



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

OBOR GEODÉZIE, KARTOGRAFIE A GEOINFORMATIKA

**Testování dálkoměrů totálních stanic Trimble S6 a S8 na
laboratorní základně**

**Testing of electronic distance meters of total stations Trimble S6
and S8 on laboratory baseline**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: Geodézie a kartografie
Studijní obor: Geodézie, kartografie a geoinformatika

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Braun, Ph.D.

Tomáš Reindl

Praha 2017



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Reindl</u>	Jméno: <u>Tomáš</u>	Osobní číslo: <u>410912</u>
Zadávající katedra: <u>K154 - Speciální geodézie</u>		
Studijní program: <u>Geodézie a kartografie</u>		
Studijní obor: <u>Geodézie, kartografie a geoinformatika</u>		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Testování dálkoměrů totálních stanic Trimble S6 a S8 na laboratorní základně</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Testing of electronic distance meters of total stations Trimble S6 and S8 on laboratory baseline</u>	
Pokyny pro vypracování: Na laboratorní základně s interferometrem určete podrobný průběh chyb dálkoměru přístroje Trimble S6 a Trimble S8. Pro měření délek použijte odrazný hranol. Relativní chyby ze základny s interferometrem převeďte na absolutní chyby s využitím pilířové základny. Chyby určené pro přístroj Trimble S6 porovnejte s dříve pořízenými daty, která jsou uvedena v [2].	
Seznam doporučené literatury: [1] Rueger, J.M.: Electronic Distance Measurement. 3. vyd. New York: Springer-Verlag, 1990. 266 s. ISBN 3-540-51523-2 [2] Braun, J. - Štroner, M. - Urban, R. - Dvořáček, F.: Suppression of Systematic Errors of Electronic Distance Meters for Measurement of Short Distances. Sensors - Open Access Journal, 2015, roč. 15, č. 8, s. 19264-19301. ISSN 1424-8220.	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>Ing. Jaroslav Braun, Ph.D.</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>21.2.2017</u>	Termín odevzdání bakalářské práce: <u>28.5.2017</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
<u>Jaroslav Braun</u> Podpis vedoucího práce	<u>Marek Hájek</u> 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“.

<u>21.2.2017</u> Datum převzetí zadání	<u>Reindl</u> Podpis studenta(ky)
---	--------------------------------------

Prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma *Testování dálkoměrů totálních stanic Trimble S6 a S8 na laboratorní základně* jsem vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jaroslava Brauna, Ph.D. a za využití zdrojů, které uvádím v seznamu literatury.

V Praze dne

Podpis

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Jaroslavu Braunovi, Ph.D. za ochotu a trpělivost, za přátelský a vstřícný přístup, za cenné rady a pomoc, které se mi dostalo při tvorbě této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval rodině a přítelkyni za podporu při mém dosavadním studiu a kamarádům za jeho zpříjemnění.

Abstrakt

Bakalářská práce popisuje testování přesnosti měření délek dvou totálních stanic Trimble S6 a S8. K testování byly použity dvě laboratorní základny, které jsou umístěny na Fakultě stavební ČVUT v Praze. Na základně s interferometrem byly zjištěny podrobné průběhy relativních chyb a pro převod na chyby absolutní bylo využito měření na pilířové základně. Pro obě testované totální stanice byl zjištěn průběh chybového modelu na vzdálenosti 2 – 20 metrů.

Klíčová slova

Elektronický dálkoměr, Trimble S6, Trimble S8, Délková základna, Relativní chyba, Absolutní chyba, Interferometr

Abstract

The bachelor thesis deals with the testing of the accuracy of distance measurement of two total stations Trimble S6 and S8. The testing was performed on two laboratory baselines, which are placed at Faculty of Civil Engineering CTU in Prague. Relative errors were determined at the baseline with interferometer and the measuring on the pillar baseline was used for the transfer to absolute errors. For both tested total stations was determined course of error model on distance from 2 to 20 meters.

Keywords

Electronic distance meter, Trimble S6, Trimble S8, Length base, Relative error, Absolute error, Interferometer

Obsah

1. Úvod.....	7
2. Elektronické dálkoměry	8
2.1 Impulsní dálkoměry	8
2.2 Fázové dálkoměry	9
2.3 Chyby elektronických dálkoměrů	10
2.3.1 Chyba součtové konstanty	10
2.3.2 Cyklická chyba.....	11
2.3.3 Měřítková chyba	11
3. Přístroje a pomůcky	12
3.1 Testované přístroje	12
3.1.1 Trimble S6 HP	12
3.1.2 Trimble S8 HP	14
3.2 Použité pomůcky	16
4. Testovací základny	19
4.1 Kalibrační dráha s interferometrem.....	19
4.1.1 Interferometr.....	19
4.1.2 Vozík	21
4.1.3 Postup měření na dráze s interferometrem	21
4.2 Laboratorní pilířová základna.....	23
4.2.1 Postup měření na pilířové základně	24
5. Zpracování měření.....	26
5.1 Zpracování a výpočet relativních chyb	26
5.2 Zpracování a výpočet absolutních chyb.....	29
5.3 Převod relativních chyb na chyby absolutní	31
5.4 Určení opravné funkce pomocí Fourierovy transformace	34
5.4.1 Parametry opravných funkcí	35
5.4.2 Výsledný průběh chyb	36
5.5 Porovnání etap u totální stanice Trimble S6	39

5.6	Porovnání chybového modelu totálních stanic Trimble S6	39
6.	Závěr	41
7.	Seznam zdrojů.....	42
8.	Seznam obrázků	43
9.	Seznam tabulek	44
10.	Seznam grafů.....	45
11.	Seznam příloh	46
11.1	Seznam tištěných příloh	46
11.2	Seznam elektronických příloh	46

1. Úvod

Délka je jedna ze základních geometrických veličin měřených v geodézii. Vývoj měření délek byl však velmi pomalý. Až do 30. let minulého století se nejčastěji používala k měření délek pásma a nitkové dálkoměry. Tyto poměrně časově náročné dálkoměrné metody umožňovaly, v omezené míře, přesné určení délky do cca 150 m. S příchodem elektrooptických dálkoměrů se však situace zlepšila. Díky nim se měření vzdáleností výrazně zjednodušilo a zrychlilo. Každý přístroj má ale své určité vady a žádný není nikdy bezchybný. Na správnosti určení délky se tak mohou projevovat vady, kterými trpí příslušný dálkoměr.

Cílem této bakalářské práce je otestování dálkoměrů a zjištění průběhu chybového modelu délek u dvou totálních stanic Trimble S6 a S8, které byly zapůjčeny Katedrou speciální geodézie. Testování proběhlo na interferometrické základně, ze které se určí podrobný průběh relativních chyb. Následně bylo měřeno na pilířové základně, aby bylo možné převést relativní chyby na chyby absolutní. U totální stanice Trimble S6 byl již jednou zjištěn průběh chybového modelu. Ten sloužil pro zjištění, jestli se, popřípadě jak, změnil její chybový model v průběhu let a po absolvování servisní revize. Dále bylo provedeno mezigenerační porovnání totálních stanic Trimble S6 a S8.

2. Elektronické dálkoměry

Pro určení vzdálenosti pomocí totální stanice se dnes používají výhradně dva typy elektronických dálkoměrů, a to impulsní a fázové. V testovaných totálních stanicích Trimble se používají fázové dálkoměry.

Výrobci standardně uvádějí směrodatnou odchylku určení délky D dle vzorce [1]:

$$\sigma_D = A + B * D. \quad (1)$$

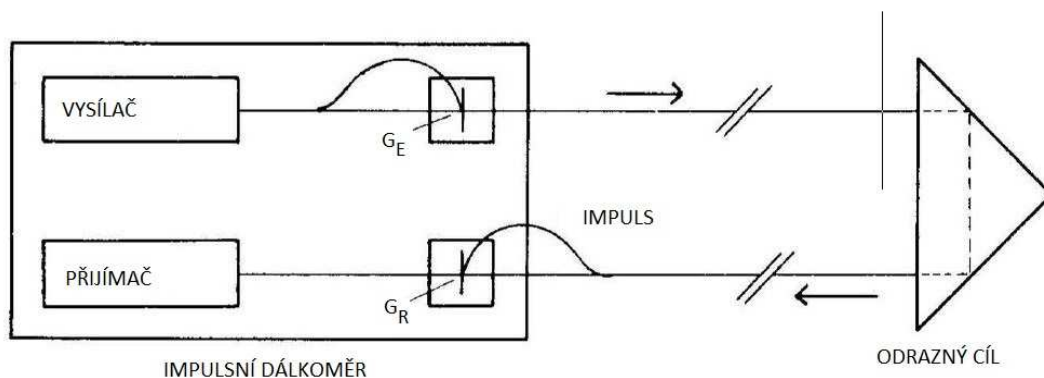
Kde A je člen uváděný v mm a zahrnuje přesnost odečtu dálkoměru, maximální amplitudu krátkoperiodické cyklické chyby u fázových dálkoměrů, maximální efekt nelineárních na délce závislých chyb, přesnost nastavené součtové konstanty a kompatibilitu odrazných hranolů. Člen B je násoben ppm a u dálkoměrů s krátkým dosahem zahrnuje rozsah frekvenčního driftu hlavního oscilátoru v pracovním teplotním rozsahu a maximální chybu, která může být způsobena omezením kroků výpočtu ppm. Člen D je délka uváděna v km [1].

2.1 Impulsní dálkoměry

Impulsní dálkoměry určují vzdálenost pomocí přímého měření tranzitního času, který se určuje z rozdílu času vyslaného a přijatého impulsu (Obr. 1). Protože přesné určení tranzitního času je velmi problematické, využívají se pro přístroje s nižší přesností. Pro výpočet vzdálenosti se používá vzorec [2]:

$$d = \frac{c * (t_R - t_E)}{2}, \quad (2)$$

kde: d určovaná vzdálenost,
 c rychlost světla v prostředí,
 t_E čas vyslání impulsu, měřeno G_E ,
 t_R čas přijetí impulsu, měřeno G_R .



Obr. 1: Princip impulsního dálkoměru [1]

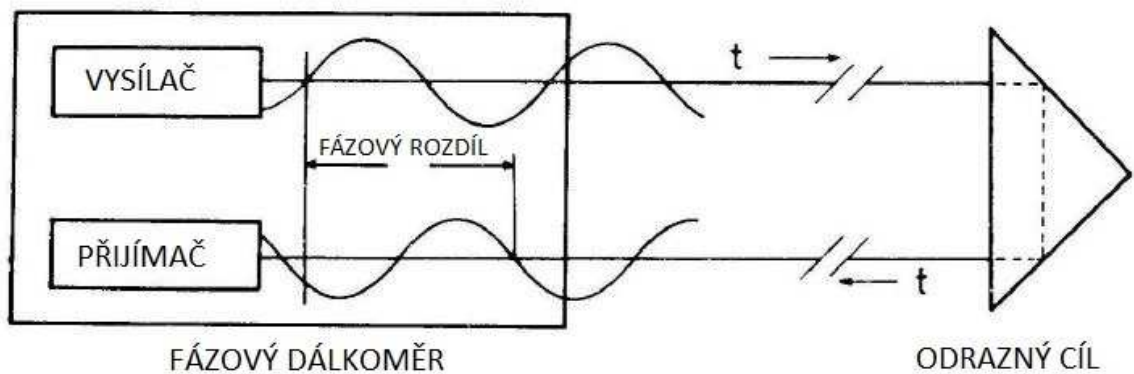
2.2 Fázové dálkoměry

Fázové dálkoměry určují vzdálenost pomocí fázového rozdílu. Vyslaná, sinusově modulovaná, vlna se porovnává s přijatou a určuje se fázový rozdíl (Obr. 2). Fázové dálkoměry se využívají pro přesné určování vzdáleností a jejich přesnost závisí na hlavní jednotkové délce dálkoměrné vlny. Pro výpočet vzdálenosti se používá vzorec [2]:

$$d = m * U + \frac{\Delta\phi}{2 * \pi} * U, \quad (3)$$

$$U = \frac{\lambda}{2}, \quad (4)$$

- kde: d určovaná vzdálenost,
 m celočíselný počet celých vlnových délek,
 U jednotková délka fázového dálkoměru,
 $\Delta\phi$ měřená fáze vlny v radiánech (fázový rozdíl),
 λ vlnová délka fázového dálkoměru,



Obr. 2: Princip fázového dálkoměru [1]

2.3 Chyby elektronických dálkoměrů

Každý elektronický dálkoměr trpí velkým množstvím přístrojových vad. Výrobci elektronických dálkoměrů se snaží jejich vady co nejvíce minimalizovat a zahrnují je do uváděné přesnosti. Chyby mohou být náhodné, systematické o konstantní velikosti, systematické s periodickým průběhem, systematické lineárně závislé na vzdálenosti, systematické lineárně nezávislé na vzdálenosti a chyby, které závisejí na parametrech prostředí. Dále může mít vliv na přesnost samotný měřič a používané pomůcky. Souhrn všech vyjmenovaných jevů vede k chybovému modelu délek:

$$\text{chyba dálkoměru} = \Sigma(\text{systematické chyby}) + \Sigma(\text{náhodné chyby}) + \text{šum.} \quad (5)$$

Největší chyby dálkoměrů jsou: chyba součtové konstanty, cyklická chyba a měřítková chyba [1].

2.3.1 Chyba součtové konstanty

Jedná se o systematickou chybu s konstantní velikostí, kde neplatí hodnota uvedená výrobcem. Je způsobena netotožností centra dálkoměru s vertikální osou totální stanice, dráhou, kterou urazí paprsek navíc uvnitř dálkoměru a konstantou odrazného hranolu. Při používání stejného dálkoměru a stejného odrazného hranolu se velikost chyby součtové konstanty nemění a pohybuje se okolo 5 mm [1].

2.3.2 Cyklická chyba

Jedná se o systematickou chybu, která je závislá na délce a její chybový model má obvykle tvar sinusoidy. Vzniká hlavně z důvodu interference mezi vyslaným a přijatým signálem. Další možné důvody vzniku mohou být i škrábance a nečistoty na objektivu. U dnešních přístrojů by měla tato chyba být menší než 1 mm [1].

2.3.3 Měřítková chyba

Chyba, která se projevuje na větší vzdálenosti a je způsobena oscilací vysílacích a přijímacích diod. Na velikost chyby má také vliv spousta dalších dílčích efektů. Například zanedbání vlhkosti při zadávání fyzikálních korekcí do totální stanice, špatné určení teploty a tlaku prostředí, ale třeba i přehřátí elektronických součástí a mnohé další [1].

3. Přístroje a pomůcky

3.1 Testované přístroje

Veškeré vybavení bylo zapůjčeno katedrou speciální geodézie a z katedry geomatiky byl zapůjčen interferometr. Vybrané přístroje jsou používány pro výuku a výzkumné měřické práce. Jejich nasazení není každodenní a při měření je vždy přítomna kvalifikovaná obsluha.

3.1.1 Trimble S6 HP

Totální stanice Trimble S6 HP nabízí výkon a flexibilitu, které jsou v současné době vyžadovány profesionály. Díky pokročilým technologiím, jako jsou například Trimble vision, Trimble DR plus a mnoho dalších, splňuje vysoké nároky kladené na práci. Doba provozu na jedno nabití baterky činí přibližně 6,5 hodin. Přístroj je vybaven nekonečnými jemnými ústavnkami. Dalekohled disponuje 30násobným zvětšením obrazu a jeho rozsah ostření je od 1,5 m do nekonečna. [3]

Pro měření byl použit přístroj s výrobním číslem 92120086.



Obr. 3: Totální stanice Trimble S6 HP [3]

Níže uvedené vybrané technické parametry totální stanice Trimble S6 HP pocházejí ze stránek výrobce Trimble [3].

Měření úhlů

Typ senzoru.....absolutní kodér s diametrickým čtením
Přesnost (směrodatná odchylka podle DIN 18723).....1'' (0,3 mgon)

Měření délek

Parametry EDM

Zdroj světla.....Pulsní laserová dioda 905 nm, Laser třídy 1
Rozptyl paprsku horizontálně.....4 cm /100 m
Rozptyl paprsku vertikálně.....8 cm /100 m
Jednotková délka.....0,37 m

Přesnost v režimu hranol

Směrodatná odchylka.....1 mm +1 ppm
Sledování.....4 mm +2 ppm

Dosah v režimu hranol

1 hranol.....2500 m
1 hranol Long Range mód.....5500 m (maximální dosah)
Nejkratší možná vzdálenost.....0,2 m

3.1.2 Trimble S8 HP

Totální stanice Trimble S8 HP, vycházející ze starší S6, představuje maximální funkčnost pro nejnáročnější projekty, které vyžadují přesnost, rychlost a účinnost. Díky pokročilým technologiím, jako jsou například Trimble vision, Trimble DR plus a mnoho dalších, splňuje vysoké nároky kladené na práci. Doba provozu na jedno nabití baterky činí přibližně 6,5 hodin. Přístroj je vybaven nekonečnou jemnou ustanovkou. Dalekohled disponuje 30násobným zvětšením obrazu a jeho rozsah ostření je od 1,5 m do nekonečna. [4].

Pro měření byl použit přístroj s výrobním číslem 98111877.



Obr. 4: Totální stanice Trimble S8 HP [4]

Níže uvedené vybrané technické parametry totální stanice Trimble S8 HP pocházejí ze stránek výrobce Trimble [4].

Měření úhlů

Typ senzoru.....absolutní kodér s diamterickým čtením
Přesnost (směrodatná odchylka podle DIN 18723).....1'' (0,3 mgon)

Měření délek

Parametry EDM

Zdroj světla.....Pulsní laserová dioda 905 nm, Laser třídy 1
Rozptyl paprsku horizontálně.....4 cm /100m
Rozptyl paprsku vertikálně.....8 cm /100m
Jednotková délka.....0,37 m

Přesnost v režimu hranol

Směrodatná odchylka.....0,8 mm +1 ppm
Sledování.....4 mm +2 ppm

Dosah v režimu hranol

1 hranol.....2500 m
1 hranol Long Range mód.....5500 m (maximální dosah)
Nejkratší možná vzdálenost.....0,2 m

3.2 Použité pomůcky

Dále byly k testování použity tyto pomůcky:

Trojnožka Leica

Pro měření na interferometrické a na pilířové základně byly použity trojnožky Leica. Pro pilířovou základnu se použily dvě speciální trojnožky, které byly upravené pro potřeby měření na pilířích. Mají na sobě vyznačené rysky pro koincidenci s centračními deskami.



Obr. 5: Trojnožka Leica

Magnetická zarážka

Magnetická zarážka sloužila jako referenční bod pro počátek měření. V případě přerušení měření interferometrem se tak nemuselo celé měření opakovat, ale stačilo vozíkem dojet k zarážce a interferometrem znova změřit počátek. V případě nouze mohla sloužit i jako nárazník před rozjetým vozíkem. Její umístění bylo na začátku dráhy před interferometrem.



Obr. 6: Magnetická zarážka [6]

Hranol Leica GMP 101

Pro měření na interferometrické základně a na pilířové základně byl vždy použit tento hranol. Spolu s trnem Leica GZR3 tvoří speciální měřickou soupravu určenou výhradně pro potřeby měření na laboratorních základnách. Tato souprava byla testována v disertační práci vedoucího práce a bylo zjištěno, že součtová konstanta hranolu je -16.429867 mm [2].



Obr. 7: Hranol Leica GMP101

Trn Leica GZR3

Trn je vybaven trubicovou libelou, která sloužila pro urovnání hranolu na pilířích. Je součástí speciální soupravy pro měření na pilířové základně.



Obr. 8: Tm Leica GZR3

Teploměr, vlhkoměr a barometr

Pro určení stavu atmosféry je v laboratoři zabudován interiérový digitální přístroj schopný měřit teplotu ovzduší, atmosférický tlak a relativní vlhkost ovzduší. Jedná se přístroj značky Comet, který má rozsah měření teploty -10 až 50 °C s přesností $\pm 0,5$ °C, přesnost měření relativní vlhkosti je $\pm 2,5$ % při teplotě 23 °C a maximální rozsah měřeného tlaku je 600 až 1100 hPa při přesnosti $\pm 1,3$ hPa + 0.06 % z nastaveného výstupního rozsahu při teplotě 23 °C [5].



Obr. 9: Teploměr, vlhkoměr, barometr Comet [5]

4. Testovací základny

Pro testování dálkoměrů byly použity dvě testovací základny. Kalibrační dráha s interferometrem a laboratorní pilířová základna. Obě základny jsou umístěny v laboratoři B028, která se nachází na Fakultě stavební ČVUT v Praze.

4.1 Kalibrační dráha s interferometrem

Jedná se o kolejnicovou laboratorní dráhu, která je dlouhá přibližně 24 m a je vystavěna na ocelové konstrukci s podpěrami. Kolejnice jsou vyhotoveny z kovových tyčí. Podpěry jsou rozmístěné po dráze v pravidelných intervalech 0,5 m a slouží pro polohové a výškové seřízení. Dráha je vybavena samohybným, dálkově ovládaným vozíkem, na kterém je umístěn odrazný hranol interferometru a totální stanice.



Obr. 10: Kalibrační dráha pohled od interferometru [6]

4.1.1 Interferometr

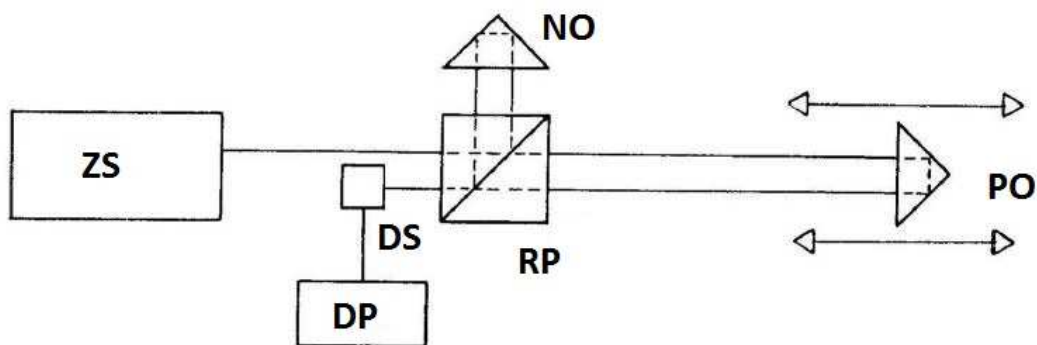
Vývoj interferometrů se datuje od roku 1880, kdy A. A. Michelson postavil v Německu první interferometr. Jedná se o zařízení, které je schopné měřit délky s extrémní přesností. Neměří ale absolutní délky, pouze relativní (změnu polohy hranolu od počátku).

Základní princip interferometru je zobrazen na obr.11. Zdroj světla (ZS) vyše laserový paprsek do rozdělovače paprsků (RP), který rozdělí laserový svazek na dva vzájemně kolmé paprsky. Jedna část míří do pohyblivého odražeče (PO) a druhá pak do nepohyblivého (NO).

Odražené paprsky opět projdou rozdělovačem paprsků a vytvoří interferenční obrazec, který je zaznamenán detektorem světla (DS) a Dopplerovský počet je zaznamenán digitálním počítačem (DP) [1].

Paprsky vytvořené rozdělovačem mají stejnou frekvenci a amplitudu, protože jsou vytvořené stejným zdrojem světla. Jelikož každý paprsek urazí odlišnou vzdálenost, tak mají jiný fázový doměrek [1].

K testování byl použit interferometr Renishaw ML10. Vlnová délka laserového paprsku je $\lambda = 638,8 \text{ nm}$ a přesnost měření interferometru činí $\sigma_d = \pm 0,5 \text{ ppm}$ [7].



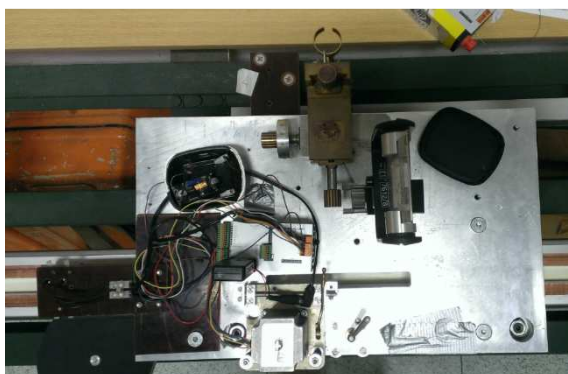
Obr. 11: Schéma interferometru [1].



Obr. 12: Interferometr Renishaw ML10 [6]

4.1.2 Vozík

Tělo vozíku je vyrobeno z ocelové desky. Na desce se nacházejí odrazné hranoly pro interferometr a pro totální stanici, řídicí jednotka, bezdrátový komunikační port, řídicí jednotka motoru a krokový motor. Motor disponuje pouze jedním hnacím kolem, které dosedá z boku na kolejnici. Napájení zajišťují dva měděné pásy, které jsou umístěny mezi kolejnicemi dráhy. Vozík lze ovládat dálkově přes program, který v rámci své bakalářské práce vyvinul Bc. Vojtěch Pětník [8]. Tento program umožňuje velice přesné popojíždění s vozíkem až s přesností na milimetry. Popřípadě lze také vozík ovládat manuálně.



Obr. 13: Vozík [6]

4.1.3 Postup měření na dráze s interferometrem

Před samotným začátkem měření bylo nejprve třeba nechat zapnutý interferometr po dobu přibližně 20 minut pro zahřátí. Testovací totální stanice se upevnila do trojnožky za interferometr. Trojnožka byla přišroubována ke konstrukci dráhy, jednalo se tedy o nucenou centraci. Totální stanice se před měřením urovnala a zadala se teplota, tlak a nastavila se součtová konstanta hranolu. V softwaru určenému pro měření interferometru se také nastavila teplota a tlak. Poté se vozík spároval s počítačem, aby bylo možné ho dálkově ovládat. Následně se s vozíkem dojelo na konec dráhy. Testovací totální stanicí se zacílilo na střed hranolu a po celou dobu měření se cílení neměnilo. Interferometr se také nastavil tak, aby vysílaný laserový paprsek mířil na střed hranolu pro co největší přijímaný signál. Intenzita se pak zkontrolovala po celé délce dráhy pomalým přejetím vozíku zpátky na začátek k magnetické zarážce, kde se nastavilo nulové čtení.

Pro obě testované totální stanice bylo při měření postupováno stejně. Měření probíhalo v krocích po 0,05 m v celé délce dráhy až do závěrečné části, kde už nebyly na dráze přítomné měděné pásky, které by poháněly vozík. Interval, na kterém byly měřeny délky, je 1,5 m až 21 m od totální stanice. Měřily se zenitové úhly a šikmé vzdálenosti v I. poloze dalekohledu. Každé měření se 16krát opakovalo a výsledná vodorovná délka se vypočetla z průměru šikmé délky a zenitového úhlu. V případě přerušení měření interferometru se vozíkem dojelo zpátky k magnetické záložce, kde se znova změřilo nulové čtení a poté se pokračovalo dál od místa přerušení.

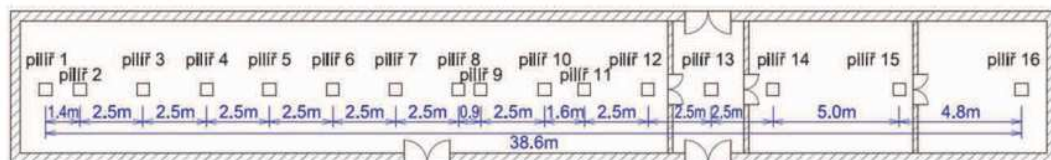
Pro lepší zaznamenání průběhu chyb, bylo ještě dodatečně zvoleno měření po kroku 0,01 m v délce 0,50 m a v krocích 0,001 m v délce 0,05 m. Tyto úseky byly měřeny na třech místech dráhy. První úsek byl ve vzdálenosti 4 m od počátku, druhý byl ve vzdálenosti 12 m a třetí ve vzdálenosti 20 m od počátku. Naměřená data nebyla dále použita při určování průběhu chyb a slouží jako orientační, zobrazují rozptyl měření při malých délkových krocích. Grafy určené pomocí metody klouzavého průměru jsou součástí přílohy (Příloha 1, Příloha 2).

Měřená data se ukládala do paměti totální stanice, kde po měření byla vyexportována do formátu .txt. Program pro ovládání interferometru také disponuje možností ukládání dat a pro jejich export byl zvolen jednoduchý formát .txt.

Totální stanice Trimble S6 byla testována dvakrát (první etapa a druhá etapa). Druhá etapa vznikla z důvodu častého vypadávání signálu na interferometru během prvního měření.

4.2 Laboratorní pilířová základna

Pilířová základna je tvořena 16 betonovými pilíři seřazenými do jedné přímky. Vzdálenost mezi jednotlivými pilíři se pohybuje od 0,9 m do 5 m a celková délka základny je 38,6 m. Výška pilířů je 0,9 m a velikost hlav je 0,35 m x 0,35 m. Hlavy pilířů jsou osazeny centračními deskami. Ve středu desky je upínací šroub pro nucenou centraci. Centrační desky jsou umístěné do přímky s maximální příčnou odchylkou 2 mm a maximální převýšení mezi deskami je 50 mm. Na centračních deskách jsou vyryty rysky, které slouží pro přesnou koincidenci s vyznačenými ryskami na trojnožkách. Laboratorní pilířová základna slouží pro zjištění absolutních chyb dálkoměrů.



Obr. 14: Schéma laboratorní pilířové základny [2]



Obr. 15: Pilíř s centrační deskou

Rozměry základny (Tab. 1) byly určeny v rámci disertační práce vedoucího práce [2] a jsou převzaty do této bakalářské práce.

Tabulka 1: Rozměry pilířové základny [2]

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

4.2.1 Postup měření na pilířové základně

Pro potřeby měření bylo vybráno prvních 11 pilířů, délky byly měřeny z pilíře č.1. Pilíře byly vybrány tak, aby pokryly celý rozsah měřených délek z dráhy s interferometrem.

Při měření se dodržovala následující pravidla, která eliminovala excentricitu pomůcek. Trojnožky se vždy dotahovaly tak, aby se jejich rysky skoincidovaly s ryskami na pilíři. Tím se docílilo, že trojnožky byly vždy stejně dotažené a měly stejnou centrační chybu. Horizontace trojnožek se prováděla na dvou stavěcích šroubech. To zajistilo, že cíle byly vždy ve stejné výšce. Trn se horizontoval ve 4 směrech pomocí trubkové libely trnu a totální stanice podle elektronické libely. Na trn se nasadil odrazný hranol a pečlivě se nasměroval směrem k testované totální stanici. Testovaný přístroj byl osazen do pilíře č.1 a nastavily se u něj fyzikální

korekce. Teplota a tlak se určovaly uprostřed měřené vzdálenosti. Měřily se zenitové úhly a šikmé vzdálenosti.

Měření jedné vzdálenosti bylo provedeno 51krát v I. poloze a 51krát ve II. poloze. V první i ve druhé poloze dalekohledu se měřilo bez přecilování. Výsledná vodorovná délka je určena průměrem ze 102 hodnot.

5. Zpracování měření

5.1 Zpracování a výpočet relativních chyb

Z vyexportovaných dat totální stanice se vyseletovaly naměřené šikmé délky a z interferometru naměřené relativní vzdálenosti. Z nich se určily relativní chyby pro daný dálkoměr (Tab. 2). Jejich výpočet se provádí dle vzorce [2]:

$$\Delta_{Ri} = (D_{TSi} - D_{TS1}) - (D_{Li} - D_{L1}), \quad (6)$$

- kde: Δ_{Ri} relativní chyba pro určitou délku,
 D_{TSi} měřená délka totální stanicí,
 D_{TS1} měřená délka totální stanicí ke vztažnému bodu,
 D_{Li} měřená délka interferometrem,
 D_{L1} měřená délka interferometrem ke vztažnému bodu.

Tabulka 2: Ukázka určování relativní chyby z naměřených dat

Čtení totální stanice	Čtení interferometru	Rozdíl totální stanice	Rozdíl interferometru	Relativní chyba
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1144,5	0,0007	0,0000	0,0000	0,0000
1193,5	49,3037	49,0000	49,3030	0,3030
1243,7	99,3810	99,2000	99,3803	0,1803
1292,7	148,9236	148,2000	148,9229	0,7229
1343,7	199,3298	199,2000	199,3291	0,1291
1392,1	249,0537	247,6000	249,0530	1,4530
1443,0	299,4856	298,5000	299,4849	0,9849
1491,9	349,0315	347,4000	349,0308	1,6308
1542,7	399,4848	398,2000	399,4841	1,2841

V Tab. 2 první sloupec obsahuje měření totální stanice a druhý interferometru. Ve třetím a čtvrtém sloupci jsou relativní vzdálenosti vztažené k první naměřené délce. Pátý sloupec

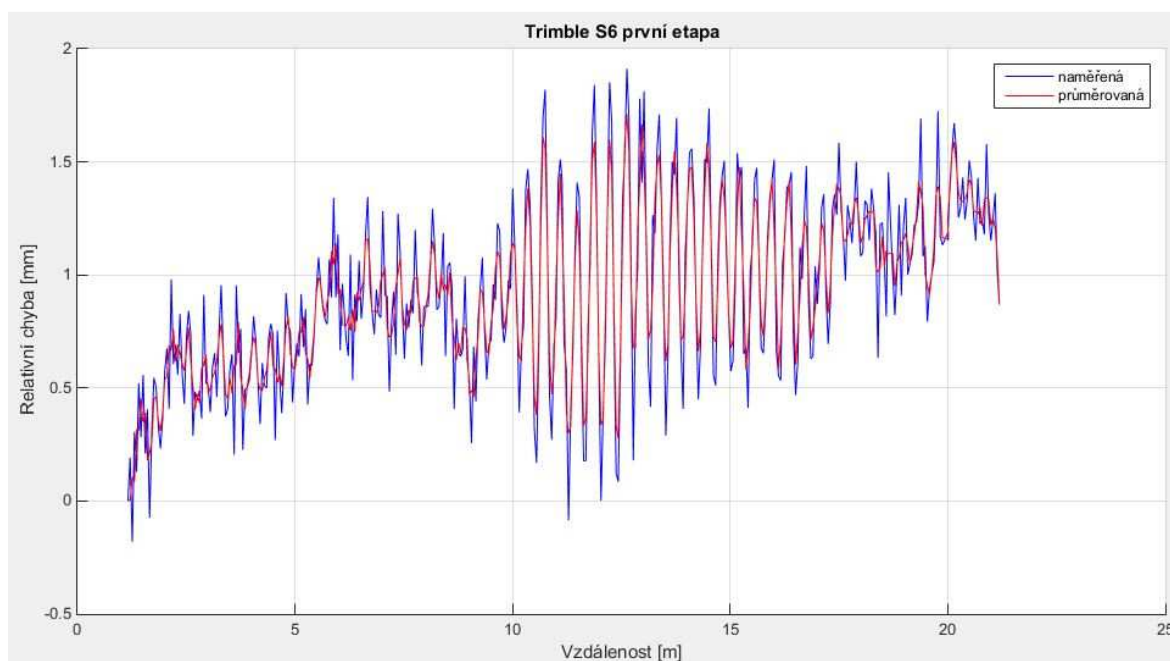
zobrazuje relativní chyby pro jednotlivé měřené úseky. V prvním řádku je měření na vztažný bod

Na zjištěné relativní chyby se aplikovala metoda klouzavého průměru ze 3 hodnot. Tím se zajistilo vyhlazení a plynulejší průběh křivky:

$$H_i = \frac{h_{i-1} + h_i + h_{i+1}}{3}, \quad (7)$$

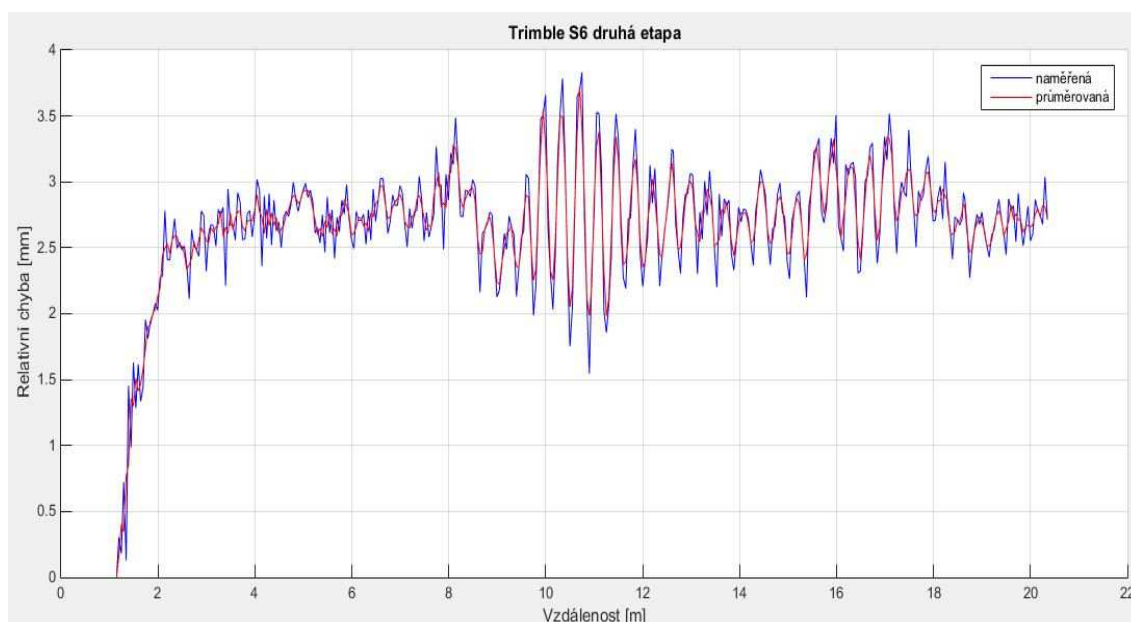
kde: H_i zprůměrovaná hodnota relativní chyby,
 h zprůměrované sousední relativní chyby.

Z měření na základně s interferometrem jsou hlavním výstupem grafy zobrazující relativní chyby vyhlazené metodou klouzavého průměru. Délky vynášené do grafu jsou rovny délce, které naměřil testovaný dálkoměr.



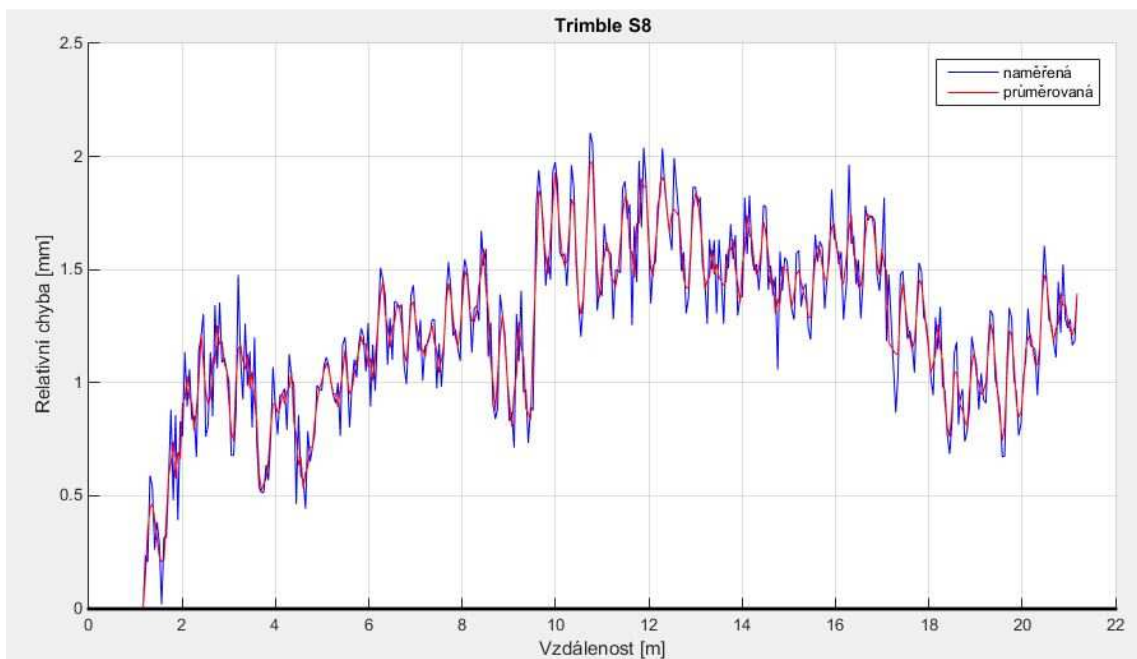
Graf 1: Relativní chyby přístroje Trimble S6 (první měření)

Při prvním měření totální stanicí Trimble S6 byly měřeny délky v rozmezí od 1,16 m do 21,19 m. Do výpočtu bylo zařazeno celkem 402 měření. Velikost relativní chyby se pohybuje v rozmezí 2 mm (Graf 1). Z důvodu změn velikosti chyb v intervalu 10 m až 17 m, oproti ostatním částem grafu, bylo navrženo opakovat měření. Z měřených hodnot je patrná periodičnost průběhu chyb, která je ale zatížena velkým množstvím náhodných chyb a šumu.



Graf 2: Relativní chyby přístroje Trimble S6 (druhé měření)

U druhého měření totální stanicí Trimble S6 byly měřeny délky v rozmezí od 1,14 m do 20,35 m. Do výpočtu bylo zařazeno celkem 386 měření. Velikost relativní chyby se pohybuje v rozmezí 4 mm (Graf 2). Z měřených hodnot je patrná periodičnost průběhu chyb, která je ale zatížena velkým množstvím náhodných chyb a šumu. Je patrné, že na začátku testování došlo ke zdatelnému zhoršení přesnosti měření. A proto se pro další zpracování nebudou brát v potaz počáteční, první 2 m měřené délky.



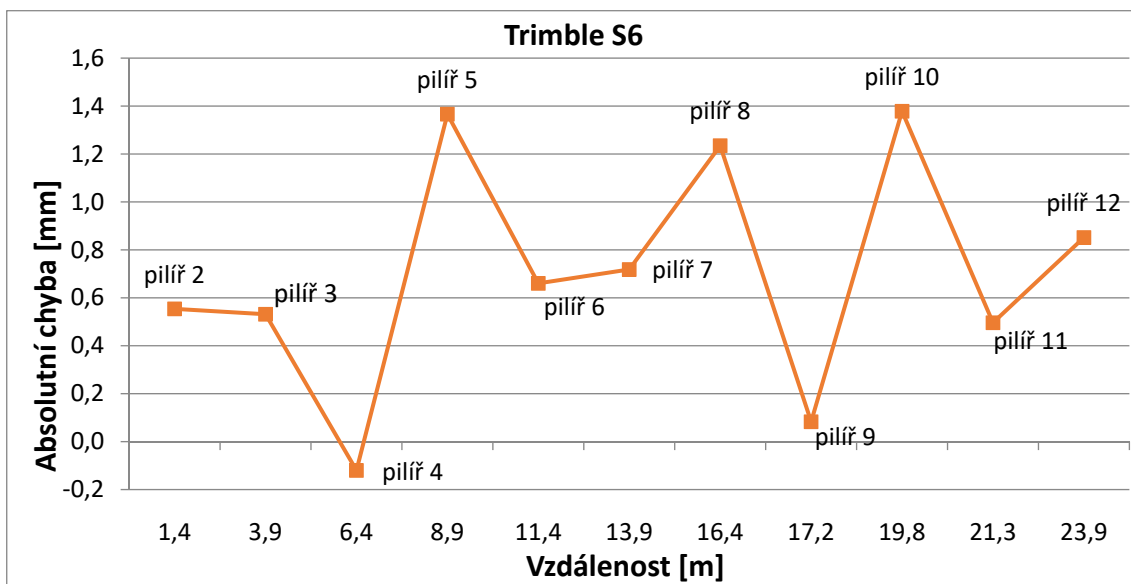
Graf 3: Relativní chyby přístroje Trimble S8

Totální stanicí Trimble S8 byly měřeny délky v rozmezí od 1,16 m do 21,18 m. Do výpočtu bylo zařazeno celkem 397 měření. Velikost relativní chyby se pohybuje v rozmezí 2 mm (Graf 3). Z měřených hodnot je patrná periodičnost průběhu chyb, která je ale zatížena velkým množstvím náhodných chyb a šumu. Ve zhruba polovině měření (9,5 m) je patrné, že došlo k fázovému skoku interferometru. Kvůli tomu došlo k patrnému posunu počátku měření a posunutí grafu.

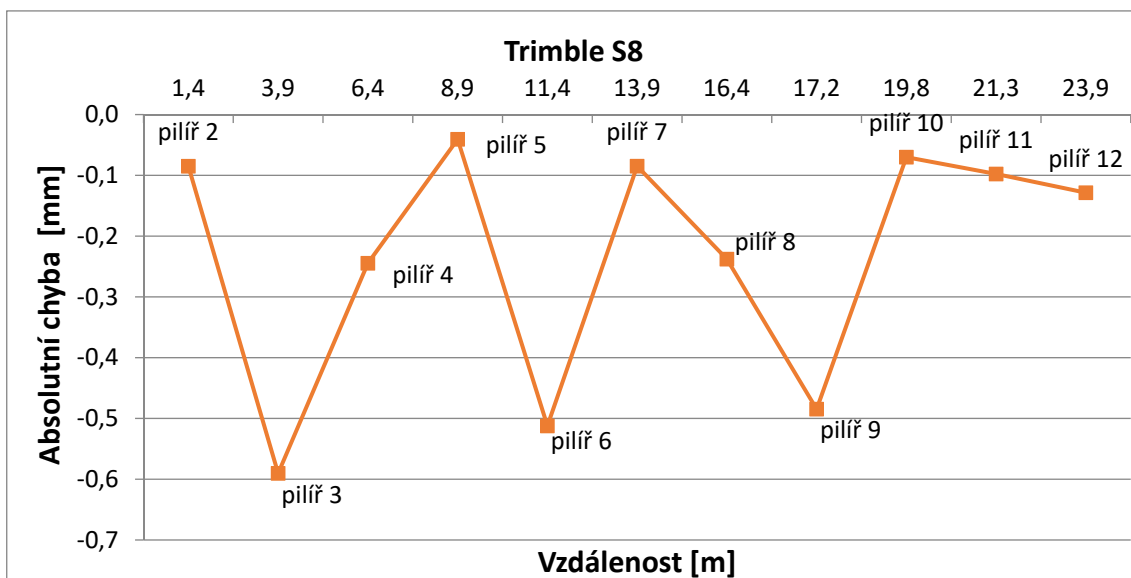
5.2 Zpracování a výpočet absolutních chyb

Z měření na pilířové základně se z vyexportovaných dat vyselektovaly naměřené zenitové úhly a šikmé délky. Šikmé délky se převedly na vodorovné. Měřené vzdálenosti z první a z druhé polohy dalekohledu se zprůměrovaly (celkem 102 naměřených délek). Výsledná délka byla opravena o součtovou konstantu hranolu a porovnána s referenční délkou k příslušnému pilíři. Rozdíl těchto délek je pak absolutní chyba.

Následující grafy znázorňují průběh absolutní chyby a testovaných dálkoměrů. Z grafů je patrné, že starší totální stanice Trimble S6 má dvakrát tolik větší absolutní chybu v porovnání s o generaci mladším přístrojem Trimble S8.



Graf 4: Absolutní chyby přístroje Trimble S6



Graf 5: Absolutní chyba přístroje Trimble S8

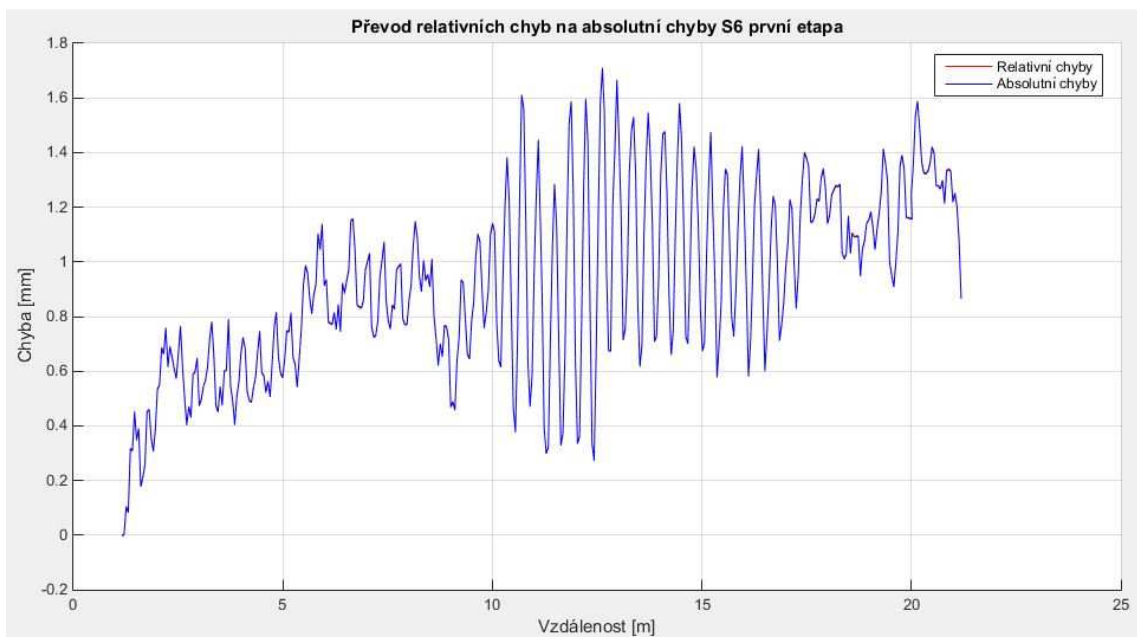
5.3 Převod relativních chyb na chyby absolutní

Aby bylo možné zavádět opravy délek a přístroje vzájemně porovnávat, je třeba převést (posunout) chyby relativní na chyby absolutní. Pro tento výpočet byl použit robustní průměr [9]. Jeho výpočet je iterativní. Relativní chyby jsou opravovány o posun a následně vstupují znova do dalšího kroku iterace. Rozdílům jsou pak přiřazovány váhy w_i . Výsledný posun je zobrazen na grafech níže:

$$w_i = \frac{1}{|\varepsilon_i - \Delta_i|}, \quad (8)$$

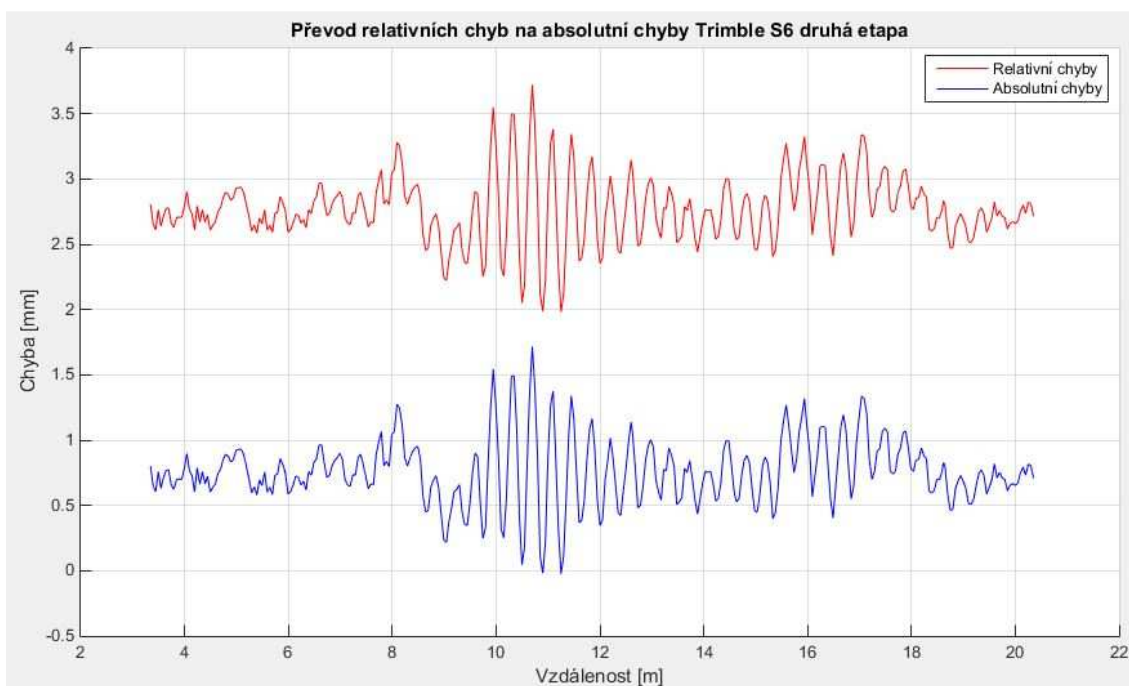
$$posun = \frac{\sum(\varepsilon_i - \Delta_i) * w_i}{\sum w_i}, \quad (9)$$

kde: ε_i relativní chyba pro danou délku (vyinterpolovaná z měřených hodnot),
 Δ_i absolutní chyba pro danou délku (změřená na pilířové základně),
 Σ suma chyb, ze kterých je počítán posun.

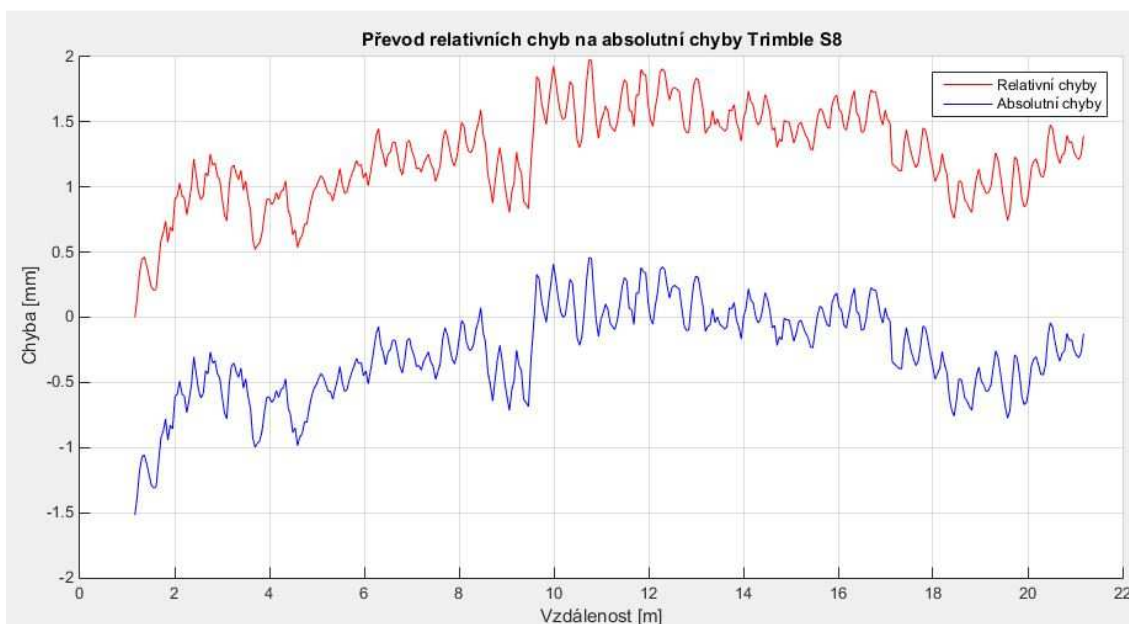


Graf 6: Posun relativní chyb na chyby absolutní pro Trimble S6 první etapu

U převodu chyb první etapy měření přístroje Trimble S6 (Graf 6) je patrné, že samotný posun na chyby absolutní je téměř nulový. U dalších dvou grafů č. 7 a 8 je patrné, že posun mezi daty je zhruba 2 mm.



Graf 7: Posun relativní chyb na chyby absolutní pro Trimble S6 druhou etapu



Graf 8: Posun relativní chyb na chyby absolutní pro Trimble S8

5.4 Určení opravné funkce pomocí Fourierovy transformace

Na převedené absolutní chyby lze aplikovat rychlou Fourierovu transformaci (Fast Fourier Transformation - FFT) [10]. Ta vytvoří harmonickou funkci, která pak reprezentuje průběh chybového modelu pro příslušný dálkoměr a umožňuje dopočet velikosti chyby pro libovolnou délku. Výpočet proběhl v softwaru Matlab, který funkci rychlé Fourierovy transformace obsahuje.

Fourierova transformace se aplikovala na průběh relativních chyb, který už byl převeden na chyby absolutní. Výstupem je soubor informací o vlnové délce, amplitud a fázových posunů. Z toho byly vybrány amplitudy, které měly větší hodnotu než zadanou mez. Mez byla pro oba přístroje volena 0,07 mm. Tyto hodnoty se pak použily do výsledné opravné funkce. Jelikož FFT neudává vertikální posun dat, tak se tento vertikální posun určil z manuálního výpočtu opravné funkce a automatizovaného výpočtu inverzní funkce FFT.

Harmonická funkce, která vyjadřuje chybu dálkoměru y_i lze zapsat dle vzorce [2]:

$$y_i = \sum_{j=1}^p A_j * \sin\left(\frac{2 * \pi}{T_j} * d_i + \varphi_j\right), \quad (10)$$

kde: p počet amplitud, které převyšují mez,
 A_j amplituda,
 T_j perioda,
 d_i počáteční fáze,
 φ_j měřená vzdálenost.

Vertikální posun se pak počítá dle vzorce [2]:

$$Y_0 = \frac{\sum_{j=1}^p (y_i^{FFT} - y_i)}{n}, \quad (11)$$

kde: n počet měřených délek,
 y_i^{FFT} chyba dálkoměru vypočtené FFT.

Oprava pro měřenou délku se pak spočte podle vzorce [2]:

$$oprava = Y_0 + \sum_{j=1}^p \left(A_j * \sin \left(\frac{2 * \pi}{T_j} (d_k - d_{počátek}) + \varphi_j \right) \right), \quad (12)$$

kde: $d_{počátek}$ oprava o počáteční vzdálenost měřená na interferometrické základně.

5.4.1 Parametry opravných funkcí

Z Fourierovy transformace byly získány jednotlivé parametry pro opravné funkce.

Tabulka 3: Parametry opravné funkce – Trimble S6 první etapa

Perioda [m]	Amplituda [m]	Fázový posun [rad]
20,1000	0,2163	3,4057
10,0500	0,1237	3,4625
6,7000	0,1509	3,0369
3,3500	0,0884	3,4446
2,5125	0,1024	3,5821
0,3865	0,0909	3,9878
0,3792	0,1575	-0,0022
0,3722	0,2097	2,6865

Tabulka 4: Parametry opravné funkce – Trimble S6 druhá etapa

Perioda [m]	Amplituda [m]	Fázový posun [rad]
0,3952	0,0803	-0,7107
0,3773	0,2069	0,5416
0,3689	0,1572	3,7540

Tabulka 5: Parametry opravné funkce – Trimble S8

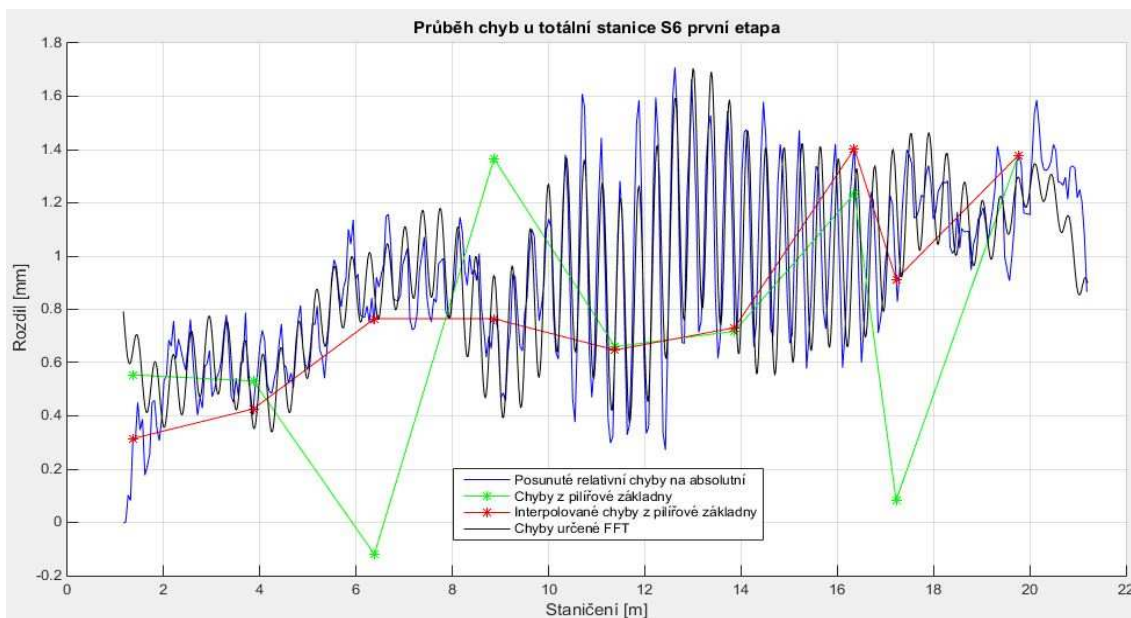
Perioda [m]	Amplituda [m]	Fázový posun [rad]
19,8500	0,3830	4,2056
4,9625	0,0811	1,2414
3,3083	0,1090	3,7020
2,4812	0,0818	3,6245
1,9850	0,0900	3,9601
1,5269	0,0740	3,4519
0,3676	0,0836	2,1045

5.4.2 Výsledný průběh chyb

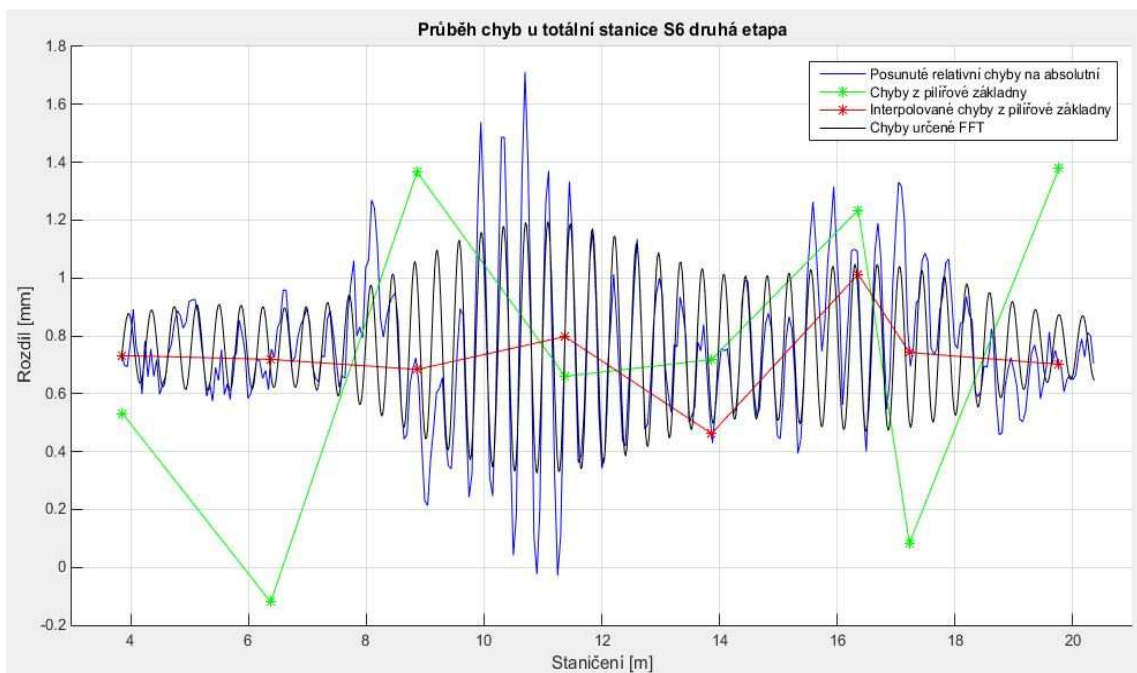
Na grafech níže (Graf 9 – Graf 11) jsou zobrazeny jednotlivé průběhy chyb pro testované dálkoměry. Modrou čarou jsou zobrazeny posunutá data z kalibrační dráhy na pilířovou základnu. Zelenou jsou pak zobrazena data naměřená na pilířové základně. Červeně jsou zobrazeny odchylky, které byly vyinterpolovány z naměřených dat na kalibrační základně a následně transformovány na naměřená data z pilířové základny. Černou čarou je pak zobrazen výsledný průběh opravné funkce vytvořené pomocí FFT.

Z výsledných hodnot (Tabulka 3 – 5, Graf 9 – 11) je patrné, že hlavní podíl na periodě chyb má jednotková délka o velikost 0,37 m. Nejlepší výsledky testu vykazuje druhá etapa měření přístroje Trimble S6, kde výsledný průběh chyb má konzistentní harmonický průběh. U první etapy měření přístroje Trimble S6 a Trimble S8 je na vzdálenosti cca 9,5 m patrný

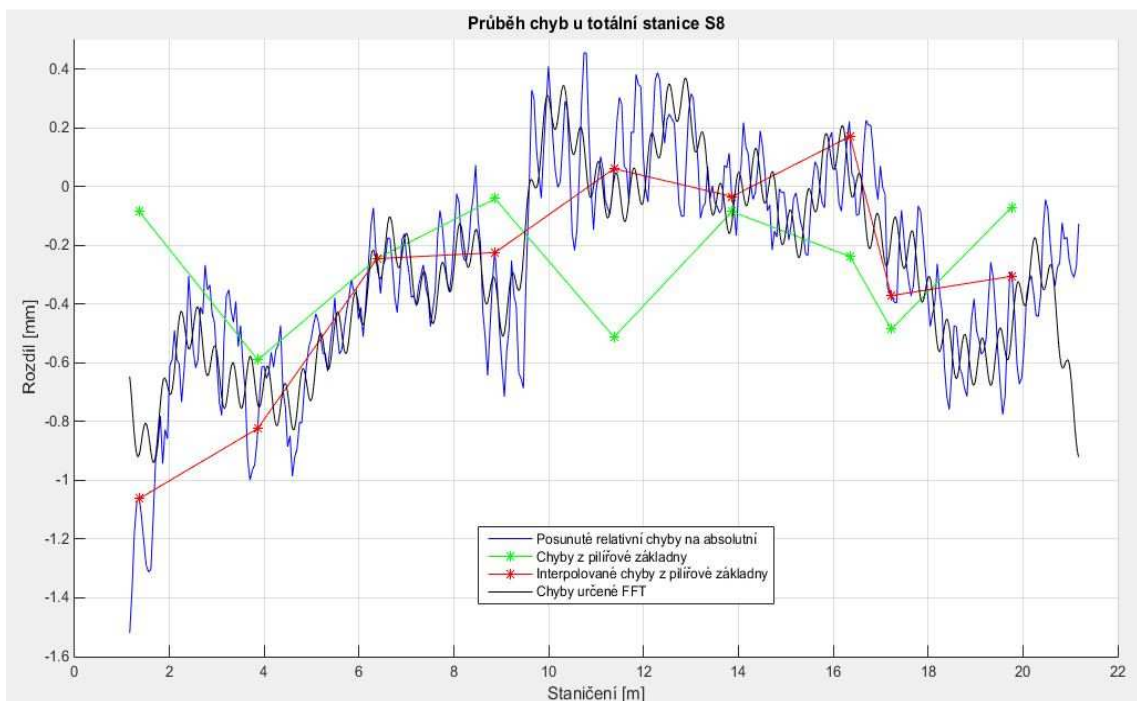
posun v datech, tato skutečnost může být vyvolána použitým interferometrem. Pro stanovení definitivní funkce by bylo vhodné test opakovat na jiné kalibrační dráze.



Graf 9: Průběh chybového modelu určené FFT pro přístroj Trimble S6 první etapy



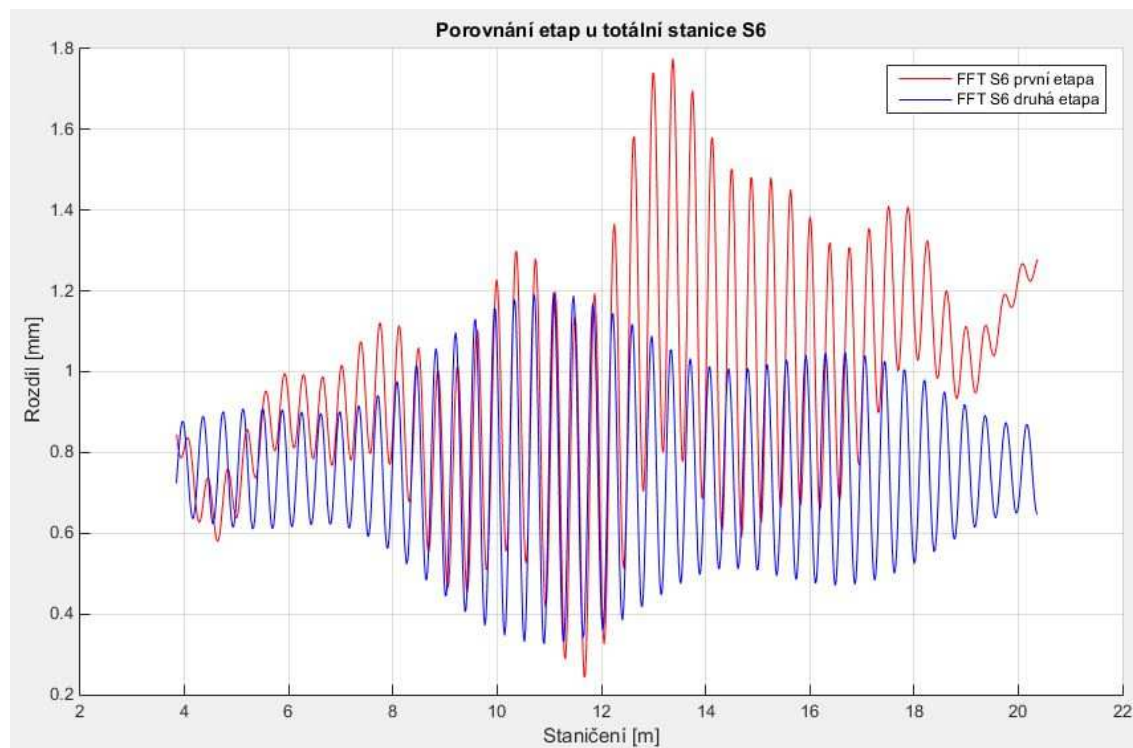
Graf 10: Průběh chybového modelu určené FFT pro přístroj Trimble S6 druhou etapu



Graf 11: Průběh chybového modelu určené FFT pro přístroj Trimble S8

5.5 Porovnání etap u totální stanice Trimble S6

Pro porovnání byla první etapa oříznuta o část začátku a konce měření z důvodu stejného rozsahu dat jako u druhé etapy.



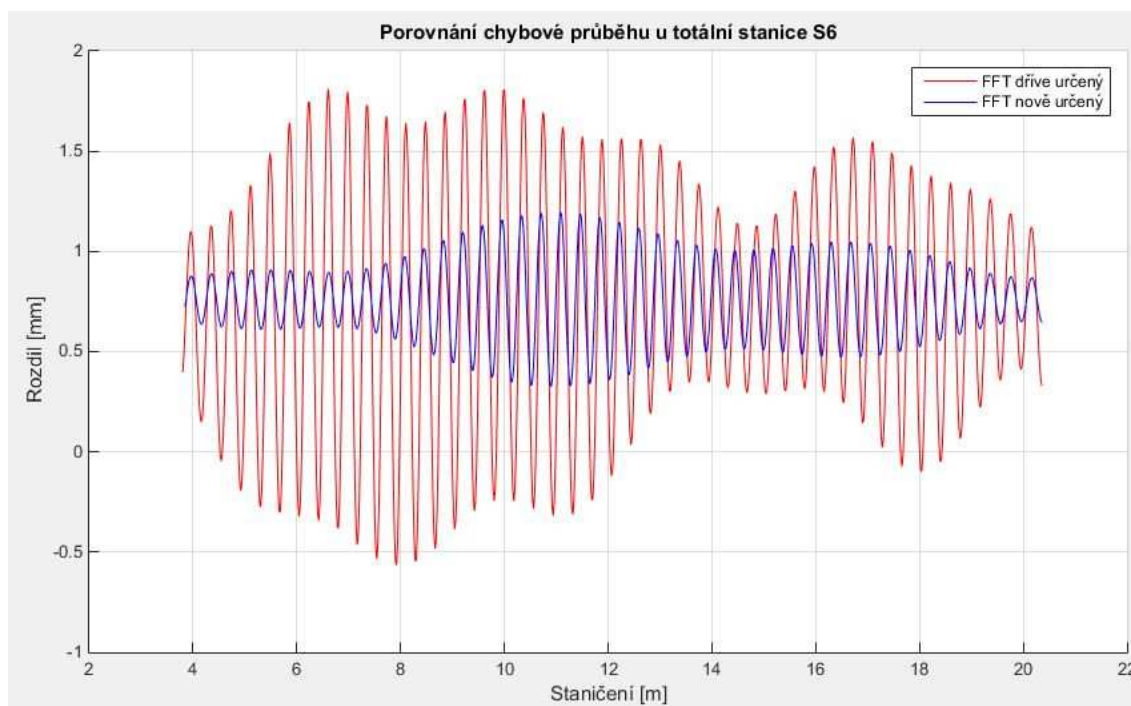
Graf 12: Porovnání etap u totální stanice S6

Jednotlivé etapy by si měly vzájemně odpovídat, což nenastalo. Důvodem může být časté vypadávání (ztrácení) signálu interferometru u první etapy. Obecně lze říci, že první etapa nevypadá tak, jak by se očekávalo a na vzdálenosti 12 m došlo pravděpodobně k posunu čtení na interferometru. U druhé etapy, která má pravidelný harmonický průběh, je to přesně naopak. Druhá etapa naplňuje očekávání a je považována za správnou.

5.6 Porovnání chybového modelu totálních stanic Trimble S6

Průběh chybového modelu totální stanice Trimble S6 již byl jednou určen v roce 2014 [11]. Data z již dříve určeného chybového modelu byla zkrácena tak, aby výsledný rozsah

funkce byl přibližně stejně dlouhý jako nově určený chybový průběh. K porovnání byla vybrána druhá etapa měření.



Graf 13: Porovnání chybového průběhu totální stanice S6 s již dříve určeným chybovým průběhem

Z grafu 13 je patrné, že křivky mají podobné znaky průběhu. Starší určení vykazuje mnohem větší rozsah chyb než nově určený průběh chyb. Perioda je u obou průběhů totožná. Velikost amplitudy chyb může být ovlivněna tím, že přístroj byl mezi testy servisován a byl mu aktualizován firmware, který může mít vliv na funkci dálkoměru.

6. Závěr

Totální stanice Trimble S6 a S8 byly testovány za účelem zjištění chybového průběhu měření délek v laboratorních podmínkách. U dálkoměru Trimble S6 se pak výsledný chybový průběh porovnal s již jednou určeným chybovým průběhem. Měření probíhalo na kalibrační dráze s interferometrem a na laboratorní pilířové základně.

Zjištěný chybový průběh u přístroje Trimble S6 se pohybuje v intervalu od 0,3 mm do 1,2 mm. Vzhledem k tomu, že dálkoměr má dle výrobce dosahovat přesnosti 1 mm + 1 ppm, tak velikosti chyb splňují uváděnou přesnost. Při porovnání se starším určením chyb je patrné, že dálkoměr nově dosahuje daleko lepších výsledků. To může být způsobeno servisní kontrolou a aktualizací firmwaru.

U totální stanice Trimble S8 výrobce garantuje přesnost 0,8 mm + 1 ppm a zjištěný průběh chyb se pohybuje v rozmezí -0,4 mm až 0,9 mm, tedy velikosti chyb také splňují uvedenou přesnost.

Z vytvořených opravných funkcí lze pak získávat opravy pro měření vzdáleností v podmínkách odpovídajících uzavřenému prostoru laboratoře. Při zavádění těchto oprav k měřeným délkám pak dojde ke zdatelnému zpřesnění měření.

7. Seznam zdrojů

- [1] J. M. RÜEGER. *Electronic distance measurement: an introduction*. 3rd totally rev. ed. Berlin: Springer, 1990. ISBN 978-354-0515-234.
- [2] BRAUN, J. *Inovace přesných měření inženýrské geodézie v průmyslu*. Praha, 2016. Disertační práce. FSv ČVUT v Praze. Vedoucí práce Prof. Ing. Martin Štroner, Ph.D.
- [3] *Totální stanice Trimble S6* [online]. [cit. 2017-05-08].
Dostupné z: <http://www.trimble.com/Survey/trimbles6.aspx>
- [4] *Totální stanice Trimble S8* [online]. [cit. 2017-05-08].
Dostupné z: <http://www.trimble.com/Survey/trimbles8.aspx>
- [5] *Teploměr, vlhkoměr a barometr* [online]. [cit. 2017-05-08].
Dostupné z: http://www.cometsystem.cz/produkty/snimace-a-regulatory-teploty-vlhkosti-tlaku/t7418-interierovy-snimac-teploty-vlhkosti-a-atmosferickeho-tlaku-s-vystupem-rs485/reg-T7418#technical_dataa
- [6] JOSKA, M. *Testování přesnosti měření délek na odrazné štítky přístroji Topcon GPT-7501*. Praha, 2016. Bakalářská práce. FSv ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Braun, Ph.D.
- [7] *Renishaw: Měřicí systém ML10* [online]. [cit. 2017-05-26].
Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/merici-system-ml10--6804>.
- [8] PĚTNÍK, V. *Automatická kalibrace elektrooptického dálkoměru*. Praha, 2015. Bakalářská práce. FSv ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Vyskočil, Ph.D.
- [9] HAMPACHER, M. a ŠTRONER, M. *Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04900-6.
- [10] REKTORYS, K. A kolektiv. *Přehled užití matematiky*. 7. vyd. Praha: Prometheus, 2000. ISBN 8071961795.
- [11] BRAUN, J. - ŠTRONER, M. - URBAN, R. – DVORÁČEK, F.: *Suppression of Systematic Errors of Electronic Distance Meters for Measurement of Short Distances*. *Sensors - Open Access Journal*, 2015, roč. 15, č. 8, s. 19264-19301. ISSN 1424-8220.

8. Seznam obrázků

Obr. 1: Princip impulsního dálkoměru [1]	9
Obr. 2: Princip fázového dálkoměru [1].....	10
Obr. 3: Totální stanice Trimble S6 HP [3]	12
Obr. 4: Totální stanice Trimble S8 HP [4]	14
Obr. 5: Trojnožka Leica	16
Obr. 6: Magnetická zarážka [6].....	17
Obr. 7: Hranol Leica GMP101.....	17
Obr. 8: Trn Leica GZR3.....	18
Obr. 9: Teploměr, vlhkoměr, barometr Comet [5].....	18
Obr. 10: Kalibrační dráha pohled od interferometru [6].....	19
Obr. 11: Schéma interferometru [1].....	20
Obr. 12: Interferometr Renishaw ML10 [6].....	20
Obr. 13: Vozík [6].....	21
Obr. 14: Schéma laboratorní pilířové základny [2].....	23
Obr. 15: Pilíř s centrační deskou	23

9. Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozměry pilířové základny [2].....	24
Tabulka 2: Ukázka určování relativní chyby z naměřených dat	26
Tabulka 3: Parametry opravné funkce – Trimble S6 první etapa	35
Tabulka 4: Parametry opravné funkce – Trimble S6 druhá etapa.....	36
Tabulka 5: Parametry opravné funkce – Trimble S8.....	36

10. Seznam grafů

Graf 1: Relativní chyby přístroje Trimble S6 (první měření).....	27
Graf 2: Relativní chyby přístroje Trimble S6 (druhé měření).....	28
Graf 3: Relativní chyby přístroje Trimble S8.....	29
Graf 4: Absolutní chyby přístroje Trimble S6.....	30
Graf 5: Absolutní chyba přístroje Trimble S8.....	30
Graf 6: Posun relativní chyb na chyby absolutní pro Trimble S6 první etapu	32
Graf 7: Posun relativní chyb na chyby absolutní pro Trimble S6 druhou etapu	33
Graf 8: Posun relativní chyb na chyby absolutní pro Trimble S8	33
Graf 9: Průběh chybového modelu určené FFT pro přístroj Trimble S6 první etapu.....	37
Graf 10: Průběh chybového modelu určené FFT pro přístroj Trimble S6 druhou etapu.....	38
Graf 11: Průběh chybového modelu určené FFT pro přístroj Trimble S8	38
Graf 12: Porovnání etap u totální stanice S6	39
Graf 13: Porovnání chybového průběhu totální stanice S6 s již dříve určeným chybovým průběhem.....	40

11. Seznam příloh

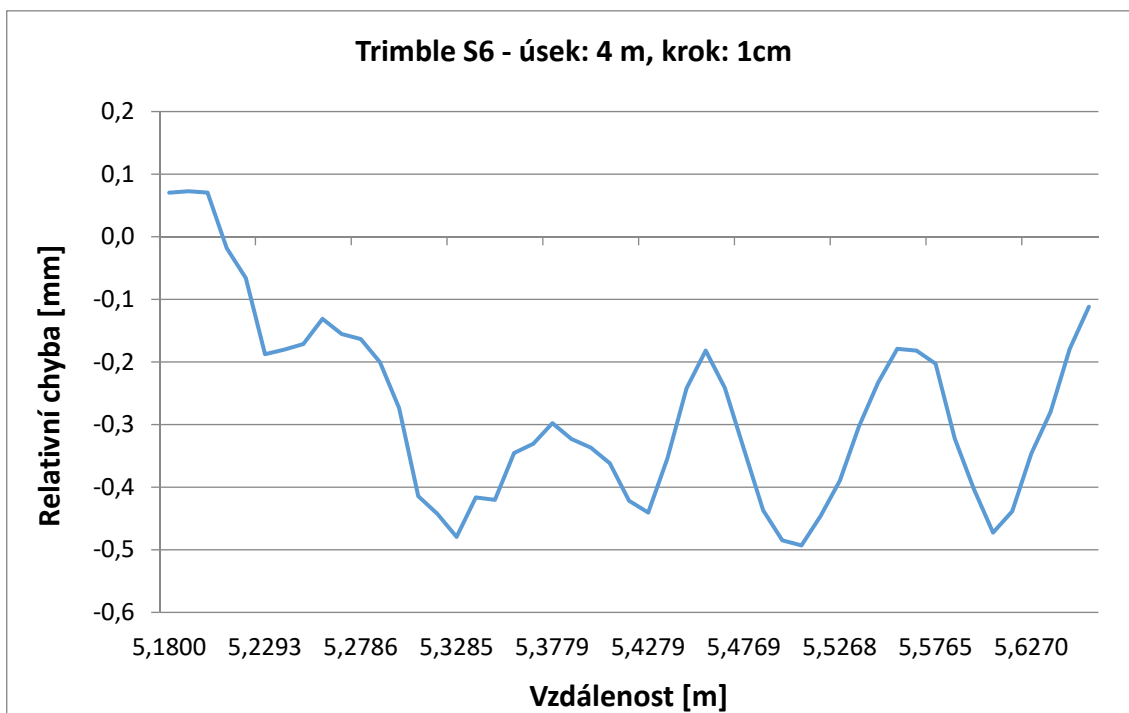
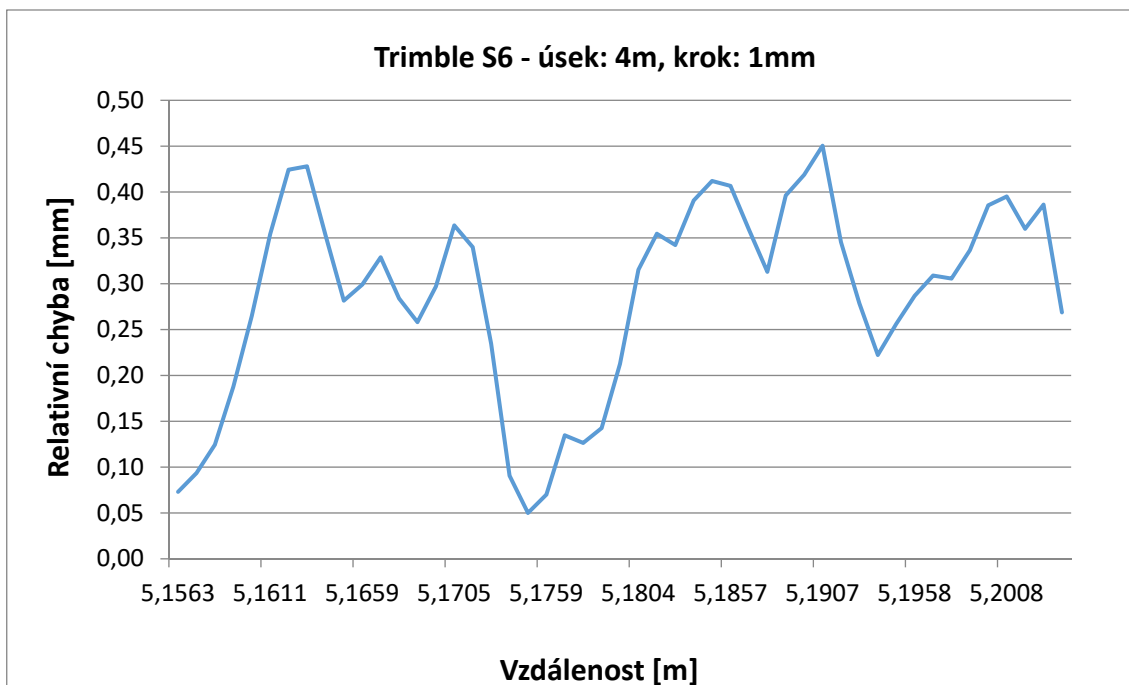
11.1 Seznam tištěných příloh

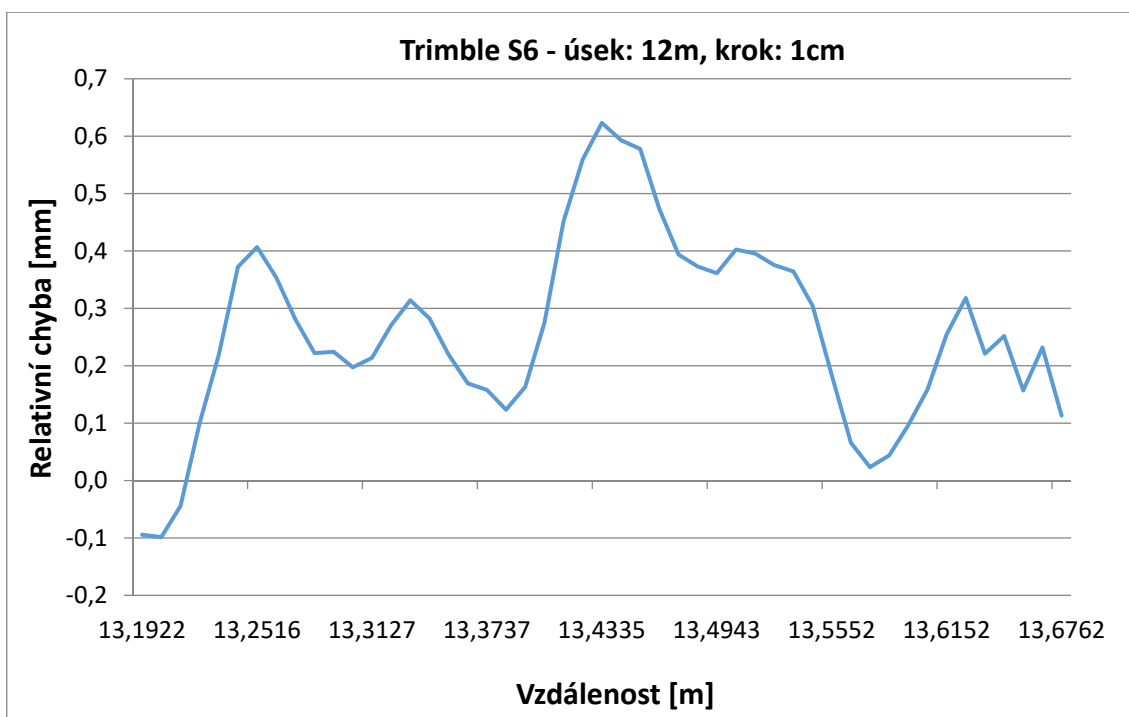
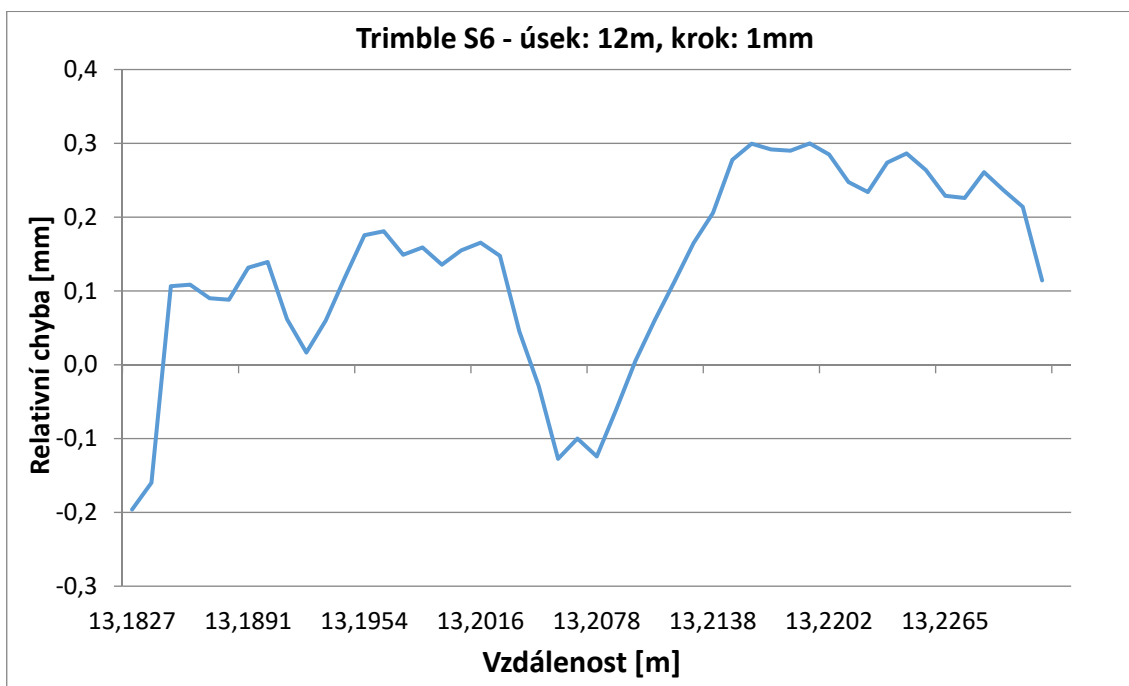
Příloha 1: Grafy z měření po úsecích pro totální stanici S6.....	45
Příloha 2: Grafy z měření po úsecích pro totální stanici S8.....	48

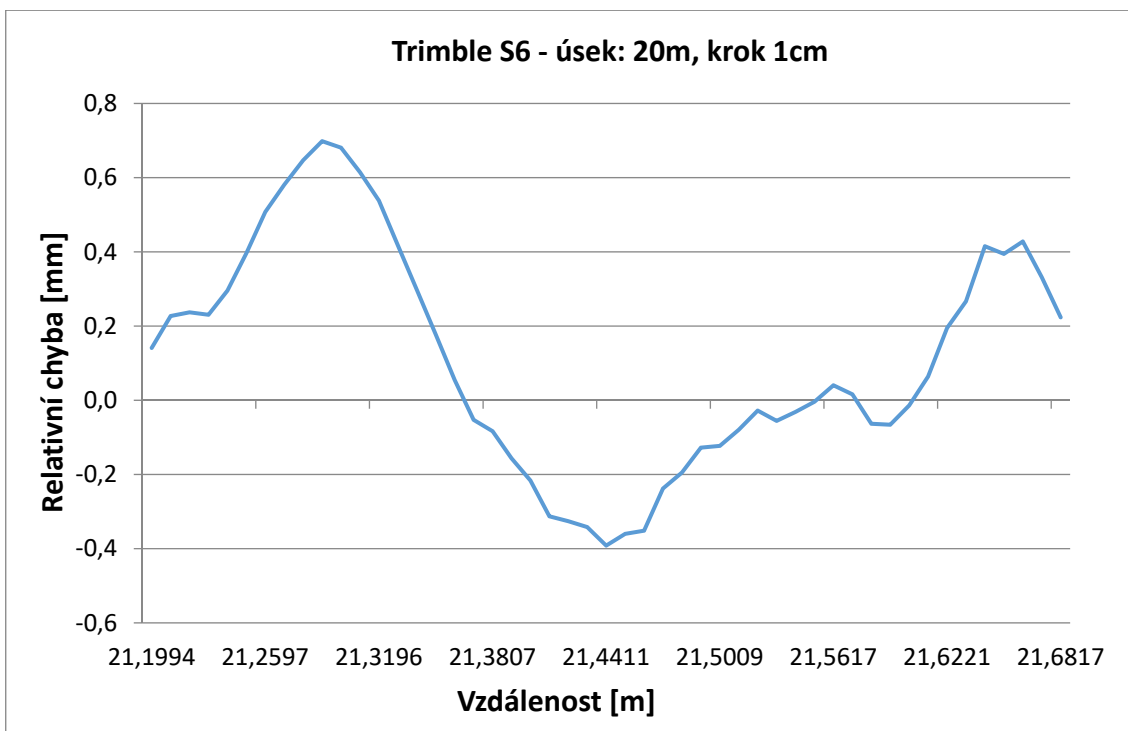
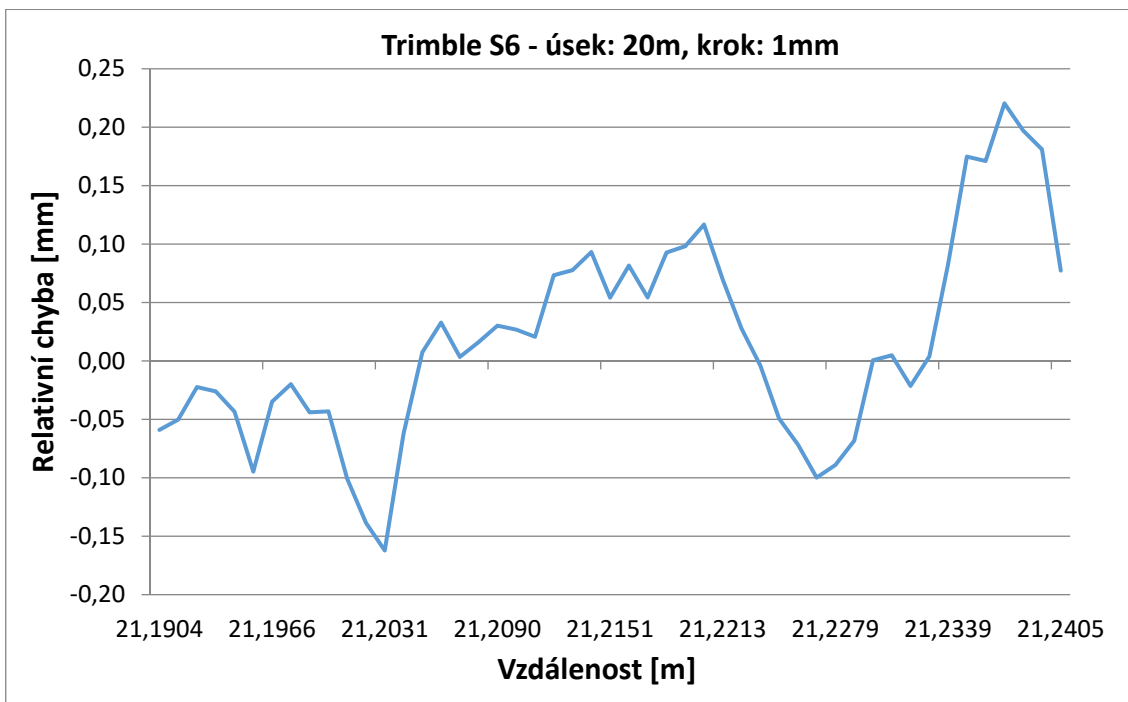
11.2 Seznam elektronických příloh

Příloha 3: Naměřená data z kalibrační základny	
Příloha 4: Naměřená a zpracovaná data z pilřřové základny	
Příloha 5: Výpočetní skript s daty	

Příloha 1: Grafy z měření po úsecích pro totální stanici S6







Příloha 2: Grafy z měření po úsecích pro totální stanici S8

