')

i=1;
j=1;
for i=1:5
    while chyby_pil(i,1) > chyby_dra(j,1)
        j=j+1;
    end
    horni = chyby_dra(j,1);
    dolni = chyby_dra(j-1,1);
    horni_ch = chyby_dra(j,2);
    dolni_ch = chyby_dra(j-1,2);
    interpol = (1-(horni-chyby_pil(i,1))/(horni-dolni))*(horni_ch-
dolni_ch)+dolni_ch;
    vyinter_body(i,:)=[dolni horni interpol];
end

pil_int = chyby_pil(:,2)-vyinter_body(:,3);
posun = mean(pil_int)
vyinter_body(:,3)=vyinter_body(:,3)+posun;
chyby_dra(:,2)=chyby_dra(:,2)+posun;
x=1000000;
i=0;

while (abs(x-posun) >= 0.00001)
    pil_int = chyby_pil(:,2)-vyinter_body(:,3);
    P=1./abs(pil_int); %váhová matice
    x=posun;
    posun = sum(pil_int.*P)/sum(P)
    vyinter_body(:,3)=vyinter_body(:,3)+posun;
    chyby_dra(:,2)=chyby_dra(:,2)+posun;
    i=i+1;
end

plot(chyby_dra(:,1),chyby_dra(:,2))
legend('Relativní chyby', 'Absolutní chyby','Location', 'north')
```