

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2020

Bc. Jiří Beneš



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ PARAMETRŮ GNSS PŘIJÍMAČŮ

MEASUREMENT OF GNSS RECEIVER PARAMETERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Beneš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Jílek, Ph.D.

BRNO 2020

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Jiří Beneš

ID: 173610

Ročník: 2

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Měření parametrů GNSS přijímačů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je návrh metodiky měření parametrů GNSS přijímačů pro účely mobilní robotiky a její reálné otestování na dostupných GNSS přijímačích. V práci je možné využít stávající přípravy, které bude nutné pro účely této práce modifikovat.

1. Proveďte rešerši na téma stanovení parametrů (především chyb měření) GNSS přijímačů pro statický i dynamický režim měření.
2. Seznamte se s přijímači určenými k testování.
3. Na základě rešerše navrhnete metodiku měření umožňující věrohodně stanovovat významné parametry GNSS přijímačů pro účely mobilní robotiky.
4. Upravte stávající dostupné přípravy a implementujte potřebný software tak, aby bylo možné dostupné GNSS přijímače měřit ve statickém i dynamickém režimu podle navržené metodiky.
5. Proveďte měření ve statickém a dynamickém režimu, naměřená data zpracujte.
6. Vyhodnoťte parametry předložených GNSS přijímačů, které jsou významné pro použití v mobilní robotice.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

KAPLAN, Elliott D. a C. HEGARTY. Understanding GPS: principles and applications. Druhé vydání. Boston: Artech House, 2006. ISBN 1-58053-894-0.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 1.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Jílek, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cílem této práce je realizace metodiky vhodné ke stanovení statických a dynamických parametrů GNSS přijímačů. Práce začíná rešerší GNSS, především možnostmi vyhodnocení pozice a přidruženými nejistotami. Následující kapitola obsahuje rešerši GNSS přijímačů, datových toků a možností vyhodnocení parametrů měření. Souhrn získaných znalostí je poté využit k rozvržení měření, realizaci experimentu a metrik vyhodnocení. Zvolená hlavní vyhodnocující metrika je váhovaný histogram odchylek s rozšířenou informací. Aplikace této metriky na měření GNSS přijímačů rozšíří informaci o přesnosti přijímačů na celý obor hodnot přesnosti měření. Tato metrika také podává doplňující statistické informace o průběhu měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

GNSS, Real Time Kinematics, Přesnost, Preciznost, Správnost, Váhovaný histogram, DOP

ABSTRACT

Goal of this thesis is to propose and realize a viable method to determine static and dynamic parameters of GNSS receivers. Thesis begins with research of GNSS, foremostly determining position and associated uncertainties of measurement. Following chapter contains research of GNSS receivers, data flow and methods of evaluating parameters of such measurements. Summary of obtained information is then used to schedule measurements, assemble experiment and create evaluating metrics. Main selected evaluating metric is weighted histogram of deviations with extended information. Application of proposed metrics onto measurements of GNSS receivers augments available information of GNSS receiver accuracy for whole range of values. This metrics also supplies additional statistical information about course of measurement.

KEYWORDS

GNSS, Real Time Kinematics, Accuracy, Precision, Trueness, Weighted Histogram, DOP

BENEŠ, Jiří. *Měření parametrů GNSS přijímačů*. Brno, 2020, 103 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Jílek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Měření parametrů GNSS přijímačů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno 1. 6. 2020

.....
podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Tomáši Jílkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno 1. 6. 2020

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	17
1 Principy GNSS	19
1.1 Určování polohy	20
1.2 Chyby měření	23
1.2.1 Chyby uživatelského segmentu	27
1.3 Zpracování informace	28
1.3.1 GNSS přijímače	32
1.4 Možnosti vyhodnocení	37
2 Realizace experimentu	43
2.1 Metodika měření	46
2.2 Pracovní postup	48
2.3 Zpracování dat	51
3 Vyhodnocení	59
3.1 Stacionární měření	59
3.2 Dynamická měření	65
Závěr	67
Literatura	69
Seznam symbolů, veličin a zkratk	73
Seznam příloh	75
A Obsah přiloženého CD	77
B Grafy stacionárních měření	79
C Grafy dynamických měření	97

Seznam obrázků

1.1	Tvorba satelitního signálu a jeho složky	20
1.2	Princip trilaterace	21
1.3	Dilution Of Precision	24
1.4	User Equivalent range Errors	26
1.5	Chyby dynamických měření GNSS	28
1.6	Ilustrace modelů planety	29
1.7	Geodetický model planety	30
1.8	Ilustrace ECEF a LTP	31
1.9	Ovládací rozhraní Piksi3	34
1.10	Schéma komunikace protokolu NTRIP	35
1.11	Ukázka zprávy protokolu SBP	36
1.12	Dekompozice parametru přesnosti	39
1.13	Srovnání koeficientů korelace	41
2.1	Rozbočovač GNSS	44
2.2	Síťová topologie experimentu	48
2.3	Schéma parseru protokolu SBP	51
2.4	Záznam surových naměřených dat	52
2.5	Záznam hodnot Flag v čase	53
2.6	Časový vývoj hodnot souřadnic East, North	53
2.7	Souřadnice East, North v rovině	54
2.8	Kumulativní histogram hodnot RMS	55
2.9	3D histogram pozice East, North v rovině	56
2.10	Průběh hodnoty Height v čase	57
2.11	Průběh hodnoty Heading v čase	57
B.1	Measurement ID 1	80
B.2	Measurement ID 2	81
B.3	Measurement ID 3	82
B.4	Measurement ID 4	83
B.5	Measurement ID 5	84
B.6	Measurement ID 6	85
B.7	Measurement ID 7	86
B.8	Measurement ID 8	87
B.9	Measurement ID 9	88
B.10	Measurement ID 10	89
B.11	Measurement ID 11	90
B.12	Measurement ID 12	91
B.13	Measurement ID 13	92

B.14 Measurement ID 14	93
B.15 Measurement ID 15	94
B.16 Measurement ID 16	95
C.1 Measurement ID 1	98
C.2 Measurement ID 2	99
C.3 Measurement ID 3	100
C.4 Measurement ID 4	101
C.5 Measurement ID 5	102
C.6 Measurement ID 6	103

Seznam tabulek

1.1	User Equivalent Range Errors	27
1.2	Datové formáty GNSS	32
1.3	Parametry přijímačů	33
2.1	Parametry splitterů GNSS	44
2.2	Sledované jevy	46
2.3	Plánovaná měření	47
3.1	Tabulka provedených statických měření	61
3.2	Statické parametry Piksi3	62
3.3	Statické parametry Trimble BX 982	63
3.4	Statické parametry Trimble BX 992	64
3.5	Tabulka provedených dynamických měření	65
3.6	Tabulka parametrů dynamických měření	66

Úvod

Měření pozice je úloha, při které zjišťujeme umístění zkoumaného předmětu. Pozici můžeme určovat vůči vztažné soustavě nebo předmětům nacházejícím se v této soustavě. Měření pozice je důležitou součástí úlohy sebelokalizace. Vyřešení úlohy sebelokalizace je nezbytnou součástí operace každého autonomního prostředku a bez vyřešení této úlohy se v daném prostředí nelze bezpečně pohybovat.

Podle volby vztažné soustavy můžeme měření pozice rozdělit na absolutní a relativní. Absolutní pozice je uváděna v nezávislé soustavě. Přístroj s absolutní indikací pozice vždy indikuje bod v již existující soustavě. Relativní pozice vzniká a zaniká s činností prostředku. Přístroj s relativním vyhodnocením pozice po aktivaci zpravidla indikuje počátek souřadného systému. Například u pozemního kolového robota je relativní pozice určena pomocí odometrie a absolutní pozice s využitím systému GNSS.

Každá metoda určení polohy má svá specifika. Systém GNSS pro svou funkci vyžaduje vysílač signálu, přenosové médium a přijímač signálu. Vysílačem jsou satelity na Zemské orbitě, přenos signálu zajišťuje atmosféra a přijímač je sestava tvořená anténou a výpočetní jednotkou. Přijímače systému GNSS mohou pracovat v různých režimech. Vyhodnocení pozice můžeme provést v singulárním i diferenciálním režimu. Singulární režim je méně náročný a nedosahuje přesnosti diferenciálních měření. Diferenciální měření mají vyšší nároky na potřebné vybavení.

Realizace zmíněných bloků GNSS není zcela ideální. Jednotlivé bloky mají vlastní chybu, kterou zanáší do měření. Zpravidla se jedná o chybu interní i externí. Tato diplomová práce se zaměřuje na klasifikaci parametrů ovlivňujících měření pozice při stacionárním a dynamickém měření a kvantifikaci jimi způsobené chyby měření. Hlavním očekávaným výstupem práce je rozšířená tabulka přesností vybraných přijímačů GNSS.

1 Principy GNSS

Global Navigation Satellite System je sdružující název všech satelitních navigačních systémů. První satelitní systém uvedený do provozu je americký Global Positioning System (GPS). Jeho činnost byla zahájena v roce 1978.

Zpočátku se jednalo o čistě vojenský projekt, pro účely navigace jednotek, munice, vozidel. Rozvoj technologie umožnil duální přístup zvaný Selective Availability (SA). Armádní přijímače dosahovaly přesnosti desítek cm, civilní sektor měl přístup pouze k datům obsahující pseudonáhodný šum. Tento uměle přidaný šum způsoboval fluktuaci měřené pozice až o desítky metrů. Díky SA mohl navigační systém používat jak vojenský, tak civilní sektor současně. S rozvojem technologií a pokrokem automatizace začal civilní sektor vyžadovat přesná poziční data pro ekonomické i osobní účely, například pro navigaci vozidel. Požadavky na přesnost určování polohy narůstaly a tak vzniklo několik metod zlepšení přesnosti. Příkladem jsou metody s přidanou informací jako Satellite Based Augmentation System (SBAS) a diferenciální metody výpočtu pozice Differential GNSS (DGNSS) nebo Real-Time Kinematics (RTK).

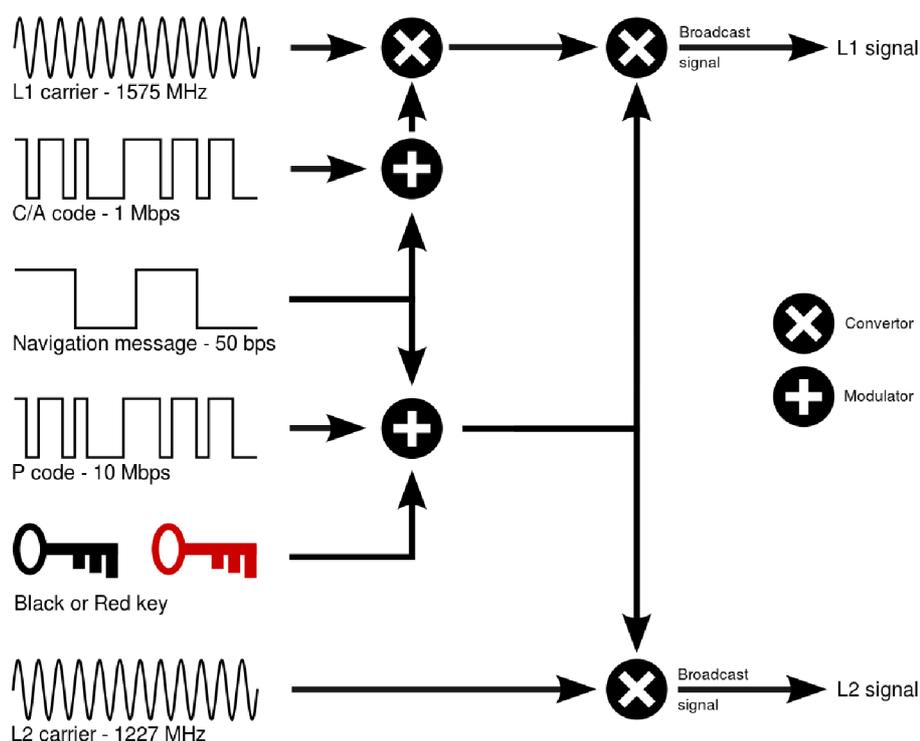
GNSS původně tvořila jedna síť satelitů ve správě americké armády. Nyní se na orbitě nachází čtyři satelitní systémy s globálním významem: GPS, GLONASS, Galileo a Beidou, které náleží Americe, Rusku, Evropě a Číně respektive. GPS a GLONASS jsou úplné soustavy zajišťující globální pokrytí s 27 respektive 24 funkčními satelity. Galileo a Beidou předpokládají dokončení sítě v roce 2020. Obecně se satelity nachází na střední orbitě Země, ve vzdálenosti přibližně 20,000 km od povrchu s inklinací nad 50° a periodou přibližně 12 h. Satelity GPS se nachází 20,200 km od povrchu s inklinací 55° a periodou 11 h 58 m. Satelity GLONASS se nachází 19,100 km od povrchu s inklinací $64,8^\circ$ a periodou 11 h 15 m.

Klíčové komponenty satelitů jsou atomové hodiny pro velmi přesné určení času, vysílací antény a zdroj napájení. Vzhledem k tomu, že pozice se určuje podle času, který uplynul od vyslání po přijetí zprávy, je naprosto nezbytné aby referenční čas, udávaný hodinami na palubě satelitu, vykazoval maximální stálost a přesnost. Dalším nezbytným vybavením satelitu je anténa, která zajišťuje samotnou komunikaci. Je vhodné zmínit, že energie signálu vysílaného moderními satelity je přibližně 500 W [7]. Tato hodnota je shora omezena maximální možnou energetickou náročností procesu, satelity jsou zpravidla napájeny solárními panely. Zdola je omezena minimální možnou detekovatelnou úrovní nad prahem šumu.

Signál vysílaný satelity v současnosti sestává z více složek. Základem přenosu je nosná frekvence. V současnosti existuje až 5 frekvenčních pásem pro přenos, v rozmezí od 1 do 2 GHz. Navigační zpráva tvoří samotný informační střed celé komunikace. Obsahuje informaci o pozici satelitu, vysílaný čas a přibližnou pozici

ostatních satelitů. Navigační zpráva je, podle vybraného pásma, nanesena na pří-
 davný signál Civilian Access (C/A) [5] nebo Precise (P (Y)). Signály C/A a P (Y)
 slouží k identifikaci satelitů a vybraného frekvenčního pásma. Informace navigační
 zprávy a přídavných signálů je modulována na samotnou nosnou frekvenci.

V současnosti se pro určení pozice používají všechny tři frekvenční složky přená-
 šeného signálu. Navigační zpráva slouží pro odhad výpočtu pozice a získání přehledu
 o aktuálním stavu satelitní konstelace. Informace obsažené v signálech C/A a P (Y)
 slouží pro zrychlení a zlepšení orientace přijímače v prostředí. Samotnou modulační
 frekvenci používají přijímače pro zpřesnění výpočtu pozice.

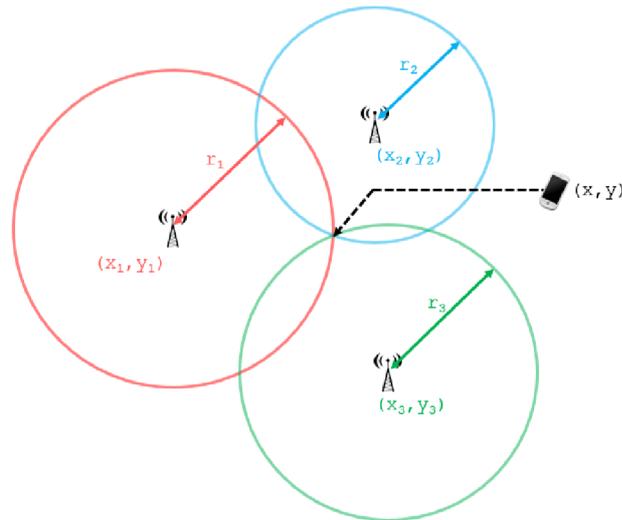


Obr. 1.1: Tvorba satelitního signálu a jeho složky [24]

1.1 Určování polohy

Z topologického hlediska GNSS tvoří síť satelitů na nízké negeostacionární orbitě
 Země. Satelity jsou rozmístěny tak, aby z každého bodu na planetě byly viditelné
 minimálně čtyři v každý okamžik. To z důvodu, že pro úspěšné určení pozice v
 3D souřadném systému jsou zapotřebí přinejmenším čtyři satelity. Princip určování
 polohy pomocí satelitního systému nazýváme trilaterace.

Princip trilaterace je následující. Budeme-li uvažovat, že signál se šíří všemi směry stejně rychle, potom signál vyslaný ze satelitu bude tvořit kuloplochu. Průsečík dvou kuloploch tvoří kružnici. Průsečík se třetí kuloplochou vytne na této kružnici dva body a průsečík se čtvrtou kuloplochou vybere ze dvou vzniklých bodů právě jeden. Takto vybraný bod je řešením úlohy určení pozice přijímačem GNSS umístěným v obecném prostoru. V případě Země jednu kuloplochu tvoří samotným povrchem planety a informace čtvrtého satelitu používáme pro stanovení časové souřadnice.



Obr. 1.2: Princip trilaterace [27]

Typy signálů a přesností lokalizace

Režimů měření pozice pomocí GNSS je v současnosti široké spektrum. Pozici můžeme měřit s jedním i více přijímači. Metody využívající jeden přijímač obecně nedosahují tak kvalitních výsledků, jaké nabízí metody s více přijímači, ale kladou menší nároky na koncové vybavení. Režimy se dvěma přijímači jsou podstatně přesnější díky možnosti diferenciálního měření, ale požadavky na množství vybavení jsou vyšší. V současnosti i měření s jedním přijímačem nabízejí režimy funkce, které se svou přesností blíží měřením s více přijímači. Spolehlivost těchto měření je omezená, výhodou těchto měření je potřeba pouze jednoho přijímače. Příkladem režimů pro jeden přijímač jsou Single Point Positioning (SPP) a Precise Point Positioning (PPP) a skupina rozšiřujících systémů. Velmi často se setkáváme s využitím Satellite Based Augmentation System (SBAS).

Satellite Based Augmentation System je metoda zlepšení měření pozice dodáváním sekundárních informací o satelitní soustavě. Toto rozšíření satelitní lokalizace

je zajišťováno sekci geostacionárních satelitů. Satelity SBAS, kromě základních dat, předávají navíc informace o posuvu času satelitních hodin, efemerid nebo o aktuálním stavu ionosféry. Metoda vznikla za účelem zlepšení navigace v letectví a námořnictví. V době, kdy existují diferenciální metody, je stále užitečná pro přijímače, které nemají přístup k referenční stanici, a přijímačům s referencí umožňuje rychlejší konvergenci řešení.

Diferenciální měření

Základem Differential Global Navigation Satellite System (DGNSS) je síť pozemních stanic, u kterých je známa přesná pozice. Výpočet přesné pozice může být proveden pomocí samostatných geodetických metod nebo diferenciálních GNSS měření s dlouhým intervalem eliminujícím šum. Tyto stanice pak v běžném provozu počítají svou pozici podle dat obdržených ze satelitů a porovnávají právě změřenou hodnotu se známou referenční hodnotou. Rozdíl hodnot mezi aktuální a známou pozicí je výchozí znalost pro stanovení korekcí. Stanice pak přeposílají zjištěné korekce dalším přijímačům v síti.

Real Time Kinematics

Technika Real Time Kinematics (RTK) vychází z principu jedno statického přijímače se známou pozicí a jednoho přijímače v pohybu. Správně bychom tuto metodu měli nazývat RTK DGNSS, jelikož samotný princip RTK je pouze nadstavbou metody DGNSS. V zaužívané terminologii nazýváme stacionární stanici Base a pohyblivý přijímač Rover. V případě Base známě přesně polohu přijímače. Base vyhodnocuje svou pozici ze satelitních signálů, porovnává ji se známou správnou hodnotou, stanovuje korekce a podobně jako u DGNSS zasílá tyto korekce Roveru.

Při výpočtu pozice s použitím metody RTK Rover využívá více frekvenčních složek modulovaného signálu. Samotná navigační zpráva slouží pro odhad řešení a získání informace o aktuálním stavu satelitního systému. Korekce předávané ze stanice Base slouží k upravení měření hodnot vzhledem k aktuálnímu stavu prostředí a jeho vlivů na přenášený signál. Nosná frekvence satelitního signálu pak slouží pro přesné určení pozice.

Nosná vlna signálu je v principu pseudonáhodný kód se známým průběhem. Každý přijímač, který umožňuje práci v RTK režimu, má vlastní generátor této sekvence. Přijímače srovnávají průběh sekvence pseudonáhodného kódu satelitního signálu a kódu generovaného přijímačem. Zjištěný vzájemný posuv signálů pak slouží k přesnému určení pozice respektive zjišťujeme, o kolik je přijímaný signál zpožděn vůči očekávanému stavu.

RTK DGNSS může pracovat ve dvou režimech nazývaných Float a Fixed. Režim Fixed značí, že pseudonáhodné sekvence jsou synchronizovány a přijímač úspěšně detekuje rozdíl mezi referenčním a měřeným signálem. Režim Float značí, že sekvence nejsou synchronizovány. Přijímač teprve zjišťuje rozdíly mezi sekvencemi pseudonáhodného kódu nebo pracuje s poslední známou pozicí, ve které úspěšně řešil v režimu RTK Fixed.

Statická a dynamická měření

Statická měření jsou skupinou měření sdružující určování polohy nehybných předmětů, objektů, či míst. Mají tu výhodu, že snáze najdeme referenční, správnou pozici měřeného bodu. Provedené měření vztažené k referenční hodnotě pak můžeme lépe ohodnotit z hlediska přesnosti, stálosti, opakovatelnosti a dalších parametrů. Další výhodou je možnost měřit po delší časový interval, což dále umožní zpřesnit získané výsledky. Nevýhodou tohoto měření je, že má omezené množství praktických aplikací. Příkladem je zaměřování budov či jiných objektů, tvorba referenčních pozic pro jiná měření a ověřování parametrů přijímačů či soustavy jako celku.

Při dynamických měřeních se měřicí zařízení pohybují v prostoru. V tomto případě se pohybuje GNSS přijímač a jeho nezbytné součásti, případně polybová jednotka. Dynamická měření mají tu nevýhodu, že lze obtížně nalézt referenční pozici. Stávající technologie a přístupy nám umožňují měřit s takovou přesností, že vzniká konflikt s možnostmi ostatních snímačů, kterými také můžeme určit pozici. Přesnost dynamických měření pozice pomocí diferenciálního výpočtu, jako je režim RTK, dosahuje řádově jednotek milimetrů.

Nalézt vhodný snímač polohy, který dlouhodobě udrží přesnost alespoň o řád menší, může být problematické [2]. Přijímače s přesností pouze podobnou zkoumaným snímačům nemá smysl používat. Žádoucí je, mít alespoň o řád přesnější referenci. Nespornou výhodou dynamických měření je míra praktického využití. Jedná se o navigaci v letectví, námořní a automobilové dopravě, osobním pohybu, robotických aplikacích a mnohých dalších odvětvích, ve kterých je znalost pozice objektu klíčovou informací.

1.2 Chyby měření

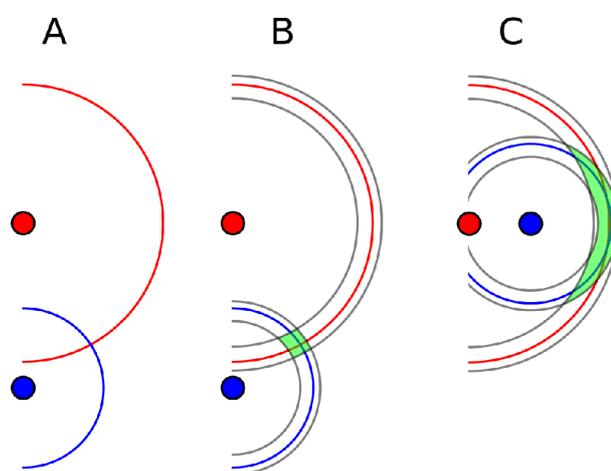
Měření pozice pomocí GNSS je rozsáhlá problematika nejen z hlediska množství použitého hardwaru a jeho složitosti, ale i jeho rozmístění. Provádíme-li kupříkladu jednoduché měření vzdálenosti na zemi pomocí metru, můžeme bez omezení manipulovat s měřicím přístrojem i soustavou, libovolně obměňovat měřicí přístroje. Dále například neexistují významné vlivy prostředí mezi součástmi experimentu.

Měření pozice pomocí GNSS podléhá velkému množství vlivů s různým původem. Podle způsobu kategorizace se jedná o vlivy vnitřní ve vysílači, jevy v prostředí mezi vysílačem a přijímačem a jevy v přijímači. Dalším způsobem kategorizace vlivů je rozdělení na jevy kosmické, atmosférické, newtonovské, relativistické, a numerické.

Detailní rozbor vlivů a jejich kvantifikace je velmi obsáhlé téma, které pro koncového uživatele nemá příliš významu. Především z toho důvodu, že většinu vlivů nelze jednoduše ovlivnit. Proto se dále zaměříme pouze na vlivy, které lze při měření ovlivnit vhodnou konfigurací, intervalem měření či jinak. Ostatní jevy budou pouze zmíněny a případně vysvětleny pro dokreslení problematiky přesnosti GNSS přijímačů.

Dilution of Precision

Trilaterace je důvodem, proč musíme dbát na umístění GNSS přijímače a především jeho antén na zemském povrchu. První částí problému je nutnost zajistit „viditelnost“ na dostatečný počet satelitů. Příkladně, aby přijímač měl přístup k signálům z dostatečného počtu satelitů a mohl úspěšně řešit úlohy trilaterace. Druhým, velmi důležitým důvodem, je vzájemná pozice zmíněných satelitů. Tato problematika se nazývá Dilution Of Precision (DOP), a vyjadřuje, do jaké míry se změní celkový výsledek výpočtu, dojde-li ke změně jednoho vstupu.



Obr. 1.3: Dilution Of Precision [15]

Princip DOP je následující. Uvažujme dvě kružnice, které se protínají tak, že mají právě dva společné průsečíky. V takovém případě by se jednalo o optimální situaci, jak by určování pozice mohlo fungovat, Ilustrace této situace je na Obr. 1.3,

část A. Problémem je, že signál ze satelitů má přidruženou nejistotu, danou technickými možnostmi a vlivem prostředí, kterým signál prochází. V reálném případě proto nemáme dvě protínající se kružnice, ale dvě dvojice souosých kružnic, které se navzájem protínají, a mezi průsečíky vzniká plocha. Tato plocha je množinou všech možných řešení v daný moment. Ilustraci tohoto modelu nalezneme na Obr. 1.3, část B.

Z Obr. 1.3 je patrné jaký má vliv vzájemná pozice těchto kružnic. V případě C, kde osa středů kružnic prochází plochou vytknutou průsečíky těchto kružnic, DOP nabývá nejvyšších možných hodnot a řešení poziční úlohy nabývá nejvyšší možné nejistoty. V případě B je ilustrováno vychýlení od spojnice středů kružnic, hodnota DOP klesá a nejistota, s jakou přijímač určuje polohu, se snižuje. V reálném prostředí se rozpoložení nachází v topologii mezi limitními případy ilustrovanými v části B a C.

Při řešení reálné poziční úlohy proto hledáme takové umístění antén, aby viditelné satelity měly na obloze maximální možný odstup. Přijímače z pravidla řeší výpočet pozice podle této podmínky, ale uživatel se musí ujistit, že při rozmístování antén zajišťuje pokud možno plný kruhový výhled na oblohu.

Satelitní čas

Princip využití satelitů neumožňuje jednoduchou záměnu jednotlivého přístroje. Proto je nezbytné, aby hardware byl dostatečně sofistikovaný a robustní na to, aby dodával přesné informace po celou dobu své operace. Satelit disponuje atomovými hodinami. Měření času je založeno na principu rozpadu radioaktivních látek, který je velmi přesný a dobře matematicky popsatelný. Ačkoliv se jedná o nejpřesnější a nejstálejší hodiny dostupné člověku, stále je třeba mít na paměti, že se zde vyskytují chyby, které je třeba korigovat. O tyto korekce se stará správce satelitního systému.

Správné určení času je nezbytné pro určení přesné polohy. Vzhledem k rychlosti signálu a vzdálenosti vysílač-přijímač hovoříme o chybě měření řádově v desítkách centimetrů až jednotkách metrů při chybném určení času řádově v nanosekundách.

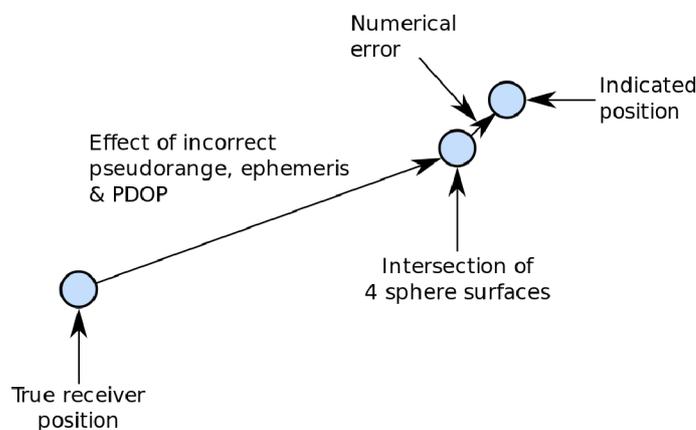
Ephemeris

Při určování pozice satelitů nelze opomenout fakt, že satelity putují po nestacionárních orbitách, celý zemský pohyb není stacionární a informace o těchto změnách mohou být až dvě hodiny zastaralé. Pokud dojde k vychýlení satelitu z orbity, koncový uživatel se o tom může dozvědět až se značným zpožděním. Pro ilustraci můžeme zmínit, že i tlak slunečního záření má nezanedbatelný vliv na orbitu satelitů a tím i na přesnost určení polohy.

Problematiku chyby vnesené do měření, která pochází ze Satelitního času a Eferid, nelze příliš ovlivnit. Pouze lze omezit dopady tím, že měření bude probíhat po dostatečně dlouhou dobu a náhodné jevy budou dostatečně zprůměrovány.

Prostředí

Položíme-li vnější vlivy jako sluneční vítr a kosmické záření rovny nule, satelitní signál přicházející od družic GNSS systému i nadále nedojde k přijímači beze změn. Bude ovlivněn při průchodu atmosféru, především v oblastech troposféry a ionosféry. Ionizace ionosféry způsobuje disperzi signálu v prostředí a jeho zpoždění. Jedná se o relativně pomalu se měnící jevy, které lze omezit či eliminovat několika způsoby.



Obr. 1.4: User Equivalent range Errors[19]

Jeden ze způsobů je využití více pásem, na kterých je signál veden. Z rozdílu zpoždění jednotlivých signálů lze určit celkové zpoždění. Druhým způsobem je využití matematických modelů jevů v ionosféře. Třetím způsobem je porovnání změřené pozice přijímačem s pozicí určenou pozemskými geodetickými metodami. Při průchodu troposférou může být signál ovlivněn rozličnou vlhkostí a atmosférickým tlakem. Jevy v troposféře jsou hůře předvídatelné a aproximovatelné a mění se rychleji než jevy ionosférické.

V případě, že bychom se omezili na měření v krátkém časovém úseku, lze předpokládat, že bychom mohli naměřit významné odchylky způsobené zmíněnými vlivy. Především v pracovních režimech mimo RTK DGNSS a obecné DGNSS. Jevy prostředí, které ovlivňují přesnost měření nazýváme souhrnně User Equivalent Range Errors (UERE). Přehled nejvýznamnějších zdrojů UERE je uveden v Tabulce 1.1.

Tab. 1.1: User Equivalent Range Errors [3]

Zdroj	Účinek [m]
Signal arrival C/A	3
Signal arrival P(Y)	0,3
Ionospheric effects	5
Ephemeris errors	2,5
Satellite clock errors	2
Multipath distortion	1
Tropospheric effects	0,5
$3 \sigma_r$ C/A	6,7
$3 \sigma_r$ P(Y)	6,0

1.2.1 Chyby uživatelského segmentu

Nastínili jsme si problematiku chyb vznikajících na začátku měřicího řetězce, především konstrukční nedokonalosti satelitů a nestálost udávaných parametrů. Dále jsme si probrali problematiku chyb vznikajících mezi vysílačem a přijímačem, tedy ovlivnění signálu při průchodu jednotlivými vrstvami atmosféry. Třetí částí, kde mohou vznikat chyby je blok přijímače samotného. Jedná se o chyby metody, přístroje, teplotní závislosti a další.

Opět můžeme rozdělit podle toho, zda se jedná o statické či dynamické měření. Chyby, na které se zaměřujeme u statických měření, se zajisté vyskytují i u dynamických měření. S ohledem na celkovou chybu dynamického měření, způsob rozložení měřených hodnot a časový interval měření je výhodnější se zaměřit na odlišnou skupinu příznaků měření, které nesou pro daná měření lepší vypovídací hodnotu.

Chyby statických měření

Bavíme-li se o maximální přesnosti měření pozice GNSS, teoretický limit je rozlišení výpočtu. Při řešení RTK je přijímač při korelaci signálů referenční a místní stanice schopen dosáhnout přibližné přesnosti 1% vlny. Pro frekvenci L1 je délka vlny 19 cm z čehož plyne maximální možná teoretická přesnost přibližně 2mm. V takové situaci je třeba uvážit parametry ovlivňující přesnost měření, které běžně nepřichází na mysl ve spojitosti s GNSS.

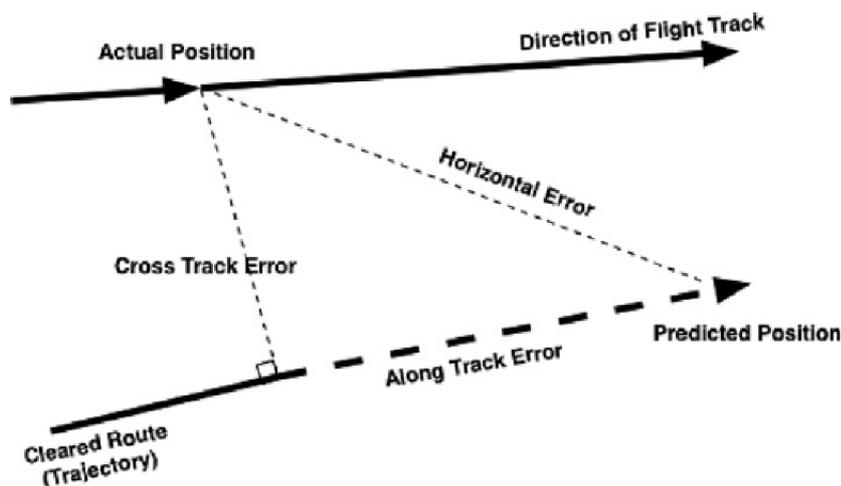
Můžeme zmínit několik jevů. Souhrnně teplotní dilatace působící na soustavu a především pohyb montážního segmentu, na kterém jsou upevněny antény. Dále pohyb celého experimentu. Vyšší budovy mohou být kupříkladu náchylné na vychýlení silnějšími poryvy větru. Dále pak kvalita měření referenční pozice, případná přesnost

převodu mezi jednotlivými reprezentacemi této souřadnice a stálost jednotlivých reprezentací v čase.

Chyby dynamických měření

V případě, že se zabýváme dynamickým měřením, přibývá problematika jak určit polohu, kterou chceme považovat za pravou a chceme vůči ní vztahovat data naměřená GNSS přijímači. Mezi chyby, které vznikají navíc při dynamickém měření, můžeme zařadit Radial Error, Along Track Error a Cross Track Error, souhrnně RAC. Radial error značí úhlovou odchylku od vytyčené trajektorie. Along track error značí podélnou odchylku od trajektorie a cross track error značí kolmou vzdálenost od vytyčené trajektorie. Ilustraci jednotlivých odchylek nalezneme na Obr. 1.5.

Stanovování příčné a podélné odchylky při vyšších úhlových rychlostech může být problematické a proto se tato problematika v praxi řeší pomocí náhradní aparatury. Pro odhadnutí průběhu střední odchylky a rozptylu lze použít rotující upevnění přijímače [2].



Obr. 1.5: Chyby dynamických měření GNSS [4]

1.3 Zpracování informace

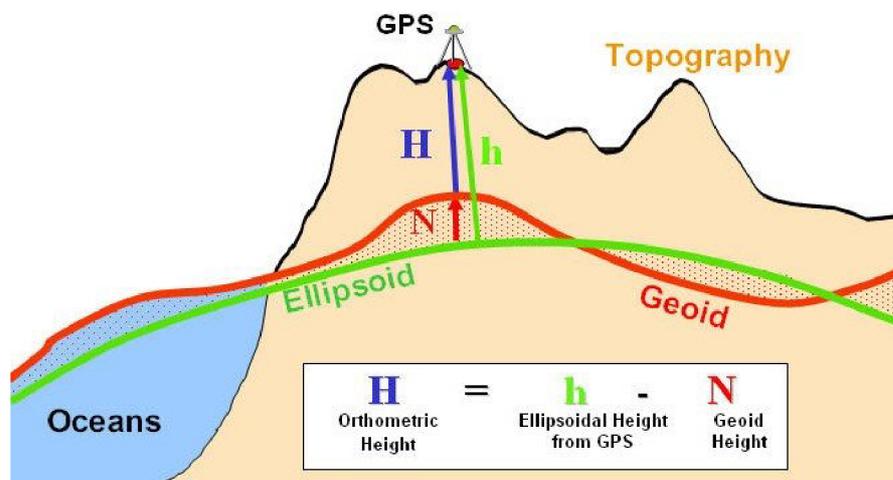
V předcházejících kapitolách jsme si popsali principy měření a přidružené chyby. Nyní zavedeme způsob reprezentace naměřených hodnot, způsob přenosu informace v rámci experimentu, parametry zkoumaných přístrojů a možnosti nastavení experimentu.

Nejprve potřebujeme zavést soustavu, ke které budeme vztahovat naměřené údaje. Víme, že GNSS umožňuje absolutní určení pozice. Pozice, kterou určujeme,

bude vždy vypočtena od existujících satelitů. Vztahovat zjištěnou pozici zpět vůči satelitům není praktické. Proto volíme prostředí, ve kterém se pohybuje přijímač – v tomto případě povrch planety.

Model planety

Když se poprvé začalo hovořit o planetě Zemi jako o zaobleném vesmírném tělese, byl model koule dostačující. Měřicí přístroje nebyly dostatečně sofistikované na to, aby případná odchylka od skutečného tvaru měla znatelný dopad, a také byla všechna měření pevně svázána s povrchem. Postupem času bylo zjištěno, že Země nemá tvar ideální koule, těžiště není v jejím středu a navíc se samotné rozpoložení planety mění.



Obr. 1.6: Ilustrace rozdílů modelů planety[25]

Vznikly modely jednoduchého elipsoidu, zploštělého elipsoidu a modifikovaného elipsoidu, který nazýváme geoid. Specifikem geoidu je, že v každém bodě je povrch kolmý na gravitační zrychlení. Přibližné rozdíly můžeme vidět na Obr. 1.6. Zpřesněné modely planety našly uplatnění až v éře počítačů, kdy nárůst výpočetního výkonu umožnil spočítat jednotlivá řešení. V současnosti existuje mnoho eliptických modelů povrchu. Modely se liší ve svém tvarování v závislosti na aproximačních rovnicích a rozměrech aproximační mřížce. Snahou jednotlivých modelů je zajistit maximální přesnost modelu v dané oblasti zájmu.

V praxi se nejčastěji setkáme se systémy World Geodetic System (WGS 84) a International Terrestrial Reference System (ITRS). Oba systémy jsou pravotočivé geocentrické kartézské souřadné systémy se středem v těžišti Země. Zakládající instituce udržují tyto systémy aktuální vůči stavu planety, výsledné modely se v jednotlivých místech liší o jednotky cm.

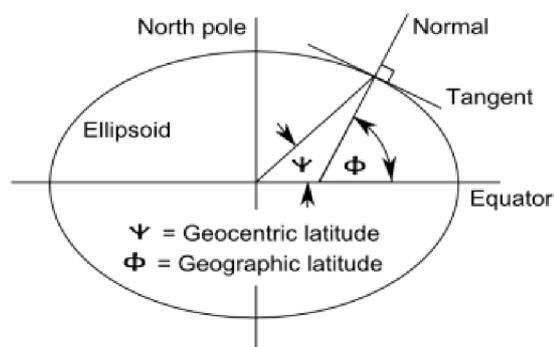
GNSS systémy zpravidla vycházejí ze systému GPS, který pracuje s modelem WGS84, proto většina obecných přijímačů podává výsledky v souřadném systému WGS84. V České republice se často setkáváme se systémem ETRS89, který vychází z ITRS a je spojen s Eurasijskou tektonickou deskou. Výhodou spojení s tektonickou deskou je, že pokud porovnáváme v rámci jednoho systému, není zapotřebí provádět přepočty souřadnic v čase.

Souřadné systémy

Abychom mohli určovat pozici pomocí GNSS přijímačů, potřebujeme, kromě soustavy vysílačů dodávajících informace nezbytné pro výpočet, také vztahný souřadnicový systém. V praxi se nejčastěji setkáme s těmito souřadnými systémy:

LLA – Latitude, Longitude, Altitude

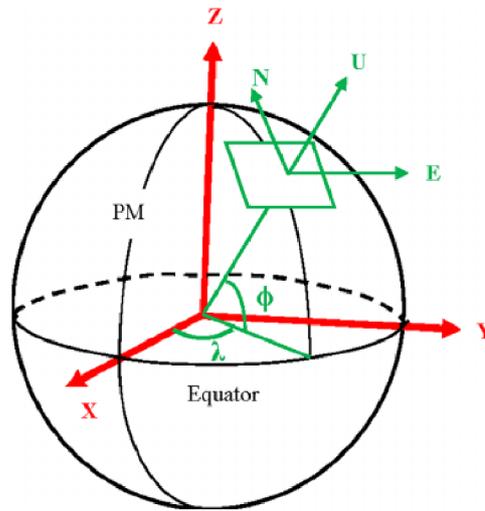
Jedná se o geodetický souřadný systém uváděný v úhlových jednotkách. Historicky se jedná o nejstarší systém a vznikl právě na předpokladu, že Země je tvaru ideální koule. Souřadnice výšky získáme jako úhel mezi kolmicí k povrchu ve zkoumaném bodě a rovinou rovníku. Obdobně pro výšku a nultý poledník. Exaktnější geocentrickou variantu získáme v případě, že stejný bod na povrchu Země vztáhneme vůči středu planety.



Obr. 1.7: Geodetický model planety[20]

ECEF – Earth centered, Earth fixed (XYZ)

Název napovídá, že se jedná o geocentrický, absolutní systém. Všechny souřadnice udávané v tomto systému jsou vztaheny vůči jednomu bodu uprostřed země. Jedná se o standardní způsob udávání souřadnic, jeho nevýhodou je obtížná čitelnost hodnot. Proto nejčastěji transformujeme na souřadnice LLA nebo Local Tangent Planes.



Obr. 1.8: Ilustrace ECEF a LTP [21]

Local tangent planes

Příklady této reprezentace jsou souřadnice East-North-Up (ENU) a North-East-Down (NED). Oba systémy mají pravotočivou bázi. Kterou z těchto dvou bází volíme je čistě na konvenci uživatele. Jedná se o metrický relativní systém, který dává velmi dobrou představu o lokálním určení pozice. Zpravidla se bavíme o jednotkách až desítkách kilometrů vzdálenosti. Nejčastěji tuto hodnotu vztahujeme vůči stacionární stanici, ze které získáváme korekce.

Nevýhodou těchto souřadných systému je, že neobsahují informaci o absolutní poloze. Proto zpravidla ukládáme hodnoty ENU pro místní použití s dobrým rozlišením, a ECEF nebo LLA pro absolutní referenci pozice.

Přenos informace

V rámci měření polohy s využitím GNSS je množství přenášených informací, jejich struktura a způsob předávání důležitou znalostí. V režimu RTK jsou důležité dva toky informací: tok surových informací mezi přijímači, nezbytných pro nalezení aktuální pozice přijímače, a tok informací z přijímače obsahující uživatelsky užitečná data o poloze a případné doplňující informace.

Informace předávané mezi přijímači pro účely výpočtu nejsou v porovnání s finálním datovým výstupem měření náročné na objem dat. Zpravidla se předávají pomocí standardizovaných formátů. Běžně používané formáty jsou RTCM a NMEA. Jedná se o univerzálně rozlišitelné formáty, zpravidla formátované v rámci základní ASCII tabulky znaků. Důležitým rysem je univerzální čitelnost. Protokoly sloužící k přenosu korekcí a doplňujících informací vyžadují minimální zpoždění přenosu pro

zachování maximální přesnosti výpočtu.

Koncový datový výstup z přijímače může naopak obsahovat velké množství informací. Podle toho, jaké informace požadujeme a v jakém objemu, také nastavujeme výstupní formát dat přijímače. Existuje velké množství dostupných formátů. Formáty dělíme na univerzální s obecným standardem a proprietární, s firemním standardem.

Univerzální formát používají zpravidla veřejné stanice, aby bylo možné přijímat jejich data z libovolného přijímače. Proprietární formáty bývají zpravidla používány jako koncový výstup přijímače. Obsahují nejen informace obsažené v univerzálním formátu, ale i přídatnou informaci poplatnou jednotlivému výrobcí / přístroji / konstrukci.

Tab. 1.2: Datové formáty GNSS

Formát dat	Specifikace
Univerzální formáty	
RTCM 2, 3	Radio Technical Commission for Maritime Services
RINEX	Receiver INdependent Exchange Format
BINEX	Binary receiver INdependent Exchange Format
NMEA 0183	National Marine Electronics Association
Proprietární formáty	
NovAtel OEM3	NovAtel OEM3
u-blox	u-blox LEA-4T, 5T, 6T
Hemisphere	Hemisphere Crescent/Eclipse
SkyTraq	SkyTraq S1315F
GW10	Furuno GW-10-II/III
Javad	JAVAD GRIL/GREIS
NVS BINR	NVS NV08C
RT17/27	Trimble BD982, BD992
GSOF	Trimble BD982, BD992
SBP	SwiftNav Piksi 3

1.3.1 GNSS přijímače

Pod pojmem GNSS přijímač rozumíme výpočetní jednotku, která vyhodnocuje signál z připojené antény a počítá ze získaných informací pozici, kde se nachází přijímající anténa. Většina moderních jednotek pracuje se stávajícími satelitními sítěmi a je připravena i na plánované, které ještě nejsou v provozu. Přijímače se liší cenou,

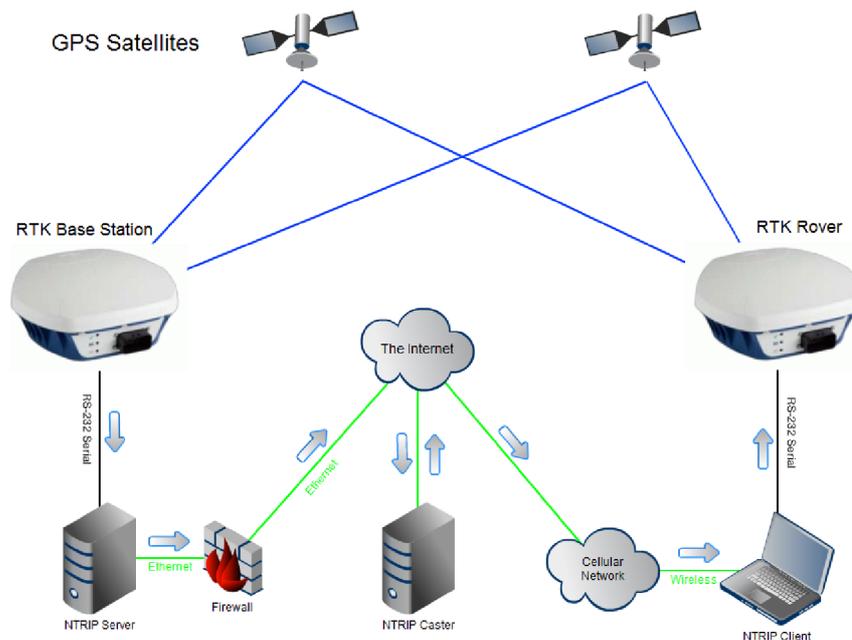
možnostmi hardwarové konfigurace a fyzickým provedením. Algoritmus výpočtu vychází ze stejných zákonitostí, ovšem implementace se může lišit právě kvůli odlišné hardwarové konstrukci nebo softwarovým doplňkům jednotlivých přijímačů.

Tab. 1.3: Parametry přijímačů

Parametry	Piksi3 [10]	Trimble Bd982 [8]	Novatel OEM719 [13]
Metrika	1sigma RMS	1sigma RMS	1sigma RMS
Rychlost H/V	0,03ms ¹	0,007ms ¹ /0,02ms ¹	0,03ms ¹
Zrychlení	X	11g	X
RTK H	0,01m +1ppm	0,008m+1ppm	0,01m+1ppm
RTK V	0,015m +1ppm	0,015m+1ppm	X
Frekvence [Hz]	10hz	50hz	100hz
SBAS	0,75m	0,5m H/0,85m V	0,6m
Heading 2m	X	0,09°	X
GPS	L1/2	L1 C/A, L2E/2C/5	L1C/A, L1/2C,L2P/3
GLONASS	G1/2	L1/2 C/A, L2P	L1/2 C/A, L2P/3/5
SBAS	X	L1 C/A, L5	L1/5
BeiDou	B1/2	B1/2	B 1/2/3 I, B1/2C
Galileo	E1/5b	L1 BOC, E/5a/5b	E1/5/5a/5b/6
RTK init	10s/99%	1m / 99,9%	10s/ 99,9%
Start	60/5/2	45/30/2	40/19/X
Raw data	yes	yes	yes

Souhrnná Tabulka 1.2:Parametry přijímačů obsahuje zveřejněné parametry testovaných přijímačů SwiftNav Pixsi Multi 3 a Trimble BX 982. Dále je v tabulce uveden přijímač Novatel OEM719 pro porovnání možností trhu. Přijímač Trimble BD982 je high-endový model s vysokou přesností a vysokou cenou, Pixsi 3 je mid-to-low end s omezenými možnostmi. Cílem měření je mimo jiné porovnat, zda Pixsi i při omezených parametrech a nastaveních dosahuje dostačujících hodnot přesnosti použitelných v mobilní robotice.

V případě, že chceme srovnávat GNSS přijímače, věnujeme pozornost především přesnosti řešení z hlediska pozice a orientace. Dalšími zajímavými parametry jsou rychlost inicializace, použitelná frekvenční pásma a satelitní systémy nebo možnosti nastavení jednotlivých přijímačů.



Obr. 1.10: Schéma komunikace protokolu NTRIP[22]

Proprietární protokoly

V případě, že bychom chtěli porovnávat pouze základní parametry přijímačů, stačily by komunikační protokoly jako NMEA, které nesou základní informace typu čas, poloha a souřadnice, dostupné satelity a další. V případě cíleného srovnávání přesnosti přijímačů jsou tyto protokoly nedostačující. Informace potřebné k zevrubnému srovnání přijímačů nejsou dostupné a museli bychom je dopočítávat offline, pokud by to vůbec bylo možné.

Proto budeme používat proprietární protokoly. Výhoda těchto protokolů spočívá ve schopnosti efektivně přenášet veškeré potřebné informace při zachování minimálního objemu datového přenosu. Nevýhodou těchto protokolů je vzájemná nezaměnitelnost mezi přijímači, takže data nelze jednoduše vyhodnocovat v reálném čase. Je zapotřebí aplikovat syntaktickou analýzu protokolu.

Příklad binárního protokolu

Interní protokol přijímačů společnosti SwiftNav se nazývá Swift Binary Protocol (SBP). Jedná se o proprietární protokol, pomocí kterého lze unifikovaně přenášet veškerá data z přijímače Piksi 3. Jednotlivé zprávy proprietárních binárních protokolů jsou formálně univerzální a v rámci standardu se liší pouze obsahem. Zpráva se sestává z hlavičky, definice zprávy, samotného obsahu a kontrolních součtů.

Example Message

As an example, consider this framed series of bytes read from a serial port:

```
55 02 02 cc 04 14 70 3d d0 18 cf ef ff ff ef e8 ff ff f0 18 00 00 00 05 00 43 94
```

This byte array decodes into a MSG_BASELINE_ECEF (see pg. 16), which reports the baseline position solution of the rover receiver relative to the base station receiver in Earth Centered Earth Fixed (ECEF) coordinates. The segments of this byte array and its contents break down as follows:

Field Name	Type	Value	Bytestring Segment
Preamble	u8	0x55	55
Message Type	u16	MSG_BASELINE_ECEF	02 02
Sender	u16	1228	cc 04
Length	u8	20	14
Payload		—	70 3d d0 18 cf ef ff ff ef e8 ff ff f0 18 00 00 00 05 00
MSG_BASELINE_ECEF			
.tow	u32	416300400 msec	70 3d d0 18
.x	s32	-4145 mm	cf ef ff ff
.y	s32	-5905 mm	ef e8 ff ff
.z	s32	6384 mm	f0 18 00 00
.accuracy	u16	0	00 00
.nsats	u8	5	05
.flags	u8	0	00
CRC	u16	0x9443	43 94

Table 4.0.3: SBP breakdown for MSG_BASELINE_ECEF

Obr. 1.11: Ukázka zprávy protokolu SBP [11]

Hlavička

Unikátní numerický identifikátor, pomocí kterého při syntaktické analýze (parsování) identifikujeme typ zprávy. Tento parametr slouží k určení typu zprávy při online komunikaci mezi dvěma přijímači i v momentě offline parsování sekvence naměřených dat.

Definice

Podle hlavičky je v tabulce vyhledán prototyp zprávy, který definuje z kolika segmentů se detekovaná zpráva skládá, co obsahují a jak jsou dlouhé. Definice prototypu je volacím parametrem funkce parseru a zajišťuje načtení správného objemu dat a jeho rozklíčování.

Nosný obsah

Faktický obsah zprávy. Například pozice přijímače, souřadnice, počet satelitů, chybové hlášky a další. Z pravidla se jedná o uživatelsky užitečnou část dat. Zbylé informace jsou výhradně procesní.

Kontrolní součet

Segment zprávy sloužící k formální a kvalitativní validaci obsahu. Syntaktická analýza se v průběhu čtení dat stará o kontrolu smysluplnosti z hlediska chodu programu. Kontroluje správnost pointerů, počet předávaných parametrů a počet volání funkce, ale dokud zmíněné proměnné dávají smysl, nezajímá se o jejich obsah. Kvalita dat je ověřena až závěrečným krokem, provedením kontrolního součtu.

1.4 Možnosti vyhodnocení

Parsovaná data jsou ve své podstatě surové hodnoty určování pozice, ze kterých potřebujeme stanovit vlastní parametry přijímačů. Hlavním parametrem pro určení kvality přijímačů je přesnost, která souhrnně vyjadřuje systematickou a náhodnou chybu procesu měření. Systematickou hodnotu můžeme nazývat jako pravost a vyjadřuje vzdálenost střední hodnoty souboru měřených hodnot od vztažné, referenční hodnoty. Náhodnou chybu resp. preciznost vyjádříme jako rozptyl hodnot měřeného souboru od střední hodnoty. Hodnoty pravosti a preciznosti jsou výchozím kontrolním parametry kontroly kvality přijímačů.

V kapitole Reprezentace pozice jsme uvedli modely Zemského tělesa používané pro účely GNSS a odůvodnění existence těchto modelů. Důsledkem těchto poznatků je, že pozice určená pomocí systému GNSS nemusí nutně být v každé instanci indikována ve stejném souřadném systému. Existuje řada převodních vztahů, které berou v potaz nejen samotnou pozici a orientaci jednotlivých modelů vůči sobě, ale také průběh těchto hodnot v čase. Studium těchto závislostí není předmětem této diplomové práce. Z hlediska vyhodnocení je nezbytné pouze znát správnou aktuální hodnotu referenční pozice, kterou získáme vhodnou transformací souřadnic mezi systémy. Tuto transformaci zajišťuje kupříkladu webová aplikace Geoportál [16].

Stanovení hodnoty referenční pozice je úloha nezávislá na měření parametrů GNSS přijímačů. Referenční pozice byla stanovena v roce 2013 samostatným geodetickým měřením při zaměřování budovy. Hodnoty jsou uvedeny v systému ETRS89. Abychom mohli správně vztáhnout pozici změřenou GNSS přijímači, je zapotřebí pro každé měření provést převod referenční pozice mezi Systémy ETRS89 a WGS84 pro příslušný kalendářní den.

Správnost

Chceme-li porovnávat správnost určené pozice, potřebujeme znát střední hodnotu souboru dat. V ideálním případě by soubor dat získaný v průběhu měření nabýval pouze jediné hodnoty a určení hodnot správnosti a preciznosti by se stal triviálním. Reálné měření dává netriviální soubor hodnot, který je zapotřebí vhodně roztřídit podle informace podávané přijímačem. GNSS přijímače vyhodnocují hodnoty DOP, pomocí kterých jsou schopny s určitým množstvím zjednodušujících předpokladů [1] stanovit předpokládanou odchylku měření v daný okamžik. Tato informace bude využita pro vhodnou klasifikaci dat pro pozdější zpracování. V kombinovaném histogramu přesnosti měření tato hodnota značí absolutní vzdálenost od referenční pozice.

Preciznost

Druhým nosným faktorem přesnosti určení pozice je preciznost. Ze statistického hlediska je tento parametr shodný s pojmem rozptylu hodnot statistického souboru. Popisuje oblast od střední hodnoty souboru, ve které se bude nacházet příslušná část hodnot ze souboru. Těsnost tohoto intervalu resp. rozměr oblasti, ve které se nachází všechny hodnoty souboru, vypovídá o kvalitě měření z hlediska důvěryhodnosti jednotlivých měření.

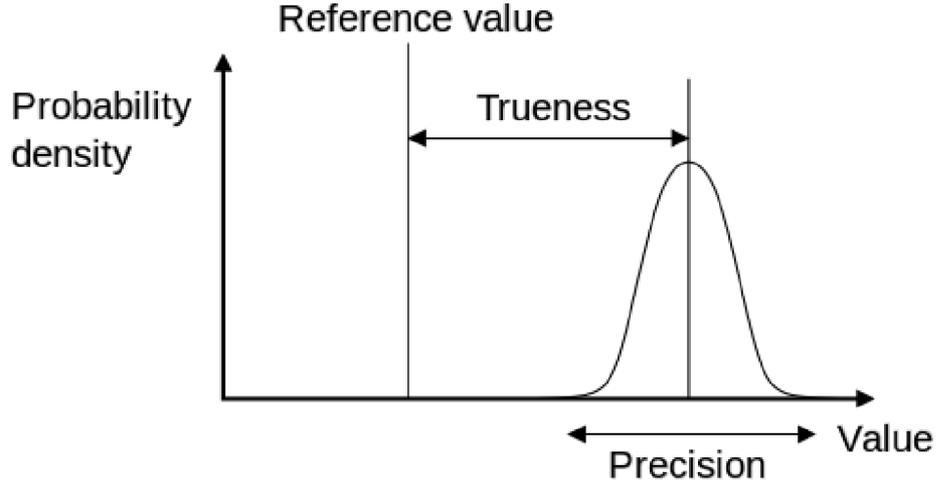
V ideálním případě budou všechna měření nabývat jedinou hodnotu a jistota, že měřený bod je právě daná hodnota, je maximální, byť tato hodnota může být nesprávná. V reálné situaci je rozptyl nenulový a jistota určení pozice klesá. V kombinovaném histogramu přesnosti měření tato hodnota značí strmost křivky vzdálenosti od referenční pozice.

Estimace chyby v přijímači

Matice kovariancí (1.1) vychází z rovnic výpočtu pozic přijímače, jak je uvedeno v [1]. V ideálním případě je matice pouze diagonální a obsahuje pouze hodnoty rozptylu v jednotlivých osách. Z toho plyne, že vazba mezi jednotlivými souřadnicemi neexistuje a souřadnice jsou nezávislé.

$$\text{cov}(dx) = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 & \sigma_{x\Delta t}^2 \\ \sigma_{xy}^2 & \sigma_y^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_{y\Delta t}^2 \\ \sigma_{xz}^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_z^2 & \sigma_{z\Delta t}^2 \\ \sigma_{x\Delta t}^2 & \sigma_{y\Delta t}^2 & \sigma_{z\Delta t}^2 & \sigma_{\Delta t}^2 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Předpoklad, že naměřené hodnoty v jednotlivých souřadnicích jsou nezávislé, je výchozím bodem pro sestavení následujících rovnic hodnot DOP. Rovnice výpočtu různých stupňů DOP jsou v reálném měření pouze aproximací skutečné chyby.



Obr. 1.12: Dekompozice parametru přesnosti [23]

Přijímače je využívají v jednotlivých měřeních k výpočtu předpokládané odchylky měření v daný okamžik.

Geometric Dilution Of Precision (GDOP)

$$GDOP \times \sigma_{UERE} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_{\Delta t}^2} \quad (1.2)$$

Position Dilution Of Precision (PDOP)

$$PDOP \times \sigma_{UERE} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (1.3)$$

Horizontal Dilution Of Precision (HDOP)

$$HDOP \times \sigma_{UERE} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (1.4)$$

Vertical Dilution Of Precision (VDOP)

$$PDOP \times \sigma_{UERE} = \sigma_z \quad (1.5)$$

Time Dilution Of Precision (TDOP)

$$GDOP \times \sigma_{UERE} = \sigma_{\Delta t} \quad (1.6)$$

Distance Root-Mean-Square (DRMS)

$$DRMS = HDOP \times \sigma_{UERE} \quad (1.7)$$

Distance „Root-Mean-Square“ (1.7) odvozený z HDOP (1.4) je vztah, který tvoří polovinu vzájemné vazby mezi výpočty předpokládané odchylky v průběhu měření a při pozdějším zpracování nad kompletním segmentem dat. Hodnoty HDOP stanoví přijímač z matice kovariancí a σ_{UERE} . Hodnoty UERE jsou považovány za konstantní, ale v různých publikacích nabývají odlišných hodnot [1].

Estimace chyby výpočtem

Druhou částí stanovení chyby měření je výpočet skutečných odchylek hodnot z provedených měření. K tomu využijeme triviálních statistických operací a stanovíme směrodatné odchylky jednotlivých měření.

Odchylka

$$\Delta x_i = x_i - x_{ref} \quad (1.8)$$

Výběrový průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta x_i \quad (1.9)$$

Výběrový Rozptyl

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{1-N} \times \left(\sum_{i=1}^N x_i^2 - \bar{x}^2 \right) \quad (1.10)$$

Výběrová Směrodatná odchylka

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{1-N} \times \left(\sum_{i=1}^N x_i^2 - \bar{x}^2 \right)} \quad (1.11)$$

Distance Root-Mean-Square (DRMS)

$$DRMS = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (1.12)$$

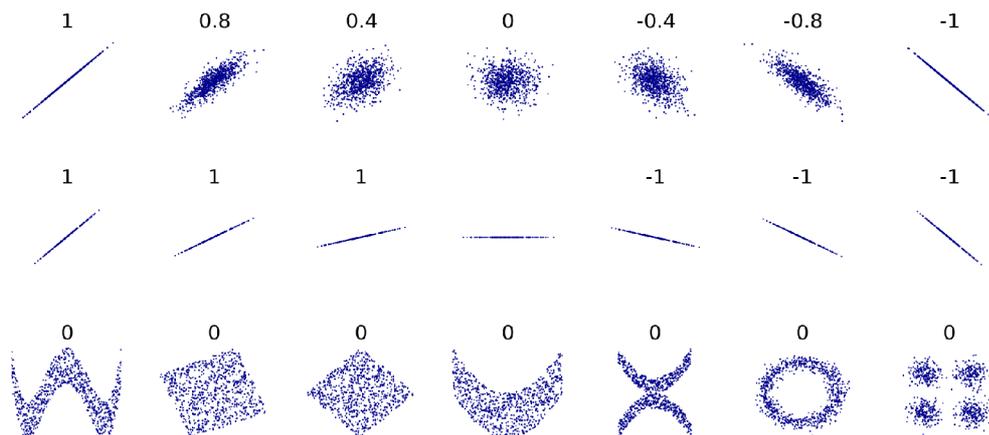
Druhá část výsledného převodního vztahu (1.12) používaného pro porovnání přesnosti, kde hodnoty σ_x^2 a σ_y^2 indikují směrodatnou odchylku, kterou jsme stanovili výpočtem. V ideálním případě bude hodnota indikovaná přijímači (1.7) identická s hodnotou, kterou vypočteme nad celým blokem měření (1.11) a (1.12). Podle zjednodušení uvedených v [1] však lze očekávat, že tyto hodnoty budou shodné, pouze pokud množina hodnot splňuje uvedené nároky na statistické parametry měření.

Estimace dynamických měření

U dat získaných u dynamických měření přibývá problematika porovnání mezi jednotlivými měřeními. Pro daná měření nedisponujeme přesně sledovatelnou trajektorií a proto potřebujeme navrhnout metodu srovnávající jednotlivá měření. K tomu poslouží jednoduché srovnání lineární závislosti jednotlivých měření. Snahou je zachovat identickou trajektorii při měření pro maximální přenositelnost všech parametrů. Za dostačující metriku proto volíme výpočet kovariance mezi jednotlivými měřeními.

Pearsonův korelační koeficient

$$P(a, b) = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{a,i} - \bar{x}_a)(y_{b,i} - \bar{y}_b)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{a,i} - \bar{x}_a)^2 \sum_{j=1}^N (y_{b,j} - \bar{y}_b)^2}} \quad (1.13)$$



Obr. 1.13: Srovnání koeficientů korelace[6]

Na Obr. 1.13 můžeme pozorovat vývoj hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu vzhledem k vzájemnému rozložení hodnot. Ačkoliv nelze trajektorii pohybu popsat pomocí jednoduché křivky, jsme schopni určit korelaci jednotlivých trajektorií. Využijeme faktu, že tímto vztahem porovnáváme hodnoty v každém naměřeném bodě odděleně.

2 Realizace experimentu

Kvalifikované měření pozice má velmi silné požadavky na kvalitu hardware jednotlivých prvků měřící soustavy. Přesnost, se kterou jsme schopni měřit pozici v režimu RTK, vyžaduje kvalitní provedení jednotlivých částí experimentu. Zmíníme ty nejdůležitější.

Víme, že satelity poskytující základní data pro výpočet, cestují po orbitách. S ohledem na znalost pohybu po kružnici a relativních úhlových rychlostech vůči přijímači si povšimneme, že satelity se většinu času nenacházejí vysoko na obloze nad přijímačem. Naopak, většinu času je nalezneme v úhlech blízkých horizontu. Cílem této snahy je zajistit maximum možných satelitů použitelných pro výpočet pozice a jeho kvalitu.

U statických měření se snažíme zajistit, aby přijímače (antény), měly maximální možný, ničím nestíněný výhled na oblohu. Hledáme umístění s minimem vysokých konstrukcí v okolí. Vyhýbáme se umístěním blízko budov a jiných objektů. Ideálně měřící aparaturu umísťujeme na nejvyšší budovu v dané lokalitě. V části práce provádíme sekvenci statických měření, která chceme navzájem srovnávat. K tomu potřebujeme zajistit, aby se antény nacházely vždy na stejném místě. Pro tyto účely slouží fixní aparatura, blok pevného materiálu pevně spojeného s konstrukcí budovy.

Abychom mohli provádět komparační měření bez vnesené chyby jiné antény, rozhodli jsme se pro variantu, kdy signál z každé antény distribuujeme pro všechny přijímače současně. Eliminovali jsme tak případnou chybu danou odlišnými konstrukcemi antén, ale vnesli jsme případnou chybu danou rozbočovačem. Očekáváme ovšem, že chyba rozbočovače ovlivní všechny přijímače stejně a půjde kvantifikovat v separátním měření.

Z principu činnosti DGNS vyplývá, že přesnost polohy závisí na vzdálenosti přijímačů značených Rover a Base. Čím dále od sebe přijímače jsou, tím méně bude odpovídat model korekcí distribuovaných z Base a tím větší bude odchylka samotného výpočtu pozice. Je účelné proto změřit závislost přesnosti měření na vzdálenosti stanic Rover a Base.

Dodatečný hardware

Abychom mohli jednoznačně srovnávat přijímače, musíme zajistit, abychom vyhodnocovali měření ve stejných bodech. Pro částečné usnadnění problematiky jak zajistit, že srovnávané přijímače jsou ve stejné poloze, jsme se rozhodli použít rozbočovač anténního signálu. Na jednu stranu díky tomu můžeme prohlásit, že přijímače připojené na rozbočovač opravdu přijímají signál ze stejné pozice, na druhou stranu je třeba ověřit, zda rozbočovač vnáší vlastní chybu do aparatury a v případě že ano, tak do jaké míry.

Tab. 2.1: Parametry splitterů GNSS

Parametry	GPS Source [12]	NAVtech	Tallysman
Frequency range	1-2 GHz	1.1 – 1.7 GHz	1 – 2 GHz
Output impedance	50 ohm	50 ohm	50ohm
Gain	step 1	18 dB	X
Gain flatness	2	1 dB	X
Amplitude balance	0.5 dB	0.5 dB	0.5 dB
Phase balance	1 deg	1 deg	2 deg
SWR	2.0:1	2.0:1	1.25
Loss	7.5 dB	X	X
Noise	1.8 dB	4.2 dB	X

Signálový rozbočovač zajišťuje symetrické rozbočení signálu na všechny své vývody. Rozbočení zpravidla způsobuje fázový a amplitudový posun. Amplitudový posuv lze při znalosti topologie experimentu kompenzovat aktivním zesilovačem již při zadávání výroby rozbočovače. Fázový posun nelze jednoduše omezit. Jedním z cílů měření je stanovit, jaký vliv bude mít fázový posuv signálu na přesnost určení polohy.



Obr. 2.1: Rozbočovač GNSS [12]

Zjednodušující předpoklady

Souhrn informací o principu určování pozice a chybách vstupujících do procesu na různých místech dává pobídku myšlenky, zda jsme vůbec schopni postihnout všechny faktory ovlivňující měření a do jaké míry. Je zřejmé, že sledovat všechny parametry ve všech měřeních by bylo nejen výpočetně náročné, ale také velmi nepřehledné. Výsledná měření bychom museli podrobit aproximacím, jednotlivé chyby bychom

patrně sdružovali do kategorií apod. Jistou formu zjednodušení proto provedeme již před zahájením samotného experimentu.

Předvedli jsme si, že při měření pozice s využitím GNSS přijímačů existuje velké množství neznámých, které mohou ovlivňovat proces měření. Tyto jevy jsme si rozdělili na technicky vzdálené a blízké. Vzdálené jevy proto, že jsou mimo dosah schopností a možností uživatele. Tyto jevy nemůžeme přímo potlačit nastavením přijímačů, ale některé dopady na měření způsobené těmito jevy lze potlačit vhodným nastavením experimentu.

Blízké jevy proto, že jsou na dosah uživateli, lze je přímo ovlivňovat nastavením koncových zařízení, jejich vzájemnou konfigurací či jinak. Tyto vlastnosti může uživatel volit již při koupi přijímačů nebo v průběhu měření. Kupříkladu můžeme obměňovat použité antény, měnit jejich rozteč, měnit délky kabelů a další. Vybrané parametry, jejichž vliv budeme zkoumat, jsou uvedeny v souhrnné tabulce navržených experimentů.

Dlouhodobá stálost

Shrnutím předcházejících jevů také dojdeme k poznatku, že GNSS měření mohou být podle aktuálního stavu atmosféry a samotné GNSS soustavy zatížena časově proměnnou chybou. Chyba měření se může měnit v krátkém i dlouhém časovém intervalu, v závislosti na zdroji. Při dlouhodobých měřeních lze předpokládat, že relativní chyba měření bude obdobná u singulárních (s jedním přijímačem) i diferenciálních měření. U krátkodobých měření můžeme předpokládat, že diferenciální měření budou výrazně kvalitnější, jelikož z principu potlačují některé chybové faktory.

Statická měření můžeme vhodně adaptovat tak, abychom výsledný dopad fluktuace parametrů potlačili, nebo alespoň zprůměrovali. Nejsnáze toho dosáhneme pomocí měření po dostatečně dlouhou dobu. Víme, že perioda satelitních soustav je zpravidla o něco méně než 12 hodin. Navržený interval měření je proto dvojnásobek periody soustav a očekáváme, že za tuto dobu se vyskytne dostatek náhodných jevů, které budou alespoň přibližně rovnoměrně rozloženy.

U dynamických měření bychom mohli navrhnout stejné intervaly měření, ovšem jejich realizace by byla až na několik experimentálních výjimek obtížná. Pokud pomineme finanční nebo personální náročnost samotného měření této délky, musíme řešit přinejmenším jeden výrazný problém. V průběhu takto dlouhého dynamického měření se nebude měnit pouze vysílací soustava a parametry signálu, ale také parametry vozidla a výsledná trajektorie přijímače.

Pro účely této práce proto budou dynamická měření omezena na krátké pracovní úseky, během kterých budeme zkoumat pouze klíčové parametry dynamického

pohybu a jejich vývoj v krátkém časovém horizontu.

2.1 Metodika měření

Uvedli jsme si, že kvalitu výsledků experimentu lze ovlivnit více způsoby v různých bodech. Princip výpočtu RTK vychází z jednoznačně definovaných matematických vztahů. Jednotlivé přijímače se proto mohou lišit především podle nastavení vnitřních parametrů. Různí výrobci nad základním výpočtem mohou aplikovat odlišné filtry a uživatelská nastavení se mohou lišit. Rozdíly mohou být v míře otevřených možností a intervalem volby v rámci jednotlivých možností.

Podstatou experimentu je provádět jednotlivá měření odděleně. Mezi jednotlivými měřeními měnit pouze jeden druh nastavení, aby každá změna ve výsledcích byla jasně identifikovatelná a případný jev byl izolovatelný.

Tab. 2.2: Sledované jevy

Zkoumaný jev	Předpokládaný účel
Délka měření	Statistická vyváženost souboru
Umístění	Vliv omezení výhledu na oblohu na dostupnost signálu
Antény	Schopnost přijímat satelitní signály, zisk signálu
Pozice antén	Vliv rozteče na určení orientace a pozice
GNSS Systémy	Kvalita měření podle množství použitých systémů
Filtry pohybu	Vliv pohybových profilů na výslednou přesnost
Referenční stanice	Vliv vzdálenosti mezi přijímači na výslednou přesnost
Dostupnost rtk	Poměr aktivity v režimu RTK a celkového času měření
Inicializace rtk	Prodleva po prvního vzorek v režimu RTK
Opakovatelnost	Test na identifikovatelné drifty měřených hodnot

Tabulka plánovaných experimentů

Seznámili jsme se s největšími zdroji chyb. Vybrali jsme parametry experimentu, jejichž sledování může mít největší přínos. Shrnutím všech informací dostáváme výchozí tabulku experimentů. Podle Tab. 2.3: Plánovaná měření budeme postupovat při samotném měření. Některá nastavení nebo volby měření budeme měnit za chodu podle toho, jak přínosné výsledky dostaneme. Je možné, že vybrané sekvence nebudou vystihovat podstatu problematiky a proto bude zapotřebí sekvenci pozměnit.

Id	Antena	Rozteč [m]	Systémy	Trimble	Piksi3	Měření[hh:mm]	Korekce
1	AG25	1	GPS/GLO	Kinematic	High Dynamics	24:00	CZEPOS RTK3MSM
2	AG25	1	GPS	Kinematic	High Dynamics	24:00	CZEPOS RTK3MSM
3	AG25	1	GPS/GLO/GAL	Kinematic	High Dynamics	24:00	CZEPOS RTK3MSM
4	AG25	1	GPS/GLO	Portable	Hirozontal HD	24:00	CZEPOS RTK3MSM
5	AG25	1	GPS/GLO	Static	Low Dynamics	24:00	CZEPOS RTK3MSM
6	AG25	1	GPS/GLO	Kinematic	High Dynamics	24:00	LOCAL TRIMBLE
7	AG25	2	GPS/GLO	Kinematic	High Dynamics	24:00	CZEPOS RTK3MSM
8	AG25	0.5	GPS/GLO	Kinematic	High Dynamics	24:00	CZEPOS RTK3MSM
9	AV34	1	GPS/GLO	Kinematic	High Dynamics	24:00	CZEPOS RTK3MSM
10	AV34	1	GPS	Kinematic	High Dynamics	24:00	CZEPOS RTK3MSM
11	AV34	1	GPS/GLO/GAL	Kinematic	High Dynamics	24:00	CZEPOS RTK3MSM
12	AV34	1	GPS/GLO	Portable	Hirozontal HD	24:00	CZEPOS RTK3MSM
13	AV34	1	GPS/GLO	Static	Low Dynamics	24:00	CZEPOS RTK3MSM
14	AV34	1	GPS/GLO	Kinematic	High Dynamics	24:00	LOCAL TRIMBLE
15	AV34	2	GPS/GLO	Kinematic	High Dynamics	24:00	CZEPOS RTK3MSM
16	AV34	0.5	GPS/GLO	Kinematic	High Dynamics	24:00	CZEPOS RTK3MSM
17	Zephyr 2	1	GPS/GLO	Kinematic	High Dynamics	24:00	CZEPOS RTK3MSM
18	Zephyr 2	1	GPS	Kinematic	High Dynamics	24:00	CZEPOS RTK3MSM
19	Zephyr 2	1	GPS/GLO/GAL	Kinematic	High Dynamics	24:00	CZEPOS RTK3MSM
20	Zephyr 2	1	GPS/GLO	Portable	Hirozontal HD	24:00	CZEPOS RTK3MSM
21	Zephyr 2	1	GPS/GLO	Static	Low Dynamics	24:00	CZEPOS RTK3MSM
22	Zephyr 2	1	GPS/GLO	Kinematic	High Dynamics	24:00	LOCAL TRIMBLE
23	Zephyr 2	2	GPS/GLO	Kinematic	High Dynamics	24:00	CZEPOS RTK3MSM
24	Zephyr 2	0.5	GPS/GLO	Kinematic	High Dynamics	24:00	CZEPOS RTK3MSM
25*	Zephyr 2	1	GPS/GLO	Kinematic	X	24:05	CZEPOS RTK3MSM
26*	Zephyr 2	1	GPS/GLO	Kinematic	X	24:05	CZEPOS RTK3MSM
27*	Zephyr 2	1	GPS/GLO	X	High Dynamics	24:00	CZEPOS RTK3MSM

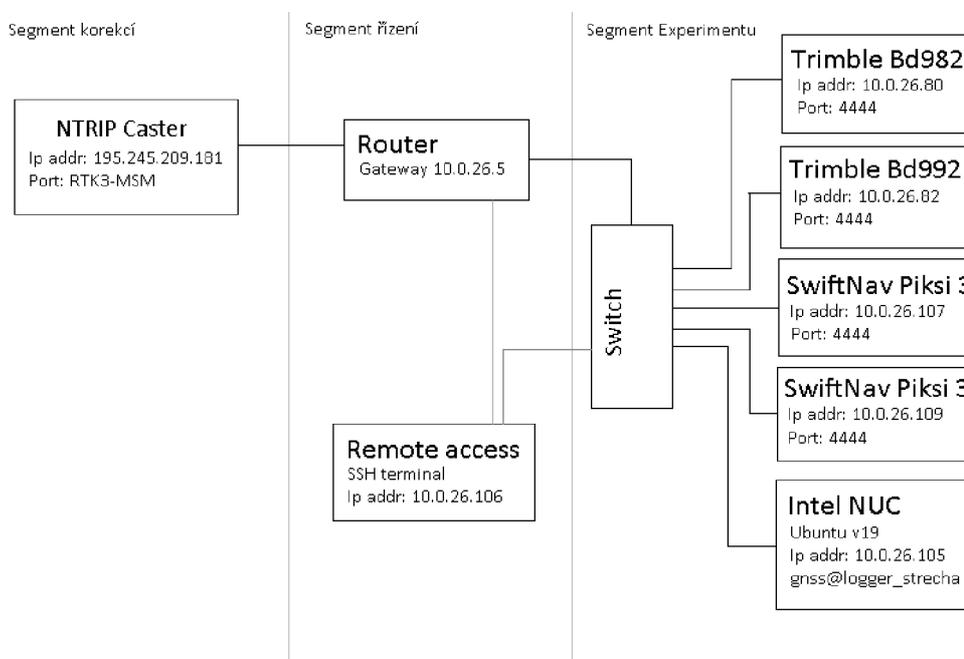
Tab. 2.3: Plánovaná měření

2.2 Pracovní postup

Sestavili jsme komplexní a detailní návrh měření, která považujeme za nezbytná pro vyhodnocení přesnosti a kvality přijímačů. Nyní potřebujeme navrhnout řetězec zpracování, který sestává z ukládání, parsování a vyhodnocení.

Aparatura

K měření parametrů přijímačů byla sestavena účelová měřicí aparatura. Aparatura je přenosná, vodotěsná, zabudovaná v rozvaděčovém boxu. Součásti nejsou záměnné. Pro statická měření jsme namontovali experiment na fixní měřicí blok na budově VUT FEKT, Technická 12, křídlo E, Brno - Královo Pole. Při dynamických měřeních jsme použili jednoduchou neopakovatelnou montáž na testovací vozidlo v blízkosti téže budovy.



Obr. 2.2: Síťová topologie experimentu

Aparatura se skládá z dvojice antén, dvojice splitterů, trojice zvolených přijímačů, síťové komunikace a doplňků. Sestavení aparatury a topologie zapojení zůstává identické pro statická i dynamická měření. Odlišnost nalezneme pouze v umístění antén a zdroji energie. Pro jednoduchost provedení jsme zvolili přívod 230V na který jsou připojeny adaptéry všech zařízení. Umístění antén je vždy fixované pomocí šroubových úchytů se známými vzdálenostmi.

Klíčovými řídicími komponentami experimentu jsou Intel NUC a GNSS přijímače Piksi 3, Trimble BX982 a Trimble BX992. Komunikace mezi zařízeními je vedena

pomocí Ethernetu. Operační systém instalovaný na NUC je Linux v19. Dále je instalována Swift konzole a balíček „Piksi Tools“ [11] pro snadný přístup k nastavení GNSS přijímače Pixsi 3.

Provedení měření

Vlastní měření provádíme podle navržené Tabulky 2.3: Plánovaná měření. V této fázi zůstává hardwarové navržení experimentu beze změn. Sledujeme postup jednotlivých měření, ověřujeme výsledky a podle dosažených hodnot případně volíme taková měření, která nejlépe vystihují zkoumanou problematiku přijímačů. Souhrnně nás zajímá celková kvalita měření. Akvizice spektra hodnot a krokové provádění měření s unikátní změnou nám umožní vyhodnotit i specifické parametry jednotlivých aparatur. Jmenovitě můžeme určit, jak jednotlivá měření ovlivní volba antény a jejich rozteč. Můžeme určit jak volba použitých systémů, korekce či zvolené filtry ovlivní výsledné parametry měření. Dopad jednotlivých změn na měření lze nepřímo vyvodit z tabulky přesnosti měření uvedené v kapitole Vyhodnocení.

Ukládání dat

Nejprve se musíme postarat o ukládání dat. Měření pozice pomocí GNSS přijímačů je datově náročná záležitost. Nepředpokládáme, že experimentální aparatura pojme všechny bloky měření do paměti a navíc je zapotřebí tato data zálohovat po pozdější použití. Odhadovaný segment měření o délce 24h zabere přibližně 1 GB místa při frekvenci datového výstupu 50 Hz. Měření budeme provádět na 3 přijímačích současně.

Následně uvážíme všechna navržená měření. Potřebujeme uložit surová naměřená data a následně i tabulkové soubory vzniklé parsováním. Celkový odhadovaný objem dat je přinejmenším 0,5 TB. Pro účely vyhodnocení těchto experimentů využijeme možností archivačního úložiště CESNET, kde budeme ukládat veškerá získaná data.

Získávání dat

Loggování dat zajišťuje minimální skript s využitím příkazu netcat. GNSS přijímače jsou nastaveny jako TCP servery, z řídicího PC se připojujeme na zvolené porty a veškerou komunikaci ukládáme do souboru. Pro jednoduchost organizace každé měření individuálního přijímače generuje jeden soubor. Soubory uložené v archivu CESNET sdružujeme do složek podle ID měření.

U zvolených GNSS přijímačů volíme interní protokoly, které jsou pro daná zařízení výchozí, a obsahují veškeré informace, které přijímače vyhodnocují. Využití interních plnohodnotných protokolů minimalizuje offline náročnost procesu. Veškerá data, se kterými pracujeme, jsou seřazena do tabulkových souborů pomocí parserů.

Parsování

Uvedli jsme si, že přijímače nepředávají data v jednoduchých ASCII formátech, nýbrž v komprimovaných binárních protokolech. Před samotným kvalitativním posouzením experimentu je nezbytné transformovat binární protokoly na běžnou reprezentaci v ASCII. K tomu je zapotřebí syntaktické analýzy datových záznamů; potřebujeme sestavit parsery, které budou schopny tyto binární datové záznamy převést na univerzální reprezentaci. Tato zjednodušená reprezentace nám poté umožní jednoduchým nahlédnutím kontrolovat správnost dat. Současně také výrazně zjednoduší přenos dat do jiných programů a jejich zpracování.

SBP parser

Princip parseru GNSS dat spočívá ve čtení lineárního streamu dat. V tomto streamu jsou unifikované pakety informace. Parser podle hlavičky identifikuje jednotlivé zprávy a podle knihovny dekóduje informaci.

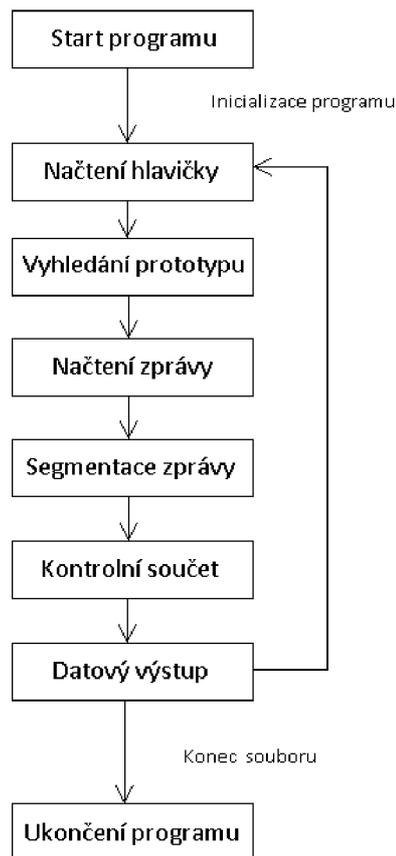
Implementace realizuje velmi jednoduchý stavový automat. Před započítím syntaktické analýzy program načte soubor do paměti. S daty pracujeme v mezipaměti programu. Jeden segment měření zabírá přibližně 1 GB místa na disku. Při současných možnostech výpočetních jednotek pracujeme s celým souborem najednou

Každý soubor „.sbp“ začíná a končí krátkou sekvencí procesních informací, které slouží především pro zajištění komunikace mezi dvěma přijímači a v rámci automatu mají vlastní stavy. Tyto sekce nejsou uživatelsky zajímavé a automat je vyřazuje.

Funkce vykonávající parsování zpráv je volána smyčkou a počíná načtením hlavičky zprávy. Jelikož jedno volání zpracuje vždy jeden ze dvou segmentů zprávy, je funkce volána při každém načítání hlavičky a načítání zbývajících částí zprávy.

Poté, co program načte hlavičku a najde prototyp funkce, který tato hlavička indikuje, volá znovu funkci a načítá zbytek zprávy. Podle prototypu zprávu dělí na segmenty, provádí kontrolu, že data nebyla poškozena a předává vybrané sekce zprávy na výstup. Kontrola zprávy je průběžná, parser hlídá obecnou validitu jednotlivých segmentů (!Null). Prvkem kontrolní součet v logickém řetězci se myslí parametr checksum, pomocí kterého parser kontroluje, zda je parsování úspěšné a data kompletní.

Výchozí SBP protokol obsahuje veškeré informace z průběhu měření ve formátu nečitelném pro člověka. Po konverzi dostáváme jednoduché „.csv“ tabulky obsahující pouze elementární data. Výběr dat, která chceme konvertovat, lze nastavit před spuštěním procesu parsování. Parsování je nedestruktivní proces. V případě, že konvertovaná data nevyhovují požadavkům, lze parsování spustit opětovně s upravenými parametry.



Obr. 2.3: Schéma parseru protokolu SBP

2.3 Zpracování dat

Pro samotné zpracování upravených dat bylo zvoleno prostředí Matlab. Identické výsledky bychom dostali i s použitím jazyka Python, prostředí Octave a dalších. Pro následující operace s daty není důvod preferovat jeden jazyk nad druhým, možná bychom našli nuance v možnostech optimalizovat kód nebo zobrazení. Jediný argument pro volbu prostředí Matlab je, že je podporovaný v průběhu celého studia a tudíž obecné povědomí o tomto prostředí je na vyšší úrovni.

Stacionární měření

U stacionárních měření předpokládáme, že změny se dějí pouze v rozložení satelitů a prostředí mezi satelity a přijímači. Soustavu přijímačů samotných v rámci jednoho segmentu měření považujeme za neměnnou. Díky tomu můžeme provést důkladný statistický rozbor naměřených souborů hodnot. Známe referenční pozici, vůči které můžeme vztáhnout naměřené hodnoty.

Dynamická měření

Vzhledem k časovým intervalům měření u dynamických měření naopak předpokládáme, že rozložení satelitů a stav prostředí jsou v rámci jednotlivých měření konstantní nebo alespoň blízké původnímu stavu. Výsledná vyhodnocení měření jsou prováděna obdobně jako u stacionárních měření. Navíc můžeme srovnávat trajektorii pohybu mezi jednotlivými měřeními. Z důvodu absence kvalitního etalonu však nejsou jednotlivé hodnoty srovnávány s referenční pozicí.

Zpracování

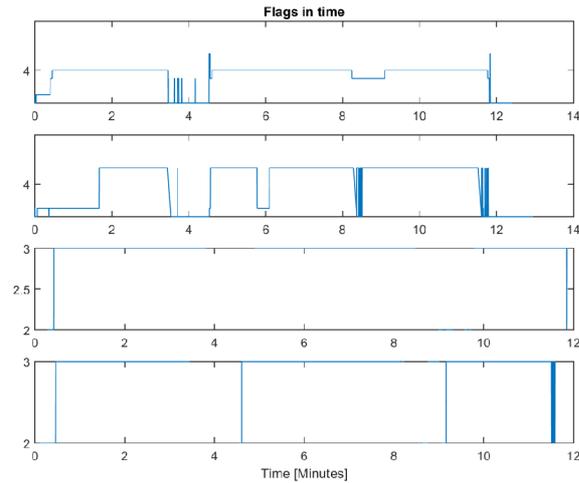
Až do momentu kdy načteme data do prostředí Matlab jsou data bez kvalitativní úpravy. Data prošla pouze syntaktickou analýzou a překladem do univerzálního formátu tvořeného základními znaky ASCII tabulky. Tímto končí fáze prosté manipulace s daty a začíná fáze úprav. V teoretickém rozboru jsme si popsali způsob měření pozice, souřadné systémy, ve kterých hodnoty uvádíme, jednotlivé algoritmy určování pozice a chyby vstupující do procesu měření.

time.ofweek	pos.enu-e[m]	pos.enu-n[m]	pos.enu-u	pos.rmse-e	pos.rmse-n	pos.rmse-u	spd.horiz	spd.course	ori.yaw	ori.pitch	ori.roll[rad]	pos.flags
491081120	-1285.5781	2361.9976	30.6769	0.0059	0.0070	0.0176	0.004	0.0000	5.8376	-0.0011	0.0000	7
491081140	-1285.5786	2361.9982	30.6787	0.0059	0.0070	0.0176	0.003	0.0000	5.8375	0.0000	0.0000	7
491081160	-1285.5802	2361.9992	30.6799	0.0059	0.0070	0.0176	0.002	0.0000	5.8361	-0.0006	0.0000	7
491081180	-1285.5781	2361.9969	30.6781	0.0059	0.0070	0.0176	0.001	0.0000	5.8375	-0.0035	0.0000	7
491081200	-1285.5766	2361.9989	30.6793	0.0059	0.0070	0.0176	0.000	0.0000	5.8360	-0.0014	0.0000	7
491081220	-1285.5776	2362.0008	30.6825	0.0059	0.0070	0.0176	0.001	0.0000	5.8371	0.0011	0.0000	7
491081240	-1285.5773	2361.9995	30.6764	0.0059	0.0070	0.0176	0.001	0.0000	5.8369	-0.0009	0.0000	7
491081260	-1285.5776	2361.9966	30.6720	0.0059	0.0070	0.0176	0.001	0.0000	5.8353	-0.0036	0.0000	7
491081280	-1285.5774	2361.9965	30.6739	0.0059	0.0070	0.0176	0.001	0.0000	5.8372	-0.0016	0.0000	7
491081300	-1285.5771	2361.9982	30.6766	0.0059	0.0070	0.0176	0.002	0.0000	5.8381	-0.0025	0.0000	7
491081320	-1285.5777	2361.9968	30.6739	0.0059	0.0070	0.0176	0.001	0.0000	5.8359	-0.0068	0.0000	7
491081340	-1285.5773	2361.9978	30.6761	0.0059	0.0070	0.0176	0.001	0.0000	5.8372	-0.0064	0.0000	7
491081360	-1285.5766	2362.0009	30.6835	0.0059	0.0070	0.0176	0.000	0.0000	5.8390	0.0009	0.0000	7

Obr. 2.4: Záznam surových naměřených dat

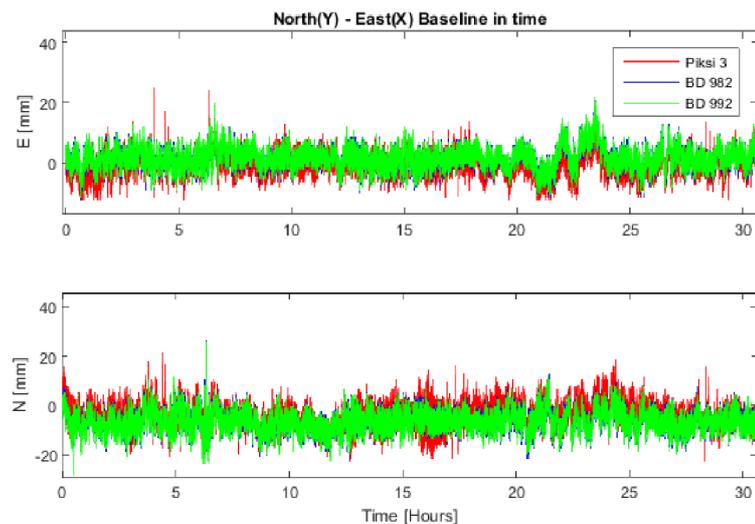
V první části zpracování to má následující dopady. Data, která jsme načtli, potřebujeme roztřídit tak, abychom s nimi dále mohli jednoduše pracovat. Prvním, velmi intuitivním krokem je rozdělit tabulkový soubor podle sloupců na jednotlivé veličiny, například čas [s], souřadnice E/N/U [mm], orientace [°], rms chyby udávané přijímačem [mm], počet použitých satelitů [-] a v neposlední řadě režim řešení pozice [-]. V případě, že parsery nemají nastavený výstup ve shodných jednotkách, je zapotřebí tuto nesrovnalost vyřešit vhodným převodem jednotek.

Režim řešení pozice (SPP, SBAS, DGNS, RTK Float a Fix) slouží jako další třídící parametr. V rámci vyhodnocení dat nás zajímá kvalita měření pouze v režimu RTK Fix, ostatní režimy jsou zajímavé pouze z hlediska poměrného zastoupení v



Obr. 2.5: Záznam hodnot Flag v čase

rámci měření. Prakticky se jedná o poměrné vyhodnocení aktivity v režimu RTK vůči celkovému času měření.

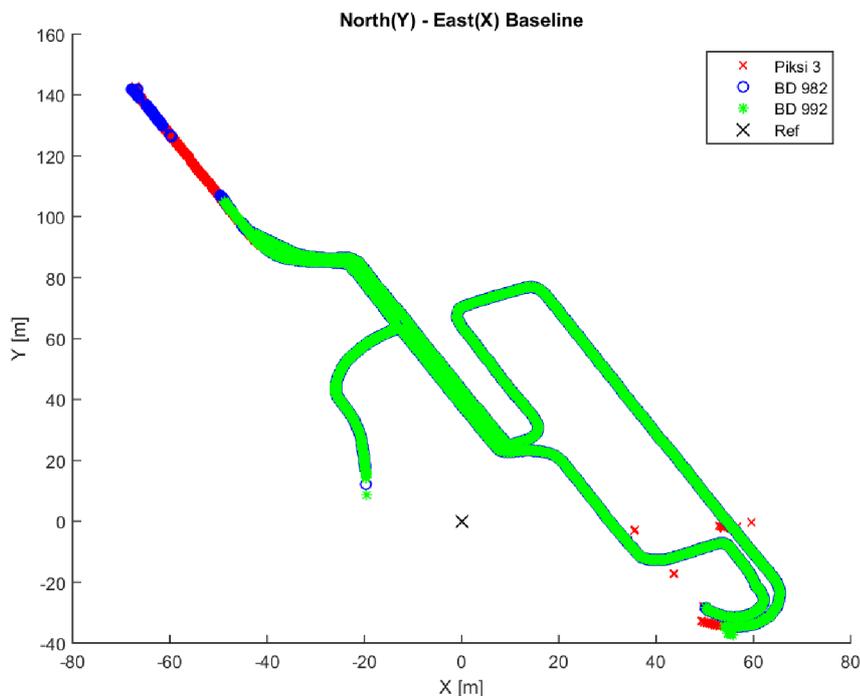


Obr. 2.6: Časový vývoj hodnot souřadnic East, North

Druhou částí zpracování je kontrola dat. Přijímače mohou v průběhu experimentu zaznamenat chybový signál, satelity se mohou nacházet v nevhodné konstelaci, která neumožňuje dostatečně dobře vyhodnotit pozici. Dále mohla při výpočtu jednoduše vzniknout numerická chyba, při přenosu došlo k výpadku a byla ztracena informace a jiné.

Možných zdrojů hodnot mimo očekávaný interval je mnoho, ale jejich dopad na výsledné měření pozice lze roztrždit do tří skupin. Strukturálně chybné segmenty, které nacházíme již při samotném parsování dat a indikujeme je jako hodnotu „Not a number“. Numericky správné segmenty s nesprávnou hodnotou, které pozici přijímače domněle umístí kilometry od měřené pozice. Numericky správné segmenty se správnou hodnotou, která je ovšem zatížena velkým chybovým parametrem. Jedná se o poslední krok ve zpracování, který je společný pro statická i dynamická měření.

Následuje rozdělení procesu podle vlastností jednotlivých přístupů. Princip stacionárních měření nám umožnil provádět dlouhá měření se stálou a stabilní aparaturou. Známe referenční pozici. Víme, že aparatura jako celek se v průběhu měření nepohybuje. Naproti tomu u dynamických měření víme, že se celek měřící soustavy pohybuje, předpokládáme, že jednotlivé části zůstávají v identické pozici po celé měření a vzhledem k přesnosti dostupných etalonů vztahujeme měření vůči sobě.



Obr. 2.7: Souřadnice East, North v rovině

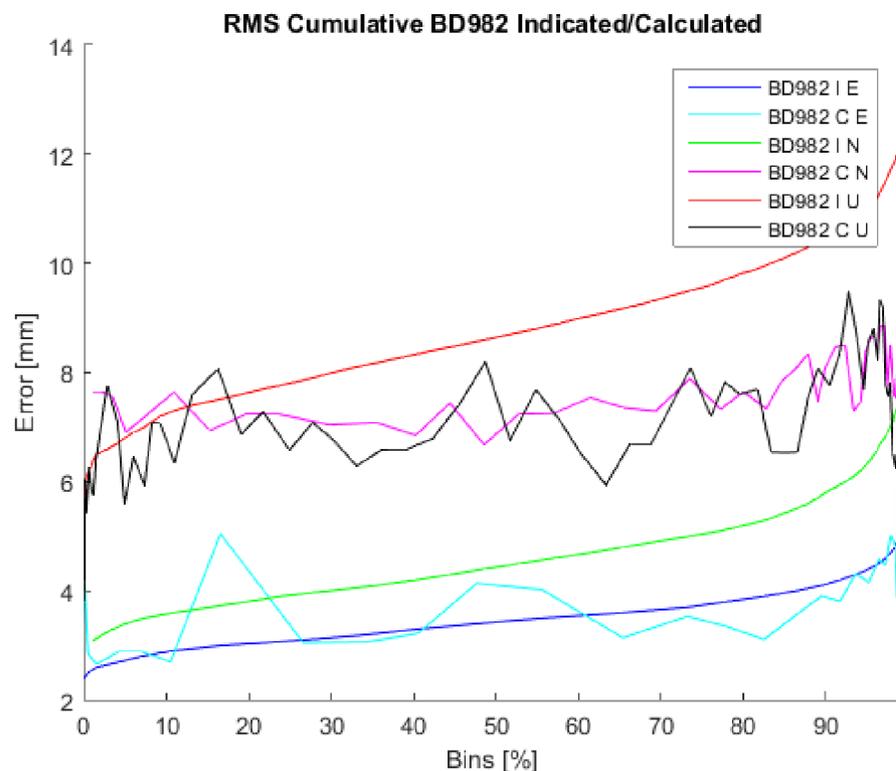
Nyní je vhodné zavést diskuzi, které hodnota ještě spadá do intervalu „nepřesné měření“ a je vhodné ji zahrnout do množiny měřených hodnot, a která hodnota již patří do intervalu „přesné neměření“. Průběžnou kontrolou jednotlivých měření jsme zjistili, že více než 99,9% hodnot leží v intervalu do 0,5 m od referenční pozice. Zde zahrnujeme i případy, kdy kvalita řešení poklesne do režimu RTK Float či dokonce SPP+SBAS. Proto jsme se rozhodli stanovit interval, kde měření považujeme za

směrodatná, na ± 1 metr od referenční hodnoty. Ostatní hodnoty vyřazujeme z množiny z důvodů přehlednosti vyobrazení a faktu, že v praxi bychom tato data z objektivních důvodů nevyužili.

Po roztrídění dat podle režimu měření a odebrání případných neplatných dat následuje spárování hodnot podle časových značek. Sjednocení měření podle časových značek je nezbytné pro správné vyhodnocení měření. Snadno lze usoudit, že u libovolných měření veličin, která nebyla provedena ve stejný časový okamžik, nelze očekávat shodné výsledky a tudíž výsledky ani nelze vzájemně porovnávat.

Při studiu jednotlivých přijímačů jsme si uvedli, že mohou pracovat na různých vyhodnocovacích frekvencích. Může se jednat o rozdíly maximálních i aktuálně nastavených pracovních frekvencí. Dalšími důvody případné nesrovnalosti časových značek mohou být situace, kdy některý přijímač nepracuje v režimu RTK Fix a ostatní ano, a vyjmutí segmentů měření kvůli invalidnímu obsahu.

Po filtraci dat podle režimu měření, validaci segmentů a srovnání časových značek můžeme provést samotné vyhodnocení. Jako nosný parametr měření přijímačů ve statických měřeních jsme se rozhodli zvolit následující. Přijímače udávají aproximaci chyby každého měření dle rovnice (1.7). Hodnoty udávané přijímačem seřadíme vzestupně. Vznikne tak samostatný histogram hodnot udávaných přijímačem.



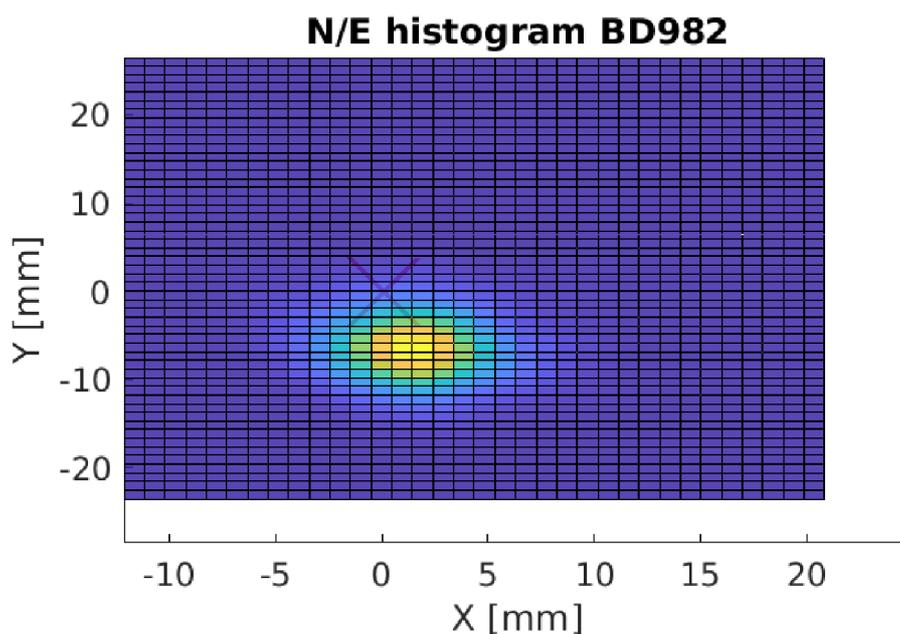
Obr. 2.8: Kumulativní histogram hodnot RMS

Unikátní hodnoty z tohoto histogramu použijeme k rozřídění naměřených dat do podmnožin. Nad každou podmnožinou provedeme výpočet směrodatné odchylky měření. Tímto vzniká druhý histogram, kde osa X je společná s osou histogramu aproximovaných hodnot, a osa Y nese informaci o pravé odchylce, vztažené k referenční hodnotě. Poměrem těchto vázaných histogramů dostáváme vyjádření relativní odchylky odhadu přijímače od reality.

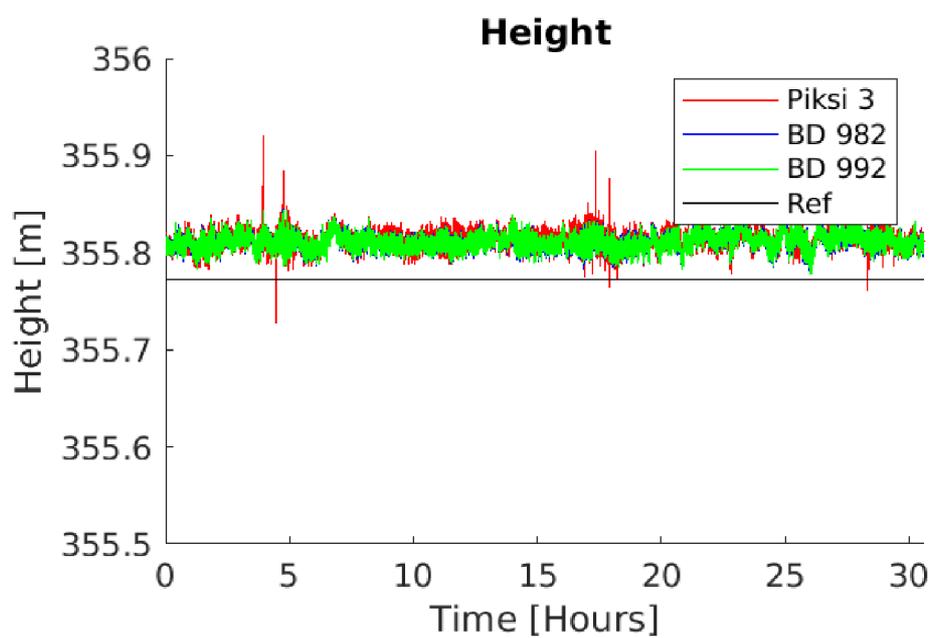
Z vypočtených hodnot odchylky v jednotlivých souřadnicích pak s využitím vztahů (1.11) a (1.12) dostáváme celkovou chybu měření v rovině. Chybu ve výškové souřadnici ponecháváme oddělenou.

Na Obr. 2.8 pak můžeme pozorovat nosný výsledek experimentů provedených v rámci této práce s využitím zmíněných vztahů. Hladké křivky s označením „I“ značí kumulativní histogram hodnot získaných ze záznamu přijímače. Křivky s označením „C“ jsou pomyslné váhovací křivky odchylky. Jsou to lineárně interpolované průběhy hodnot odchylek v jednotlivých bodech udávaných přijímači.

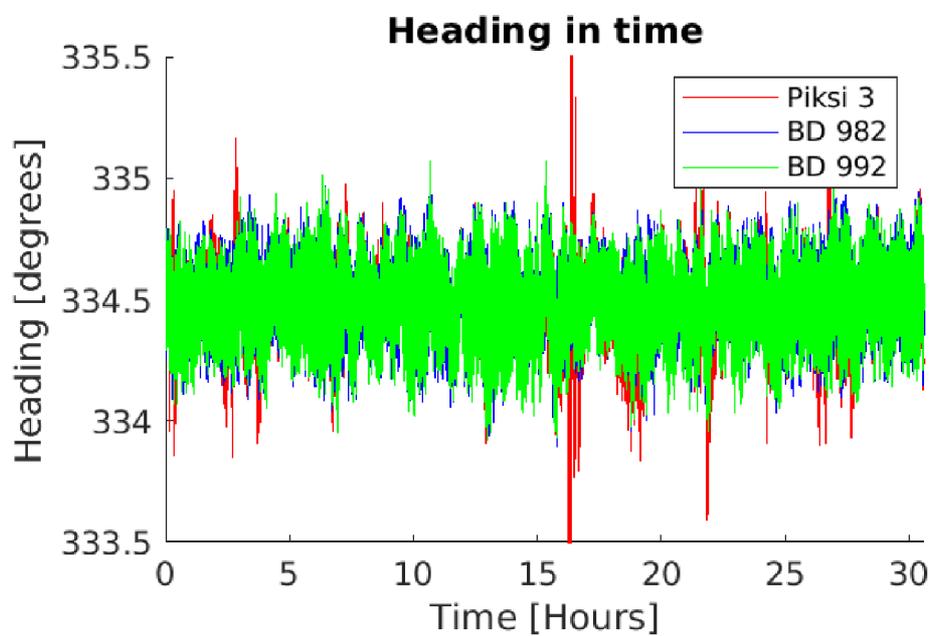
Dalšími výstupy z měření jsou následující vyobrazení:



Obr. 2.9: 3D histogram pozice East, North v rovině



Obr. 2.10: Průběh hodnoty Height v čase



Obr. 2.11: Průběh hodnoty Heading v čase

3 Vyhodnocení

Při vypracování experimentu bylo provedeno 19+3 statických a 6 dynamických měření. Souhrnné/přehledové parametry měření jsou uvedeny v Tabulkách 3.1 - 6. Tabulky 3.1 a 3.5 obsahují seznam jednotlivých měření a jejich nastavení. Tabulky 3.2 - 4. a 3.6 pak ukazují samotné výsledky jednotlivých přijímačů korespondující s jednotlivými nastaveními.

Stacionární měření jsme prováděli na pevně montované konstrukci. Antény měly plný výhled. Pozice jsme v průběhu času neměnili, jediná změna vznikla při změně rozteče antén. Srovnávací hodnotou je referenční poloha dané konstrukce změřená v roce 2013 a zanesená do souřadnicového systému ETRS89. Hodnoty referenční souřadnice jsou $X = 4000143,357$ m, $Y = 1190608,371$ m, $Z = 4807361,930$ m.

Dynamická měření jsme prováděli na pojízdné konstrukci. Antény měly v rámci vozidla plný výhled. Pozice v rámci experimentálního vozidla se opět neměnila. Pro srovnávání dynamických měření nebyl dostupný etalon pro měření referenční pozice. Hodnoty naměřené při dynamických měřeních jsou pouze vztaženy mezi jednotlivými přijímači a provedenými měřeními.

3.1 Stacionární měření

Tabulky 3.2 - 4. stacionárních měření jsou organizovány dle hierarchie od shora dolů a obsahují následující položky. ID měření slouží k jednoduchému rozklíčování jednotlivých nastavení experimentů. Hodnoty rozptylu ve vybraných rovinách jsou uvedeny v běžně používaných hodnotách CEP (50%), DRMS, T95 a 2DRMS. Hodnota vertikálního rozptylu není uvedena pro hodnotu T95, jelikož nemá valný přínos ji uvádět.

V rámci jednotlivých sloupců pravděpodobnosti je vždy dvojice sloupců. Levé sloupce uvádějí hodnotu, jakou pro daný interval a dané měření indikuje přijímač, a pravé sloupce obsahují skutečnou chybu vypočtenou podle referenční pozice. Sloupec RTK indikuje poměr četnosti aktivity v režimu RTK.

Z tabulky 3.2 pro přijímač SwiftNav Piksi3 lze dedukovat, že, pro zvolenou metriku a vybraná měření, jsou reálné hodnoty přesnosti přijímače vyšší úrovní, než jak je odhaduje přijímač. Ze statistického hlediska nepozorujeme žádné měření, které by mělo nadměrný nepoměr mezi indikací a realitou. S přihlédnutím ke křivkám uvedeným v příloze C) stacionární měření lze konstatovat, že přijímač mírně nadhodnocuje přesnost ve spodní části spektra a podhodnocuje v horní části spektra.

Přijímače Trimble BD982 a BD992 jsou, alespoň co se parametrů týče, velmi podobné. Podávají proto velmi podobné výsledky. V rámci porovnání samostatných přijímačů můžeme pozorovat, že jednotlivé rozdíly mezi indikovanou a vypočtenou

přesností jsou menší. Navíc v oblastech, kde modely DOP odpovídají nastavení experimentu, je těsnost shody výpočtu a odhadu lepší. Naopak tam, kde modely selhávají, se indikovaná přesnost zhoršuje.

Všechny uvedené přijímače dosahují velmi vysokého poměru režimu RTK, zpravidla se jedná o hodnoty 99,9 a 100%, zaokrouhleno na jednu desetinu. Rozdíly v odhadované a vypočtené chybě hodnoty Heading nelze rozumně shrnout do tabulky kvůli řádovým rozdílům hodnot. Hodnoty chyby RMS Heading nalezneme v příloze C statická měření.

Při srovnání mezi přijímači si můžeme povšimnout především rozdílů mezi jednotlivými měřeními. Hlavní výhoda přijímačů Trimble spočívá v možnosti uživatelských nastavení výstupu. Přijímače Trimble jsou schopny pracovat s modelem antény a proto je jejich odhad chyby výšky lepší. Dále přijímače Trimble umožňují nastavení filtrů pohybu. Při jejich adekvátním nastavení pak můžeme dosahovat až o řád vyšší přesnosti u stacionárních měření, než jakou umožňuje přijímač Piksi 3.

Id	Antena	Systémy	Trimble	Piksi3	Měření	Korekce
1	AG25	GPS/GLO	Kinematic	High Dynamics	24:20	CZEPOS RTK3MSM
2	AG25	GPS	Kinematic	High Dynamics	24:10	CZEPOS RTK3MSM
3	AG25	GPS/GAL	Kinematic	High Dynamics	24:25	CZEPOS RTK3MSM
4	AG25	GPS/GLO	Portable	Hirozontal HD	24:30	CZEPOS RTK3MSM
5	AG25	GPS/GLO	Static	Low Dynamics	24:20	CZEPOS RTK3MSM
6	AG25	GPS/GLO/GAL	Kinematic	High Dynamics	24:25	CZEPOS RTK3MSM
7	Zephyr 2	GPS/GLO	Kinematic	High Dynamics	25:35	CZEPOS RTK3MSM
8	Zephyr 2	GPS	Kinematic	High Dynamics	24:40	CZEPOS RTK3MSM
9	Zephyr 2	GPS/GLO	Portable	Hirozontal HD	26:35	CZEPOS RTK3MSM
10	Zephyr 2	GPS/GLO	Static	Low Dynamics	24:20	CZEPOS RTK3MSM
11	Zephyr 2	GPS/GLO	Kinematic	High Dynamics	24:20	CZEPOS RTK3MSM
12	AV34	GPS/GLO	Kinematic	High Dynamics	25:00	CZEPOS RTK3MSM
13	AV34	GPS	Kinematic	High Dynamics	24:15	CZEPOS RTK3MSM
14	AV34	GPS/GAL	Kinematic	High Dynamics	24:25	CZEPOS RTK3MSM
15	AV34	GPS/GLO/GAL	Kinematic	High Dynamics	24:20	CZEPOS RTK3MSM
16	GPS500	GPS/GLO	Kinematic	High Dynamics	24:30	CZEPOS RTK3MSM
17*	Zephyr 2	GPS/GLO	Kinematic		24:05	CZEPOS RTK3MSM
18*	Zephyr 2	GPS/GLO	Kinematic		24:05	CZEPOS RTK3MSM
19*	Zephyr 2	GPS/GLO	Static		24:00	CZEPOS RTK3MSM

Tab. 3.1: Tabulka provedených statických měření

Id	Směrodatná odchylka vertikální (mm)						Směrodatná odchylka horizontální (mm)								RTK
	50%		68%		99%		50%		68%		95%		98%		
1	20,1	6,1	21,2	6,3	25,5	7,1	10,1	7,6	10,8	7,5	13,1	7,1	13,9	7,2	99,9
2	25,3	6,1	28,5	6,4	4,4	10,3	13,8	7,7	15,6	6,9	21,4	7,8	24,2	8,00	99,9
3	18,8	5,3	19,8	5,4	23,7	6,8	10,0	6,7	10,7	7,1	13,2	8,0	14,2	7,0	99,9
4	12,3	6,0	12,9	6,3	16,3	8,5	9,0	6,7	9,6	6,9	11,2	6,5	11,8	6,6	99,9
5	12,3	7,4	12,8	7,6	14,9	9,1	6,7	7,4	7,1	7,5	8,6	7,2	9,2	7,4	100
6	19,1	6,6	19,8	6,5	22,3	7,3	10,0	8,1	10,8	8,2	12,8	7,2	13,7	6,9	100
7	18,9	6,5	20,1	6,7	25,9	10,0	9,4	6,7	9,9	6,8	11,8	7,5	12,4	7,4	100
8	248	6,0	26,7	6,2	34,6	8,1	13,4	6,8	15,0	7,1	21,5	7,4	24,3	8,0	99,9
9	12,4	6,8	12,9	7,0	15,6	8,2	9,4	6,6	9,9	6,9	11,5	7,6	11,9	7,6	99,9
10	12,4	7,4	12,9	7,8	5,4	7,9	6,8	7,0	7,2	7,2	8,1	7,4	8,7	7,3	100
11	19,1	8,5	20,2	7,7	25,7	9,9	9,4	7,0	9,9	7,0	11,2	7,6	11,8	7,6	100
12	19,8	8,7	21,3	9,7	25,8	10,9	9,8	22,2	10,6	22,3	13,2	24,4	14,4	25,9	100
13	25,0	14,6	27,0	105	34,7	350	13,4	24,5	15,1	24,6	21,4	26,4	24,2	27,0	99,9
14	19,5	8,5	20,5	9,2	26,5	12,5	9,8	23,7	10,5	23,9	12,3	24,5	13,3	26,0	100
15	19,2	8,7	20,1	9,4	26,5	18,3	9,8	24,2	10,6	24,4	12,9	24,4	13,8	21,9	99,9
16	9,5	7,1	20,5	7,5	24,8	8,5	9,5	6,7	10,2	6,7	12,7	7,0	13,4	7,2	100

Tab. 3.2: Statické parametry Piksi 3

Id	Směrodatná odchylka vertikální (mm)						Směrodatná odchylka horizontální (mm)								RTK
	50%		68%		99%		50%		68%		95%		98%		
1	9,5	6,2	10,1	5,8	14,2	5,6	6,4	8,8	7,1	9,3	9,2	10,0	10,5	9,0	100
2	12,2	7,6	13,2	7,1	20,0	26,7	8,2	8,1	9,5	10,2	13,7	10,2	16,3	8,6	100
3	9,2	5,5	10,4	20,1	16,8	9,5	6,4	9,4	7,4	8,5	10,6	10,1	11,7	8,7	100
4	9,0	6,0	9,5	6,3	12,8	4,9	5,9	8,3	6,5	9,2	8,2	7,6	9,0	7,2	100
5	1,0	0,9	1,3	1,1	5,5	0,6	0,6	7,3	0,8	7,5	1,9	7,2	3,6	6,0	100
6	7,1	7,3	7,7	7,0	19,8	21,0	4,8	9,6	5,3	8,9	2,7	13,1	13,7	15,6	100
7	9,0	6,0	9,7	6,9	12,9	4,5	5,9	9,1	6,5	9,5	8,6	8,8	9,3	9,3	100
8	12,4	8,5	14,0	9,3	20,9	5,6	8,8	9,3	10,0	9,5	14,7	8,7	17,7	8,6	100
9	9,2	6,9	10,1	7,2	15,8	12,0	6,0	9,2	6,9	8,9	9,2	9,9	10,8	9,2	100
10	1,4	1,7	1,6	1,4	3,3	3,3	0,8	8,3	1,0	8,1	1,9	8,6	2,6	9,6	100
11	9,4	8,4	10,3	7,5	15,0	5,6	6,1	8,8	6,7	9,4	9,0	9,2	10,2	9,1	100
12	9,5	9,0	10,4	9,9	15,7	10,1	6,2	24,7	6,8	25,0	9,3	29,3	10,1	24,7	100
13	13,2	10,8	14,7	9,3	20,7	9,2	8,9	25,0	10,0	27,7	14,9	34,2	17,0	28,4	100
14	8,8	8,4	9,7	8,0	14,7	6,8	5,7	26,7	6,4	26,1	8,6	28,3	9,8	26,6	100
15	7,9	6,8	8,7	7,8	20,2	17,6	5,1	26,1	5,7	27,0	12	27,1	13,2	27,6	100
16	8,6	7,5	9,3	6,7	11,8	7,0	5,6	8,0	6,1	8,0	7,7	9,4	8,5	9,5	100

Tab. 3.3: Statické parametry Trimble BX 982

Id	Směrodatná odchylka vertikální (mm)						Směrodatná odchylka horizontální (mm)								RTK
	50%		68%		99%		50%		68%		95%		98%		
1	10,7	6,0	11,6	4,7	15,4	6,	6,9	8,9	8,4	8,8	10,9	9,1	11,7	9,5	100
2	14,1	7,1	15,8	9,7	20,7	8,2	9,4	9,3	11,3	8,5	15,6	9,0	17,3	12,2	100
3	10,3	5,8	11,3	29,1	13,8	5,7	7,0	8,	7,7	8,8	10,3	9,9	11,2	10,2	100
4	10,5	5,5	11,3	6,1	13,7	5,	6,9	8,4	7,7	9,1	9,3	9,1	9,6	7,7	100
5	1,6	1,5	1,8	2,0	4,5	0,4	1,0	7,4	1,1	7,2	2,3	8,2	2,9	6,4	100
6	8,1	6,8	8,7	6,8	13,0	4,7	5,6	9,8	6,1	9,4	7,7	8,9	9,1	9,2	100
7	11,3	6,0	12,2	5,4	16,0	8,6	7,5	8,8	8,2	9,4	10,2	7,6	10,8	10,1	100
8	17,0	7,2	18,6	7,2	23,5	12,0	11,5	9,6	13,	9,7	17,3	11,4	18,8	8,0	100
9	11,1	8,2	12,0	8,1	16,2	12,8	7,4	8,6	8,1	9,2	10,3	8,1	11,5	11,2	100
10	1,7	1,5	1,9	1,6	4,6	2,0	1,0	8,2	1,2	8,2	2,7	8,9	3,6	8,0	100
11	11,5	8,5	12,2	7,5	15,8	5,2	7,6	8,7	8,2	9,1	9,9	7,9	10,5	8,6	100
12	12,5	8,4	13,4	8,1	19,6	10,1	8,2	25,2	8,9	23,6	10,9	27,2	12,2	30,3	100
13	18,2	7,4	19,7	9,7	25,3	12,8	12,2	25,7	13,7	26,6	17,6	31,5	19,1	33,2	100
14	11,6	7,3	12,5	8,8	17,7	11,2	7,5	26,7	8,3	26,0	10,3	28,4	10,9	29,6	100
15	8,9	7,2	9,6	7,6	12,4	9,2	5,8	26,4	6,5	26,8	8,0	25,7	8,6	26,2	100
16	12,5	6,2	14,1	8,5	18,2	7,7	8,1	7,5	9,0	10,1	12,2	6,5	12,8	7,9	100

Tab. 3.4: Statické parametry Trimble BX 992

3.2 Dynamická měření

Vyhodnocení dynamických měření je obdobné stacionárním měřením. Rozdíly jsou v tom, že měření nebyla provedena s etalonem pozice a tudíž postrádáme informaci o správné pozici měření. Druhým specifickým je, že aparatura byla v pohybu a proto vyhodnocujeme i podobnost jednotlivých měření.

Zatímco stacionární měření je zacíleno na získání co nejpřesnějších výsledků, dynamické měření jsme zaměřili na maximální výpovědní hodnotu v praktickém provozu. Dynamické měření zahrnuje interval inicializace režimu RTK na všech přijímačích. Následuje chod v běžné viditelnosti, chod v kompletním zastínění, návrat do běžné viditelnosti, poté částečné zastínění poloviny oblohy a závěrem návrat do plné viditelnosti.

Tabulka 3.6 dynamických měření sjednocuje parametry všech dynamických měření a obsahuje následující položky. ID měření slouží k jednoduchému rozklíčování jednotlivých nastavení experimentů. Hodnoty rozptylu ve vybraných rovinách jsou uvedeny v běžně používaných hodnotách CEP (50%), DRMS a 2DRMS. Tabulky dynamických měření neobsahují vypočtenou hodnotu odchylky. Naopak obsahují korelaci naměřených hodnot mezi přijímači v rámci měření.

U stacionárních měření slouží vyhodnocení poměru hodnot RTK prakticky pouze ke kontrole, zda se v měření nevyskytla hrubá systematická chyba. U dynamických měření z koeficientu RTK usuzujeme o schopnosti jednotlivých přijímačů setrvat v režimu RTK s ohledem na proměnné pracovní podmínky.

Tab. 3.5: Tabulka provedených dynamických měření

Id	Antena	Systémy	Trimble	Piksi3	Měření	Korekce
1	AG25	GPS/GLO	Kinematic	High Dynamics	11:50	CZEPOS
2	AG25	GPS	Kinematic	High Dynamics	10:40	CZEPOS
3	AG25	GPS/GAL	Kinematic	High Dynamics	10:50	CZEPOS
4	GPS500	GPS/GLO	Human	Hirozontal HD	12:40	CZEPOS
5	Zephyr 2	GPS/GLO	Static	Low Dynamics	11:30	CZEPOS
6	Zephyr 2	GPS/GLO/GAL	Kinematic	High Dynamics	13:00	CZEPOS

Dynamické parametry Piksi 3

Id	Směrodatná odchylka V (mm)			Směrodatná odchylka H (mm)			Korelace Piksi3/BX982				RTK
	50%	68%	99%	50%	68%	99%	East	North	Height	Heading	
1	21,4	23,8	752,0	10,8	12,3	355,6	0,99	0,98	-0,09	0,80	91,1
2	31,5	33,5	1266	11,3	11,9	557,6	0,97	0,94	0,29	0,96	94,2
3	24,3	26,7	1994	8,7	9,3	839,8	0,95	0,91	0,63	0,86	89,8
4	21,1	24,9	931,3	11,6	13,1	400,8	0,96	0,94	0,05	0,36	95,2
5	20,9	22,5	886,8	11,6	12,8	472,8	0,95	0,95	-0,02	0,48	95,5
6	13,4	14,1	918,6	7,6	7,9	450,4	0,93	0,72	0,01	0,01	86,0

Dynamické parametry BX 982

Id	Směrodatná odchylka V (mm)			Směrodatná odchylka H (mm)			Korelace BX982/Bx992				RTK
	50%	68%	99%	50%	68%	99%	East	North	Height	Heading	
1	19,8	26,3	14426	14,1	23,1	10315	0,99	0,94	-0,17	0,94	87,6
2	57,8	65,0	26332	27,6	30,1	13739	0,89	0,75	0,09	0,99	97,8
3	25,3	27,7	17507	12,3	13,2	9801	1,00	0,99	0,13	1,00	97,1
4	15,9	22,0	13067	11,1	14,6	9402	1,00	1,00	0,58	1,00	93,0
5	80,9	162,0	15771	48,3	145,4	11767	0,99	0,99	0,03	1,00	99,9
6	18,3	22,8	17274	12,7	17,2	10515	1,00	1,00	0,07	1,00	99,4

Dynamické parametry BX 9992

Id	Směrodatná odchylka V (mm)			Směrodatná odchylka H (mm)			Korelace Piksi3/BX992				RTK
	50%	68%	99%	50%	68%	99%	East	North	Height	Heading	
1	17,0	32,1	3555	12,2	32,7	2139	0,99	0,99	0,21	0,77	89,1
2	48,8	53,9	4656	24,4	26,2	2666	0,94	0,88	0,16	0,96	92,3
3	27,2	31,1	3689	13,3	14,6	1971	0,95	0,91	0,10	0,86	97,5
4	14,1	15,5	2901	9,3	10,6	1905	0,97	0,94	0,04	0,35	94,4
5	27,9	143,6	3928	18,8	133,2	2378	0,96	0,96	-0,03	0,47	99,1
6	18,5	20,3	3786	12,9	14,4	2246,5	0,93	0,73	0,19	0,01	99,2

Tab. 3.6: Tabulka parametrů dynamických měření

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout metodu měření parametrů GNSS přijímačů a s její pomocí následně srovnat GNSS přijímače. Prvním krokem k vypracování tohoto úkolu je provést rozbor technologie GNSS. Na různých zemských orbitách nalezneme satelity vysílající informaci nezbytnou ke stanovení polohy. Různými přístupy k vyhodnocení tohoto signálu můžeme vypočítat pozici a reprezentovat ji v souřadných systémech. Existují singulární a diferenciální metody výpočtu. Singulární metody jako SPP a PPP jsou jednodušší a méně přesné. Diferenciální metody jako RTK DGNSS jsou přesnější a náročnější finančně i aplikačně.

Výsledek výpočtu pozice je zatížen několika chybovými faktory. Chybové faktory nalezneme ve vysílací soustavě, atmosféře, signálu samotném a koncovém přijímači. První tři faktory uživatel neovlivní. Modely těchto složek jsou distribuovány automaticky v rámci navigačních informací předávaných satelitním systémem. Faktor koncového přijímače můžeme chápat jako hardwarové a softwarové nastavení experimentu. Volba koncového přijímače podléhá kritériu běžně známému jako „maximální výsledky za minimální cenu“.

Parametry udávané výrobcem podléhají především marketingovým nárokům a samotná vědecká hodnota přidružené dokumentace může být potlačena. Proto jsme pro zlepšení možností evaluace přijímačů navrhli a realizovali metodiku odchylek s doplňujícími informacemi. Zvolená metodika porovnávání přesnosti přijímačů podle histogramu odchylek nabízí fundovaný náhled na parametry přijímače v širokém spektru.

Pro diplomovou práci jsme zvolili přijímače Trimble BX 982 a BX 992 a SwiftNav Piksi 3 Multi. Přijímače Trimble řadíme do vyšší cenové skupiny, řádově stovky tisíc, s vědeckou přesností. Cena tohoto systému se promítne především v nadstavbě systému a možnostech nastavení. Přijímač Piksi řadíme do střední cenové kategorie, řádově desítky tisíc. Jedná se reálně dostupnou technologii pro téměř běžné použití.

Samotný experiment je uspořádán do přenosného modulárního bloku. Zahrnuje napájecí, datové a signálové vývody. Je odolný proti vniknutí cizích těles. Mezi měřeními lze jednotlivé komponenty dle potřeby obměňovat. Přidružený software je z převážné části univerzální. Závislé segmenty jsou spjaty především s proprietárními komunikačními protokoly jednotlivých přijímačů. Vyhodnocení naměřených dat je prováděno v prostředí Matlab s využitím základních funkcí.

Zjištěné kvalitativní parametry. V rámci statistických měření jsou přijímače v průběhu celého spektra měření srovnatelné s přesností jednotky cm horizontálně i vertikálně. V rámci dynamických měření je horizontální přesnost opět srovnatelná na jednotky cm. Přesnost určení výšky a orientace je ovšem kamenem úrazu dynamických měření.

Při ověřování dostupnosti služby jsme nezaznamenali žádný dlouhodobý problém.

Běžné vlivy jako počasí, náhodné jevy v atmosféře, osoby v blízkosti aparatury či rušení neměly jednoznačně kvantifikovatelný vliv na výsledné měření. Záměrné zásahy do měření jsou však snadno sledovatelné. Nastavení příjmu signálu na samostatný systém omezí dostupnost služby. Záměrné zastínění antén může službu vyřadit z provozu úplně. Inicializace režimů RTK zpravidla dosahuje časů pod 1 minutu za běžných podmínek.

V průběhu práce jsme úspěšně provedli 19 srovnávacích stacionárních experimentů, 3 doplňková stacionární měření a 6 dynamických měření. Realizovali jsme workflow, pomocí kterého lze kvantifikovat chybu přijímačů ve více bodech, než kolik běžně uvádí výrobce.

U stacionárních měření jsme se zaměřili především na vyhodnocení přesnosti GNSS přijímačů. Pomocí zvolené metriky odvozené od "Distance RMS" jsme rozšířili informaci o přesnosti. Přijímač v provozu udává spektrum očekávaných chyb a zvolená metrika funguje jako pomyslná váhová funkce spektra hodnot udávaných přijímačem.

U dynamických měření jsme realizovali myšlenkově stejný postup. Oproti stacionárním měřením jsme nevyhodnocovali reálnou chybu měření. Naopak přibylo vyhodnocení dostupnosti režimu RTK v závislosti na trajektorii a shodnost trajektorie jednotlivých měření.

Celý experiment lze shrnout následujícími větami. Za vybraných podmínek je možné s přijímači Piksi dosáhnout shodné přesnosti měření jako s přijímači Trimble. Problém spočívá v tom, že nalezení a udržování takovýchto podmínek může být ve výsledku dražší než pořízení dražšího vybavení již na začátku.

Literatura

- [1] KAPLAN, Elliott D. a C. HEGARTY. *Understanding GPS: principles and applications*. Druhé vydání. Boston: Artech House, 2006. ISBN 1-58053-894-0.
- [2] Sama, Michael P.: *PRECISE EVALUATION OF GNSS POSITION AND LATENCY ERRORS IN DYNAMIC AGRICULTURAL APPLICATIONS* [online]. 2013, Theses and Dissertations–Biosystems and Agricultural Engineering. Dostupné z URL: <https://uknowledge.uky.edu/bae_etds/14>
- [3] *GNSS Errors. UAV Navigation* [online]. 2019, [cit. 5. 1. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.uavnavigation.com/support/kb/general/general-system-info/global-navigation-satellite-system-gnss-errors/>>.
- [4] Rakas, Jasenka & Niu, Bona & Tom, Jeffrey & Santiago, Confesor & Seelhorst, Michael: *Analysis of Air Traffic Control Command Entries and the Impact on Decision Support Tool Performance. Air Traffic Control Quarterly* Vol. 22. pp 1-20. 10.2514/atcq.22.1.1.[online]. 2013, [cit. 5. 1. 2020]. Dostupné z URL: <<http://gpsinformation.net/main/gpspower.htm/>>.
- [5] *The C/A Code. In: PennState College of Earth and Mineral sciences* [online]. [cit. 31. 5. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1742/>>.
- [6] *Pearson correlation coefficient. In: Wikipedia* [online]. 2020, [cit. 31. 5. 2020]. Dostupné z URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Pearson_correlation_coefficient#/media/File:Correlation_examples2.svg/>
- [7] *GPS TECHNICAL REFERENCES. U.S. Coast Guard Navigation Center* [online]. 2019, [cit. 5. 1. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.navcen.uscg.gov/?pageName=gpsTechnicalReferences/>>.
- [8] *Trimble Bd982. Trimble* [online]. 2019, [cit. 5. 1. 2020]. Dostupné z URL: <<http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-868146//>>.
- [9] *Trimble Bd992. Trimble* [online]. 2019, [cit. 5. 1. 2020]. Dostupné z URL: <<http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-873443//>>.
- [10] *Piksi Multi. SwiftNavigation* [online]. 2020, [cit. 5. 1. 2020]. Dostupné z URL: <http://https://www.swiftnav.com/sites/default/files/piksi_multi_product_summary.pdfble.com/docushare/dsweb/Get/Document-868146//>.

- [11] *Piksi Tools. Swift Navigation* [online]. 2019, [cit. 5. 1. 2020]. Dostupné z URL: <<https://support.swiftnav.com/customer/en/portal/articles/2966082-piksi-tools-user-guide/>>.
- [12] *GNSS Splitters. GPS World* [online]. 2019, [cit. 5. 1. 2020]. Dostupné z URL: <https://www.chronos.co.uk/files/pdfs/gsi/s14_splitter.pdf/>.
- [13] *Novatel OEM719. NovAtel* [online]. 2019, [cit. 5. 1. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.novatel.com/assets/Documents/Papers/OEM719-Product-Sheet.pdf/>>.
- [14] *GPS Satellite trilateration. GIS Commons* [online]. 2019, [cit. 5. 1. 2020]. Dostupné z URL: <<https://giscommons.org/chapter-2-input/>>.
- [15] *Dilution of Precision. Wikipedia* [online]. 2019, [cit. 5. 1. 2020]. Dostupné z URL: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Dilution_of_precision_\(navigation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Dilution_of_precision_(navigation))>.
- [16] *Transformace souřadnic. In: ČUZK geoportál* [online]. 2010, [cit. 31. 5. 2020]. Dostupné z URL: <[https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(2alfitdsenzquxzknekeir3p\)\)/Default.aspx?head_tab=sekce-01-gp&mode=TextMeta&text=wcts&menu=19/](https://geoportal.cuzk.cz/(S(2alfitdsenzquxzknekeir3p))/Default.aspx?head_tab=sekce-01-gp&mode=TextMeta&text=wcts&menu=19/)>.
- [17] *Geographic coordinate conversion. In: Wikipedia* [online]. 2020, [cit. 31. 5. 2020]. Dostupné z URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Geographic_coordinate_conversion#From_ECEF_to_ENU/>.
- [18] *APPENDIX CCOORDINATE TRANSFORMATIONS* [online]. [cit. 31. 5. 2020]. Dostupné z URL: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9780470099728.app3/>>.
- [19] *Gps Error Diagram. In: Wikipedia* [online]. 2020, [cit. 31. 5. 2020]. Dostupné z URL: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/da/Gps_error_diagram.svg/>.

- [20] *Latitude doesn't exactly mean what I thought*. In: *John D Cook* [online]. 2011, [cit. 31. 5. 2020]. Dostupné z URL:
<<https://www.johndcook.com/blog/tag/geodesy/page/2//>>.
- [21] Wang, Yansen & Huynh, Giap & Williamson, Chatt.: *Integration of Google Maps/Earth with microscale meteorology models and data visualization*. 2013, Computers & Geosciences. [cit. 31. 5. 2020].
- [22] *NTRIP Caster Setup*. In: *Http://lefebure.com* [online]. 2011, [cit. 31. 5. 2020]. Dostupné z URL:
<<http://lefebure.com/articles/ntrip-caster-setup//>>.
- [23] *Accuracy (trueness and precision)*. In: *Wikipedia* [online]. 2020, [cit. 31. 5. 2020]. Dostupné z URL:
<[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Accuracy_\(trueness_and_precision\).svg/](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Accuracy_(trueness_and_precision).svg/)>.
- [24] *GPS signal modulation*. In: *Wikipedia* [online]. 2020, [cit. 31. 5. 2020]. Dostupné z URL:
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:GPS_signal_modulation_scheme2.svg/>.
- [25] Gábor Timár: *The topography the geoid and the ellipsoid*. In: *ResearchGate* [online]. 2013, [cit. 31. 5. 2020]. Dostupné z URL:
<https://www.researchgate.net/figure/The-topography-the-geoid-and-the-ellipsoid-fig28_259480162/>.
- [26] *Learning a bit about Beidou3 signals*. In: *Michele's GNSS blog* [online]. 2018, [cit. 31. 5. 2020]. Dostupné z URL:
<<http://michelebavaro.blogspot.com/2018/09/learning-bit-about-beidou3-signals.html/>>.
- [27] *Cell phone trilateration*. In: *101Computing* [online]. 2019, [cit. 31. 5. 2020]. Dostupné z URL:
<<https://www.101computing.net/cell-phone-trilateration-algorithm/>>.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

C/A	Civilian Access
DGNSS	Differential Global Navigation Satellite system
DOP	Dilution of Precision
GDOP	Geometric Dilution Of Precision
PDOP	Position Dilution Of Precision
HDOP	Horizontal Dilution Of Precision
VDOP	Vertical Dilution Of Precision
TDOP	Time Dilution Of Precision
ECEF	Earth centered, Earth fixed
ENU	East North Up
ETRS	European terrestrial reference system
GHz	Gigahertz
GLONASS	Global Navigation Satellite system
GPS	Global Positioning system
GNSS	Global Navigation Satellite system
ITRS	International terrestrial reference system
LLA	Lattitude, Longitude, Altitude
NED	North East Down
NMEA	National Marine Electronics Association
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
PPP	Precise Point Positioning
P(Y)	Precise
RAC	Radial, Along track, Cross track error
RMS	Root Mean Square

RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real Time Kinametics
SA	Selective Availability
SBAS	Satelite Based Augmentation system
SBP	Swift Binary protocol
SPP	Single Point Precision
UERE	User Equivalent range Errors
W	Watt
WGS	World Geodetic System
DRMS	Distance Root Mean Square
cov	kovariance
σ_x^2	Rozptyl v ose x
σ_y^2	Rozptyl v ose y
σ_z^2	Rozptyl v ose z
$\sigma_{\Delta t}^2$	Rozptyl v čase
σ_{UERE}	Směrodatná odchylka hodnoty UERE
Δx_i	Odchylka
x_i	Měřená hodnota
x_{ref}	Referenční hodnota
\bar{x}	Výběrový průměr
σ_x^2	Výběrový Rozptyl
σ_x	Výběrová Směrodatná odchylka
$P(a, b)$	Pearsonův korelační koeficient

Seznam příloh

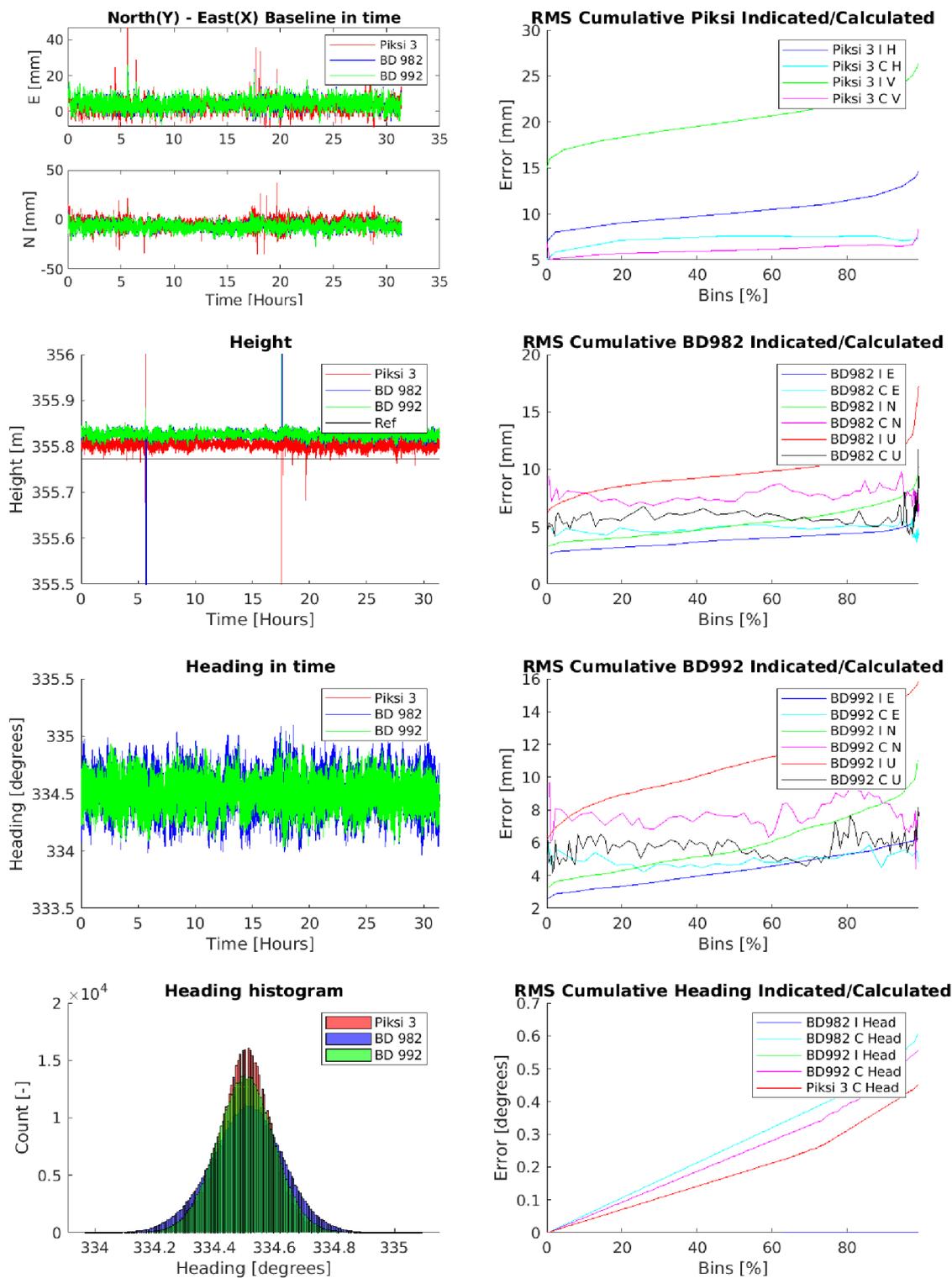
A	Obsah přiloženého CD	77
B	Grafy stacionárních měření	79
C	Grafy dynamických měření	97

A Obsah příloženého CD

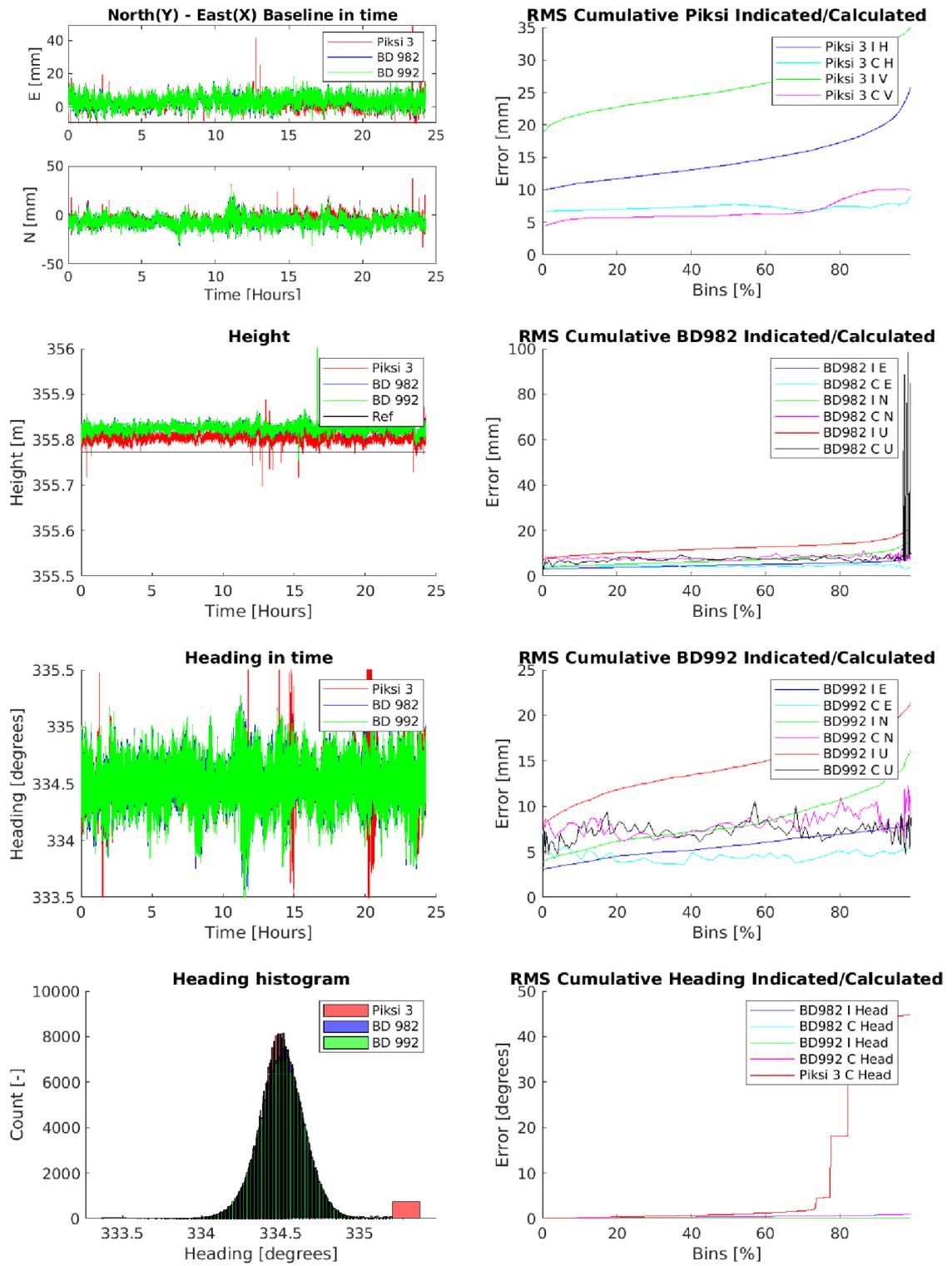
Parsery	
_ SBP Parser	vyžaduje MSVS
_ TrimbleGSOFExporter.exe	
_ MatlabScript	Matlab 2015a
_ GNSS static.m	
_ GNSS dynamic.m	
_ Dynamická měření	Grafické a tabulkové záznamy
_ 1	
_ 2	
_ 3	
_ 4	
_ 5	
_ 6	
_ Statická měření	Grafické a tabulkové záznamy
_ 1	
_ 2	
_ 3	
_ 4	
_ 5	
_ 6	
_ 7	
_ 8	
_ 9	
_ 10	
_ 11	
_ 12	
_ 13	
_ 14	
_ 15	
_ 16	
_ 18	
_ 19	

B Grafy stacionárních měření

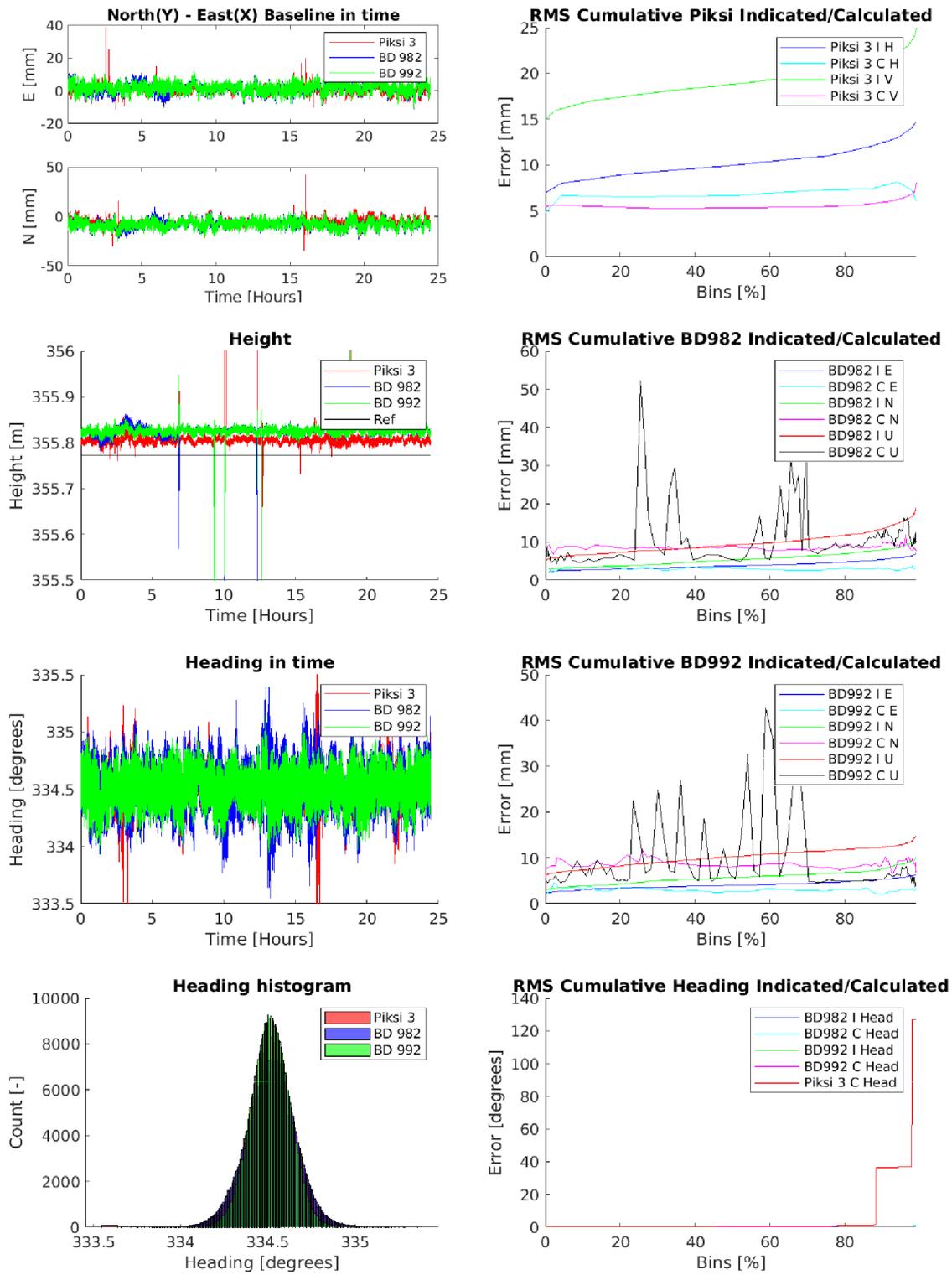
Obr. B.1: Measurement ID 1



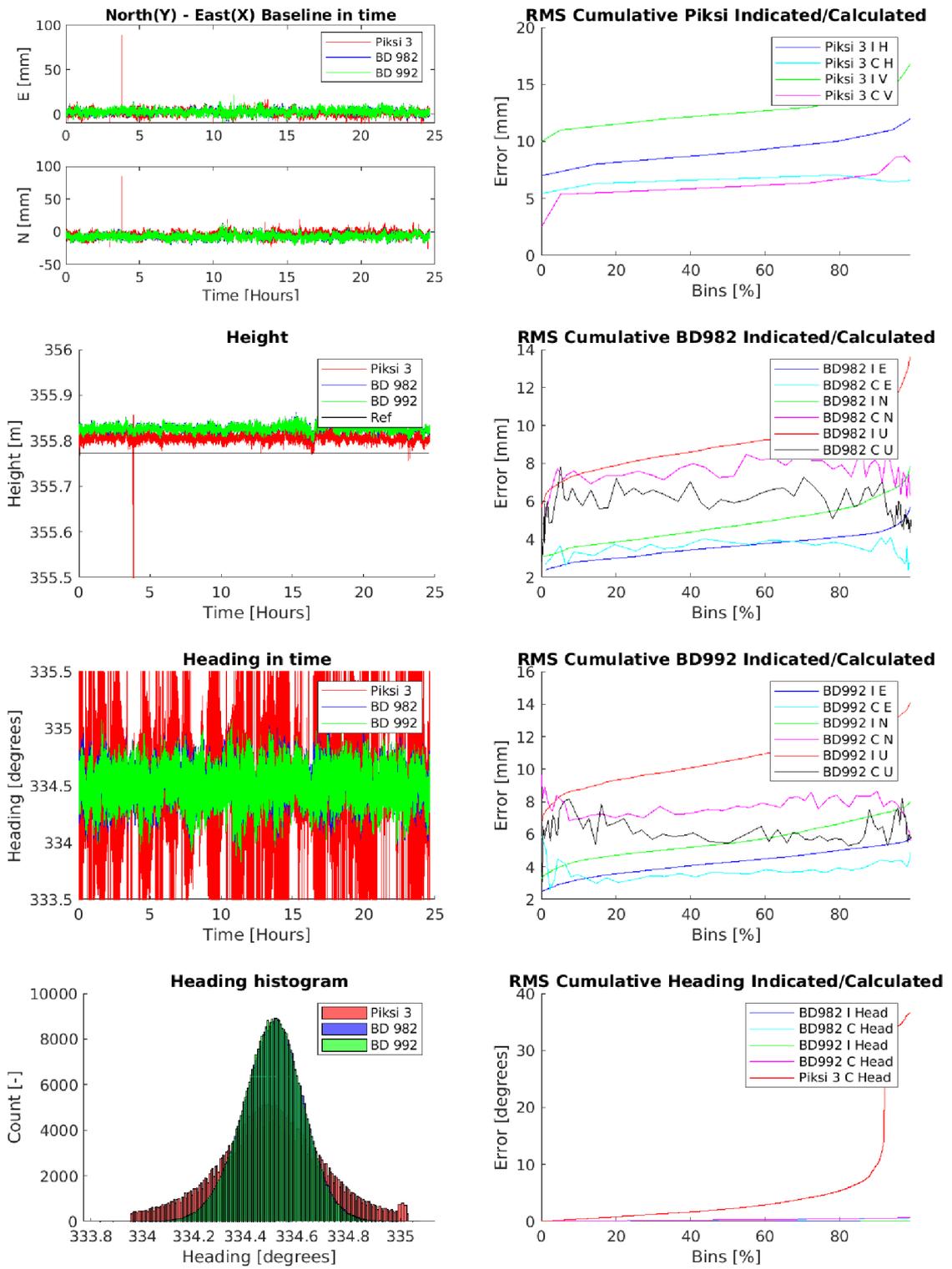
Obr. B.2: Measurement ID 2



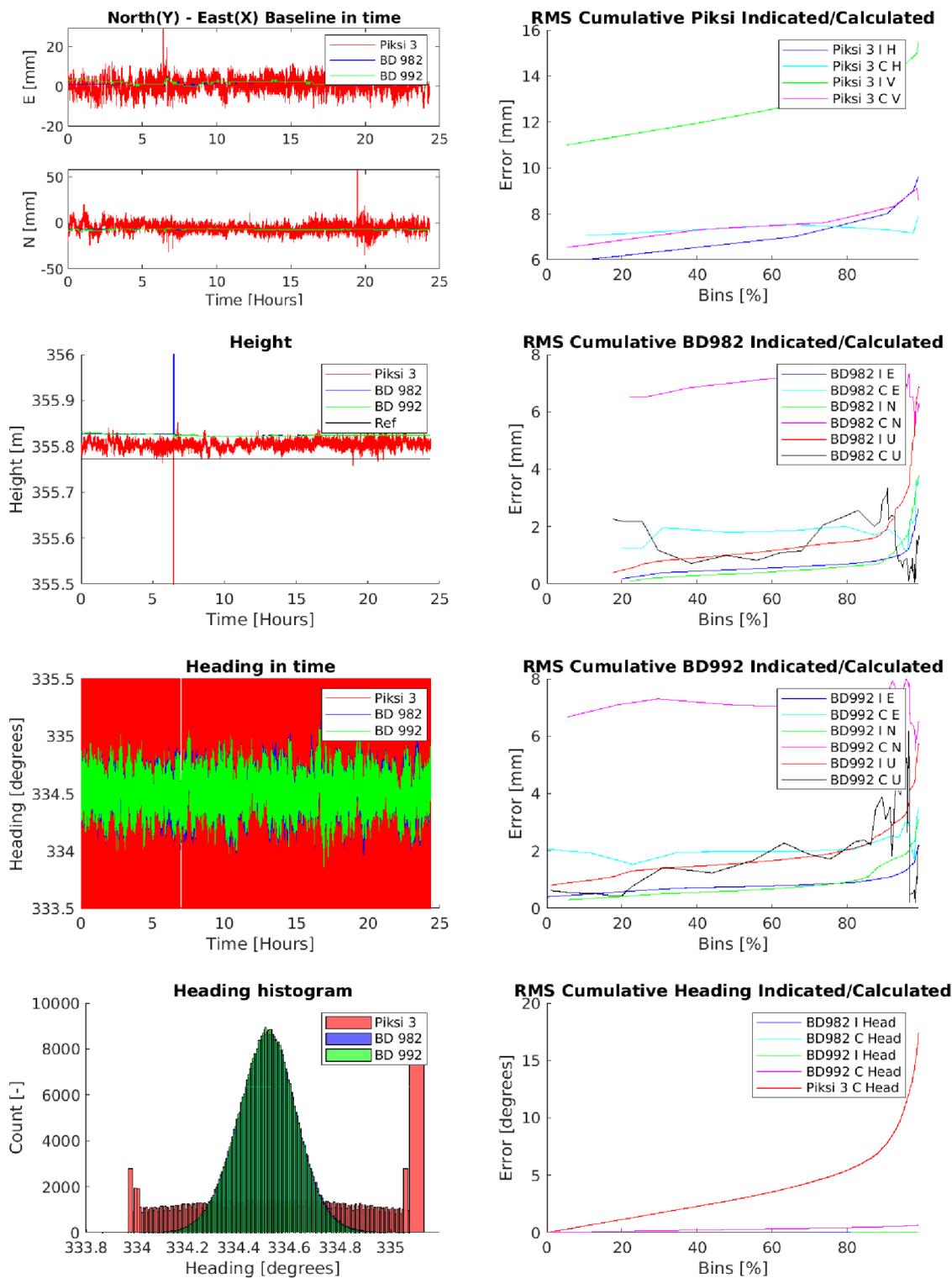
Obr. B.3: Measurement ID 3



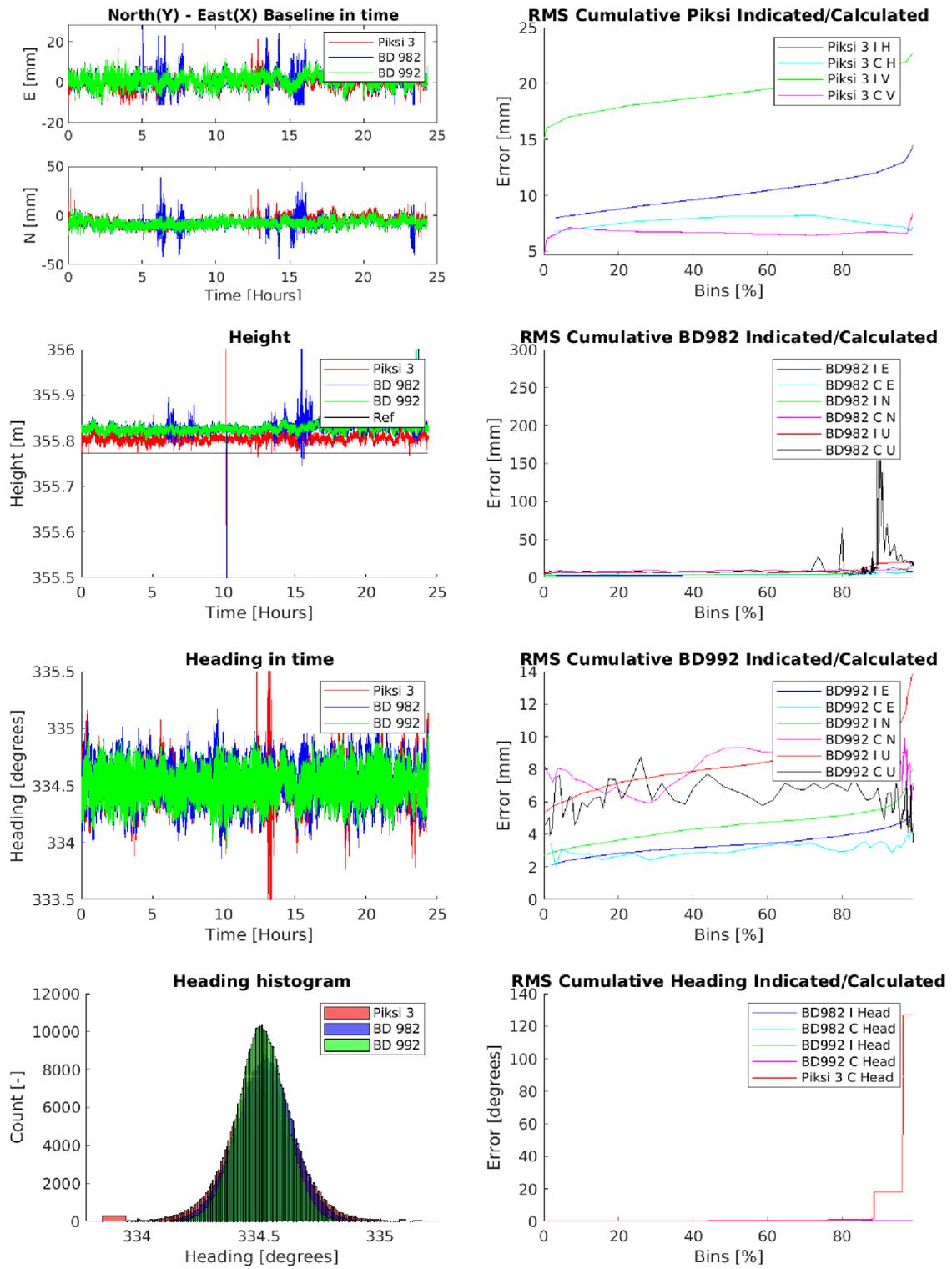
Obr. B.4: Measurement ID 4



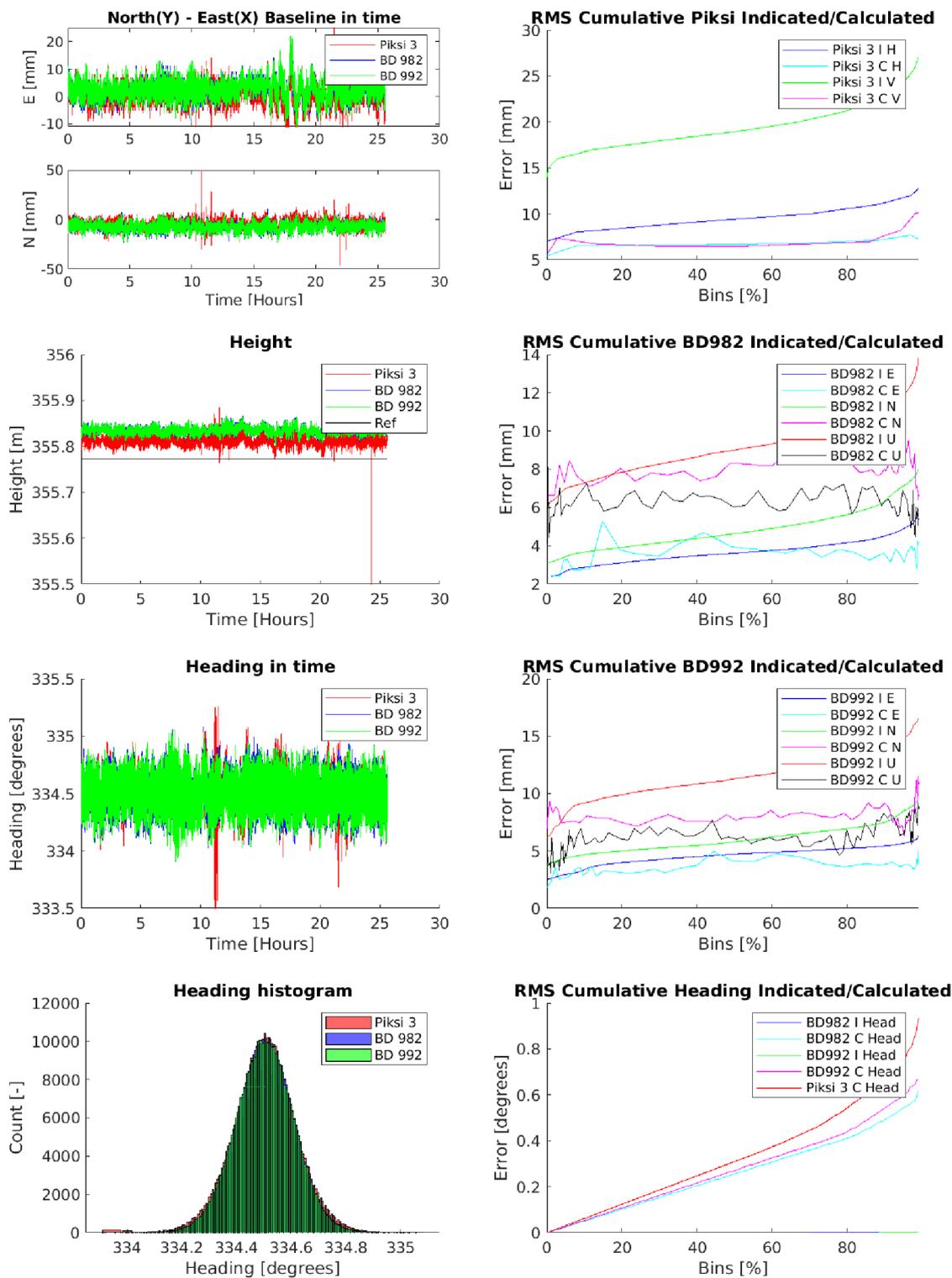
Obr. B.5: Measurement ID 5



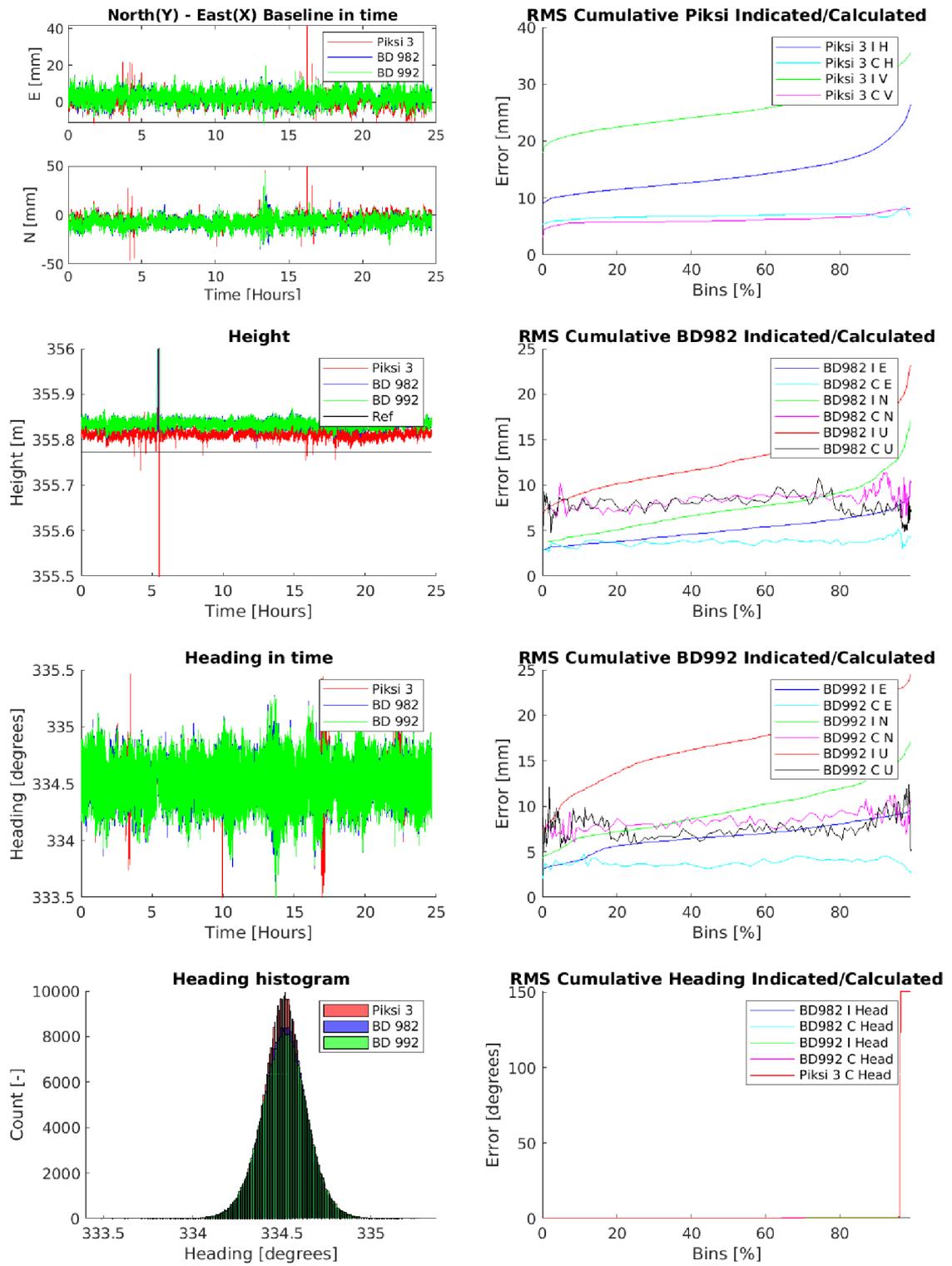
Obr. B.6: Measurement ID 6



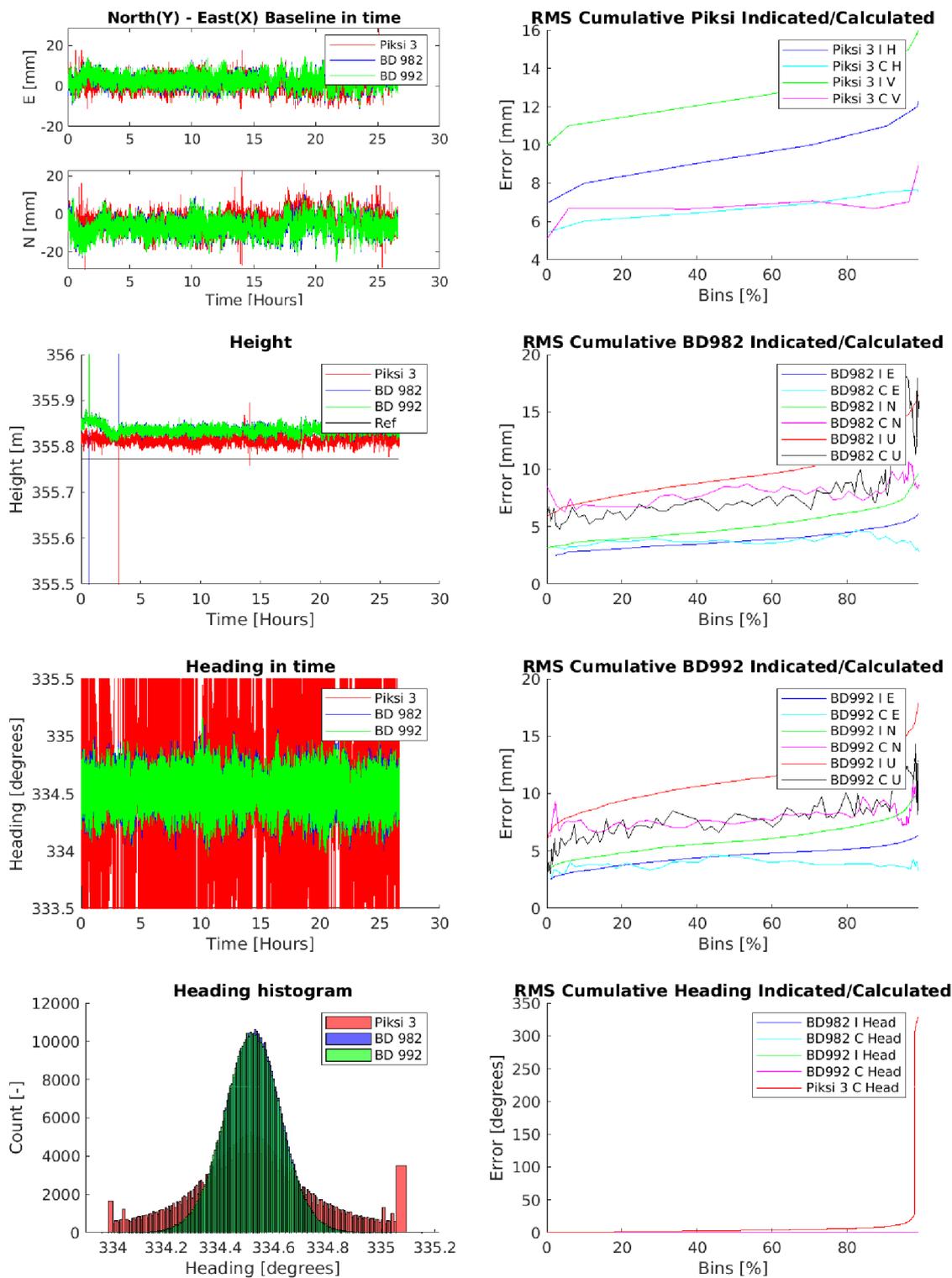
Obr. B.7: Measurement ID 7



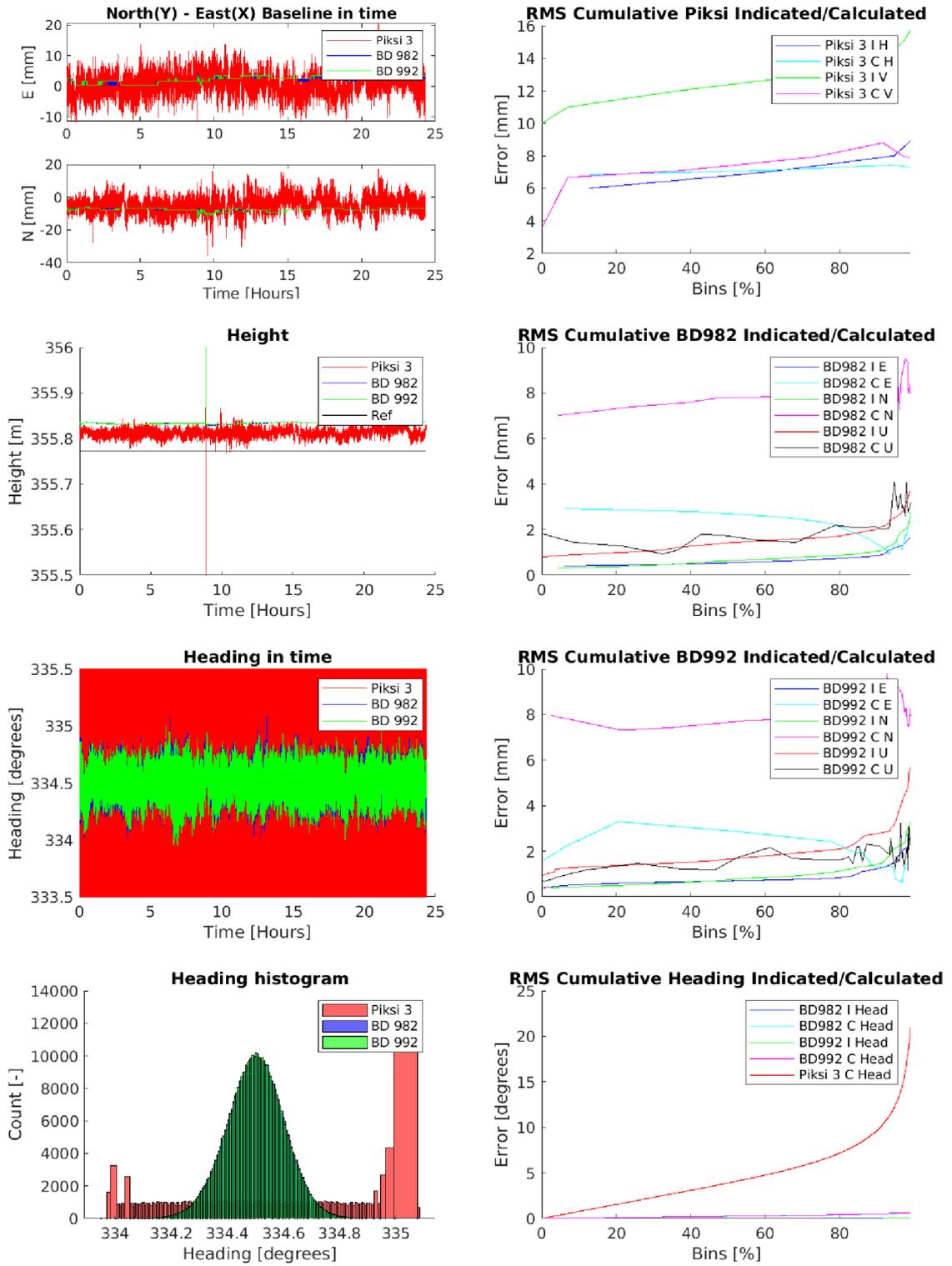
Obr. B.8: Measurement ID 8



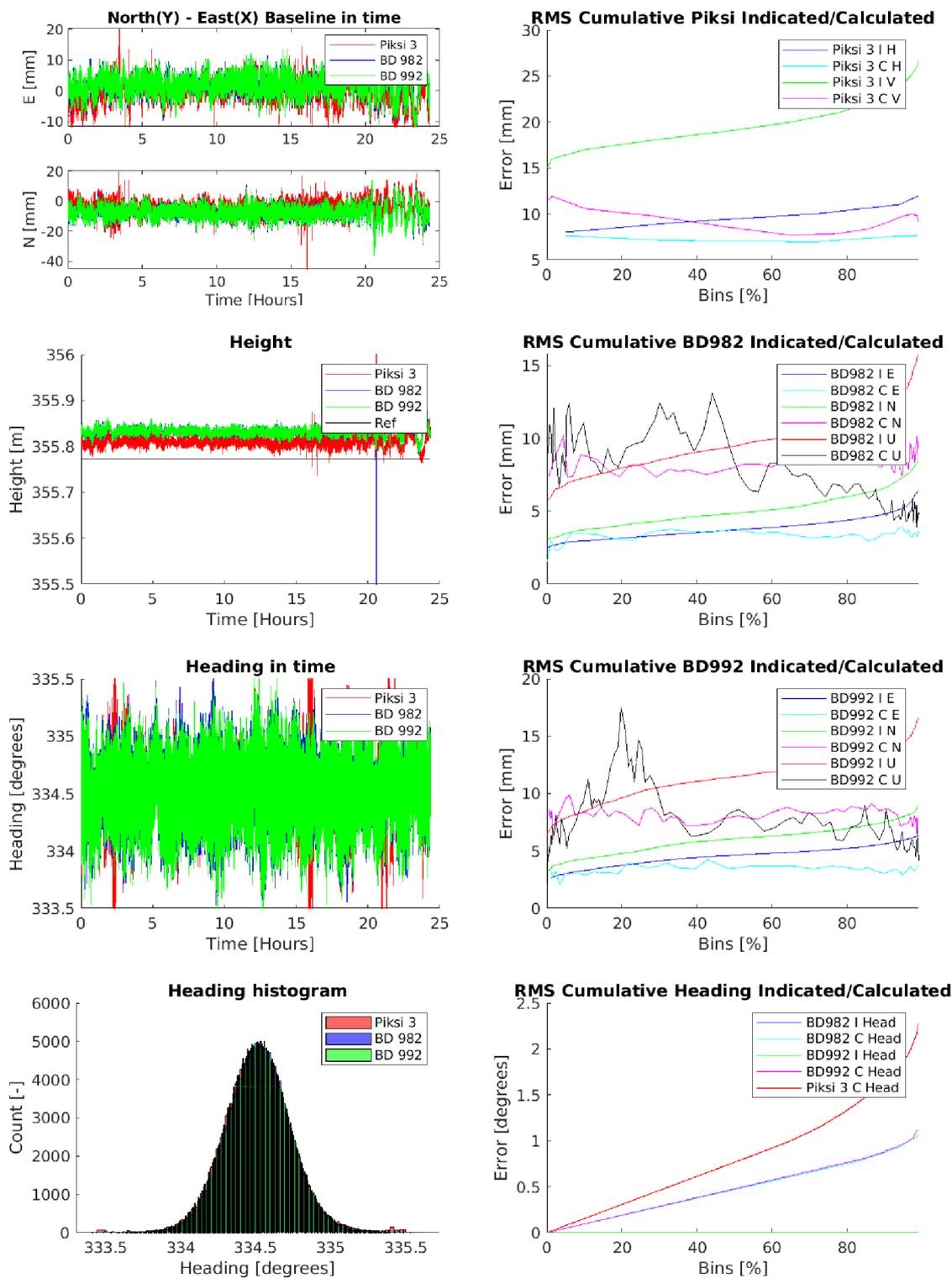
Obr. B.9: Measurement ID 9



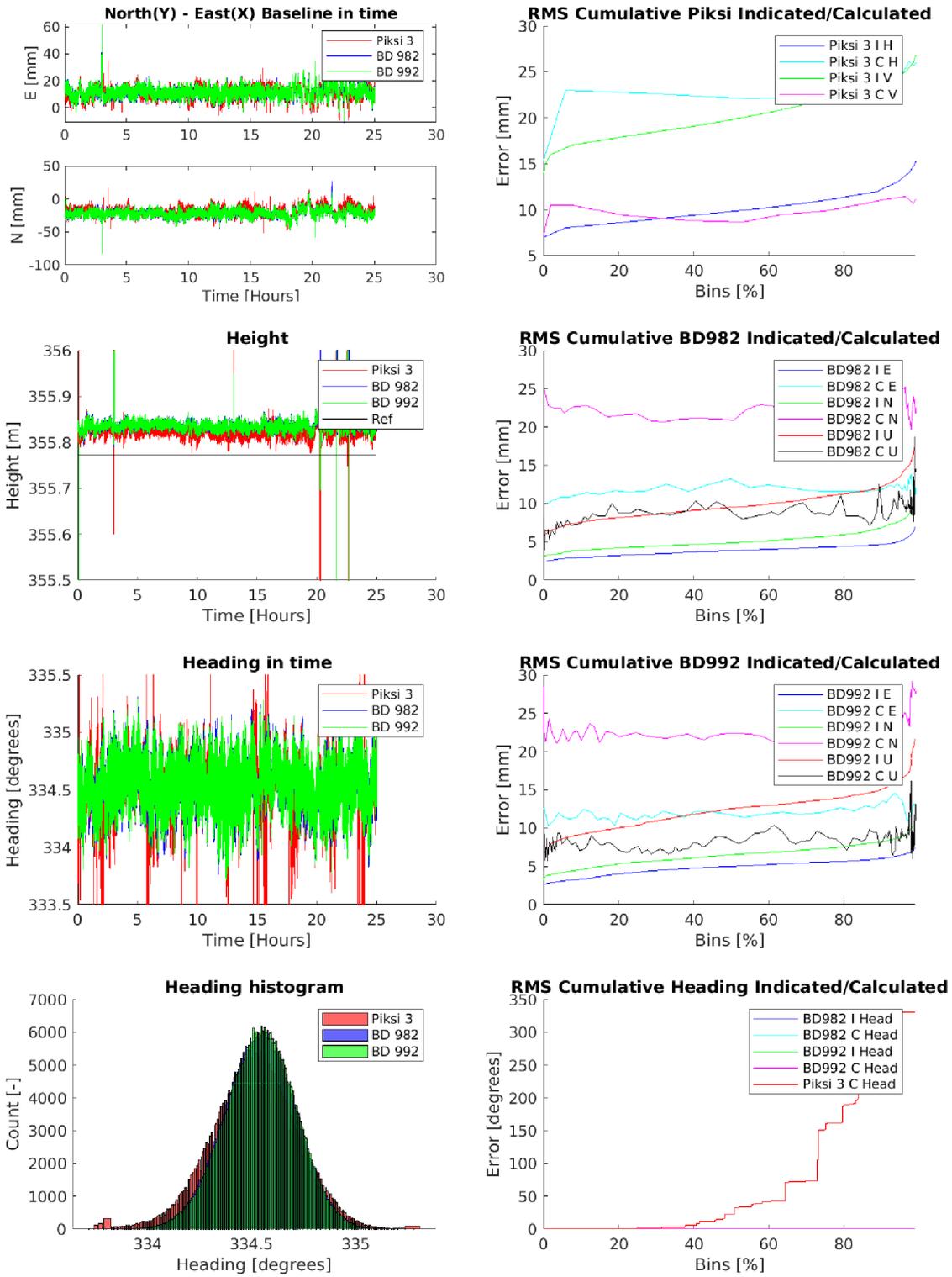
Obr. B.10: Measurement ID 10



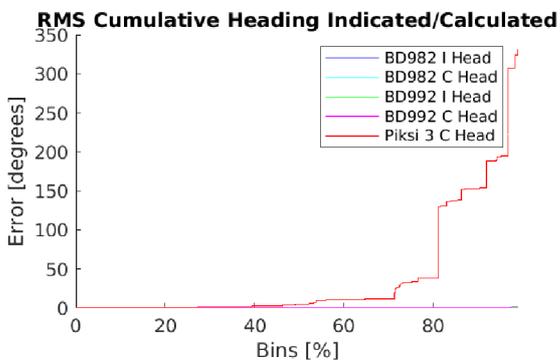
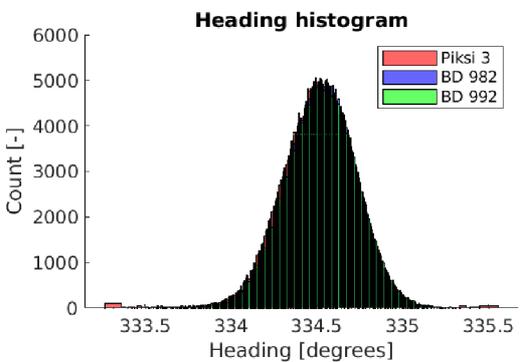
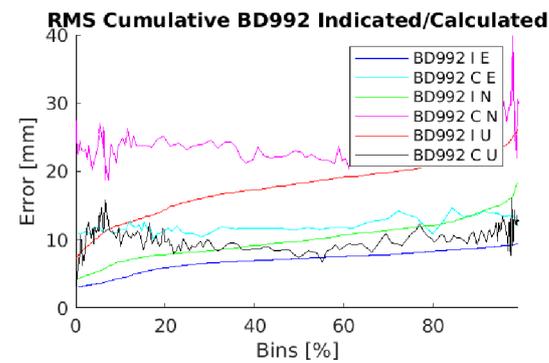
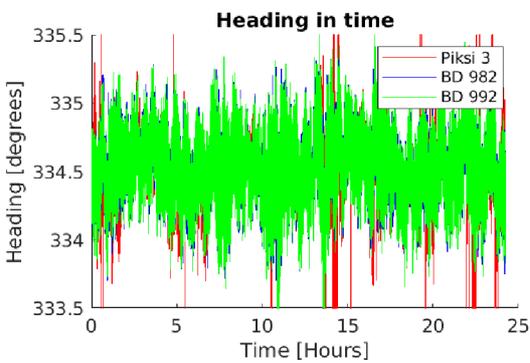
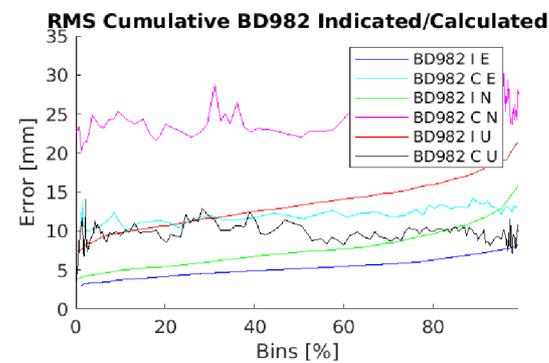
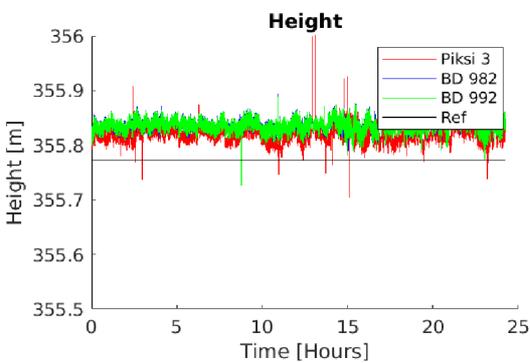
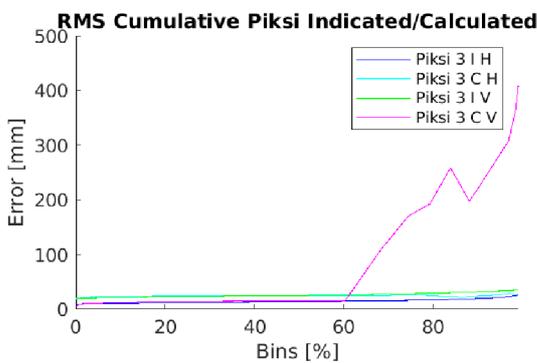
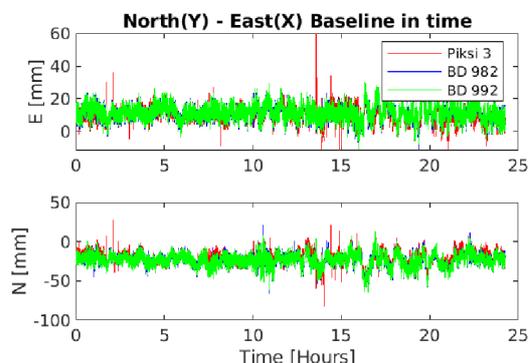
Obr. B.11: Measurement ID 11



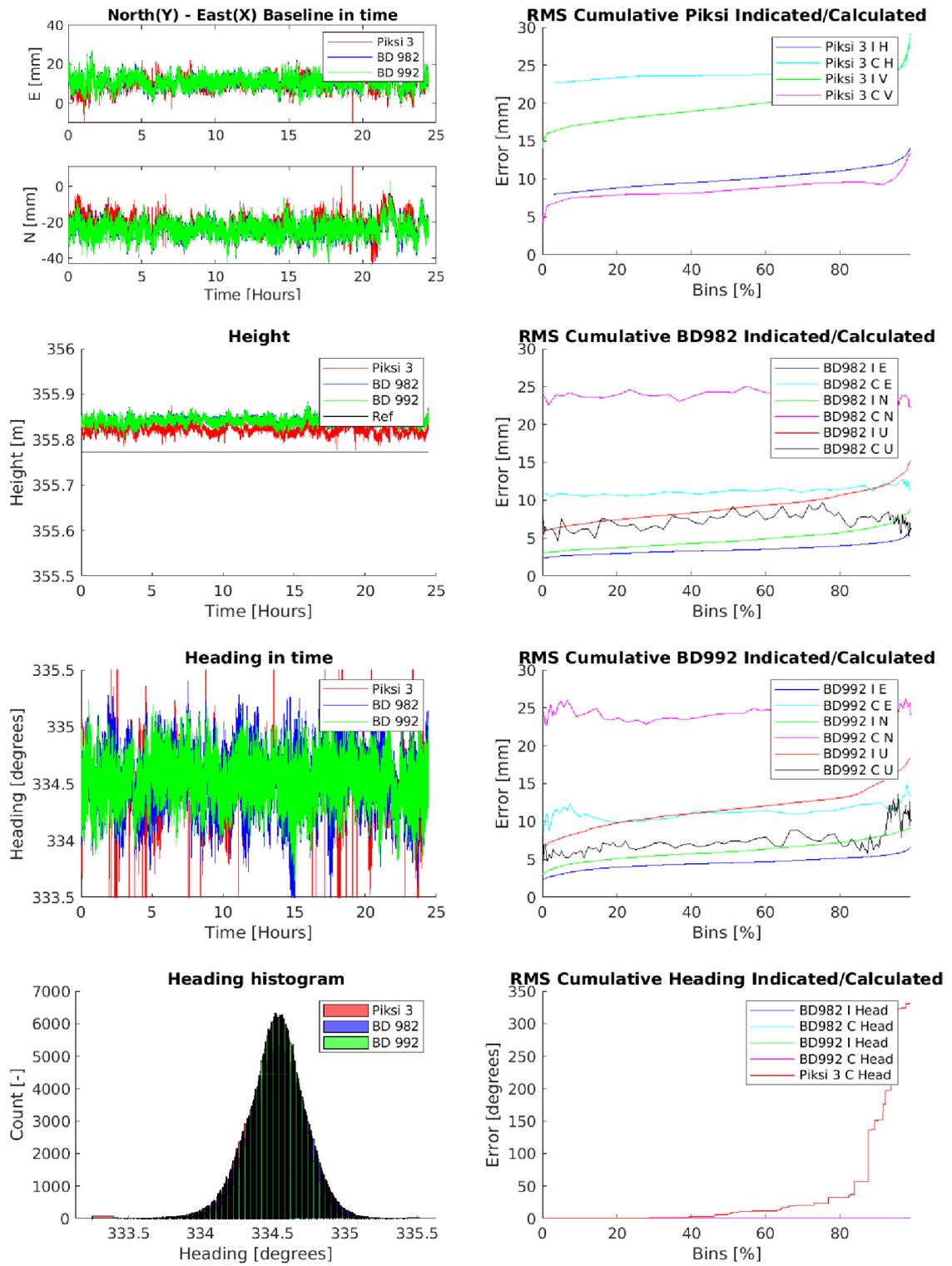
Obr. B.12: Measurement ID 12



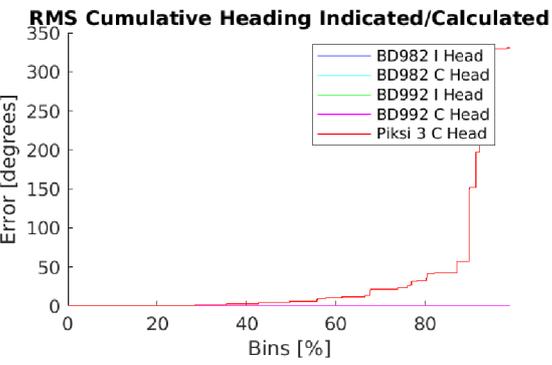
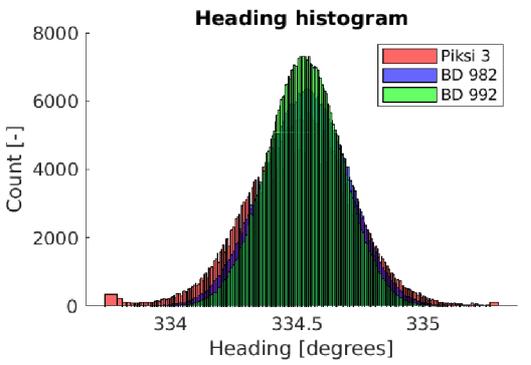
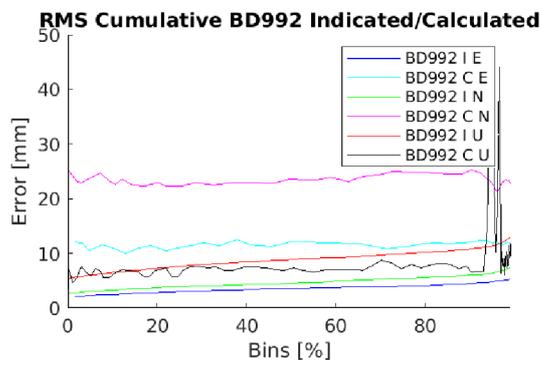
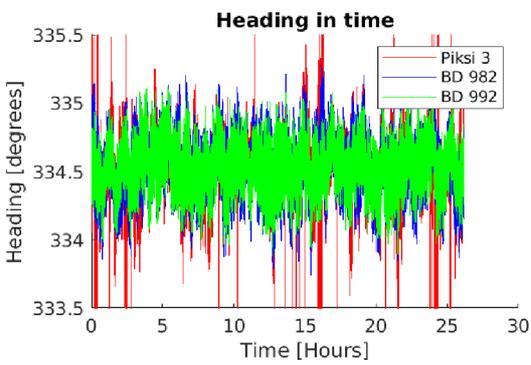
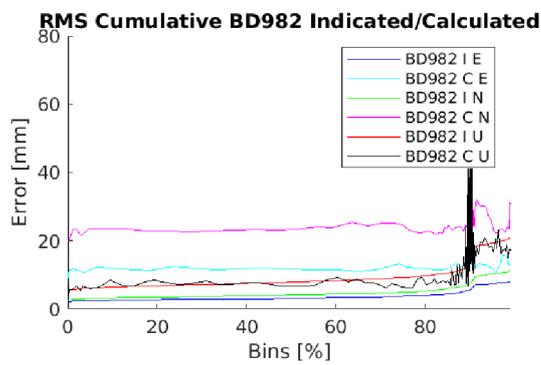
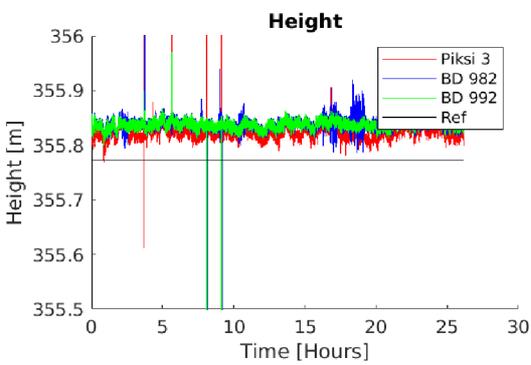
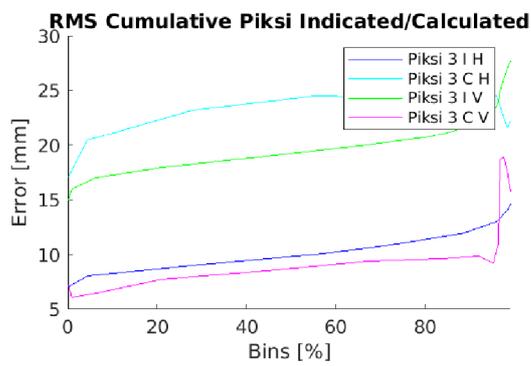
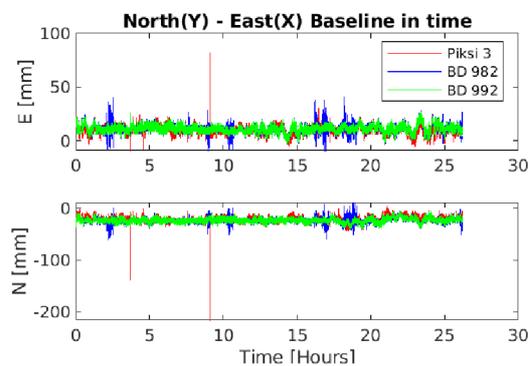
Obr. B.13: Measurement ID 13



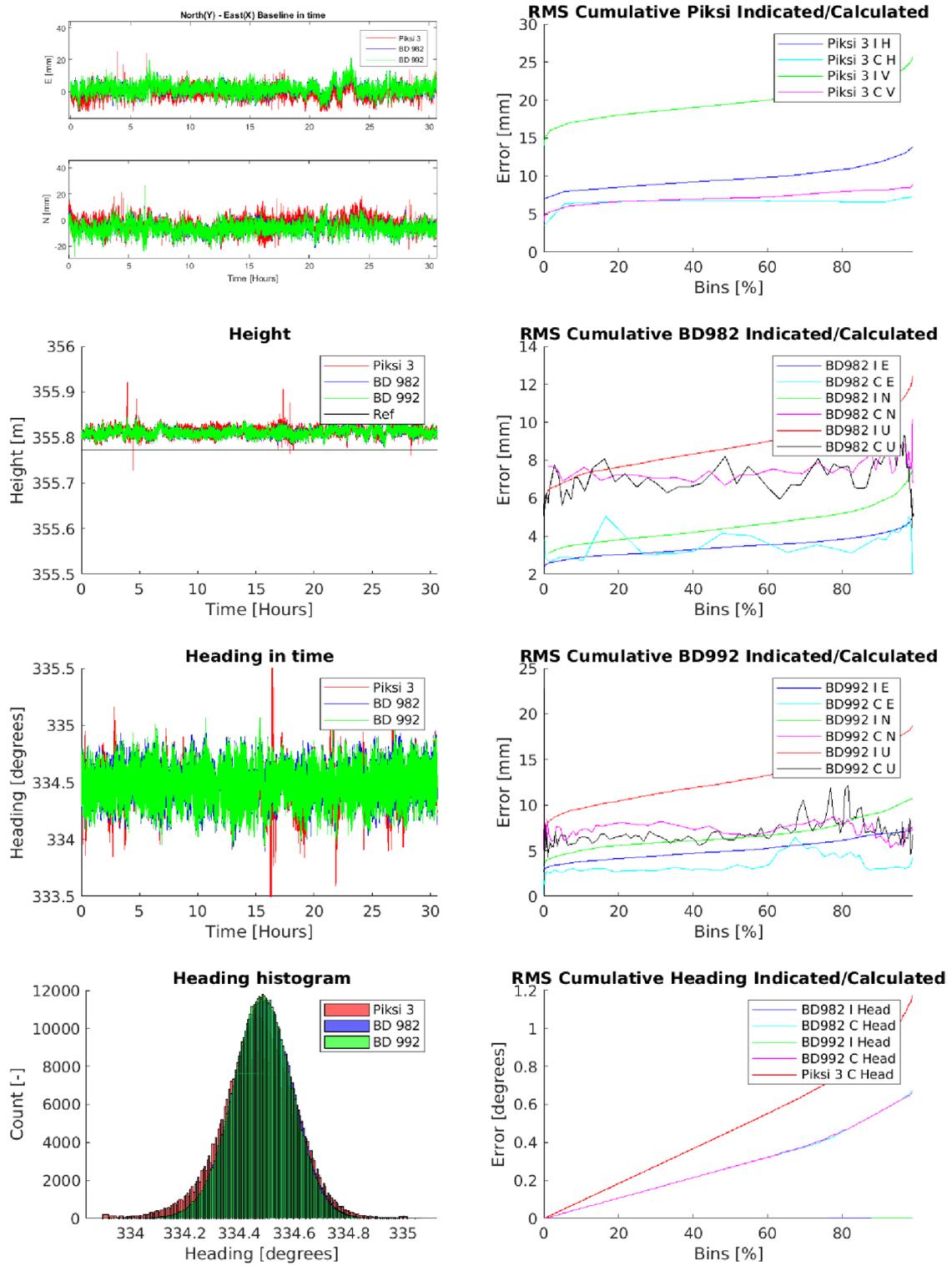
Obr. B.14: Measurement ID 14



Obr. B.15: Measurement ID 15

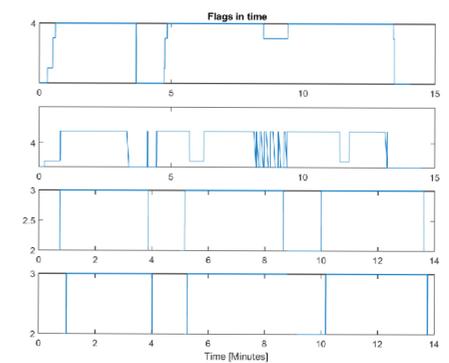
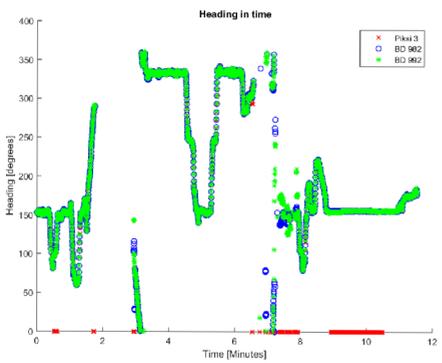
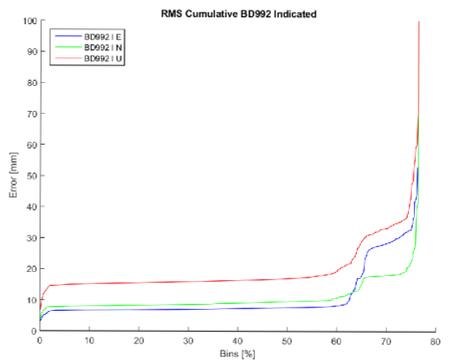
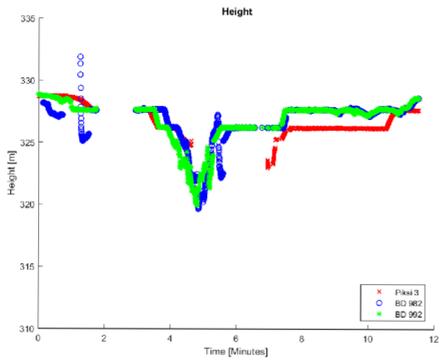
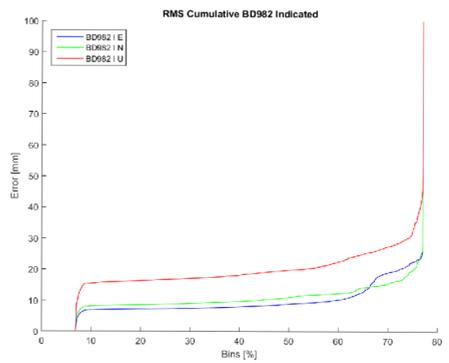
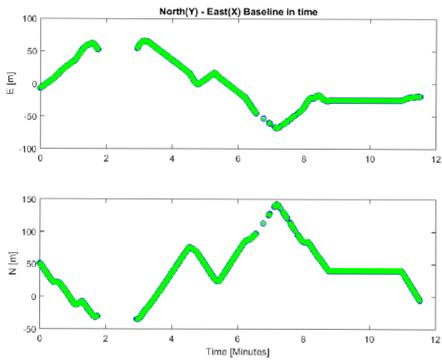
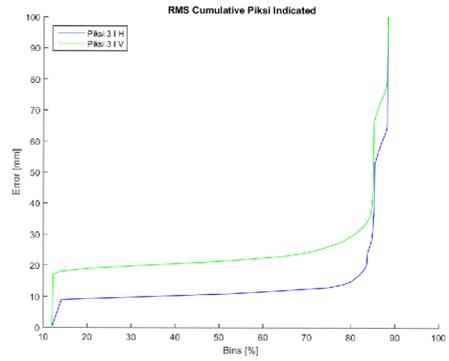
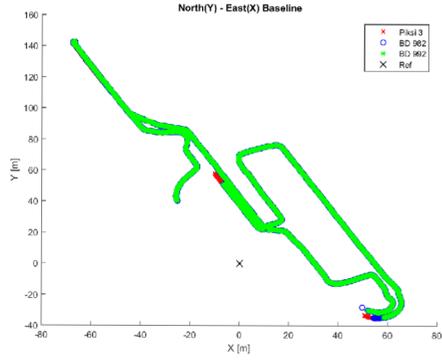


Obr. B.16: Measurement ID 16

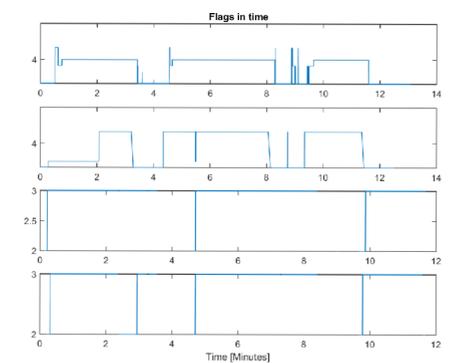
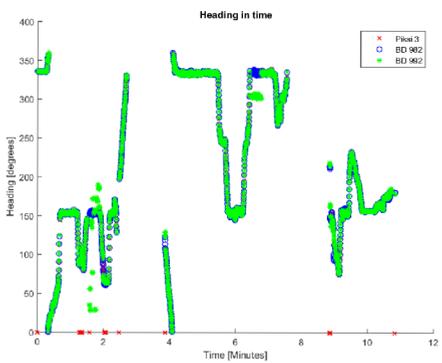
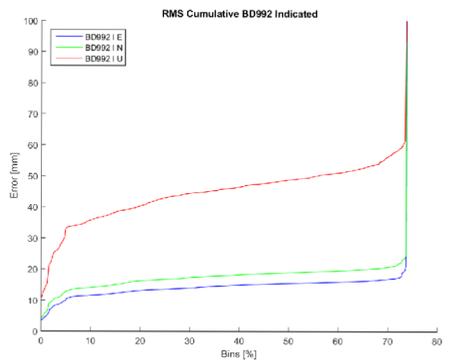
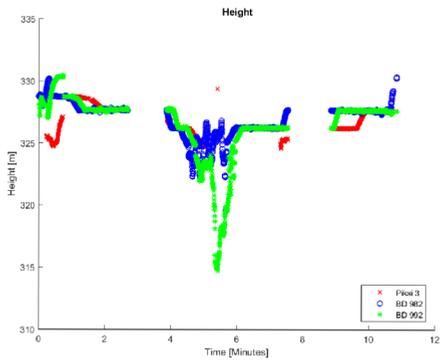
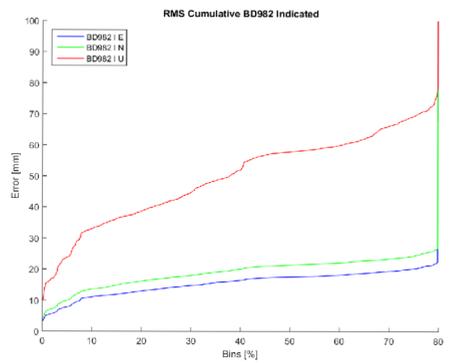
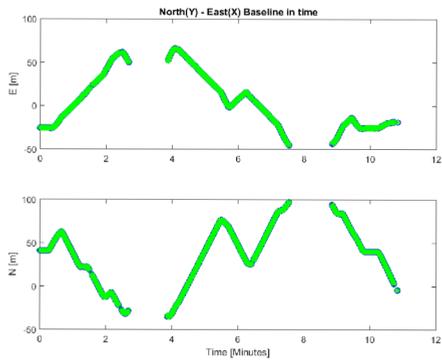
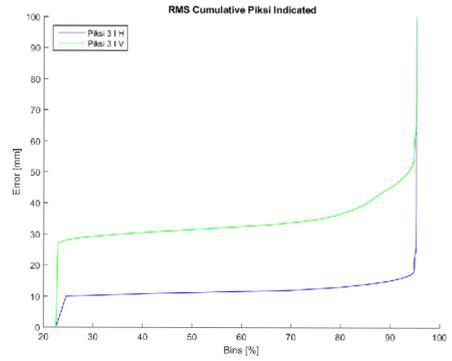
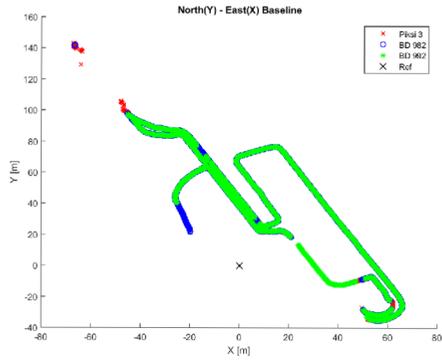


C Grafy dynamických měření

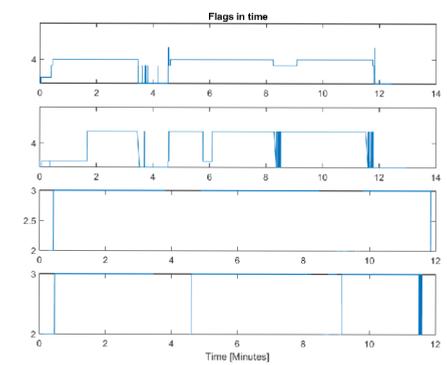
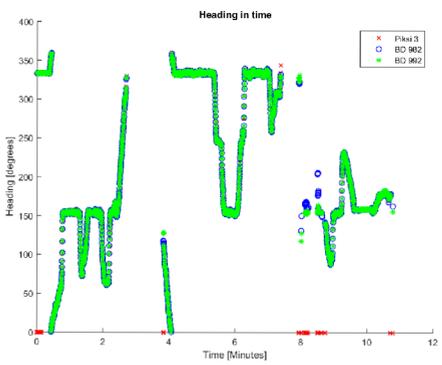
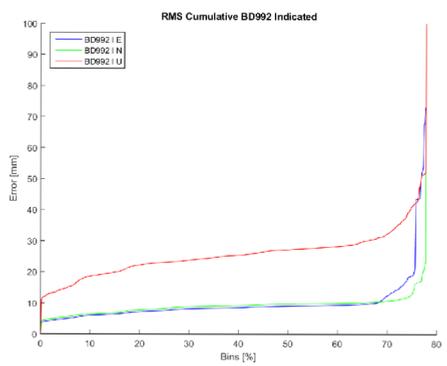
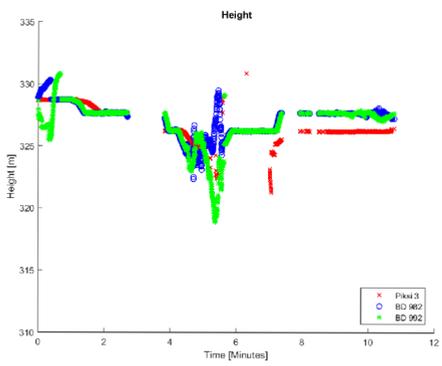
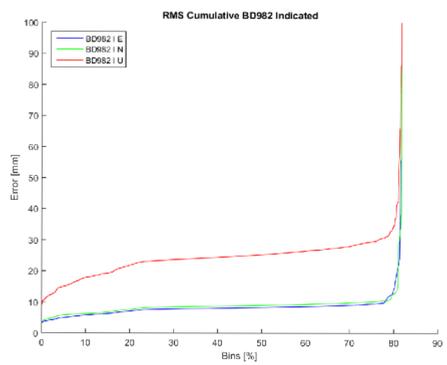
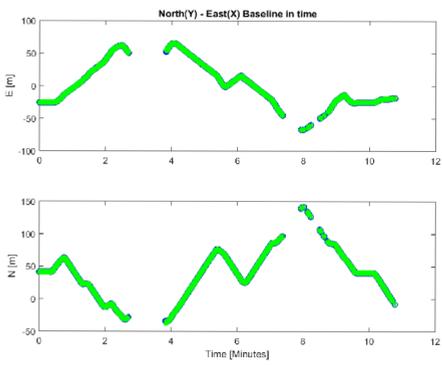
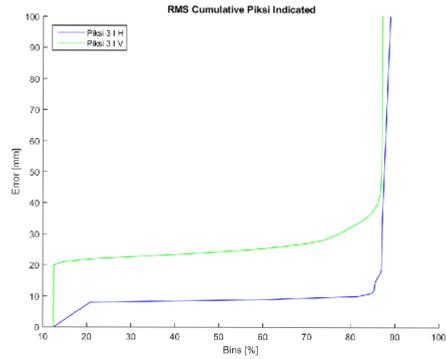
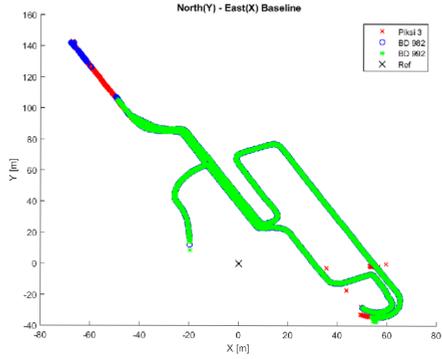
Obr. C.1: Measurement ID 1



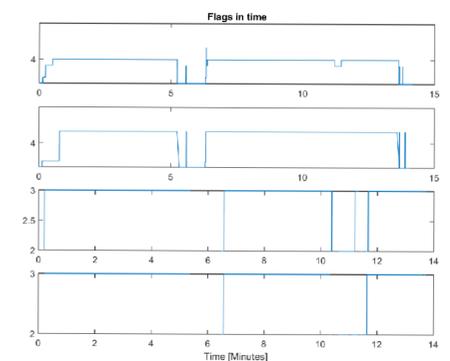
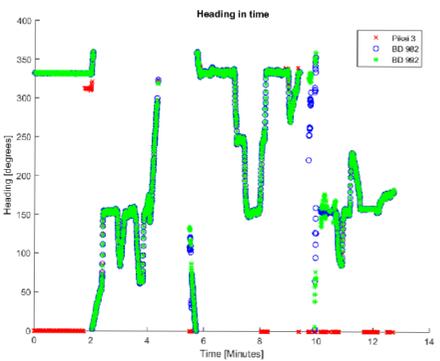
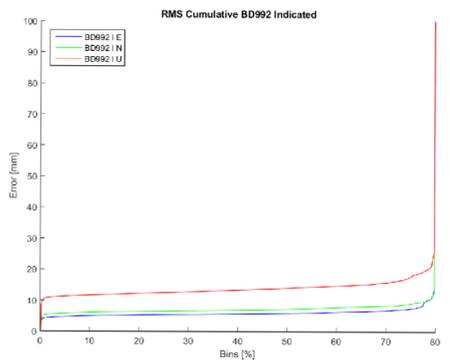
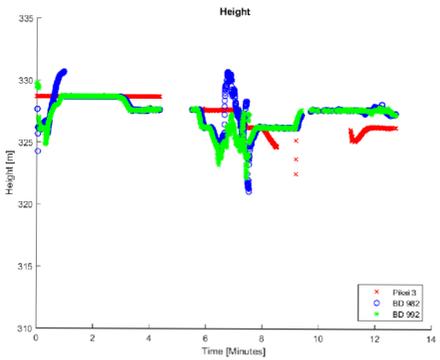
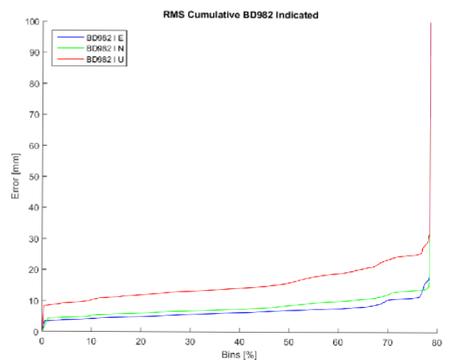
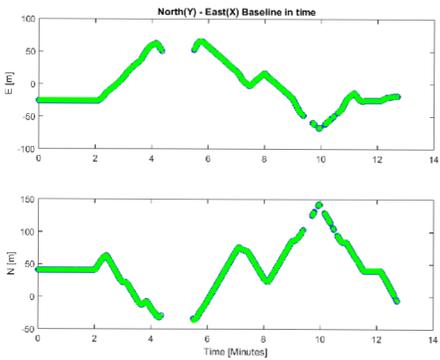
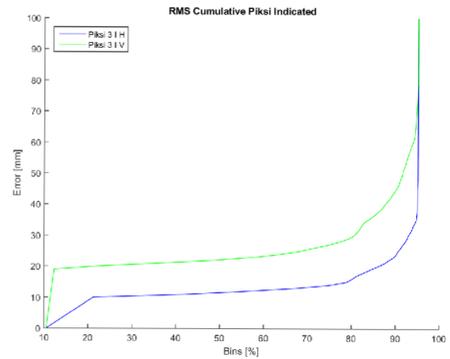
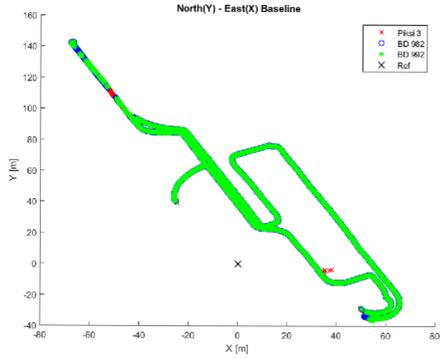
Obr. C.2: Measurement ID 2



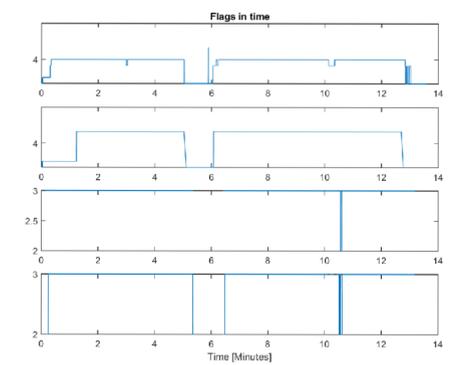
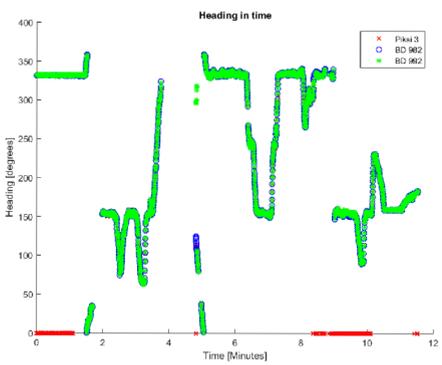
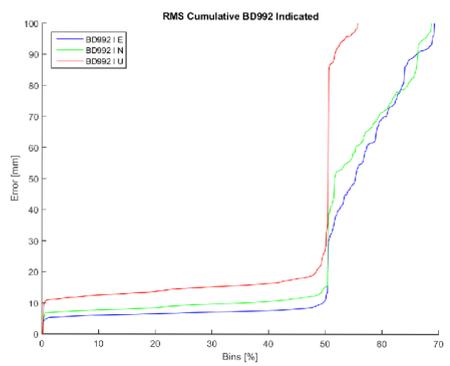
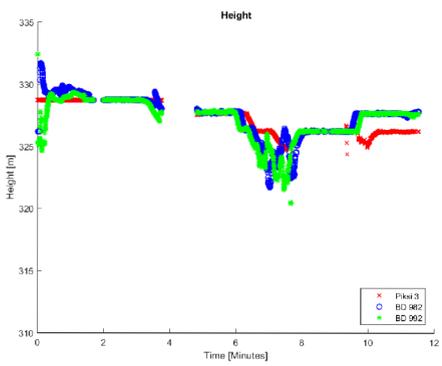
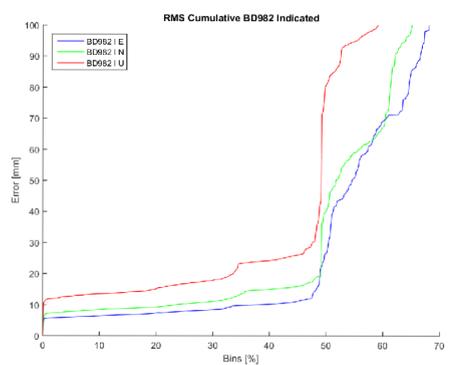
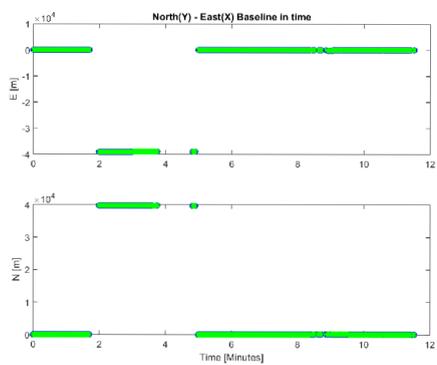
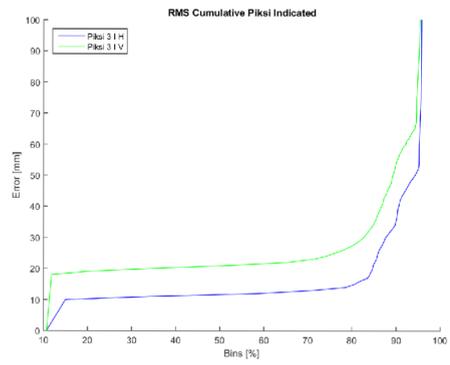
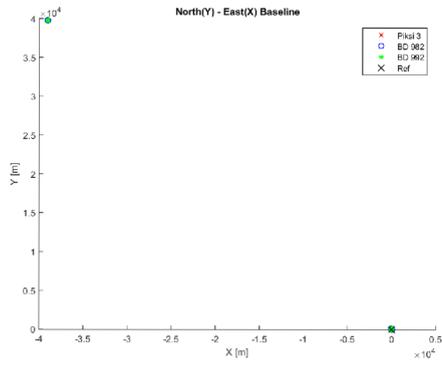
Obr. C.3: Measurement ID 3



Obr. C.4: Measurement ID 4



Obr. C.5: Measurement ID 5



Obr. C.6: Measurement ID 6

