



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MODUL KOMBINOVANÉ GLOBÁLNÍ SATELITNÍ NAVIGACE COMBINED GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM MODULE

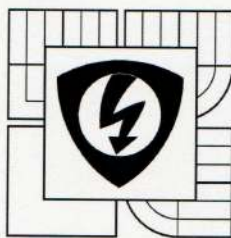
DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. DAVID JURAJDA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LUDĚK ŽALUD, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. David Jurajda
Ročník: 2

ID: 112048
Akademický rok: 2012/13

NÁZEV TÉMATU:

Modul kombinované globální satelitní navigace

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- Seznamte se s principy globálních satelitních navigačních systémů, především NAVSTAR GPS a GLONASS.
- Navrhněte metodiku měření přesnosti určení pozice GNSS modulů.
- Realizujte kombinovaný navigační modul založený na přijímači NVS08-CSM.
- Navrhněte vhodný způsob začlenění GPS modulu do hlavního řídicího systému quadrocopteru Uranus (komunikace, architektura SW).
- Navigační modul otestujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Paul D. Groves, Principles of GNSS, INERTIAL, and MULTISENSOR INTEGRATED NAVIGATION SYSTEMS, ISBN-13: 978-1-58053-255-6, 2008

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 20.5.2013

Vedoucí práce: doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

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

Tato diplomová práce se zabývá návrhem metodiky měření přesnosti GPS/GLONASS přijímačů. Text je rozdělen do pěti hlavních částí. První část popisuje technologii globální satelitní navigace. Druhá část se zabývá použitými souřadnými systémy a mapovými zobrazeními (ETRS89, WGS84, UTM, Gauss-Krüger). Následující část pojednává o použitých statistických nástrojích. Čtvrtá část pojednává o použitých hardwarových prvcích. Závěrečná část popisuje praktickou realizaci experimentu a vyhodnocení získaných dat.

Summary

The thesis objective is design of methodology focused on accuracy measurement in field of GPS/GLONASS receivers. Text is divided into five main parts. The first one is focused on GNSS technology. Second one deals with used coordinate systems and map projections (ETRS89, WGS84, UTM, Gauss-Krüger). Next part discusses statistical methods. Part four is focused on hardware. Then the final part describes experiment realization and obtained data analysis.

Klíčová slova

navigace, NVS08-CSM, UP500, UC530M, GPS, GLONASS, GALILEO, měření, přesnost

Keywords

navigation, NVS08-CSM, UP500, UC530M, GPS, GLONASS, GALILEO, measurement, accuracy, precision, trueness

JURAJDA, D. *Modul kombinované globální satelitní navigace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 49 s. Vedoucí doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Modul kombinované globální satelitní navigace 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.“

Bc. David Jurajda

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ludkovi Žaludovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé Diplomové práce. Dále děkuji Jiřímu Slezákovi za podnětné rady.

Bc. David Jurajda

Obsah

1	Zadání	5
2	Úvod	6
3	Technologie GNSS	7
3.1	Historie GNSS	7
3.2	Principy GNSS	7
3.2.1	GPS	8
3.2.2	GLONASS	9
3.2.3	Galileo	9
3.3	Zdroje chyb v GNSS	10
3.3.1	Odchylka satelitních hodin	10
3.3.2	Chyba dráhy družic	10
3.3.3	Chyba ionosféry a troposféry	10
3.3.4	Vlastnosti přijímače	11
3.3.5	Vícecestné šíření a stínění signálu	11
3.3.6	Vliv geometrického uspořádání satelitů	12
3.4	Metody zpřesnění měření pozice	14
3.4.1	Fázové měření	14
3.4.2	RTK	14
3.4.3	DGPS	15
4	Mapování polohy	16
4.1	Souřadné systémy	16
4.1.1	Pravoúhlé souřadnice ECEF	16
4.1.2	Zeměpisné geografické souřadnice	16
4.2	Referenční systémy	17
4.2.1	ETRS-89	17
4.2.2	WGS-84	17
4.2.3	S-JTSK	17
4.2.4	Gauss-Krügerův systém	18
4.2.5	UTM	18
4.2.6	Transformace ETRS-89→WGS-84	18
4.2.7	Transformace WGS-84→UTM	19
5	Analýza dat	20
5.1	Přesnost (Accuracy, Precision, Trueness)	20
5.2	Výrobci udávané formáty přesnosti	21
5.3	Analýza jednorozměrných dat	21
5.3.1	Gaussovo rozložení pravděpodobnosti	21
5.3.2	Bodové odhady	22
5.3.3	Intervalové odhady	22
5.3.4	Určení velikosti výběru	23
5.4	Analýza vícerozměrných dat	23
5.4.1	Grafické vyjádření konfidenční oblasti v grafu	24

6	Hardware	26
6.1	Testovací DPS	26
6.1.1	Vývojová deska NVS08-CSM	28
6.1.2	Vývojová deska UC530M	30
6.1.3	Fastrax UP500	31
6.2	Referenční stanice Trimble BX982	32
6.3	Další příslušenství	33
6.4	Komunikační protokoly	33
6.4.1	NMEA 0183	33
6.4.2	RTCM SC-104	33
6.4.3	BINR	34
7	Experiment	35
7.1	Provedení experimentu	36
7.2	Vyhodnocení experimentu	37
8	Závěr	40
9	Seznam použitých zkratk a symbolů	46

Seznam obrázků

3.1	Princip dálkoměrných systémů [1]	8
3.2	Vliv elevace satelitu	11
3.3	Vliv refrakce	11
3.4	Vliv vícecestného šíření signálu	12
3.5	Ovlivnění rozptylu měřené pozice	12
3.6	Vliv geometrického uspořádání satelitů	13
3.7	SBAS	15
5.1	Vizualizace metrologických pojmů.	20
5.2	Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti [5]	22
6.1	Orientační nákres testovacího modulu. [mm]	27
6.2	Význam pinů konektorů testovacího modulu	28
6.3	Rozložení pinů modulu NVS08	29
6.4	Přijímač NVS08 [57]	30
6.5	Anténa Taoglas AGGP.35F.07.0060A [19]	31
6.6	Význam vývodů modulu UC530M	31
6.7	Přijímač UC530M [55]	31
6.8	Význam vývodů modulu UP500	31
6.9	Referenční stanice Trimble BX982 [58]	32
6.10	Struktura RTCM věty 1,9,31 a 34 [20]	35
7.1	Rozmístění měřicího stanoviště	36
7.2	Orientace měřicího stanoviště	37
7.3	Blokové schéma programu ANALYZER.m	38
7.4	Ukázka výstupního grafu	39
7.5	Sky view graf, 24 h, 1 Hz, NVS08	39

Seznam tabulek

3.1	Parametry GPS [28]	9
3.2	Parametry GLONASS [29], [22]	9
3.3	Parametry Galileo [29], [22]	10
4.1	Základní používané elipsoidy v GNSS podle [48] str. 250	16
5.1	Koeficienty pro přepočet mezi různými formáty zápisů pravdivosti podle [7]	21
5.2	Používané konfidenční hranice normálního rozložení [3]	22
6.1	Srovnání parametrů použitých přijímačů podle [56], [55], [57]	32
6.2	Význam NMEA věty RMC	34
6.3	NVS08 RTMC SC-104, význam vět	34
7.1	Vhodné referenční body	35
7.2	Referenční body WGS-84 (Transdat [47])	36
7.3	Plán měření	37

1. Zadání

Seznamte se s principy globálních satelitních navigačních systémů, především NAVSTAR GPS a GLONASS. Navrhněte metodiku měření přesnosti určení pozice GNSS modulů. Realizujte kombinovaný navigační modul založený na přijímači NVS08-CSM. Navrhněte vhodný způsob začlenění GPS modulu do hlavního řídicího systému quadropteru Uranus (komunikace, architektura SW). Navigační modul otestujte.

2. Úvod

Přesnost určení pozice je jedním z výchozích parametrů podmiňujících návrh navigačního systému pro quadcopter. Na tomto parametru závisí kvalita navigačního subsystému. Různí výrobci používají rozdílné metody měření i různé konvence zápisu hodnot přesnosti (RMS, CEP). Udávané hodnoty obvykle představuje poloměr kruhové oblasti do které při opakovaném měření pravděpodobně spadne daná část měřených vzorků. Z metrologického pohledu však neposkytuje kompletní informaci o přesnosti zkoumaného senzoru, protože přesnost sdružuje pojmy preciznost a pravdivost. Udávané hodnoty tedy představují preciznost. Chybějící parametr je odchylka od referenční hodnoty. Vzhledem k charakteru satelitní navigace není jisté zda zjištěný shluk bodů bude odpovídat kruhu. Je patrné, že pro bližší analýzu GNSS (Global Navigation Satellite System) přijímače je třeba zvolit detailnější popis. Cílem této práce je vytvoření metodiky měření GNSS přijímačů pro jejich charakterizaci a vzájemné srovnání parametrů. Dalším zkoumanou oblastí je také zhodnocení výhod kombinovaných přijímačů GPS/GLONASS.

Pro praktickou realizaci byly vybrány tři přijímače z nižší cenové třídy. První z nich je GPS/GLONASS přijímač NVS08-CSM švýcarského výrobce NVS Technologies AG v kombinaci s externí anténou Taoglas AGGP.35F. Druhým je GPS/GLONASS přijímač UC530M od firmy u-blox, také sídlící ve švýcarsku. Výrobce udává, že se jedná o nejmenší GPS/GLONASS přijímač s integrovanou anténou na světě. Třetím přijímačem je UP500 firmy Fastrax z Finska, která byla koncem roku 2012 sloučena s firmou u-blox. Přijímač UP500 umožňuje pouze příjem GPS signálu a slouží pro srovnání s předchozími přijímači. Přijímače NVS08 a UC530M umožňují příjem korekcí z vlastní korekční stanice.

Protože jsou zakoupené moduly NVS08 a UC530M dodávány jako SMT moduly, byla před samotným měřením navržena testovací deska spolu s vývojovými moduly pro jednotlivé přijímače. Návrh je popsán v kapitole hardware.

Problematika přesnosti GNSS přijímačů je úzce spojena s použitými souřadnými soustavami a mapovými zobrazeními. Vzájemné přepočty mohou být zdrojem přidaných chyb. Praktická realizace měření vyžaduje dostatečné zázemí pro dlouhodobý sběr dat. Přijímače musí být umístěny na pozici s nestíněným výhledem na oblohu. To je jednou z výrazných komplikací této úlohy. Řešením tohoto problému se zabývá kapitola popisující experiment.

3. Technologie GNSS

Globální satelitní navigační systém (GNSS) představuje souhrnné označení pro techniku navigace pomocí sítě satelitů na oběžných drahách okolo Země. Prvním plně funkčním GNSS se stal GPS vybudovaný v USA zejména pro vojenské účely. Dalším státem, který uvedl do činnosti svůj GNSS se stalo Rusko se systémem GLONASS. V současné době (2013) je v testovací fázi také evropský GNSS Galileo. Můžeme si položit otázku proč byly vytvořeny další dva GNSS systémy když už funguje GPS? Odpověď lze nalézt zkoumáním historického vývoje rádiových navigačních systémů.

3.1. Historie GNSS

Prvotním krokem k satelitní navigaci byl objev elektromagnetického vlnění Heinrichem Hertzem (1887). Od té doby vznikaly první aplikace této novinky. První radar byl vytvořen v Anglii (1935). Po druhé světové válce, během níž došlo výraznému rozvoji rádiové navigace pro vojenské užití, se tato technologie rozšířila i do civilního sektoru, především do letectví. Dalším významným milníkem se po objevu rádiových vln stalo vypuštění Sputniku (1957) - první umělé družice Země vypuštěné SSSR.

Po tomto období vzniklo několik projektů zaměřených na vývoj satelitních navigačních systémů pro vojenské využití. V USA byl vytvořen projekt TRANSIT (1964 - 1996) [24], který vedl ke zrodu GPS. Detailní historie vzniku GPS je popsána v [21]. V SSSR vznikl projekt Cikada (1967) - první sovětský systém s nízkou oběžnou dráhou. Nízká oběžná dráha nevyhovovala požadavkům uživatelů a proto byl vytvořen nový systém se střední oběžnou dráhou pojmenovaný GLONASS (1982) [23].

Evropský systém Galileo byl založen v roce 2003 [26] jako primárně civilní systém. Mezi hlavní důvody pro tvorbu nového GNSS patří nezávislost na vojensky orientovaných systémech GPS a GLONASS, které mohou být kdykoliv deaktivovány. Dále ke vzniku vedly ekonomické důvody. Evropská komise odhaduje, že 6-7% evropského HDP je závislá na satelitní navigaci [25].

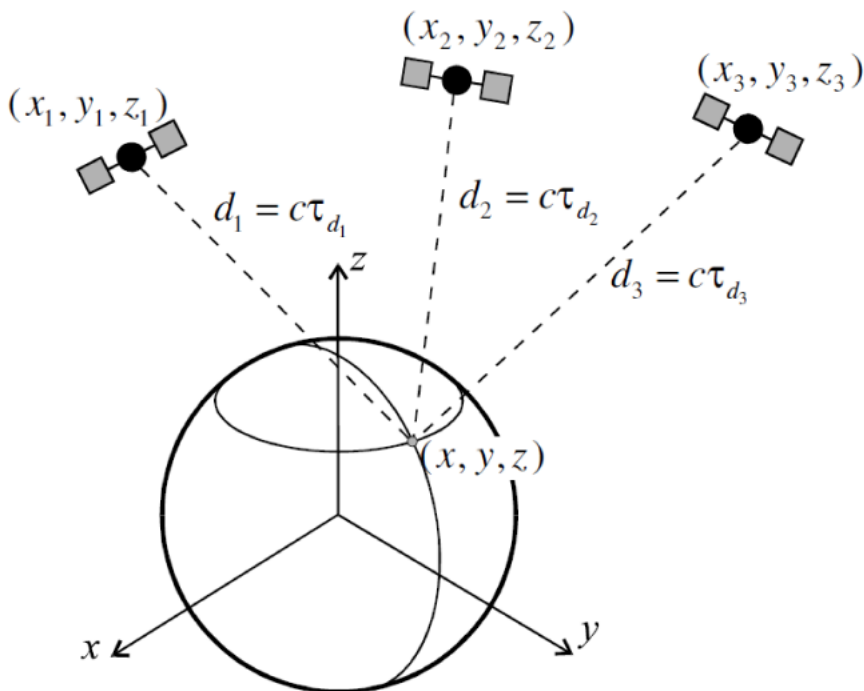
Přítomnost více navigačních systémů nabízí možnost použití hybridních přijímačů, které díky fúzi dat dokáží pracovat s vyšší přesností a lépe odolávají rušivým vlivům okolí.

3.2. Principy GNSS

Globální navigační satelitní systémy (GNSS) dnes představují již nedílnou část našeho života. Uplatňují se v širokém spektru lidské činnosti. Následující kapitola se zabývá základními principy těchto systémů. Všechny dále zmíněné systémy (GPS, GLONASS, Galileo) jsou pasivní dálko-měrné systémy. Jejich základní principy jsou shodné. Liší se v některých dílčích technických řešeních v závislosti na optimalizaci pro lokální požadavky provozovatelů.

Pozice přijímače je určena ze vzdáleností k jednotlivým družicím podle obr. 3.1. Vzdálenost je odvozena z měření doby šíření signálu od družice k přijímači τ_d . Ze známých souřadnic družic (x_i, y_i, z_i) můžeme určit polohu uživatele podle [eq:gnss1?] jako:

$$\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} = \tau_d c, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.1)$$



Obrázek 3.1: Princip dálkoměrných systémů [1]

Pokud by byly hodiny přijímače synchronizovány s hodinami družic stačily by pro určení polohy tři družice. Reálný systém používá z důvodu udržení ceny a velikosti přijímače na únosné míře (není možné aby každý uživatel měl v přijímači atomové hodiny) hodiny, které nejsou synchronizovány s hodinami satelitů. Díky tomu přibude ke třem neznámým souřadnicím ještě čtvrtá neznámá představující posun časové základny δt . b. Výsledné vzdálenosti se proto nazývají pseudo-vzdálenosti. Výsledná rovnice pro výpočet polohy přejde do tvaru:

$$\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} = d_i = (\tau_{m_i} + \Delta t)c = D_i + b, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (3.2)$$

Důvody pro použití pasivních přijímačů pramení z původního určení GPS pro vojenské účely, kde by aktivní přijímač mohl umožnit nepříteli odhalení pozice. Dalším důvodem je předcházení problémů s možným přehlcením aktivních systémů velkým množstvím požadavků.

3.2.1. GPS

Global Position System (GPS) je celosvětově první, globální, satelitní navigační systém. Projekt byl realizován americkým ministerstvem obrany. Počáteční operační dostupnost byla vyhlášena v roce 1993 (18 družic na oběžné dráze) a plná operační dostupnost v roce 1994 (24 družic). Přelomovým rokem se stal rok 2000, kdy došlo ke zrušení selektivní dostupnosti a tím se otevřela cesta mezi GPS mezi širokou veřejností. GPS poskytuje dvě navigační služby SPS (standard positioning service) pro civilní použití a PPS (precise positioning service) pro autorizované použití (vojenství). [28], [3]

Základní technické charakteristiky jsou shrnuty v tab. 3.1.

Originální koncepce je navržena pro 6 oběžných drah po 4 satelitech. V současnosti je však systém provozován s 31 satelity

Počet satelitů	24+7 (1 v údržbě, 6 doplňkových)
Frekvence	L1 (1575.42 MHz)
Kódování	CDMA, BOC
výška orbity	22 200 km
Iklinace dráhy	55 °
Počet oběžných drah	6 po 4 satelitech
Doba oběhu	12 h
geodetické datum	WGS 84

Tabulka 3.1: Parametry GPS [28]

3.2.2. GLONASS

Slovo GLONASS představuje akronym složený z počátečních písmen fonetického přepisu Globalnaja Navigacionnaja Sputnikovaja Sistěma ruského označení pro Globální navigační satelitní systém. GLONAS je obdobně jako americký systém GPS spravován ruskými armádními složkami. Počáteční operační dostupnost byla dosažena roku 1993. Plné operační dostupnosti dosáhl v roce 1995 (24 satelitů). Díky finančním problémům akrátké trvanlivosti satelitů došlo k postupné degradaci systému až v roce 2001 zbylo pouze 8 satelitů. Od roku 2001 byla zahájena modernizace a správa byla převedena z ruského ministerstva obrany na civilní vesmírnou agenturu Roskosmos. Opětovně plně operační dostupnosti bylo dosaženo v roce 2010 (22 satelitů). Současný stav ovšem nedosahuje přesnosti GPS. Určení polohy je možné s přesností cca 50m. [3], [30]

Základní technické charakteristiky jsou shrnuty v tab. 3.2.

Počet satelitů	24+5 (4 v záloze, 1 testovací)
Frekvence	L1: $1602+k \cdot (9/16)$ MHz L1: $1246+k \cdot (9/16)$ MHz
Kódování	FDMA
výška orbity	19 100 km
Iklinace dráhy	64,8 °
Počet oběžných drah	3 po 8 satelitech
Doba oběhu	11 h 15 min
geodetické datum	PZ 90

Tabulka 3.2: Parametry GLONASS [29], [22]

Díky projektu IGEX 98, byl nalezen exaktní vztah mezi vztažnými soustavami použitými v systémech GLONAS a GPS. [32]

3.2.3. Galileo

Galileo je jediný GNSS vyvíjený jako civilní. Jedná se o nejmladší ze tří uvedených GNSS. V současné době je systém stále ve fázi vývoje a je uveden pro kompletnost. Jeho plná operační dostupnost je plánována okolo roku 2020. Měl by přinést submetrovou přesnost určení polohy pro civilní uživatele. [31]

Základní technické charakteristiky jsou shrnuty v tab. 3.3.

Počet satelitů	4 (testovací)
Frekvence	1575.42 MHz
Kódování	CDMA, BOC
výška orbity	23,222 km
Iklinace dráhy	56 °
Počet oběžných drah	3 po 8 satelitech
Doba oběhu	14 h 15 min
geodetické datum	GTRF

Tabulka 3.3: Parametry Galileo [29], [22]

3.3. Zdroje chyb v GNSS

Přehled zdrojů chyb GNSS systémů (přibližná přesnost bez diferenciálních korekcí podle [8]):

- Odchylka satelitních hodin (1,5 m)
- Chyba dráhy družic (2,5 m)
- Chyba ionosférické refrakce (5 m)
- Chyba troposférická refrakce (0.5 m)
- Vlastnosti přijímače (0,3 m)
- Vícecestné šíření signálu (0,6 m))
- Vliv geometrického rozmístění družic

3.3.1. Odchylka satelitních hodin

Pro měření vzdálenosti mezi přijímačem a družicí na oběžné dráze je třeba velmi přesně měřit čas. Protože je tato úloha velmi kritická, nese každý satelit několik velmi přesných atomových hodin. Synchronizace těchto hodin je kontrolována a korigována pomocí řídicího segmentu. Podle [9] 1ns způsobí odchylku 30 cm a tuto odchylku nakumulují satelitní hodiny bez synchronizace za 3 hodiny.

3.3.2. Chyba dráhy družic

Během měření polohy přijímače není přijímači zaslána přímo poloha satelitu, ale pouze parametry jeho dráhy. Dráhy jsou monitorovány kontrolním segmentem a pomocí GPS satelitů jsou jejich předpovědi vysílány k uživatelům. Omezená přesnost určení dráhy způsobuje v důsledku chybu určení polohy.

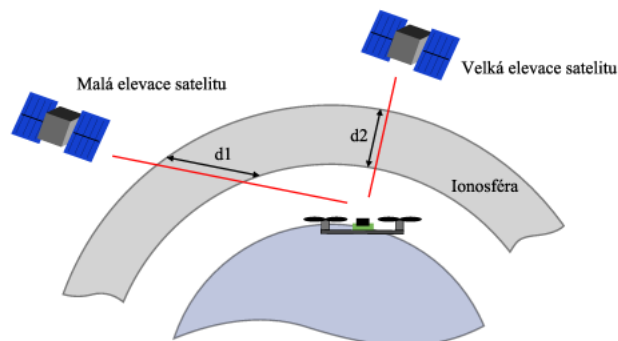
3.3.3. Chyba ionosféry a troposféry

Průchodem signálu ionosférou (obsahuje nabitě částice), dochází ke změně rychlosti šíření signálu a k refrakci čímž dochází k chybě. Ionosféra není homogenní prostředí, ale díky frekvenční závislosti vlivu ionosféry je možné měřit její parametry a na jejich základě

generovat korekce (měření pomocí frekvencí L1 a L2 [2]). Dochází také ke změnám parametrů ionosféry v závislosti na denní době (v noci je vliv ionosféry menší) a na sluneční aktivitě.

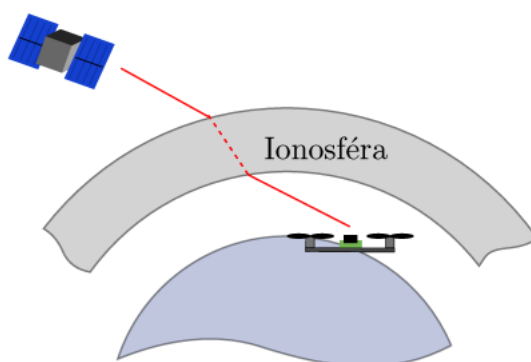
Obdobně je signál ovlivněn v troposféře (obsahuje vodní páru). "Vliv troposféry není závislý na kmitočtu rádiových vln, ale je možné ho poměrně přesně vypočítat." [2]

V troposféře a ionosféře dochází k několika jevům. Jedním z nich je změna průřezu atmosféry při změně geometrie satelitů (obr. 3.2).



Obrázek 3.2: Vliv elevace satelitu

Další jev je refrakce (obr. 3.3)



Obrázek 3.3: Vliv refrakce

3.3.4. Vlastnosti přijímače

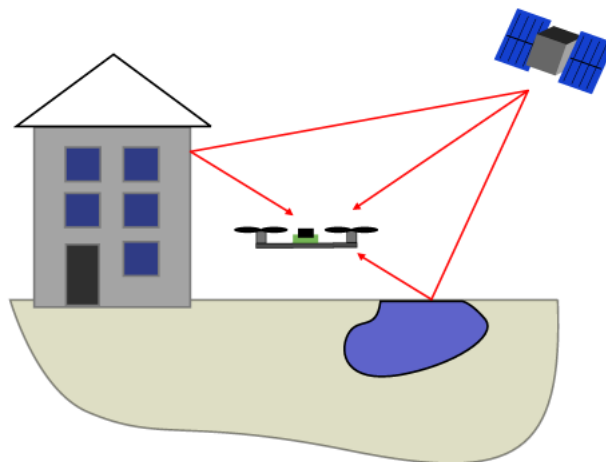
Mezi klíčové vlastnosti přijímače ovlivňující výsledné měření patří:

- Tepelný šum
- Nepřesnost hodin
- Citlivost
- Přesnost firmwaru

3.3.5. Vícecestné šíření a stínění signálu

K vícecestnému šíření dochází v zastavěných oblastech, v údolích, lesích, poblíž jezer a ve všech lokalitách, kde může dojít k odrazu satelitního signálu od překážky směrem k přijímači. Tímto mechanismem šíření signálu jinou cestou než přímou dochází k zanášení

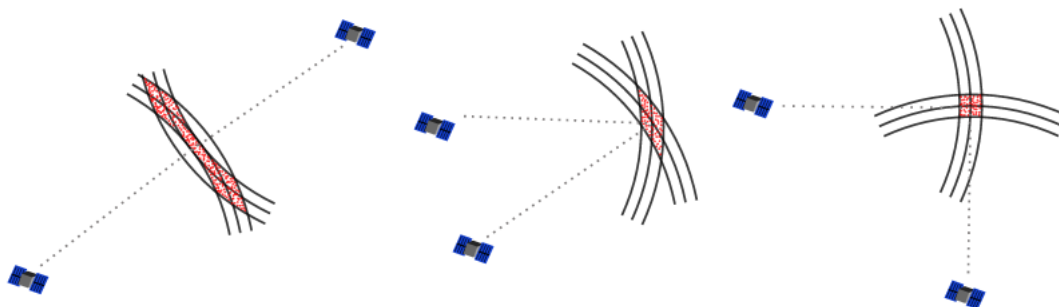
nahodilých chyb. Tento jev je možné omezit pomocí speciálních polarizovaných antén, ale toto řešení není vhodné pro miniaturní zařízení.



Obrázek 3.4: Vliv vícecestného šíření signálu

3.3.6. Vliv geometrického uspořádání satelitů

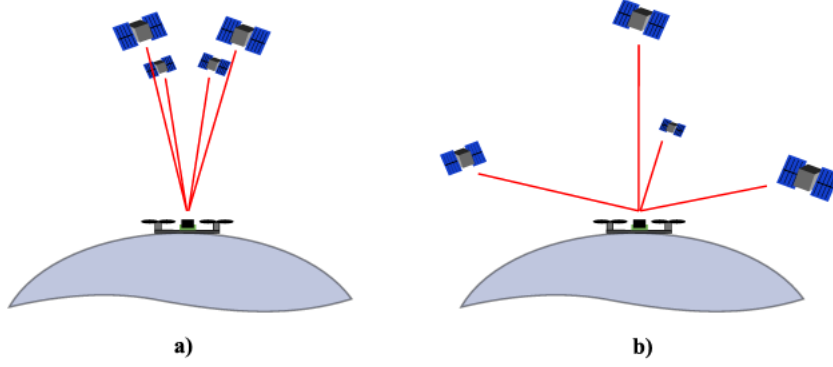
Přesnost určení pozice nezáleží jen na parametrech přenosové cesty, ale také na geometrickém uspořádání satelitů. Obr. 3.5 ilustruje tuto situaci pro dvourozměrný případ. Oblouky představují průměrnou hodnotu obklopenou hranicemi rozptylu přesnosti měření. Červeně vyznačené oblasti představují tvar rozložení hustoty pravděpodobnosti naměřené pozice. Chyba je minimalizována pokud jsou tečny těchto oblouků orientovány kolmo vůči sobě.



Obrázek 3.5: Ovlivnění rozptylu měřené pozice

Tuto situaci můžeme ilustrovat na rozmístění satelitů v prostoru pro dosažení maximální přesnosti v horizontální rovině (nejčastější požadavek). Maximální přesnosti lze dosáhnout pokud je umístěn jeden satelit v nadhlavníku a s ostatními svírá co největší úhlovou vzdálenost (Obr. 3.5b). Naopak nejméně výhodný příklad představuje situace kdy jsou satelity blízko sebe (Obr. 3.5a).

Protože jsou satelity na oběžné dráze stále v pohybu je jejich geometrie proměnlivá. Tato situace je řešena indikátorem DOP který je součástí výstupu přijímače a informuje uživatele o aktuálním stavu geometrie. Bližší popis je v následující podkapitole.



Obrázek 3.6: Vliv geometrického uspořádání satelitů

DOP - Dilution Of Precision

Pro hodnocení geometrie družic je používán ukazatel DOP (Dilution Of Precision) česky činitel zhoršení přesnosti [1]. Na základě tohoto ukazatele je možné určit zhoršení přesnosti měřené polohy oproti přesnosti při ideálním stavu uspořádání. DOP odráží vliv geometrického uspořádání popsaný v kapitole 3.3.6. Nižší hodnota znamená přesnější polohu.

Rozlišujeme několik DOP indikátorů [2], které hodnotí dílčí parametry:

- geometrický (GDOP)- geometrická snížení přesnosti
- polohový (PDOP)-kombinace horizontálního a vertikálního snížení přesnosti
- horizontální (HDOP)-horizontální snížení přesnosti
- vertikální (VDOP)-vertikální snížení přesnosti
- časový (TDOP)-snížení přesnosti hodin

Výpočet činitele snížení přesnosti pro čtyři družice podle [11]:

V prvním kroku výpočtu DOP určíme pro každou družici vektor:

$$\left(\frac{(x_i - x)}{R_i}, \frac{(y_i - y)}{R_i}, \frac{(z_i - z)}{R_i} \right) \quad (3.3)$$

kde:

$$R_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (3.4)$$

Zde x, y, z jsou souřadnice přijímače a x_i, y_i, z_i jsou souřadnice příslušného satelitu i .

Dále sestavíme matici A jako:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{(x_1 - x)}{R_1} & \frac{(y_1 - y)}{R_1} & \frac{(z_1 - z)}{R_1} & -1 \\ \frac{(x_2 - x)}{R_2} & \frac{(y_2 - y)}{R_2} & \frac{(z_2 - z)}{R_2} & -1 \\ \frac{(x_3 - x)}{R_3} & \frac{(y_3 - y)}{R_3} & \frac{(z_3 - z)}{R_3} & -1 \\ \frac{(x_4 - x)}{R_4} & \frac{(y_4 - y)}{R_4} & \frac{(z_4 - z)}{R_4} & -1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Dále sestavíme matici Q podle:

$$Q = (A^T A)^{-1} \quad (3.6)$$

$$Q = \begin{bmatrix} d_x^2 & d_{xy}^2 & d_{xz}^2 & d_{xt}^2 \\ d_{xy}^2 & d_y^2 & d_{yz}^2 & d_{yt}^2 \\ d_{xz}^2 & d_{yz}^2 & d_z^2 & d_{zt}^2 \\ d_{xt}^2 & d_{yt}^2 & d_{zt}^2 & d_t^2 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Výsledné hodnoty dílčích činitelů snížení přesnosti jsou poté definovány jako:

$$\begin{aligned} PDOP &= \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2} \\ TDOP &= \sqrt{d_t^2} \\ GDOP &= \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2 + d_t^2} \\ HDOP &= \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \\ VDOP &= \sqrt{d_z^2} \end{aligned} \quad (3.8)$$

3.4. Metody zpřesnění měření pozice

Přesnost měření pozice pomocí standardních přijímačů pro kódové měření (C/A kód) je okolo 10 m. Čas je v tomto případě odvozen z pseudonáhodného kódu modulovaného na nosné vlně. Díky relativně velké šířce impulzů kódu je snadné nalézt korelaci mezi známým průběhem kódu a jeho měřenou variantou (code-phase). Naopak právě díky této velké šířce impulzu, kdy může docházet k posuvům mezi přijímaným signálem a známým průběhem až o půl periody. Nicméně reálné přijímače pracují s posunem v řádu procent a tak je dosahovaná přesnost okolo 10 m v závislosti na kvalitě antény a dalších aspektech zmíněných výše.

Pro potřeby přesnějších měření může standardní uživatel bez možnosti měření na více frekvencích (autorizovaný uživatelé), využít některé z možností zpřesnění měření.

3.4.1. Fázové měření

Tato metoda vychází z toho, že vlnová délka nosné frekvence je C/A kódu je několikanásobně menší než šířka impulzu modulovaného PRN kódu. Lze tedy měřit fázový posun a z něho určit polohu s přesností v cm (carrier-phase). Tato metoda ovšem vyžaduje kvalitnější a přesnější přijímač i anténu. Hlavní problém spočívá v nalezení odpovídajícího počtu period nosné mezi satelitem a přijímačem. Vyřešení této nejednoznačnosti (carrier-phase ambiguity) je obtížný úkol protože každá perioda je stejná a je třeba určit přesný fázový posun nosného signálu od referenčního. K tomuto účelu se používá metoda měření, kdy se pomocí kódového měření určí přibližná perioda a poté se ve úzkém okně určuje fáze nosné.

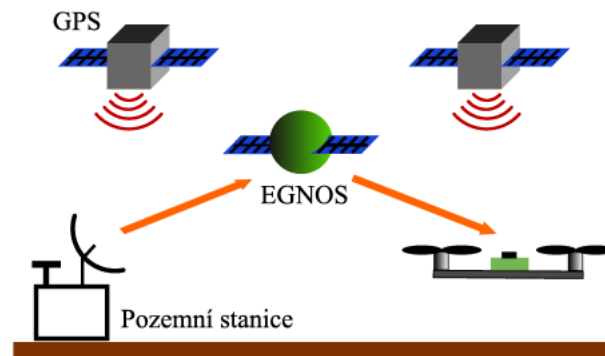
3.4.2. RTK

Fázové měření jedním přijímačem je náročná úloha, která definuje vysoké požadavky na přijímač. V praxi se používá metoda zvaná RTK (Real Time Kinematic), která využívá kromě mobilního přijímače (rover), ještě další pevnou referenční stanici (base). Účelem

této stanice je vyřešení nejednoznačnosti určení správné periody nosného signálu. Díky své přesně známé poloze dokáže tento problém řešit mnohem efektivněji a zjištěný údaj může on-line poskytnout mobilní stanici. Nevýhodou této metody pro navigaci malých létajících prostředků je velikost a cena přijímače a antény.

3.4.3. DGPS

Diferenciální GPS (DGPS) pracuje také s referenční stanicí. Vychází z toho, že pokud jsou referenční a mobilní stanice blízko u sebe (100 km), prochází signál od družice k přijímači shodnou částí atmosféry a díky tomu je postižen stejnou chybou. Referenční stanice generuje díky své známé poloze korekce a ty poskytuje mobilní stanici. Podle způsobu šíření korekcí rozlišujeme GBAS (Ground Based Augmentation System), kdy k přenosu informace dochází pomocí pozemních sítí a SBAS (Satellite Based Augmentation System), kdy jsou korekce šířeny pomocí geostacionárních satelitů (obr. 3.7).



Obrázek 3.7: SBAS

RTKLIB

RTKLIB je open-source knihovna funkcí a aplikací pro analýzu různých korekčních metod v satelitní navigaci. Knihovna podporuje několik systémů (GPS, GLONASS, Galileo, QZSS, BeiDou, SBAS). Poskytuje několik módů pro práci s daty. Jedná se zejména o Single, DGPS/DGNSS, Kinematic, Static, Moving-Baseline, Fixed, PPP-Kinematic, PPP-Static a PPP-Fixed. Podrobný popis jednotlivých módů lze najít v dokumentaci [33]. Velkou výhodou této knihovny je podpora širokého spektra komunikačních protokolů včetně binárního protokolu přijímače NVS08 použitého v této práci.

4. Mapování polohy

Polohu lze udávat pouze v rámci jasně definovaného souřadného systému. Aby bylo možné definovat polohu na zemi je třeba vedle souřadného systému zvolit také vhodnou aproximaci zemského povrchu. Nelze univerzálně říct jaká aproximace je nejvhodnější, vždy záleží na konkrétní aplikaci. Nejbližší objekt reprezentující zemský povrch je geoid, jeho tvar představuje velikost gravitačního pole v prostoru. Tento objekt je ovšem příliš složitý pro běžné výpočty. Standard se používá elipsoid. Pro některé případy postačuje i koule.

Parametry nejčastěji používaných elipsoidů:

Elipsoid	Hlavní poloosa [m]	Zploštění
WGS84	6 378 137	1/298.257 223 563
PZ 90	6 378 136	1/298.257
GTRF	6 387 136.49	1/298.256 450 000
GRS-80	6 378 137	1/298.257 222 101
Bassel 41	6 377 397,15508	1/299,152812853

Tabulka 4.1: Základní používané elipsoidy v GNSS podle [48] str. 250

Kromě základních elipsoidů z (tab. 4.1) je používáno mnoho dalších lokálních elipsoidů které vhodně aproximují povrch jednotlivých státních celků.

4.1. Souřadné systémy

Pro účely navigace se používá několik souřadných systémů, dva nejvíce používané jsou Pravoúhlé souřadnice ECEF a zeměpisné geodetické souřadnice.

4.1.1. Pravoúhlé souřadnice ECEF

Určení polohy v prostoru bez nutnosti použití referenčního elipsoidu umožňuje použití pravoúhlé souřadné soustavy ECEF (Earth-Centered, Earth-fixed). Počátek této soustavy leží v těžišti země. Osa Z míří směrem k severnímu zeměpisnému pólu. Nemusí se však shodovat s osou rotace díky jejím pomalým změnám. Osa X prochází průsečíkem nultého poledníku s rovníkem. Osa Y je kolmá na obě předchozí a směřuje k východní polokouli.

4.1.2. Zeměpisné geografické souřadnice

Geografické souřadnice jsou sférické souřadnice jejichž počátek leží v těžišti země. Poloha je udávána třemi údaji zeměpisnou délkou a zeměpisnou šířkou. Zeměpisná délka ϕ představuje úhlovou vzdálenost od nultého poledníku (severní je kladná) a zeměpisná šířka λ představuje úhlovou vzdálenost od rovníku (východní je kladná). Třetím údajem je výška, ta je udávána buďto jako nadmořská nebo jako vzdálenost od referenčního elipsoidu. Transformace mezi pravoúhlými a zeměpisnými souřadnicemi je popsána v [40],

4.2. Referenční systémy

Referenční systém definuje jak souřadnou soustavu, tak referenční těleso, mapovou projekci i transformace mezi dalšími referenčními systémy. V této práci bylo využito následujících referenčních systémů.

4.2.1. ETRS-89

ETRS-89 (European Terrestrial Reference System 1989) je odvozen od systému ITRS (International Terrestrial Reference System), což je referenční systém s počátkem těžiště Země(včetně oceánů, atmosféry). Osa X (ITRS) prochází průsečíkem rovníku s IRM(International Reference Meridian), který definuje nulovou zeměpisnou délku a je ve skutečnosti posunut o 102,5 m východně od Greenwichského poledníku [39]. Souřadná soustava ETRS je definována jako ECEF a k ní příslušná soustava zeměpisných souřadnic. Osa Z je orientována souběžně s CIO (Conventional International Origin). [35] CIO je definován jako průměrná osa rotace definovaná z měření v letech 1900-1905. str.17 [37] ETRS-89. ETRS-89 je spojen s euroasijskou kontinentální deskou, což eliminuje změny způsobené jejím pohybem. Dvočíslí 89 označuje rok odvození ze systému ITRS. V okamžiku odvození byly oba systémy shodné, ale od té doby se stále rozcházejí vlivem pohybu kontinentálních desek. [36]

Systém ITRS a tedy i odvozený ETRS-89 používá elipsoid GRS-80 (Geodetic Reference System 1980)4.1. ETRS-89 je doporučený referenční rámec pro zeměměřičské a mapovací práce na území evropské unie.

4.2.2. WGS-84

WGS-84 (World Geodetic System 1984) je referenční systém používaný v kartografii a geodesii. Byl vydán ministerstvem obrany USA roku 1984. Definuje souřadnicový systém (ECEF4.1.1), referenční elipsoid (WGS844.1) a geoid pro geodézii a navigaci. Osa rotace Země prochází IRP (IERS Reference Pole). Osa X prochází poledníkem IRM. WGS-84 byl vytvořen na základě měření systému Transit. Je standartně využíván jako defaultní referenční systém pro komerčně dostupné GPS přijímače. WGS-84 je založen na ITRS jeho počátek není zafixován ke kontinentální desce. Proto i když vychází ze stejného základního referenčního systému jako ETRS-89. Dochází s časem k narůstání odchylky s postupným odsouváním evropské kontinentální desky a tím i systému ETRS. WGS-84 zůstává stále orientován spolu s ITRS. Kompletní specifikaci systému WGS-84 popisuje [38].

4.2.3. S-JTSK

S-JTSK (Souřadnicový systém Jednotné Trigonometrická Sítě Katastrální) je pravoúhlá souřadnicová síť používaná na území České republiky pro zeměměřičské práce. Vychází z Křovákova zobrazení (Josef Křovák 1922) jenž zavedl systém v němž se tehdejší Československá republika nacházela v prvním kvadrantu a měla tedy obě souřadnice kladné. Kladná část osy X směřuje k jihu a kladná část osy Y směřuje k západu.

Tento souřadnicový systém je definován Besselovým elipsoidem s referenčním bodem Hermannskogel(definuje základní rovnoběžku zobrazení), Křovákovým zobrazením (dvojitě konformní kuželové zobrazení v obecné poloze(osa kužele není umístěna souběžně ani příčně s osou rotace Země)) a jednotnou trigonometrickou sítí katastrální. Dvojitě

zobrazení je proto, že se trigonometrické body zobrazují první konformně (zobrazení zachovává úhly a délky) z Besselova elipsoidu na Gaussovu kouli ($R = 6380,7$ km) a poté se referenční koule konformně zobrazí na kužel (délka strany 1298 km). Jako počátek, takto vzniklé pravoúhlé soustavy, byl zvolen obraz vrcholu kužele. Osu X tvoří obraz základního poledníku ($\lambda = 6^\circ 30'$) a osa Y je kolmá k ose X [41].

4.2.4. Gauss-Krügerův systém

Gauss-Krügerovým systémem lze rozumět tři různé pojmy. [43]

Kartografické válcové konformní zobrazení. Toto zobrazení převádí elipsoid přímo do roviny bez nutnosti převodu na kouli. Elipsoid se rozdělí na poledníkové pruhy stejné šířky. Obvykle 6° . A každý pruh se poté samostatně zobrazí na válec. Střední poledník se zobrazí jako přímka která je volena za osu X pravoúhlých souřadnic [42]. V každém pásu by se tedy vyskytovaly záporné souřadnice a proto se k souřadnici x přičítá konstanta 500 km a současně je uvedeno číslo poledníkového pásu [44].

Synonymum pro UTM Viz dále 4.2.7.

Popis transformace zeměpisných souřadnic do UTM Viz dále 4.2.7.

4.2.5. UTM

UTM (Universal Transverse Mercator) je systém pravoúhlých souřadnic, který vychází z Mercatorova normálního válcového zobrazení, jenž Gerhard Mercator v 16. století pro účely mořeplavby. Samotné Univerzální transversální Mercatorovo zobrazení bylo vytvořeno armádou USA v roce 1940. UTM dělí Zemi mezi 80° jižní šířky a 84° severní šířky na 60 zón. Každá z nich je široká 6° (obdobně jako Gauss-Krüger). Každá z těchto zón představuje samostatné Mercatorovo zobrazení. Díky tomu je dosaženo menší zkreslení než u Gauss-Krügerova zobrazení [45]. Výhodou tohoto systému je, že zachovává úhly a délky uvnitř každé zóny. To umožňuje jednoduše počítat vzdálenosti pomocí Pythagorovy věty.

4.2.6. Transformace ETRS-89 $\rightarrow$ WGS-84

Body geodetických měření na území České republiky jsou uváděny buďto v systému S-JTSK nebo ETRS89. Pro potřeby experimentu je třeba převést souřadnice referenčních bodů zaměřených geodety ze systému ETRS-89 do systému WGS-84 se kterým pracují zkoumané GNSS přijímače. Vzhledem k velké podobnosti referenčních elipsoidů WGS84 a GRS-80 se často tato transformace zanedbává a oba systémy se považují za ekvivalentní. V takovém případě vzniká odchylka způsobená pohybem evropské kontinentální desky 50 - 60 cm [46]. Transformace zahrnuje přepočtení referenčních elipsoidů včetně vzájemného posunu a rotace. Pro účely experimentu byl využit program TRANSDAT [47].

4.2.7. Transformace WGS-84→UTM

Tato transformace převádí geografické souřadnice na souřadnice pravoúhlé v Mercatorově zobrazení. Matematický postup transformace je popsán v [48]. Pro potřeby experimentu byla použita matlabovská funkce `wgs2utm` dostupná z [49].

5. Analýza dat

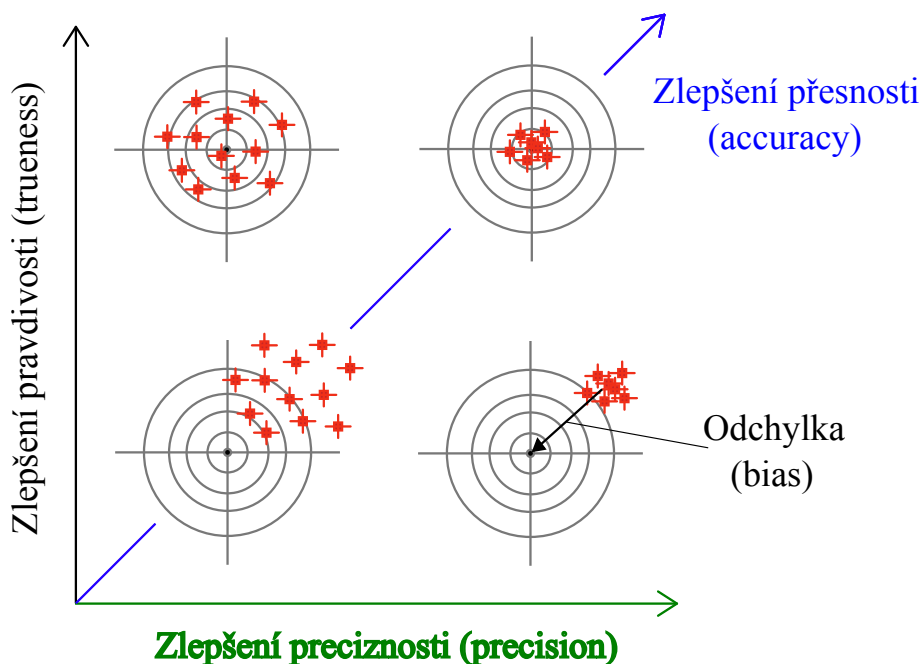
Následující kapitola pojednává o volbě vhodné metodiky vyhodnocení dat z GNSS přijímačů. Přesnost GPS přijímačů je standardně udávána v podobě poloměru kružnice ohraničující data s určitou konfidenční úrovní. Tento způsob je efektivní pro rychlou orientaci uživatele, ale neposkytuje informaci o dalších vlastnostech přijímače.

5.1. Přesnost (Accuracy, Precision, Trueness)

V rámci postupného vývoje mezinárodní standardizace se několikrát změnila definice metrologických pojmů. V českém prostředí se jedná především o pojem přesnost. Aby nedocházelo k omylům je v tomto textu použit význam podle oficiálního překladu Mezinárodního metrologického slovníku VIM3 [50]. V češtině jsou nejvíce zavádějící pojmy:

- Přesnost (Accuracy) - těsnost shody mezi naměřenou hodnotou veličiny a pravou hodnotou veličiny měřené veličiny.
- Preciznost (Precision)- těsnost shody mezi indikacemi nebo naměřenými hodnotami veličiny získanými opakovanými měřeními na stejném objektu nebo na podobných objektech za specifikovaných podmínek.
- Pravdivost (Trueness) - těsnost shody mezi aritmetickým průměrem nekonečného počtu opakovaných naměřených hodnot veličiny a referenční hodnotou veličiny.

Význam jednotlivých pojmů ilustruje obrázek 5.1.



Obrázek 5.1: Vizualizace metrologických pojmů.

5.2. Výrobci udávané formáty přesnosti

Výrobci používají jediný číselný údaj pro popis "přesnosti" GPS přijímače v horizontální rovině. Dle terminologie VIM3 by se mělo jednat spíše o pravdivost protože udávaná informace neposkytuje žádnou informaci o hodnotě odchylky a nemůže tedy z metrologického hlediska postihnout všechny aspekty přesnosti.

CEP CEP (Circular Error Probable) - Jedná se o poloměr kružnice která vytyčuje 50% interval spolehlivosti, neboli interval do kterého při opakovaném měření spadne v 50% konvenčně pravá hodnota (pravděpodobnost $P = 0,5$).

RMS Root Mean Square - zvaný také kvadratický průměr, nebo 1σ error, nebo standardní odchylka představuje poloměr kružnice která vytyčuje 68,2% interval spolehlivosti, neboli interval do kterého při opakovaném měření spadne v 68,2% konvenčně pravá hodnota (pravděpodobnost $P = 0,682$).

R95 Jedná se o poloměr kružnice která vytyčuje 95% interval spolehlivosti, neboli interval do kterého při opakovaném měření spadne v 95% konvenčně pravá hodnota (pravděpodobnost $P = 0,95$).

Pro praktické výpočty v rámci analýzy v Matlabu byla použita funkce `crr()` dostupná z [51].

Pro přepočty mezi jednotlivými formáty lze použít tabulku koeficientů 5.1.

CEP	95%	68%	
1	2,08	1.28	CEP
0,48	1	0,62	95%
0,78	1,62	1	68%

Tabulka 5.1: Koeficienty pro přepočet mezi různými formáty zápisů pravdivosti podle [7]

5.3. Analýza jednorozměrných dat

V následující části je předpokládáno, že rozložení chyby měření odpovídá Gaussovu rozdělení pravděpodobnosti.

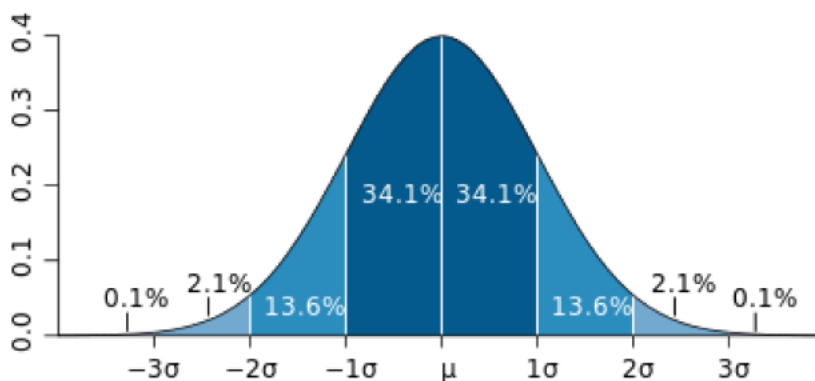
5.3.1. Gaussovo rozložení pravděpodobnosti

Gaussovo rozdělení se využívá pro modelování rozdělení chyby při opakovaném měření. Hustotu pravděpodobnosti Gaussova rozdělení charakterizují dva parametry, střední hodnota μ a rozptyl σ^2 , podle vzorce:

$$f_G(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5.1)$$

Grafické znázornění vyjadřuje obr. 5.2.

Z této charakteristiky vycházejí označování konfidenčních intervalů hodnotou směrodatné odchylky σ . Například RMS (68,2%) se často označuje jako 1σ chyba. Přehled často používaných konfidenčních hranic sdružuje tab. 5.2.



Obrázek 5.2: Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti [5]

konfidenční hranice	směrodatná odchylka σ
50%	$\pm 0,675$
68,2%	± 1
90%	$\pm 1,645$
95%	$\pm 1,960$
95,45%	± 2
99%	$\pm 2,576$
99,73%	± 3
99,9%	$\pm 3,291$
99,99%	$\pm 3,891$
99,9937%	± 4
99,999%	$\pm 4,417$

Tabulka 5.2: Používané konfidenční hranice normálního rozložení [3]

5.3.2. Bodové odhady

Míru polohy určuje aritmetický průměr. Definice aritmetického průměru μ a rozptylu σ^2 souboru dat složeného z n pozorování x_i .

$$\mu_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.2)$$

Základní charakteristikou míry variability je výběrový rozptyl:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2 \quad (5.3)$$

Směrodatná odchylka σ je definována jako odmocnina rozptylu σ^2 .

5.3.3. Intervalové odhady

”Je-li potřeba zjistit vedle míry polohy parametru také přesnost, lze vypočítat interval spolehlivosti (konfidenční interval), který vymezuje oblast výskytu parametru s předem určenou pravděpodobností $1 - \alpha$, kde α je hladina významnosti (obvykle $\alpha = 0,05$).

$$P(T_1 \leq \tau \leq T_2) \geq 1 - \alpha \quad (5.4)$$

5.4. ANALÝZA VÍCEROZMĚRNÝCH DAT

Pro normální rozdělení $N(\mu, \sigma^2)$ je nejlepším bodovým odhadem parametru střední hodnoty μ výběrový průměr $\bar{x}$, který má rozdělení $N\left(\mu, \frac{\sigma^2}{n}\right)$. Oboustranný interval spolehlivosti při známém σ pak konstruujeme jako:

$$\left(\bar{X} \pm z \left(\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \right) \quad (5.5)$$

Jelikož obvykle neznáme σ^2 , ale pouze odhad s^2 nahrazujeme výraz 5.5 pro interval spolehlivosti vztahem

$$\left(\bar{X} \pm t_{n-1} \left(\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{s}{\sqrt{n}} \right) \right) \quad (5.6)$$

kde $t_{n-1}(\alpha)$ je kritická hodnota studentova t-rozdělení a s je výběrová směrodatná odchylka.” [13]

Vlastností konfidenčního intervalu je, že se vzrůstající velikostí intervalu se zmenšuje.

5.3.4. Určení velikosti výběru

Pokud známe směrodatnou odchylku σ a požadovanou přesnost měřené veličiny p lze pro koeficient spolehlivosti $\alpha = 0,05$ získat velikost výběru jako:

$$n \geq \left(1.96 \frac{\sigma}{p} \right)^2 \quad (5.7)$$

5.4. Analýza vícerozměrných dat

Pro popis přesnosti a vzájemné závislosti vícerozměrných dat lze použít kovarianční matici. Hlavní diagonála kovarianční matice obsahuje výběrové rozptyly (variance) σ^2 jednotlivých komponent. Prvky mimo hlavní diagonálu pokrývají kovariance C které určují míru vzájemné vazby mezi dvěma veličinami.

Výpočet kovarianční matice ze souboru měřených dat lze podle [14] provést následujícím způsobem. Máme-li matici měřených dat $\mathbf{A}$ představující např. souřadnice X,Y,Z. Sloupce matice představují jednotlivé komponenty (souřadnice) a každý řádek představuje jedno pozorování těchto tří veličin.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \\ X_3 & Y_3 & Z_3 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Dalším krokem je výpočet vektoru průměrů:

$$E(\mathbf{A}) = \begin{bmatrix} E(\mathbf{X}) & E(\mathbf{Y}) & E(\mathbf{Z}) \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

kde jednotlivé složky vektoru jsou aritmetické průměry jednotlivých komponent vstupní matice A .

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.10)$$

Ze znalosti vektoru průměrů můžeme vypočítat jednotlivé kovariance v kovarianční matici $\mathbf{M}$.

$$COV = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})(Y_i - \bar{y})}{n - 1} \quad (5.11)$$

Kovarianční matice je symetrická podle hlavní diagonály, je pozitivně semidefinitní a platí

$$M = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1\sigma_2 & \sigma_1\sigma_3 \\ \sigma_2\sigma_1 & \sigma_2^2 & \sigma_2\sigma_3 \\ \sigma_3\sigma_1 & \sigma_2\sigma_1 & \sigma_3^2 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Pro jednotlivé kovariance platí také vzorec

$$\sigma_{12} = \sigma_1\sigma_2\rho_{12} \quad (5.13)$$

kde ρ je koeficient korelace. Ten určuje míru závislosti a nabývá hodnot z intervalu $< -1, 1 >$ kde pro $\rho = 1$ platí mezi příslušnými veličinami přímá lineární závislost, pro $\rho = -1$ platí mezi příslušnými veličinami nepřímá lineární závislost a pro $\rho = 0$ jsou veličiny lineárně nezávislé.

$$\rho(X, Y) = \frac{C(X, Y)}{\sigma(X)\sigma(Y)} \quad (5.14)$$

Koeficient korelace je úzce spojen s korelační maticí, která představuje matici vnitřních vazeb náhodných proměnných. Na její hlavní diagonále jsou umístěny jedničky $\rho_{ii} = 1$ a prvky mimo hlavní diagonálu obsahují koeficienty korelace mezi danými veličinami.

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{XY} & \rho_{XZ} \\ \rho_{YZ} & 1 & \rho_{YZ} \\ \rho_{ZX} & \rho_{YX} & 1 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Vztah mezi kovarianční a korelační maticí popisuje vzorec

$$\mathbf{COV} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{C} \quad (5.16)$$

K pochopení výše popsané problematiky bylo čerpáno také z [16](str. 108) a [17](str. 241).

5.4.1. Grafické vyjádření konfidenční oblasti v grafu

Jak bylo popsáno výše výrobci obvykle udávají přesnost přijímače v podobě jedné hodnoty (nejčastěji CEP). Grafické vyjádření této hodnoty by odpovídá kružnici, která vymezuje oblast dat spadající do příslušného konfidenčního intervalu. Bohužel rozložení pravděpodobnosti reálných dat není vždy kruhové jak by odpovídalo 2D Gaussově funkci, ale je zdeformováno vlivem vnějších parazitních vlivů popsaných v 3.3. Díky deformaci výsledného shluku změřených bodů je kruh již nevyhovující. Mnohem lepší aproximací je elipsa, která jasně reprezentuje tvarovou deformaci vzorku.

Konfidenční elipsu lze zkonstruovat z kovarianční matice. Víme že délky hlavní a vedlejší osy odpovídají druhým odmocninám vlastních čísel kovarianční matice. Následující postup vychází z [15].

$$\mathbf{VC} = \text{eigenvalues}(\mathbf{C}) \quad (5.17)$$

5.4. ANALÝZA VÍCEROZMĚRNÝCH DAT

Střed elipsy představuje vektor středních hodnot (x_0, y_0) . Poměr stran grafu (*aspectratio*) odpovídá vztahu

$$aspectratio = (\Delta y / verticalplotlength) / (\Delta x / horizontalplotlength) \quad (5.18)$$

kde ...

$$\theta = \frac{1}{2} \cdot Tan^{-1} \left[\left(\frac{1}{aspectratio} \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot \sigma_{xy}}{(\sigma_x^2) - (\sigma_y^2)} \right) \right] \quad (5.19)$$

Elipsa v tomto tvaru odpovídá konfidenční oblasti

V prostředí Matlab byla využita funkce `ERROR ELIPSE` dostupná z [18].

6. Hardware

Před samotnou realizací experimentu byl navržen testovací hardware. Návrh byl podřízen několika základních kritériím:

Kombinovaný příjem GPS/GLONASS. Cílem experimentu je analýza přijímačů s možností kombinovaného příjmu GPS/GLONASS. Proto byl výběr omezen pouze na tuto kategorii.

Možnost použití na UAV Quadrocopter Uranus. Quadrocopter má výrazně omezenou nosnost, a proto bylo třeba zvolit lehký přijímač s malými rozměry. Toto kritérium je omezující zejména při volbě antény.

Ekonomické kritérium. Cena přijímače byla stanovena v oblasti běžných uživatelských přijímačů pro obecné použití (do 1500 Kč).

Modulární systém Pro předpokládané použití při navigaci Quadrocopteru a pro experimentální měření by bylo nevhodné umístit všechny přijímače na jednu DPS. Proto byl zvolen systém s hlavní testovací DPS s několika vývojovými moduly.

Uvedeným kritériím v první fázi nejlépe vyhovoval GPS/GLONASS/Galileo přijímač NVS08-CSM od firmy NVS. V rámci srovnání byl k tomuto přijímači zvolen modul Fastrax UP500 dříve použitý v práci [52]. V průběhu teoretické přípravy se na trhu objevil miniaturní přijímač (podle výrobce nejmenší GPS/GLONASS přijímač s integrovanou anténou na světě) u-Blox UC530M. Díky zajímavým parametrům byl zařazen do srovnávacího experimentu jako třetí a poslední přijímač.

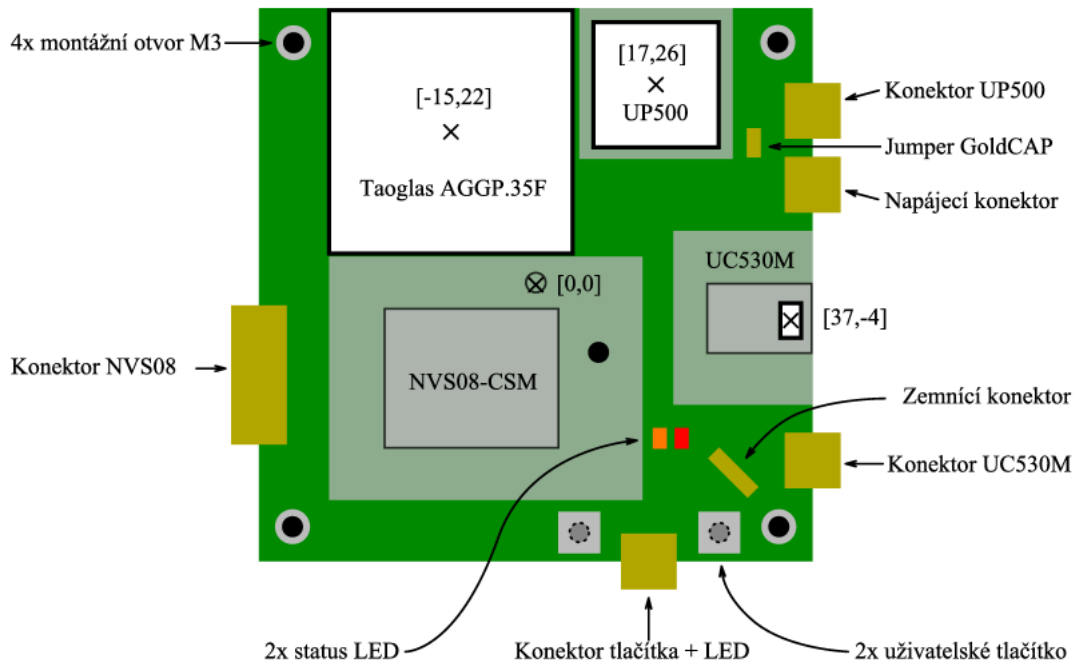
6.1. Testovací DPS

Testovací modul umožňuje snadnou práci se zkoumanými přijímači. Rozměry 80 x 80 mm byly zvoleny podle zavedené konvence rozšiřujících modulů quadrocopteru Uranus. Tloušťka DPS je 1,5 mm, která zajišťuje dostatečnou mechanickou odolnost. Zvolená koncepce umožňuje instalaci modulu na tělo quadrocopteru, nebo upevnění na stativ v případě statických testů. Celý systém je modulární, a proto je možné jednotlivé GNSS přijímače používat i samostatně. Hlavní deska poskytuje samostatné výstupy pro všechny užitečné I/O porty každého přijímače. Dále zajišťuje rozvedení napájení a záložního napájení.

Jednotlivé části testovací DPS jsou podle nákresu (obr. 6.1:

Slot pro modul NVS08 Slot je umístěn u levého okraje desky. Pozice byla zvolena s ohledem na koaxiální vedení od antény Taoglass AGGP.35F.

Konektor modulu NVS08 konektor je umístěn vlevo od modulu NVS08. Význam jednotlivých pinů popisuje (obr. 6.2.



Obrázek 6.1: Orientační nákres testovacího modulu. [mm]

Nosník antény Taoglass AGGP.35F Anténa Taoglass AGGP.35F zaujímá největší plochu z použitých antén. Je umístěna v levém horním rohu podle (obr. 6.1. Propojovací kabel je vyveden v oblasti pravého dolního rohu, odkud míří k anténnímu konektoru na modulu NVS08. Daní za kompaktní umístění je kompromis mezi skrytím kabelu před vnějšími vlivy pod modul NVS08 a ohnutím kabelu o 180°, což není zcela optimální z hlediska vedení signálu.

Slot pro modul UP500 Slot je umístěn v pravém horním rohu.

Konektor modulu UP500 Slot je umístěn vpravo od modulu UP500.

Napájecí konektor Napájecí konektor slouží k přivedení napětí 3,3 V. Je umístěn pod konektorem modulu UP500 u okraje testovací desky, pro eliminaci přepólování je vybaven zámkem.

Záložní kondenzátor Kondenzátor slouží k napájení paměti GNSS přijímačů při odpojení hlavního napájecího zdroje.

Jumper Jumper umístěný těsně vedle těla modulu UP500 slouží k odpojení záložního kondenzátoru.

Slot pro modul UC530M Slot je umístěn pod napájecím konektorem s anténou orientovanou k okraji testovacího modulu, aby došlo k minimalizaci vlivu na příjem signálu.

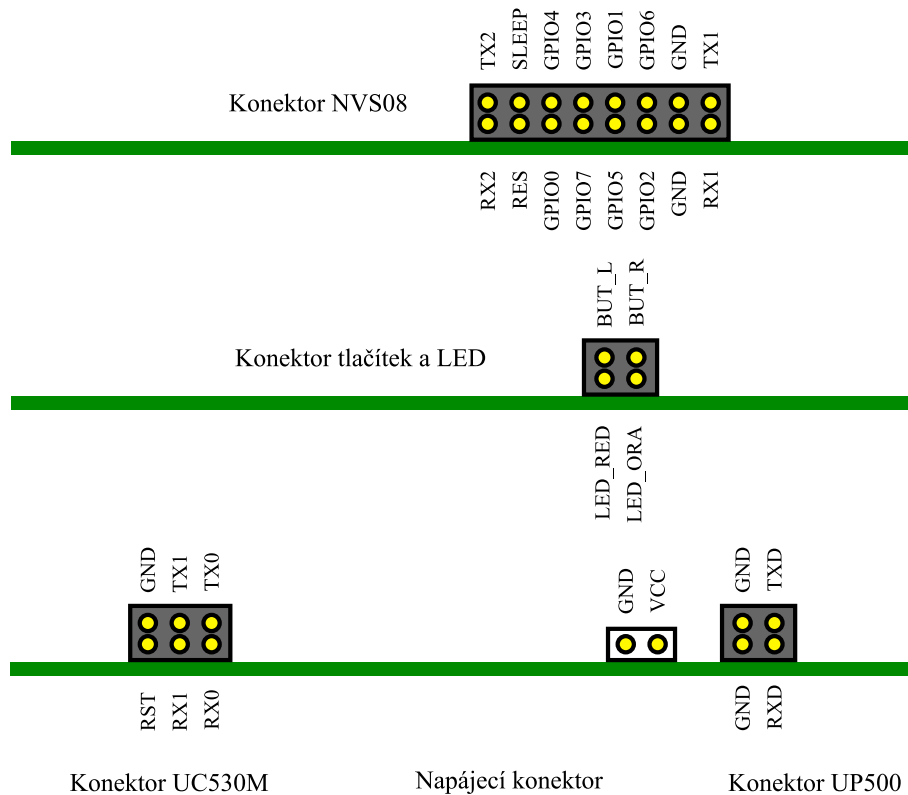
Konektory modulu UC530M Konektor je umístěn pod slotem modulu UC530M.

Uživatelská tlačítka Uživatelská tlačítka umístěná u spodního okraje testovacího modulu jsou primárně určena pro zadávání testovacích souřadnic při ladění na quadcopteru. Můžou být ale využita k jakémukoliv jinému účelu. Při stisku tlačítka je na výstupu log. 1.

Uživatelské LED Uživatelské LED jsou primárně určeny pro ladění kódu. Led jsou aktivní při přivedení log. 0.

Sdružený konektor tlačítek a LED Konektor je umístěn v pravé části spodního okraje.

Význam jednotlivých vývodů popisuje (obr. 6.2)



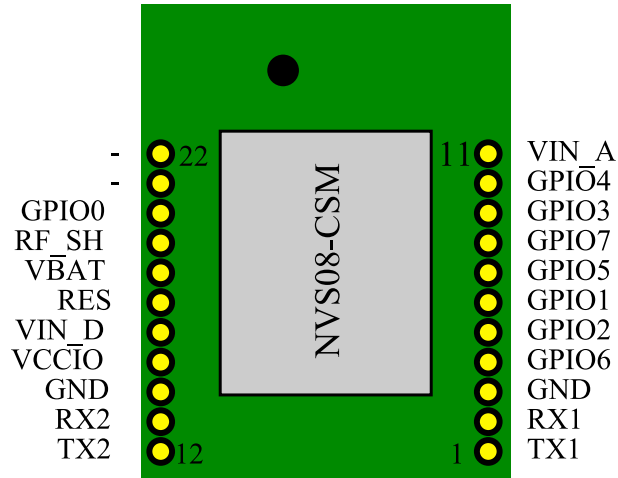
Obrázek 6.2: Význam pinů konektorů testovacího modulu

Výkresová dokumentace testovací desky je v příloze B.

6.1.1. Vývojová deska NVS08-CSM

Vývojová deska NVS08 je navržena pro připojení aktivní externí antény Taoglass AGGP.35F pomocí konekturu IPEX MHFI [53]. Použití tohoto konekturu vyplynulo z rozhraní zvolené antény. Motiv DPS byl navržen v programu Eagle 6.3. Tloušťka DPS byla zvolena 0,5 mm vyhledem k dodržení požadované charakteristické impedance anténního vedení mezi konektorem a anténním vstupem přijímače. Dalším možným řešením by bylo vytvoření vícevrstvé desky s vnořenou 0,5 mm vrstvou. Od tohoto řešení bylo upuštěno v rámci šetření nákladů. Finální rozměry modulu jsou 45 x 35 mm.

Návrh RF vedení byl realizován pomocí simulátoru AppCAD [54]. Screenshot je k dispozici v příloze H.



Obrázek 6.3: Rozložení pinů modulu NVS08

Byly vyvedeny všechny piny s užitečnými signály podle 6.3.

NVS NV08C-CSM

Přijímač NVS NV08C-CSM je produkt švýcarské společnosti NVS Technologies AG [57]. Oproti konkurenci vyniká zejména přesností pozice 1 m (CEP 95). Pro navigaci UAV je výhodná rychlá vzorkovací frekvence 10 Hz. Hlavní parametry přijímače jsou uvedeny v 6.1.

Bezpečnost kritických aplikací zajišťuje Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM). Tento systém zajišťuje integritu přijímaného signálu. Během příjmu hledá chyby v zaznamenaných datech. Pozice přijaté od jednotlivých satelitů by měly být v určitém rozmezí, pokud tomu tak není RAIM vyřadí takové měření jako chybné. Přijímač vyžaduje minimum externích součástek. Jedná se především o aktivní anténu, která musí pro optimální funkčnost splňovat následující parametry:

- L1 GPS(1575.42MHz), GLONASS(1601.5 MHz)
- střední frekvence $f_c = 1590$ MHz, šířka pásma 35 MHz
- zesílení včetně útlumu kabelu 20-30 dB
- šumová činitel antény ≤ 2 dB
- útlum signálu mimo frekvenční pásmo minimálně 35 dB pro $f_c \pm 70$ MHz.

Dále je potřebný kondenzátor pro záložní napájení. Základem přijímače je čipová sada NVS08. Vzhledem k jeho malým rozměrům a pouzdru BGA není vhodný pro vývoj testovací aplikace. Výrobce pro tyto účely dodává verzi CSM, která je uzpůsobena pro SMT montáž realizovatelnou pomocí mikropáječky. Pouzdro je zobrazeno na obr. 6.4.

Komunikace s okolím je zajištěna pomocí dvou UART portů. Toto řešení dovoluje využít jeden port pro příjem RTCM korekcí a druhý pro odesílání změřené pozice. V případě použití speciálního firmware lze jeden z portů překonfigurovat na SPI nebo TWI rozhraní.



Obrázek 6.4: Přijímač NVS08 [57]

Anténa Taoglas AGGP.35F

Anténa je jedním z hlavních činitelů ovlivňujících dosažitelnou přesnost navigace. Firma Taoglas byla založena v roce 2003 v Irsku. Vývoj je soustředěn v USA a na Taiwanu. Anténa Taoglas AGGP.35F.07.0060A byla vybrána po konzultaci s výrobcem přijímače NVS08-CSM. Jedná se o aktivní keramickou anténu určenou pro dvou-pásmový provoz (GPS, GLONAS). Hlavní parametry podle [19] charakterizující tuto anténu jsou:

- rozměry 35 x 35 x 3,7 mm
- přívodní kabel 60 mm $\phi = 1.13$, typ IPEX MHFI
- vstupní napětí 1,8 V až 5,5 V
- ROHS kompatibilní
- frekvenční pásmo 1574 - 1610 MHz
- polarizace RHCP
- zesílení 27 dB
- proudová spotřeba 10 mA při 3 V
- impedance 50 Ω

Fyzická podoba antény je zobrazena na obr. 6.5.

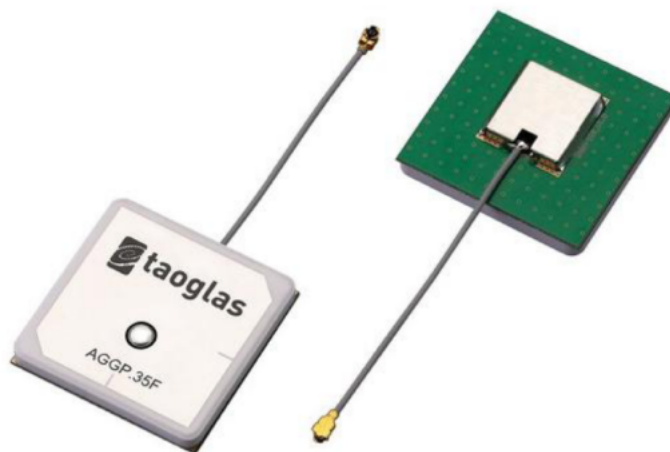
6.1.2. Vývojová deska UC530M

Vývojová deska UC530 rozšiřuje rozhraní přijímače UC530M na standardní pinheader piny a tím umožňuje variabilní využití tohoto přijímače pro experimentální práci. Modul je realizován na DPS o rozměrech 20 x 25 x 1,5 mm. Jsou vyvedeny piny podle schématu obr. 6.6.

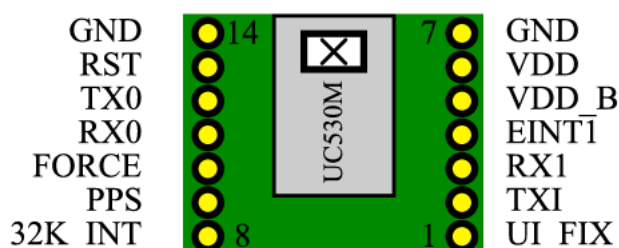
U-blox UC530M

Podle výrobce u-Blox je přijímač UC530M nejmenší GPS/GLONASS přijímač s integrovanou anténou na světě. Zajímavostí je integrovaný dataloger LOCUS s 2 kB flash pamětí. To představuje 16 h záznamu při výrobním nastavení $f_z = 15$ s.

Vlastnosti přijímače podle [55] shrnuje tab.6.1.



Obrázek 6.5: Anténa Taoglas AGGP.35F.07.0060A [19]



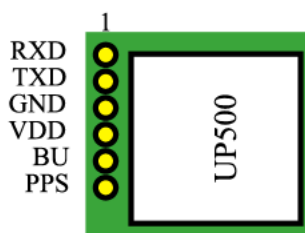
Obrázek 6.6: Význam vývodů modulu UC530M



Obrázek 6.7: Přijímač UC530M [55]

6.1.3. Fastrax UP500

Jedná se o GPS přijímač vyráběný firmou Fastrax, která byla před nedávnem koupena vedoucí firmou na trhu OEM GNSS přijímačů, firmou u-Blox. Dokumentace přijímače Fastrax UP500 je dostupná z [56]. Vizualizace je na obr. 6.8. Přijímač zástupce verzi bez možnosti příjmu GLONASS a externích RTCM korekcí.



Obrázek 6.8: Význam vývodů modulu UP500

Srovnání parametrů použitých přijímačů:

6.2. REFERENČNÍ STANICE TRIMBLE BX982

Parametr	Přijímač		
	NVS08-CSM	UC530M	UP500
Podpora	L1: GPS, GLO-NASS, GALILEO, COMPASS, SBAS	L1: GPS + Glonass(Galileo, Beidou), SBAS	L1 GPS, SBAS
Rozměry	20x26x2,5 mm	10x14x2 mm	22x22x8 mm
Hmotnost	20x26x2,5 mm	?	9 g
Max. vzorkovací frekvence	10 Hz	10 Hz	5 Hz
Horizontální preciznost	1,5 m (RMS), RTCM, SBAS: 1 m (RMS)	3.0 m (67%)	1.8 m (CEP95)
Vertikální preciznost	2 m (RMS)	5,0 m (67%)	?
Rychlostní preciznost	0,05 m/s	0,02 m/s (50%)	0,1m/s
Chip set	NVS	Mediatek MT3333	MediaTek MT3318
Kanálů (search/track)	32/32	99/33	32/14
Čas prvního fixu (cold/warm/hot)	25/25/3 s	23/23/1 s	33/33/1 s
Napájení	+1,8 ... +3,6 V	+3,0 ... +4,3 V	+3,0 V ... +5,5 V
Spotřeba	180 mW (3,3 V)	66 mW (3,3 V)	90 mW(3 V)
Porty	2 x UART(NMEA, RTCM, NVS BINR), volitelné I2C, SPI	2 x UART (NMEA, RTCM)	UART(NMEA)
Navigation Sensitivity	-160dBm	-160dBm	-159dBm

Tabulka 6.1: Srovnání parametrů použitých přijímačů podle [56], [55], [57]

6.2. Referenční stanice Trimble BX982

Velmi přesný kombinovaný přijímač Trimble BX982 schopný pracovat s milimetrovou přesností. Tento přijímač byl využit jako referenční stanice pro generování diferenčních korekcí pro testované přijímače NVS08 a UC530M.



Obrázek 6.9: Referenční stanice Trimble BX982 [58]

6.3. Další příslušenství

kompletní hardwarová sestava obsahovala několik dalších doplňků. Jedná se o 3 ks převodníků UART - USB založených na čípech FTDI FT232B, převodník úrovní RS232-UART založený na obvodu MAX232. Dále byly použity 2 ks sériové kabely, 30 m propojovacího UTP kabelu, 30 m napájecího dvoulinky, laboratorní zdroj, 1 ks notebook Sattelite, 2ks bezdrátové pojítka Mikrotic. Pokusně byla realizována bezdrátová komunikační trasa pro přenos korekcí pomocí rádiových modemů Elpro U-504 (Zamýšleno pro přenos korekcí ke vzdáleným referenčním bodům).

V rámci samostatné mobilní měřicí stanice byl použit Stativ Velbon Sherpa 750, dvojice autobaterií Akuma 44 Ah, napájecí univerzální auto adaptér Thrust 120 W, 3,3 V stabilizátor napětí založený na obvodu NCP1117.

Notebook byl vybaven softwarem u-centre od firmy u-Blox. Tento program umožňuje variabilní rozmanité zobrazení data a je vynikajícím nástrojem pro zkoušení nových nastavení. V tomto projektu byl použit také pro záznam měřených dat. Dále byl použit terminál Docklite pro manuální nastavení přijímačů do požadovaného módu.

6.4. Komunikační protokoly

V následující části jsou popsány komunikační protokoly použité během měření.

6.4.1. NMEA 0183

Výstup GPS přijímače je tvořen protokolem standardu NMEA 0183. Tento protokol byl původně vytvořen pro použití v námořnictvu. NMEA protokol používá ASCII věty o délce maximálně 80 znaků. Každá věta se skládá z hlavičky začínající znakem '\$' následovaným typem věty. Tělo tvoří série dat oddělených čárkami. Každou větu ukončuje znak '', za kterým následuje kontrolní součet. Můžeme rozlišit tři hlavní typy vět: věty výstupní (pro výstup z modulu), věty příkazovací (pro nastavení modulu) a dotazovací věty (pro kontrolu nastavení). Různé druhy výstupních vět, obsahují různé skupiny dat. Pro navigaci quadcopteru jsou využívány věty typu RMC a GGA, které poskytují základní data nutná pro potřeby navigace. Vysvětlení konstrukce věty je ukázáno na větě RMC v tab. 6.2

```
$GPRMC,114353.000,A,6016.3245,N,02458.3270,E,0.01,0.00,121009,,,A*69
$GPRMC,hhmmss.dd,S,xxmm.dddd,<N|S>,yyymm.dddd,<E|W>,.s.s,h.h,ddmmyy,d.d,
<E|W>,M*hh<CR><LF>
```

6.4.2. RTCM SC-104

Radio Technical Commission for Maritime Service je nezávislá členská organizace, která sdružuje vládní agentury, výrobce a poskytovatele služeb. Její náplní je tvorba a údržba standardů. Jedním z mezinárodně užívaných standardů je SC104: Differential Global Navigation Satellite Systems (DGNSS). Tento standard definuje formát jednotlivých vět. Každá věta je složena z hlavičky (typ věty, čas, délka zprávy) a těla které obsahuje příslušná data. Přijímač NVS08 podporuje verzi RTCM SC-104 v2.2, zprávy 1, 9, 31 a 34. Jejich význam je uveden v tab. 6.3

hhmmss.dd	Čas vzorku. hh = hodiny, mm = minuty, ss = sekundy dd = desetinná část sekundy
S	Platnost vzorku A = platný V = neplatný
xxmm.dddd	Zeměpisná šířka xx = stupně mm = minuty dddd = desetinná část minut
<N S>	Označení polokoule N = severní, S = jižní.
yyymm.dddd	Zeměpisná délka yyy = stupně mm = minuty dddd = desetinná část minuty
<E W>	Označení polokoule E = východní, W = západní
s.s	Rychlost v uzlech
h.h	Azimut, (kurz)
ddmmyy	Datu vzorku. dd = den mm = měsíc yy = rok
d.d	Magnetická deklinace
<E W>	Not supported
M	mód A=autonomní, N= neplatná data

Tabulka 6.2: Význam NMEA věty RMC

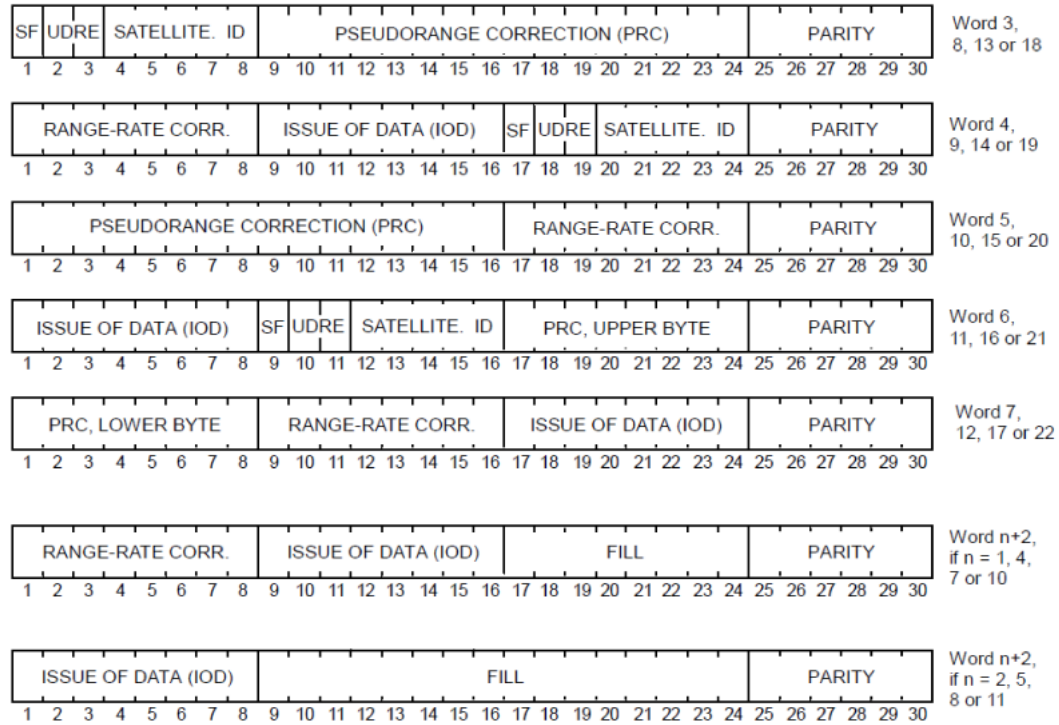
1	Differential GPS Corrections
9	GPS Partial Correction Set
31	Diferencial GLONAS Corrections
34	GLONAS Partial Correction Set

Tabulka 6.3: NVS08 RTMC SC-104, význam vět

Differential GPS Corrections obsahuje korekce pro všechny viditelné satelity. Věta GPS Partial Correction Set obsahuje korekce pouze pro tři satelity, které nejvíce mění svoji polohu. Struktura vět je zobrazena na obr. 6.10.

6.4.3. BINR

Jedná se komunikační protokol implementovaný výrobcem NVS do přijímače NVS08-CSM jako alternativa ke standardnímu protokolu NMEA. Výhodou je menší datový tok, kdy nejsou jednotlivé hodnoty kódovány do ASCII znaků. Nevýhodou je menší přehlednost a omezenější možnosti kontroly dat. NMEA umožňuje snadno kontrolovat přijaté řetězce v terminálu. U BINR protokol je potřeba nejdříve dekodovat jeho význam. Tyto protokoly nejsou standardizovány a obvykle každý výrobce používá svůj vlastní.



Obrázek 6.10: Struktura RTCM věty 1,9,31 a 34 [20]

7. Experiment

Cílem experimentu bylo shromáždění několika sad dat charakterizujících parametry zkoumaných přijímačů. Jako zkoumané parametry byly zvoleny odchylka a tvar shluku měřených hodnot v horizontální rovině. Pro účely měření byly vybrány dva referenční body definované geodetickým měřením (viz příloha H). Bod A je umístěn na střeše objektu Kolejní 4 (Fakulta podnikatelská), a je uzpůsoben pro instalaci přesného přijímače Trimble BX982. Bod B se nalézá poblíž zastávky Kolejní linky 53. Původní záměr nainstalovat na pozici A pouze přesný přijímač ve funkci korekční stanice a na pozici B zkoumané přijímače se ukázal jako nerealizovatelný z důvodu požadavku na dlouhodobé měření (min. 24 h). Principiální schéma měřicí sestavy s bezdrátovým přenosem korekcí je v příloze G. Jako alternativní uspořádání bylo zvoleno umístění zkoumaných přijímačů na nosník v blízkosti referenčního bodu a výpočet nové souřadnice ze známých rozměrů. Závěrečná analýza byla provedena pomocí programu v prostředí Matlab. Výstupem je sada grafů uvedených v příloze A.

Bod	Zem. šířka(ETRS89)	Zem. délka(ETRS89)	Výška [m]
A (střecha)	49° 13' 53.23748"N	16° 34' 21.82488" E	340,079
B (chodník)	49° 13' 50.74764"N	16° 34' 18.62832" E	325,908

Tabulka 7.1: Vhodné referenční body

7.1. Provedení experimentu

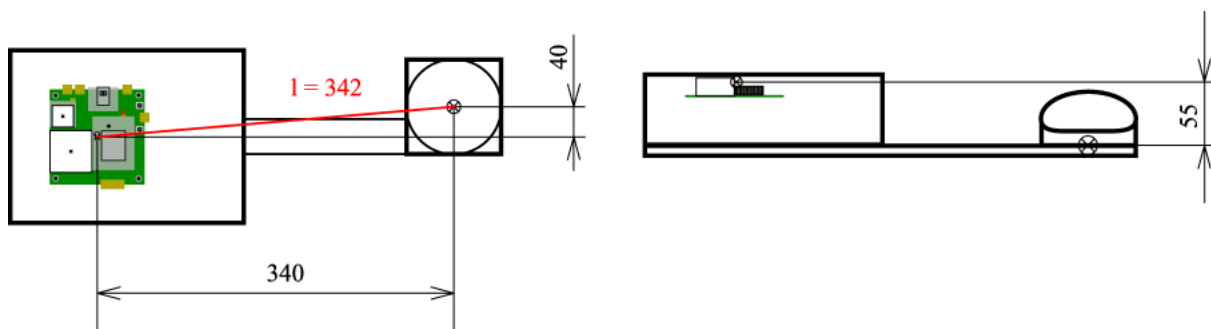
Realizace experimentu byla provedena na střeše budovy Kolejní 4 (Fakulta podnikatelská, bod A). Jednotlivé přijímače byly umístěny podle schématu obr. ???. Výstupní data byla svedena do kontrolní místnosti (30 m od bodu A pomocí UTP kabelu (3 x UART 3,3 V). V kontrolní místnosti byl umístěn záznamový počítač a napájecí zdroj. Komunikace s korekční stanicí byla realizována bezdrátovým wi-fi spojením.

Protože zkoumané přijímače poskytují výstupní polohu v systému WG-S84, byl referenční body převedeny ze systému ETRS-89 do WGS-84 pomocí programu Transdat [47].

Bod	Zem. šířka(WGS84)	Zem. délka(WGS84)	Výška [m]
A (střecha)	49° 13' 53.251386"N	16° 34' 21.848185" E	340,079
B (chodník)	49° 13' 50.61546"N	16° 34' 18.651625" E	325,908

Tabulka 7.2: Referenční body WGS-84 (Transdat [47])

Ze známého posunutí obr. 7.1 a rotace obr. 7.2 nového uměle vytvořeného referenčního bodu vůči původnímu bodu A, byly vypočítány korekce pro závěrečnou analýzu.



Obrázek 7.1: Rozmístění měřicího stanoviště

Ze známého posunu ve směru x a y obr. ?? byla vypočtena vzdálenost l mezi bodem A a novým referenčním bodem.

$$l = \sqrt{340^2 + 40^2} = \underline{\underline{342 \text{ mm}}} \quad (7.1)$$

Dále byla vypočtena oprava azimutu α jako:

$$\alpha = \arctg \frac{40}{340} = \underline{\underline{6,7^\circ}} \quad (7.2)$$

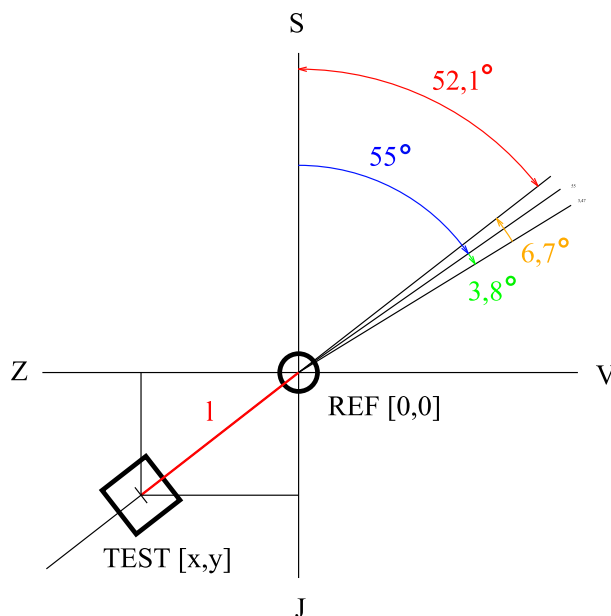
Kompasem byl zaměřen azimut k delší straně nosníku (55°) tento úhel byl poté korigován deklinací ($3,8^\circ$) a opravou azimutu α plynoucí z geometrie stanoviště. Tuto situaci ilustruje náčrt obr. 7.2.

Výpočet opravy natočení nosníku ϕ :

$$\varphi = \text{azimut} + \text{deklinace} - \alpha = 55 + 3,8 - 6,7 = \underline{\underline{52,1^\circ}} \quad (7.3)$$

Ze znalosti natočení byly vypočteny korekce posunutí pro pravpůhlou souřadnou soustavu d_x a d_y :

$$d_x = 0,342 \cdot \cos(-52,1 - 90) = -0,270 \text{ m} \quad d_y = 0,342 \cdot \sin(-52,1 - 90) = -0,211 \text{ m} \quad (7.4)$$



Obrázek 7.2: Orientace měřicího stanoviště

	GPS				GLONASS				GPS+GLONASS			
	SB	RT	SB+RT	-	SB	RT	SB+RT	-	SB	RT	SB+RT	-
UP500	1,5,6			2,3,4								
UC530M				5				4	1	2		3
NVS08								4,6	2	1	3	5

Tabulka 7.3: Plán měření

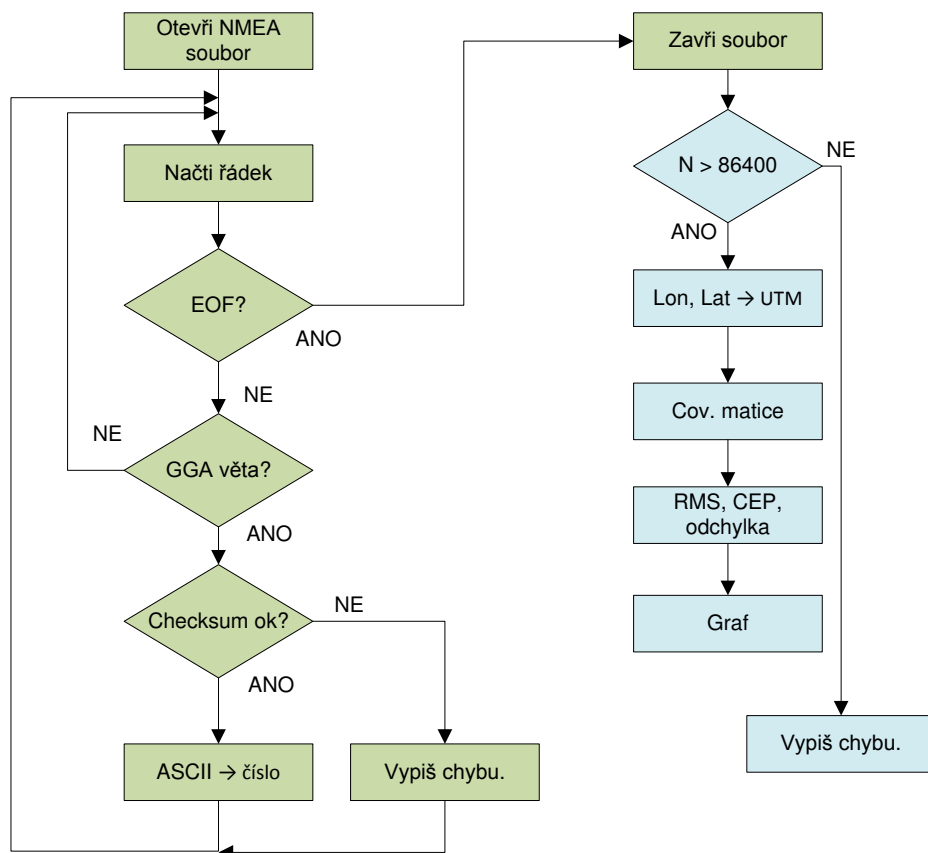
7.2. Vyhodnocení experimentu

Cílová sada nastavení byla koncipována tak, aby byly pokryty všechny módy příjmu signálů GPS, GLONAS a korekčních vstupů SBAS, RTCM (vlastní korekční stanice). Plán měření s vyznačenými uskutečněnými měřeními (zelené buňky) je znázorněn v 7.3

Každé uskutečněné měření probíhalo 24 h. Výstupem byl textový soubor se záznamem NMEA vět. Tento soubor sloužil jako vstup pro program ANALYZER.m (viz příloha K). Strukturu programu popisuje blokové schéma

Tento program program vyhledává v textovém souboru NMEA věty GGA, které obsahují souřadnice polohy v systému WGS-84. U každé věty je ověřen kontrolní součet. Poté je převeden odpovídající textový řetězec do proměnné typu double a ta je uložena do výstupní struktury GGA. Dále jsou souřadnice převedeny pomocí funkce `wgs2utm()` [49] do souřadného systému UTM, tím přejdou zeměpisné souřadnice do pravoúhlých. Převedené souřadnice jsou uloženy do struktury UTM. Pro takto získaných 86400 (24 h, 1 Hz) bodů je vypočtena kovarianční matice pomocí funkce `cov()`. Dále je funkcí `crr()` [51] spočten poloměr konfidenční kružnice pro výrobce podle výrobcem udané hladiny významnosti. Z těchto charakteristik je poté zkonstruován výstupní graf 7.4. Výstupy ostatních realizovaných měření obsahuje příloha A.

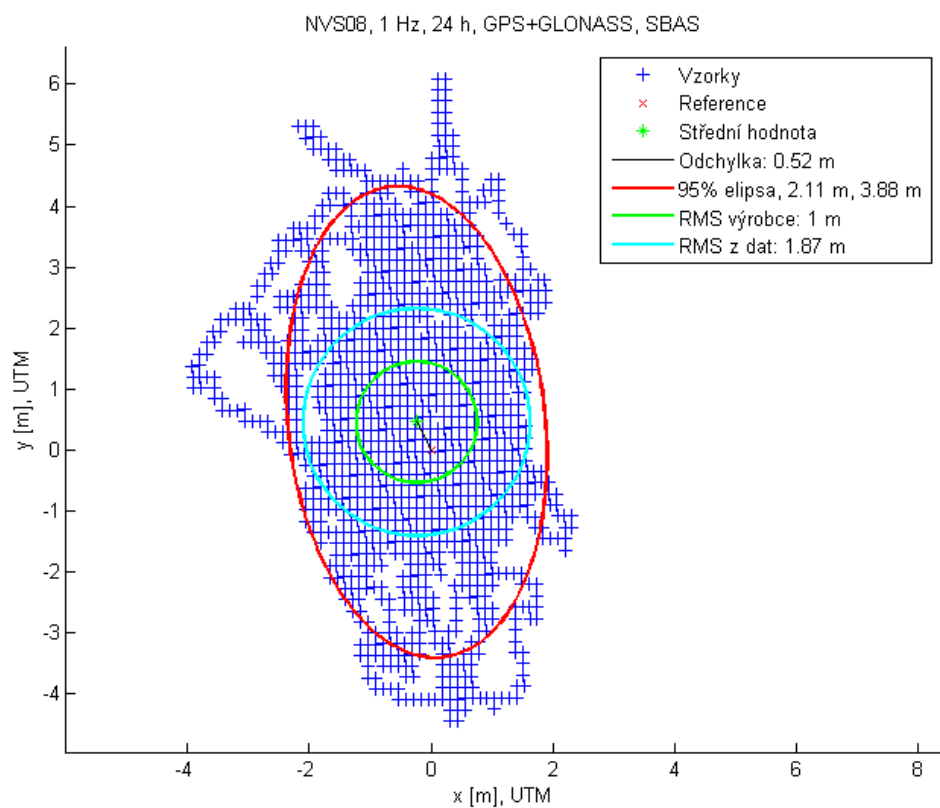
Sky view analýza Pro hodnocení kvality příjmu jednotlivých přijímačů byla použita analýza nástrojem Sky view. Jedná se o nástroj firmy u-Blox implementovaný v programu u-Center [59]. Jedná se o graf, který zobrazuje průměrnou relativní sílu signálu přijímanou



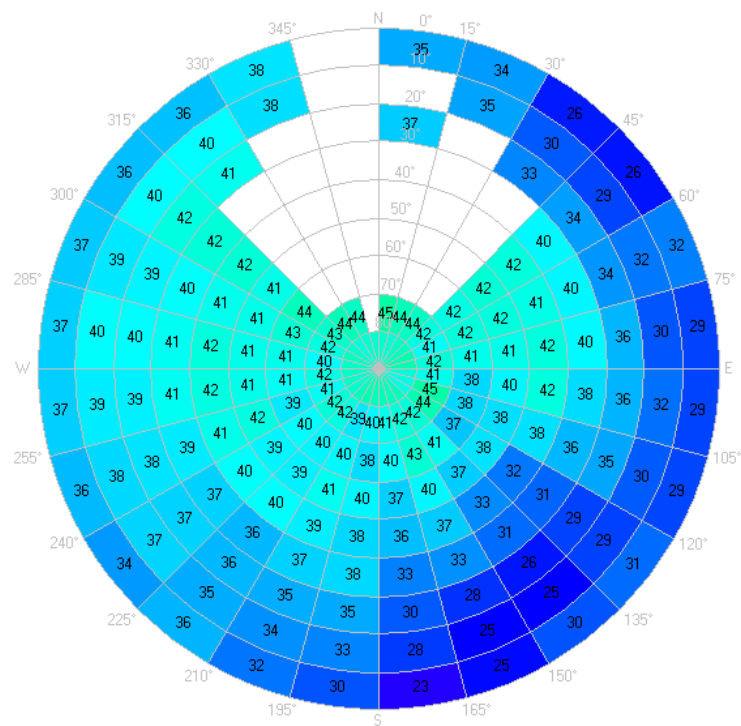
Obrázek 7.3: Blokové schéma programu ANALYZER.m

ze satelitů pro danou část oblohy (průměrná hodnota odstupů signál/šum). Z dlouhodobého měření lze získat charakteristiku přijímače, zahrnující stínění signálu, kvalitu antény, kvalitu umístění antény vůči okolním periferiím atd. Charakteristika byla vytvořena pro identický časový úsek 24 h pro jednotlivé přijímače a podle očekávání bylo zjištěno, že přijímač NVS08 spolu s anténou Taoglass AGGP.35F dosahuje nejlepších poměrů C/N. Ukázka výstupního grafu je na 7.5. Kompletní sada grafů je umístěna v příloze B.

7.2. VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU



Obrázek 7.4: Ukázka výstupního grafu



Obrázek 7.5: Sky view graf, 24 h, 1 Hz, NVS08

8. Závěr

Tato práce řeší problematiku měření přesnosti kombinovaných GPS/GLONASS přijímačů. Globální satelitní navigační systémy jsou vysoce komplexní zařízení. Díky své složitosti obsahují různorodé zdroje chyb. Rozborem těchto chyb bylo dosaženo závěru, že většina z nich lze eliminovat použitím DGPS. Nelze ovšem zvýšit přesnost GNSS přijímače limitovanou šířkou pulzu modulovaného signálu. Toho lze dosáhnout měřením fáze nosné vlny, ale tato funkce není podporována zvolenými přijímači.

Důsledkem kombinace systému GPS a GLONASS je zvýšení množství viditelných satelitů, což vede k optimální viditelnosti družic i za zhoršených podmínek. Zejména za špatné viditelnosti při zastínění části oblohy a zúžení viditelné oblasti zvyšuje kombinovaný přijímač šanci na příjem dostatečného množství satelitů pro přesné určení pozice.

Přesnost GNSS přijímačů je výrobcem udávána v podobě poloměru kružnice do které při opakovaném měření pravděpodobně spadne daná část měřených vzorků (CEP, RMS). Toto je pro mnohé aplikace dostatečný parametr, ale pro bližší popis rozptylu přesnosti GNSS přijímače je nedostatečný, protože eliminuje odchylku a z toho vyplývající pravdivost. Dále shluk naměřených dat neodpovídá vždy kružnici. V kapitole Analýza dat byla navržena metodika měření, která zohledňuje odchylku pomocí měření na referenčním bodu a dále prokládá měřený shluk elipsou, která mnohem lépe popisuje zdeformovaný shluk dat.

Základním problémem měření je určení velikosti výběrového vzorku. Tento parametr byl určen empiricky, ze zkušenosti výrobců kteří provádějí obvykle měření v rozsahu 24 h až 3 dny. Vzhledem k časovým možnostem bylo zvoleno měření po dobu 24 h na vzorkovací frekvenci 1 Hz (dáno max. rychlostí čtení korekcí RTCM u UC530M).

Pro měření byl jako hlavní testovaný přijímač vybrán NVS08-CSM, který podporuje příjem GPS+GLONAS a taky příjem externích korekcí RTCM. Po konzultaci s výrobcem byla zvolena optimální anténa zohledňující použití na quadcopteru a požadavky na co nejvyšší přesnost Taoglas AGGP.35F. Dále byl použit přijímač UP500 schopný přijímat pouze GPS. Jeho účelem je poskytnutí dat pro srovnání. Před dokončením návrhu DPS byl uveden na trh GPS/GLONASS přijímač UC530, který je výrobcem popisován jako nejmenší kombinovaný přijímač na světě. Vzhledem k zajímavé miniaturní konstrukci byl také zařazen do testovací sestavy. Pro účely venkovních měření a testování na těle quadcopteru byl vytvořen modulární systém testovací desky a sady vývojových modulů.

Samotný experiment byl realizován na střeše budovy Kolejní 4, kde byl použit referenční bod zaměřený geodety s přesností v mm. K tomuto bodu byl připevněn nosník na němž byl vytvořen další referenční bod pro testované přijímače. Na původní referenční bod byla umístěna anténa korekční stanice. Zdroj a notebook pro záznam dat byl umístěn v kryté místnosti pod střechou.

Z celkem 24 různých módů měření zahrnujících všechny možné kombinace systémů (GPS, GLONASS) a korekcí (SBAS, RTCM) bylo z časových důvodů realizováno 12 typů měření. Získaná data byla zpracována programem ANALYZER.m vytvořeným pro účely tohoto experimentu. Výstupem je sada grafů popisujících rozložení přesnosti jednotlivých přijímačů v různých módech (Příloha A).

dosažené výsledky ukazují, že se nepodařilo dosáhnout výrobcem udávanou přesnosti v ani jednom z provedených měření. U přijímače NVS08 bylo dosaženo nejlepšího výsledku v konfiguraci GPS+GLONASS+SBAS, kde bylo dosaženo 1,87 m(RMS) oproti výrobcem udávané hodnotě 1 m(RMS). U přijímače UC530 bylo dosaženo nejlepšího výsledku ve

stejném módu a to 9,55 m(RMS)oproti 3 m (RMS). U přijímače GPS bylo dosaženo nejlepší hodnoty 4,78 m(R95%) oproti udávané hodnotě 3 m(R95%).

Závěrem lze tedy říct, že díky dosaženým výsledkům nejsou testované přijímače vhodné pro účely navigace quadrocopteru, ale je třeba zdůraznit, že během měření bylo velmi nestálé počasí s častými bouřkami. Z těchto důvodů by bylo vhodné provést opakované měření. Pro tyto účely bych doporučoval vytvoření permanentního automatického měřicího stanoviště se vzdáleným přístupem.

Další provedenou analýzou je směrový test příjmu pomocí nástroje Sky view. Z těchto grafů(příloha B) vyplývá, že nejlepšího odstupu signál-šum dosahuje dle očekávání přijímač NVS08. Dále je zajímavá díra v severní oblasti grafu způsobená pravděpodobně rozložením oběžných drah.

Literatura

- [1] Hrdina, Z.; Pánek, P.; Vejražka, F.: Rádiové určování polohy (Družicový systém GPS). [Skriptum.] Praha, ČVUT 1995, 267 s.
- [2] Rapant P.: Družicové polohové systémy. [Skriptum.] Ostrava, VŠB-TU, 2002, 200 s., ISBN 80-248-0124-8
- [3] Groves, P.D.: Principles of GNSS, inertial, and multi-sensor integrated navigation systems. Artech House, 2008, 518 s. ISBN 9781580532556
- [4] Plzák Z.: Mezinárodní slovník metrologických pojmů a chemická a bioanalytická měření [on-line]. Dostupný z WWW http://web2.stapro.cz/fons/archiv/2010/after/prednasky/4_1.pdf
- [5] Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti [on-line]. Dostupný z WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Normal_distribution
- [6] NOAA: Algorithms for confidence circles and Ellipses [on-line]. Dostupný z WWW: http://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/AlgorithmsForConfidenceCirclesAndEllipses_TR_NOS107_CGS3.pdf
- [7] Frank van Diggelen: GNSS Accuracy, Lies, Damn Lies, and Statistics [on-line]. Dostupný z WWW: <http://www.frankvandiggelen.com/wp-content/uploads/2009/03/2007-gps-world-accuracy-article-0107-van-diggelen-1.pdf> GPS world, 2007
- [8] doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.: GNSS [Přednáška k MRBT]. Brno, VUT 2011 73 s.
- [9] Čábelka M.: Úvod do GPS [on-line]. Dostupný z WWW http://www.natur.cuni.cz/geografie/geoinformatika-kartografie/ke-stazeni/vyuka/gps/skriptum-uvod-do-gps?student_welcome=1
- [10] Kaplan D. K., Hegarty Ch. J.: Understanding GPS, Principles and Application. Artech House, 2005, 723 s. ISBN 1580538940
- [11] Computation of DOP Values [on-line]. Dostupný z WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Dilution_of_precision_%28GPS%29
- [12] Czech Space Office, Ruský globální družicový navigační systém GLONASS [on-line]. Dostupný z WWW: <http://www.czechspace.cz/cs/galileo/aktuality-GPS-Glonass/GLONASS>
- [13] Otyepka M., Banáš P. Otyepková E.: Základy zpracování dat [on-line]. Dostupný z WWW: <http://fch.upol.cz/skripta/zzd/chemo/chemo.pdf> 2007
- [14] Engineering statistics handbook: Mean Vector and Covariance Matrix [on-line]. Dostupný z WWW: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pmc/section5/pmc541.htm> 2013
- [15] Error Ellipses [on-line]. Dostupný z WWW: http://www.earth-time.org/projects/upb/public_docs/ErrorEllipses.pdf 2013

- [16] Hebák P., Kohounová J.: Počet pravděpodobnosti v příkladech. Informatorium, 1994, 312 s. ISBN 80-85427-48-6
- [17] Meloun M., Militký K.: Statistická analýza experimentálních dat. Academia, 2004, 953 s. ISBN 80-200-1254-0
- [18] Error Ellipse function [on-line]. Dostupný z WWW: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4705> 2013
- [19] Datasheet Taoglas AGGP.35F [on-line]. Dostupný z WWW: http://www.taoglas.com/images/product_images/original_images/AGGP.35F.07.0060A.pdf 2013
- [20] BETKE K.: Transmission Characteristics of Marine Differential GPS (DGPS) Stations. Dostupný z WWW: <https://gpsd.googlecode.com/files/rtdcm-sc104-transmission-characteristics-of-marine-differential-gps-stations.pdf> 2001.
- [21] Powers S. T., Parkinson B.: The Origins of GPS. GPS World, 2010, 44 s. [on-line]. Dostupný z WWW: http://www.u-blox.com/images/stories/the_origins_of_gps.pdf
- [22] Zogg J-M.: GPS Compendium. u-Blox, 2007, 174 s. [on-line]. Dostupný z WWW: http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/GPS_Compendium%28GPS-X-02007%29.pdf
- [23] GLONASS history. Federal Space Agency, Informational-analytical centre [on-line]. Dostupný z WWW: <http://glonass-iac.ru/en/guide/index.php>
- [24] TRANSIT history. Princeton university [on-line]. Dostupný z WWW: [http://www.princeton.edu/~achaney/tmve/wiki100k/docs/Transit_\(satellite\).html](http://www.princeton.edu/~achaney/tmve/wiki100k/docs/Transit_(satellite).html)
- [25] Why Europe needs Galileo [on-line]. Dostupný z WWW: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/Why_Europe_needs_Galileo
- [26] Galileo (Satellite Navigation) [on-line]. Dostupný z WWW: [http://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_\(satellite_navigation\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_(satellite_navigation))
- [27] GPS, Wikipedia [on-line]. Dostupný z WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System/
- [28] GPS official web [on-line]. Dostupný z WWW: <http://www.gps.gov/>
- [29] Glonass summary [on-line]. Dostupný z WWW: http://www.spaceandtech.com/spacedata/constellations/glonass_consum.shtml
- [30] GLONASS history, National navigation services provider [on-line]. Dostupný z WWW: http://www.nis-glonass.ru/en/glonass/development_history/
- [31] GNSS Galileo [on-line]. Dostupný z WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Navigační_systém_Galileo
- [32] GNSS GLONASS [on-line]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/GLONASS>

- [33] RTKLIB [on-line]. Dostupný z WWW: <http://www.rtklib.com/>
- [34] Jin, D., Lin S.: Advances in Electronic Engineering, Communication and Management Vol.2. Springer, 2012, 722 s. ISBN 9783642272967
- [35] The International Terrestrial Reference System (ITRS) [on-line]. Dostupný z WWW: <http://www.iers.org/IERS/EN/Science/ITRS/ITRS.html>
- [36] European Terrestrial Reference System 89 (ETRS) [on-line]. Dostupný z WWW: <http://etrs89.ensg.ign.fr/>
- [37] Hooijberg M.: Geometrical geodesy. Springer, 2007, 439 s. ISBN 9783540682257
- [38] World Geodetic System 1984 definition [on-line]. Dostupný z WWW: <http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tr8350.2/wgs84fin.pdf>
- [39] History of the Prime Meridian - Past and Present [on-line]. Dostupný z WWW: <http://gpsinformation.net/main/greenwich.htm>
- [40] Datum Transformation Description[on-line]. Dostupný z WWW: http://www.satsleuth.com/GPS_ECEF_Datum_transformation.htm
- [41] Souřadnicové systémy stabilního katastru[on-line]. Dostupný z WWW: <http://gis.zcu.cz/studium/gen1/html/ch02s03.html>
- [42] Fiala F.:Matematická kartografie.Vydavatelství Československá akademie věd, 1958, 288 s. HSV 105010/54/5104
- [43] Gauss-Krüger coordinate system [on-line]. Dostupný z WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Gauss%E2%80%93Kr%C3%BCger_coordinate_system
- [44] Gauss-Krügerovo zobrazení [on-line]. Dostupný z WWW: <http://oldgeogr.muni.cz/ucebnice/kartografie/obsah.php?show=86>
- [45] Universal Transverse Mercator coordinate system [on-line]. Dostupný z WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Universal_Transverse_Mercator_coordinate_system
- [46] Continental drift [on-line]. Dostupný z WWW: http://www.killetsoft.de/t_1009_e.htm
- [47] TRANSDAT program [on-line]. Dostupný z WWW: http://www.killetsoft.de/p_trda_e.htm
- [48] Snyder P. J.:Map projections—a working manual. U.S. G.P.O. (University of Michigan), 1987, 383 s.[on-line]. Dostupný z WWW: <http://pubs.usgs.gov/pp/1395/report.pdf>
- [49] wgs2utm() [on-line]. Dostupný z WWW: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/14804-wgs2utm-version-2>

- [50] Terminologie v oblasti metrologie [on-line]. Dostupný z WWW: http://www.unmz.cz/files/Sborn%C3%ADky%20TH/Terminologie%20v%20oblasti%20metrologie_DEF.pdf
- [51] crr(), Confidence Region Radius [on-line]. Dostupný z WWW: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10526-confidence-region-radius>
- [52] JURAJDA, D. Quadcopter – navigační modul. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 54s. Vedoucí bakalářské práce byl doc. Ing. Luděk Ťalud, Ph.D.[on-line]. Dostupný z WWW: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39040
- [53] IPEX MHFII [on-line]. Dostupný z WWW: http://www.taoglas.com/images/product_images/original_images/RECE.20279.001E-%20IPEX%20MHFI%20%28U.FL%29%20Receptacle.pdf
- [54] AppCAD RF and Microwave[on-line]. Dostupný z WWW: <http://www.hp.woodshot.com/>
- [55] UC530M dokumentace [on-line]. Dostupný z WWW: http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/UC530M_DataSheet_%28FTX-HW-12007%29.pdf2013
- [56] UP500 dokumentace [on-line]. Dostupný z WWW: <http://www.farnell.com/datasheets/1625181.pdf>
- [57] Datasheet NVS08-CSM [on-line]. Dostupný z WWW: <http://www.nvs-gnss.com/products/receivers/item/download/40.html> 2013
- [58] Datasheet NVS08-CSM [on-line]. Dostupný z WWW: <http://www.trimble.com/gnss-inertial/bx982.aspx?dtID=specs> 2013
- [59] u-Center program, u-Blox[on-line]. Dostupný z WWW:<http://www.u-blox.com/en/evaluation-tools-a-software/u-center/u-center.html>

9. Seznam použitých zkratek a symbolů

CEP	Circular Error Probable
CR	Carriage Return
DGPS	Differential Global Position System
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
GBAS	Ground Based Augmentation Systems
GGA	Global Positioning System Fix Data
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Position System
GSA	DOP and aktivní satelity NMEA věta
GLONASS	Globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistěma
GALILEO	Evropský navigační satelitní systém
GNSS	Global Navigation Satellite System
I2C	Inter-Integrated Circuit
NAVSTAR	Navigation Timing and Ranging Global Position System
I2C	Inter-Integrated Circuit
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
NAVSTAR	Navigation Timing and Ranging Global Position System
NMEA	National Marine Electronics Association
OEM	Original Equipment Manufacturer
RAIM	Receiver autonomous integrity monitoring
RMS	Root Mean Square
RMC	Recommended Minimum Specific GNSS Data
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real Time Kinematic
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SPI	Serial Peripheral Interface

TWI	Two Wires Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver / Transmitter
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
USB	Universal Serial Bus
WGS84	World Geodetic System 1984

Seznam příloh

Příloha A: Grafy - výstup měření.

Příloha B: Skyview grafy.

Příloha C: Výrobní podklady testovací desky.

Příloha D: Výrobní podklady vývojové desky NVS08.

Příloha E: Výrobní podklady vývojové desky UC530M.

Příloha F: NMEA Věty pro nastavení přijímačů.

Příloha G: Schéma aparatury.

Příloha H: Přehledka referenčních bodů.

Příloha I: Foto dokumentace.

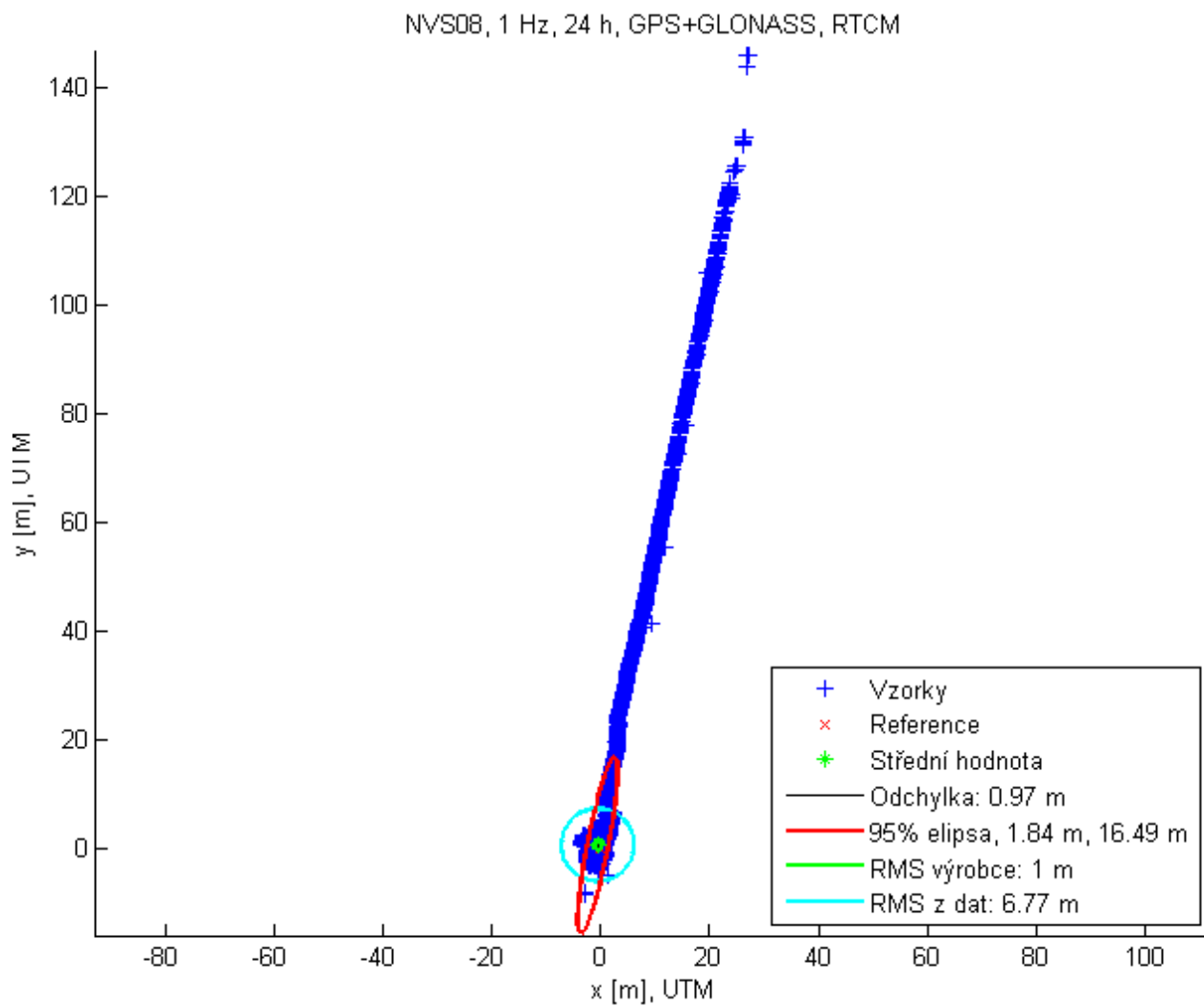
Příloha J: Screenshoty speciálního softwaru.

Příloha K: DVD.

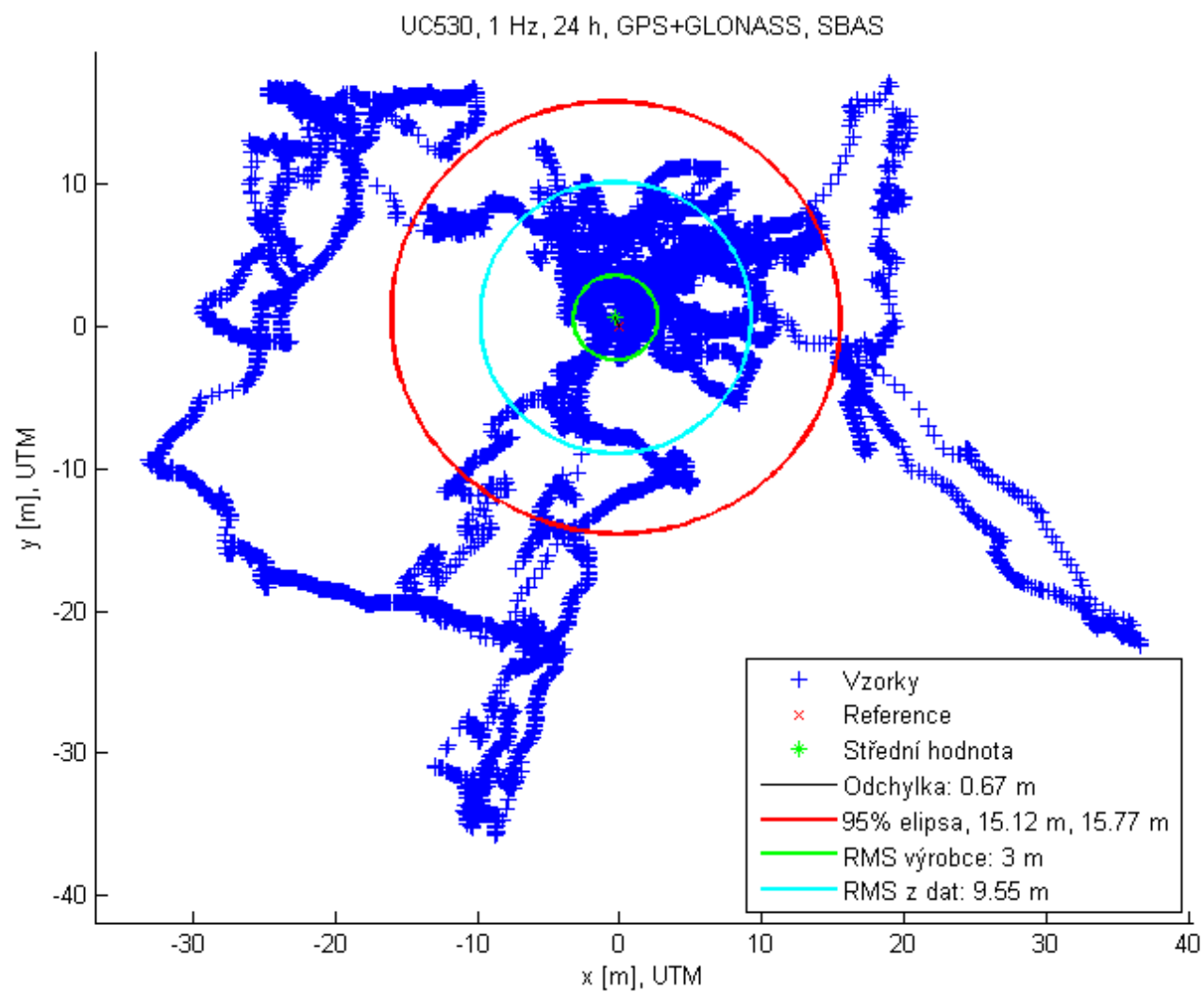
Obsah DVD

- Hlavní soubor
- Naměřená data
- DPS podklady Eagle
- Matlab ANALYZER
- Geodetické zaměření objektu - dokumentace

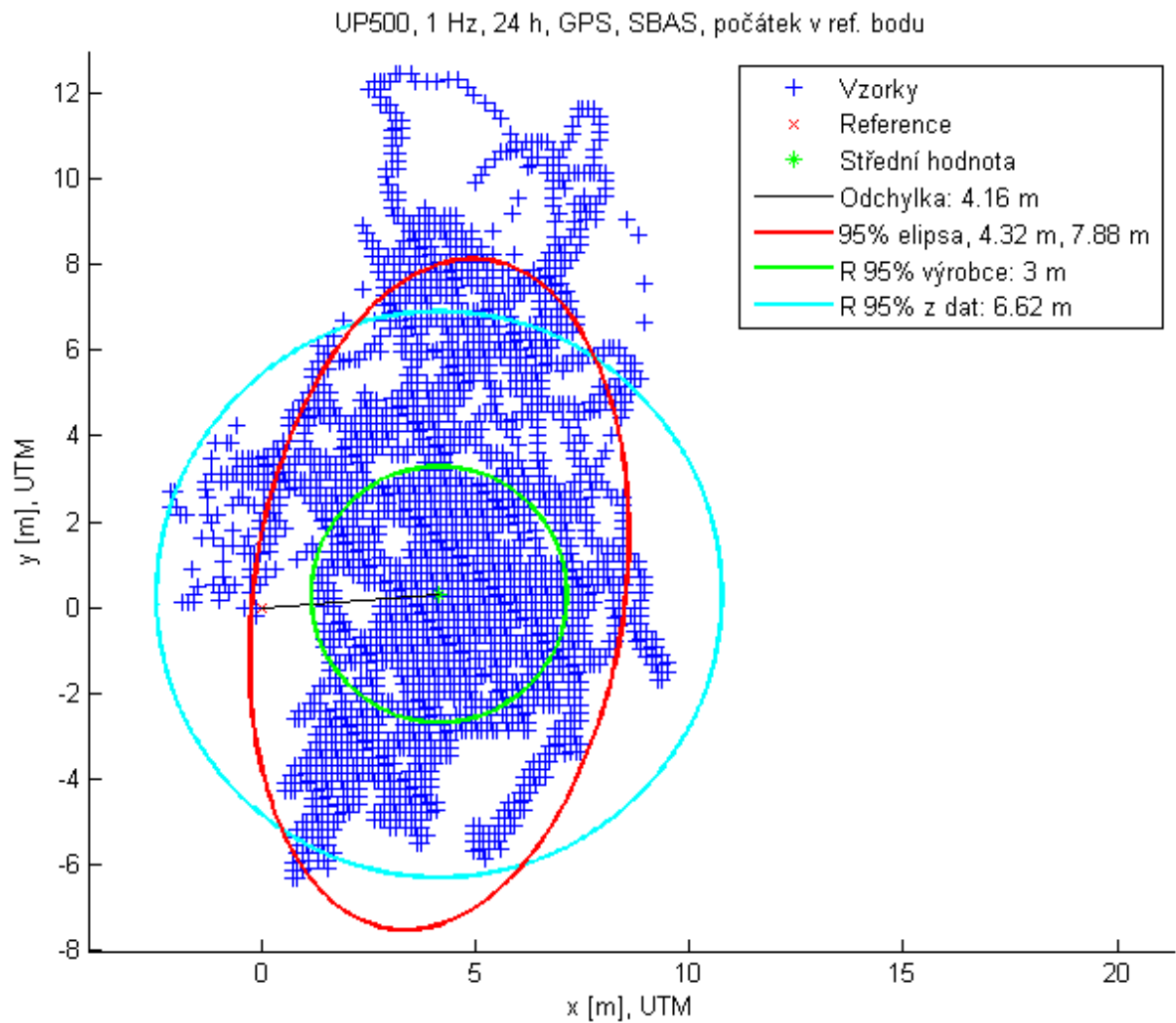
Příloha A: Měření č.1 (1/3)



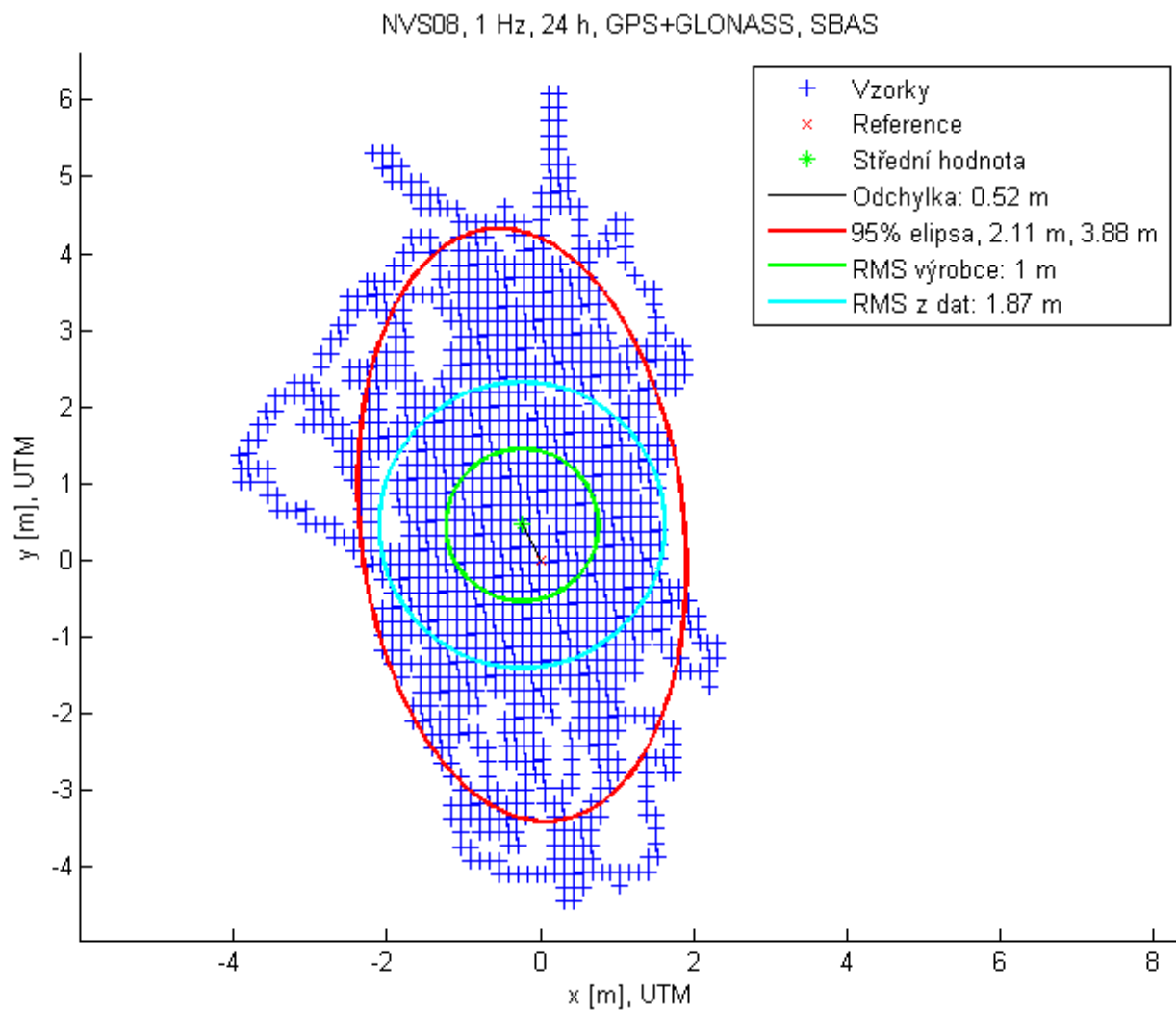
Příloha A: Měření č.1 (2/3)



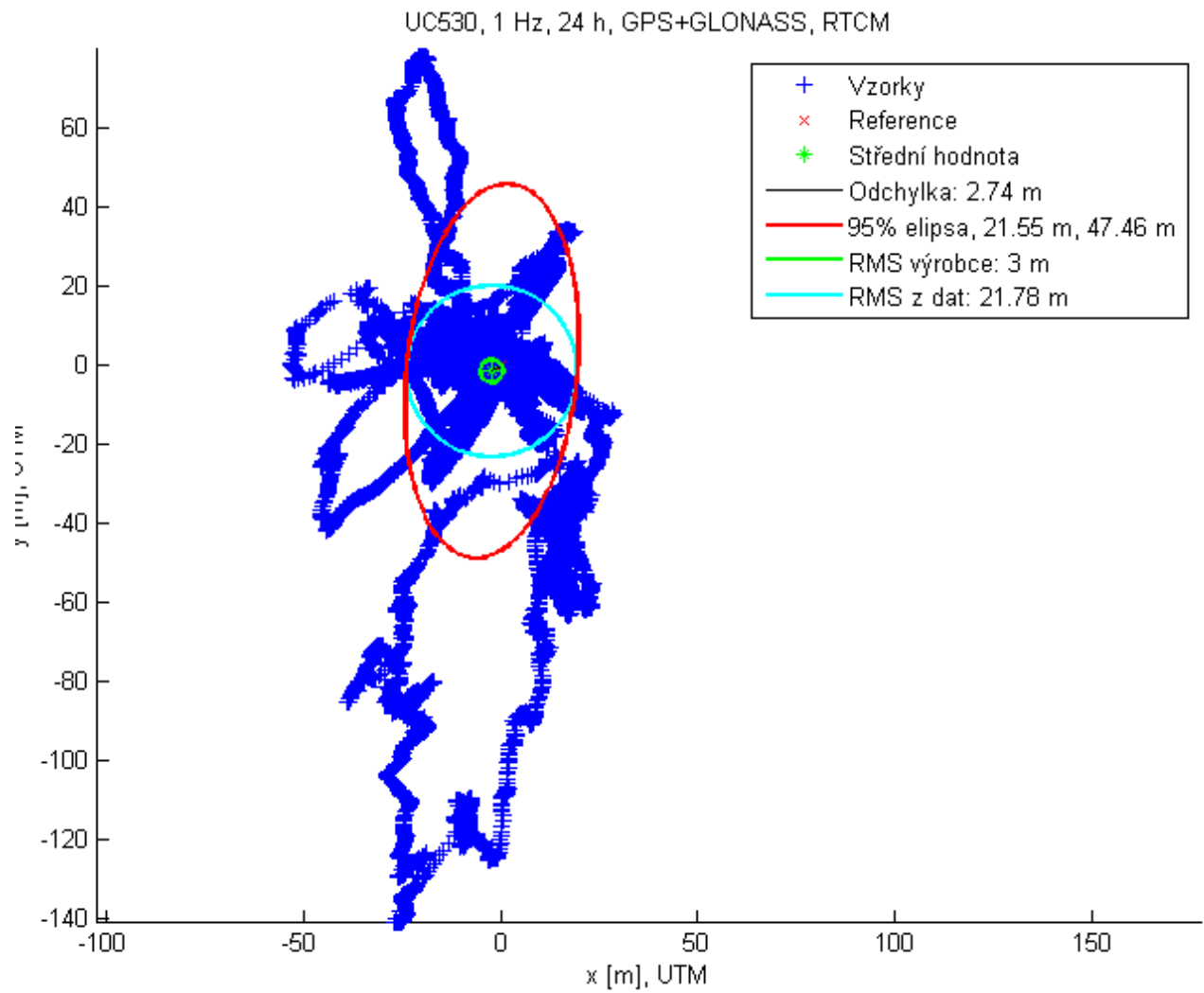
Příloha A: Měření č.1 (3/3)



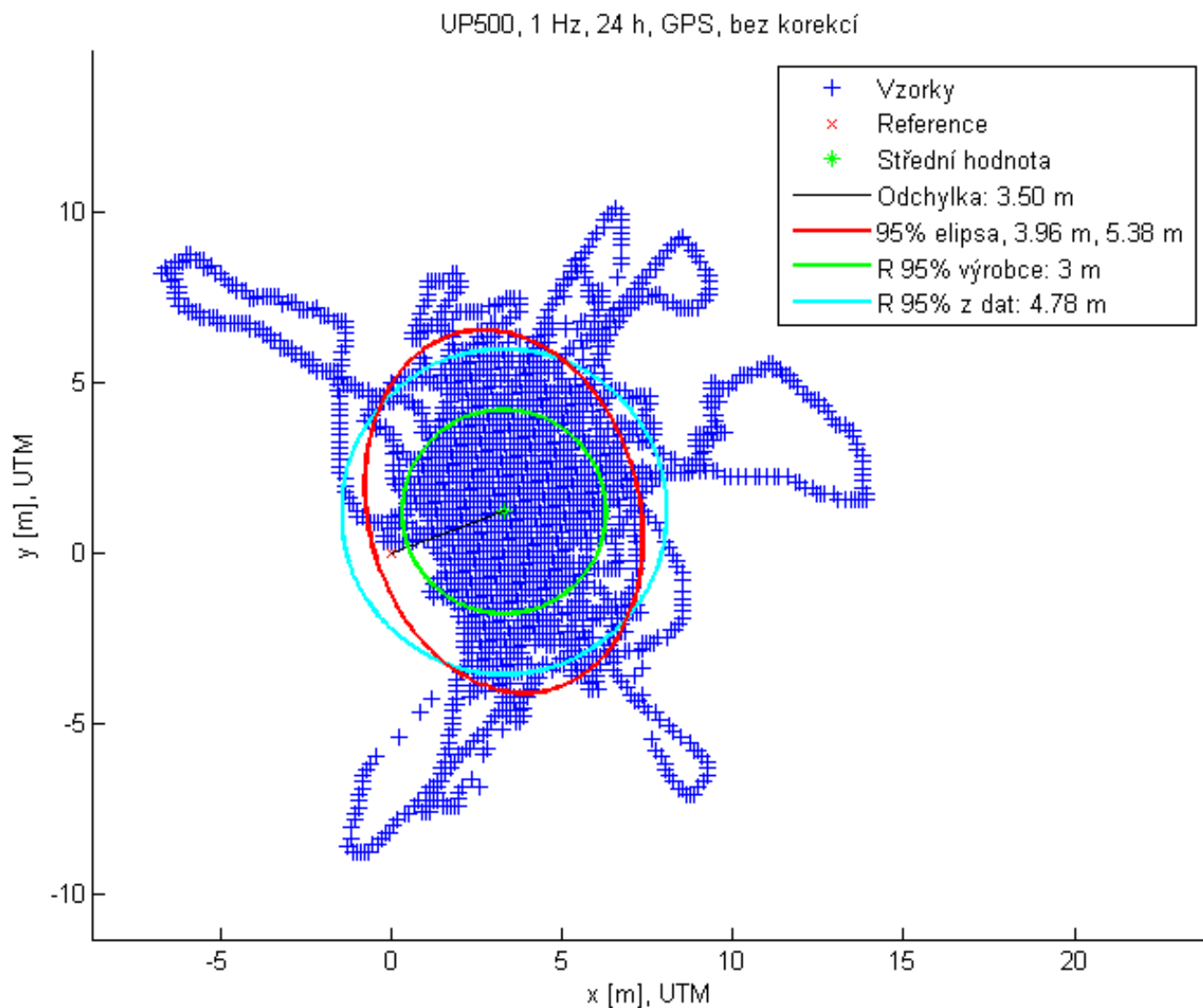
Příloha A: Měření č.2 (1/3)



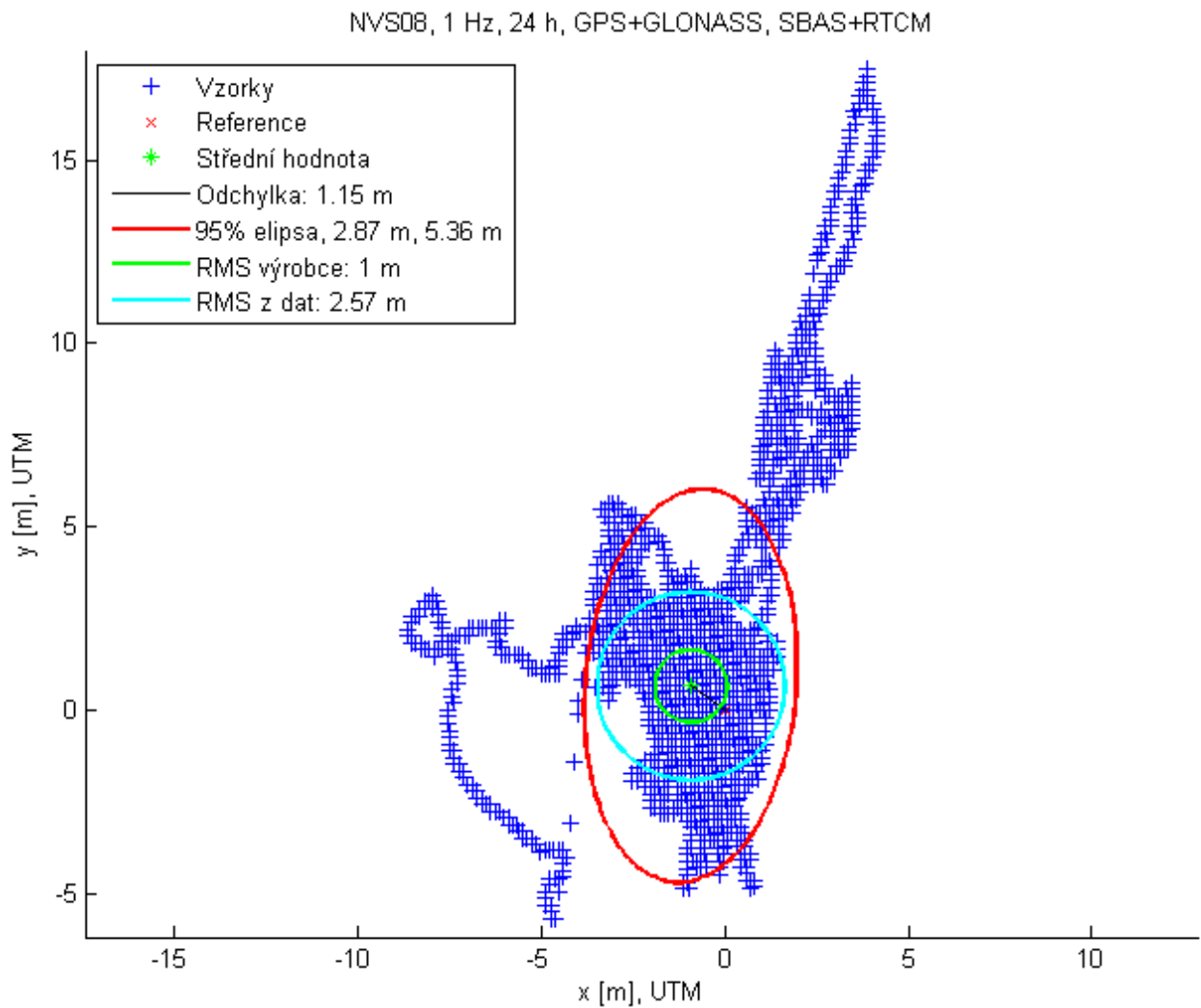
Příloha A: Měření č.2 (2/3)



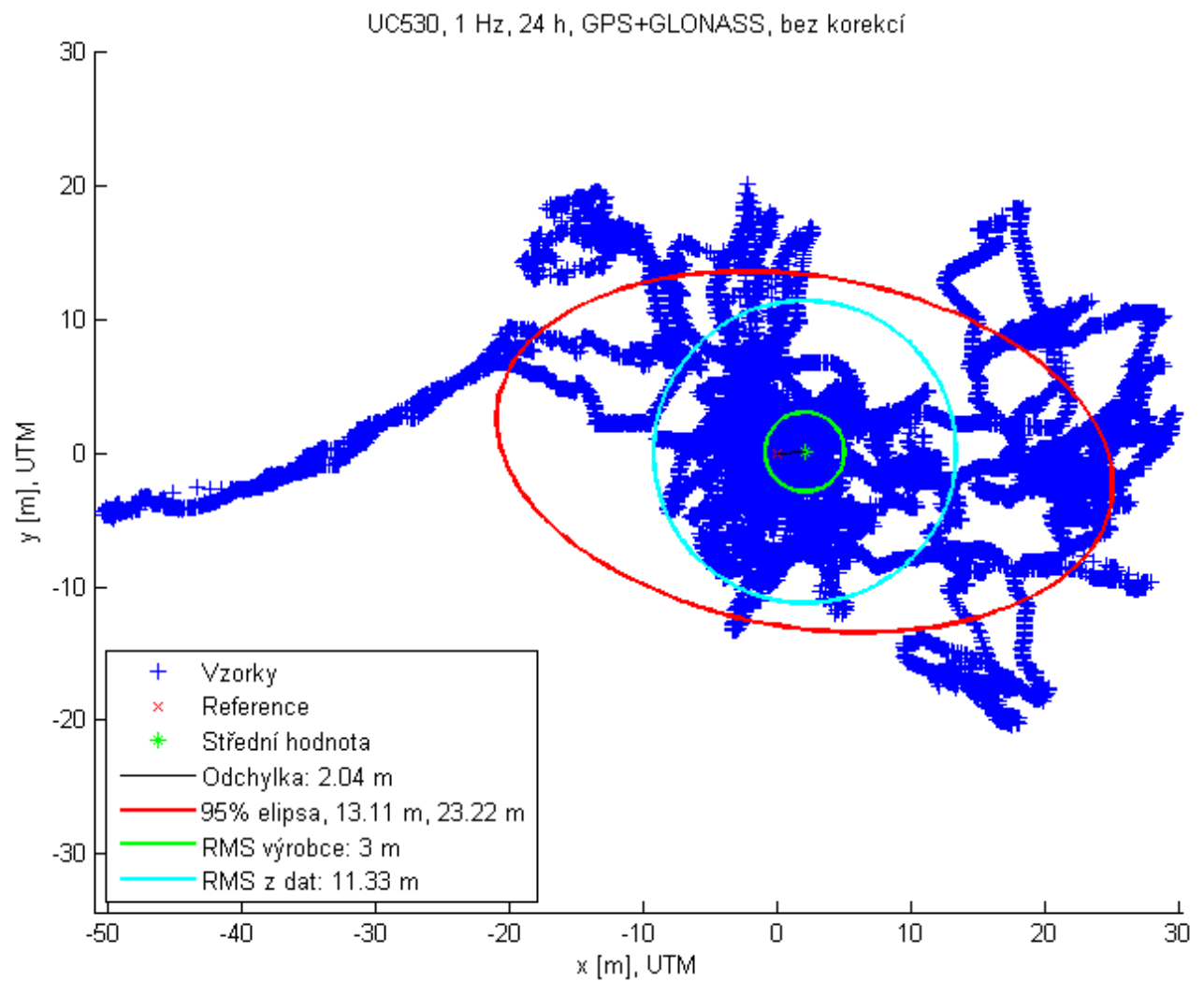
Příloha A: Měření č.2 (3/3)



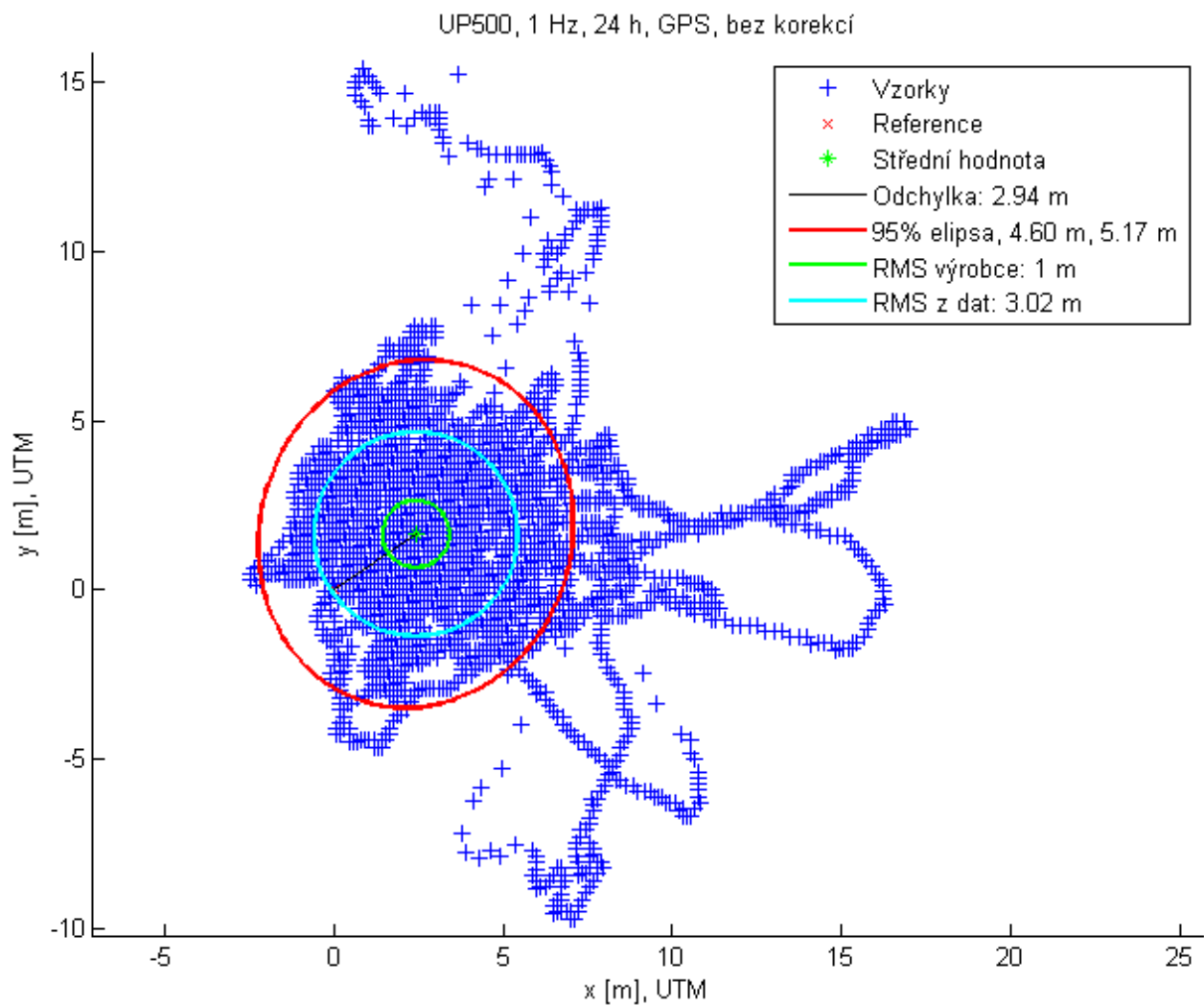
Příloha A: Měření č.3 (1/3)



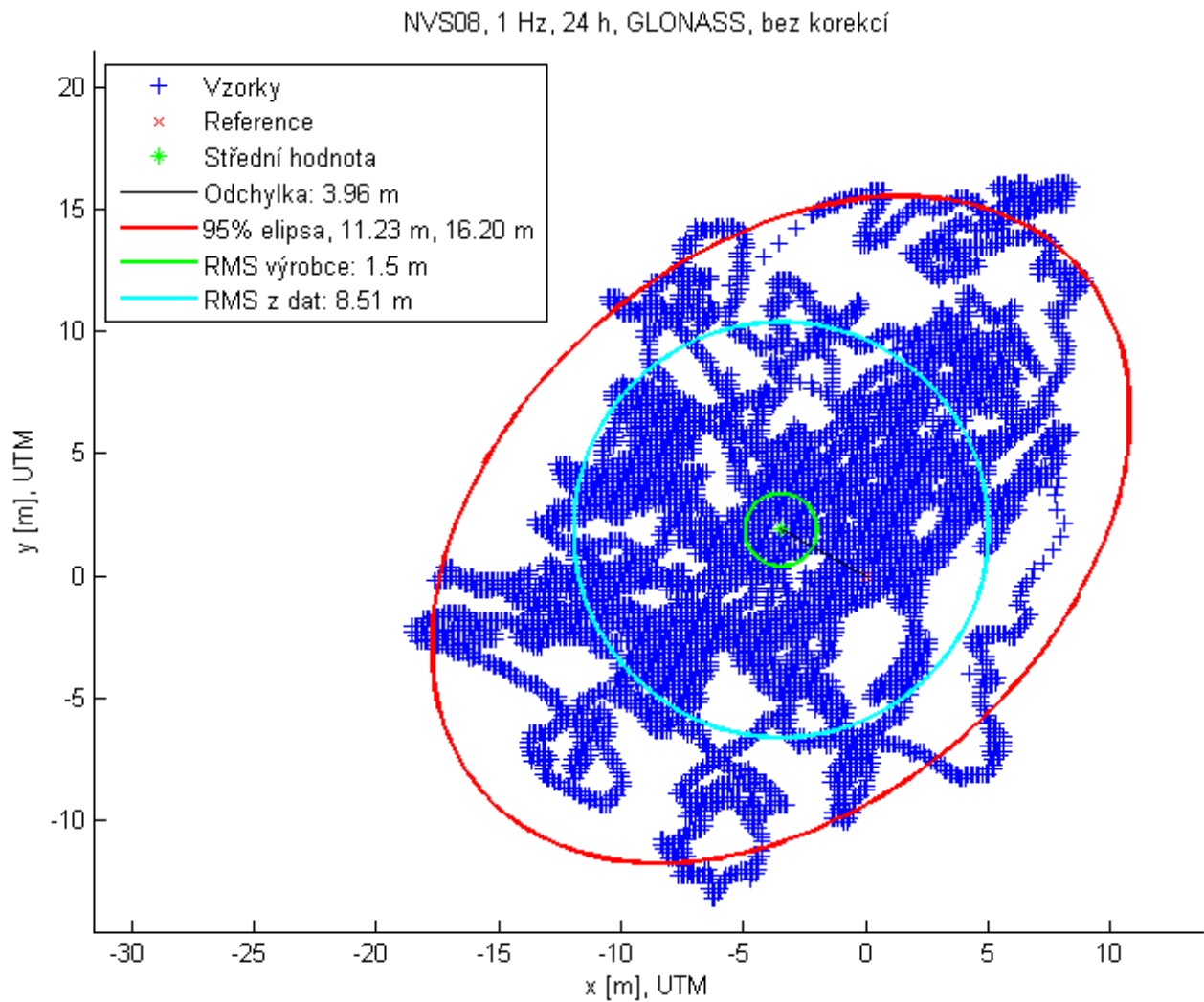
Příloha A: Měření č.3 (2/3)



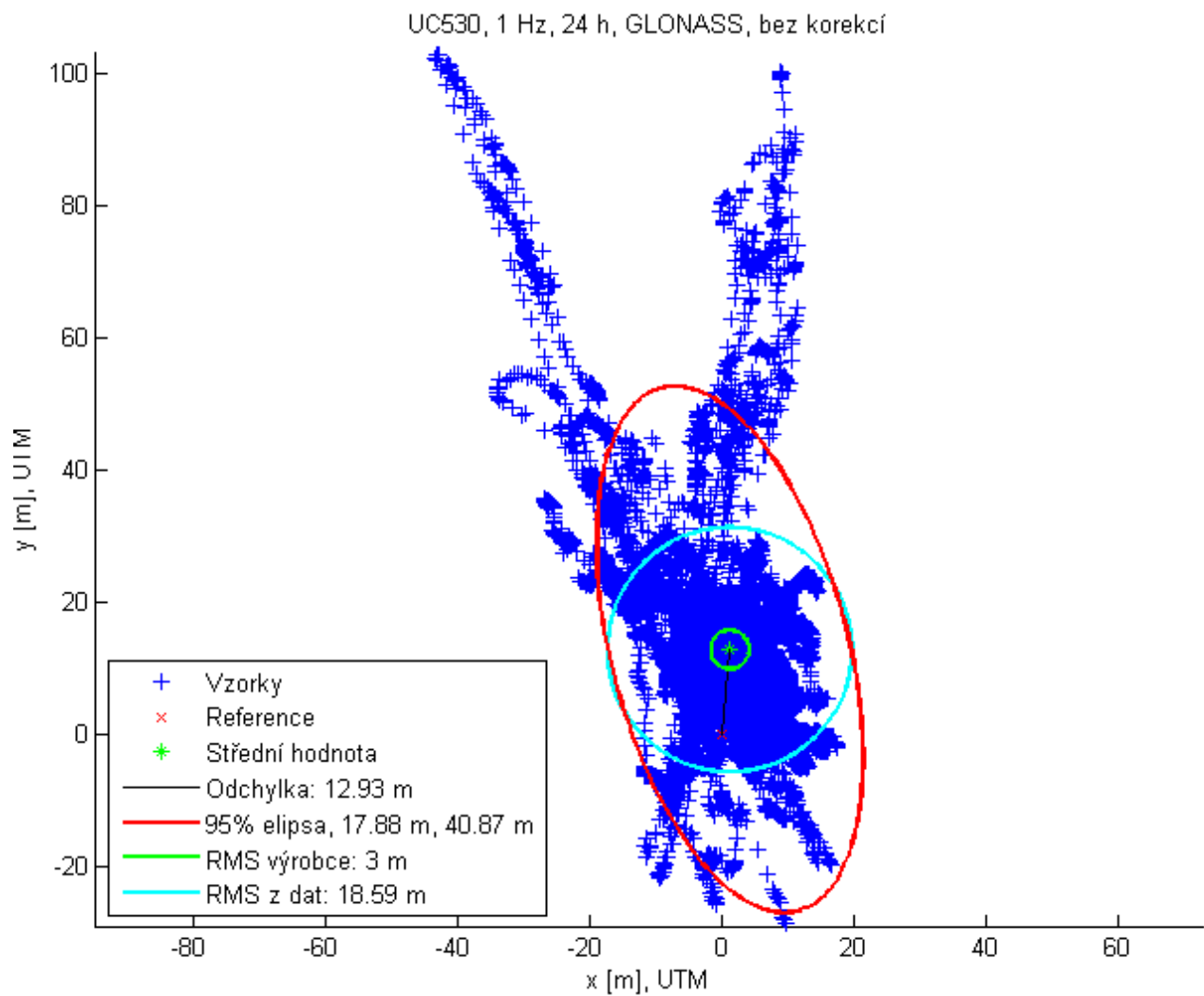
Příloha A: Měření č.3 (3/3)



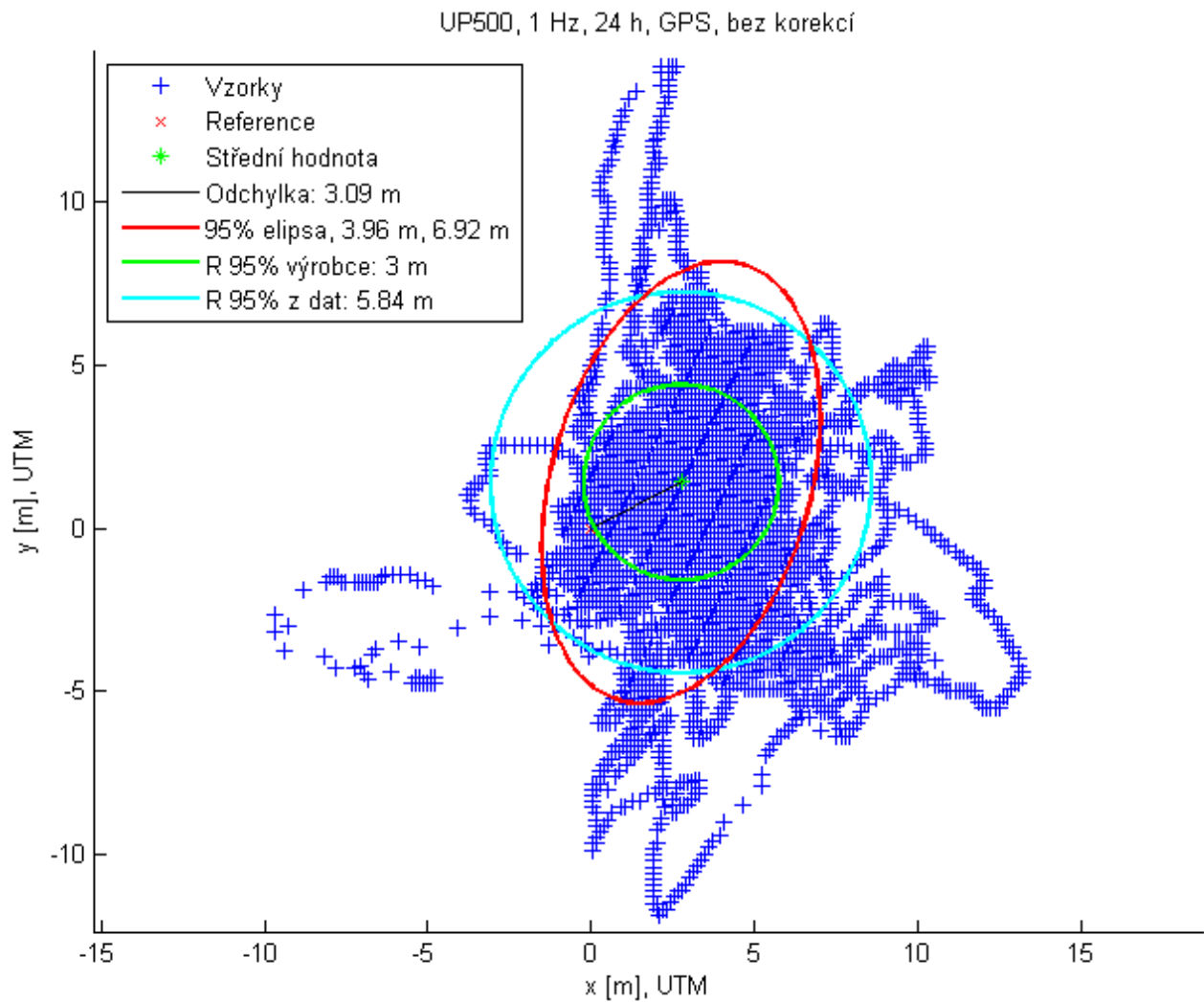
Příloha A: Měření č.4 (1/3)



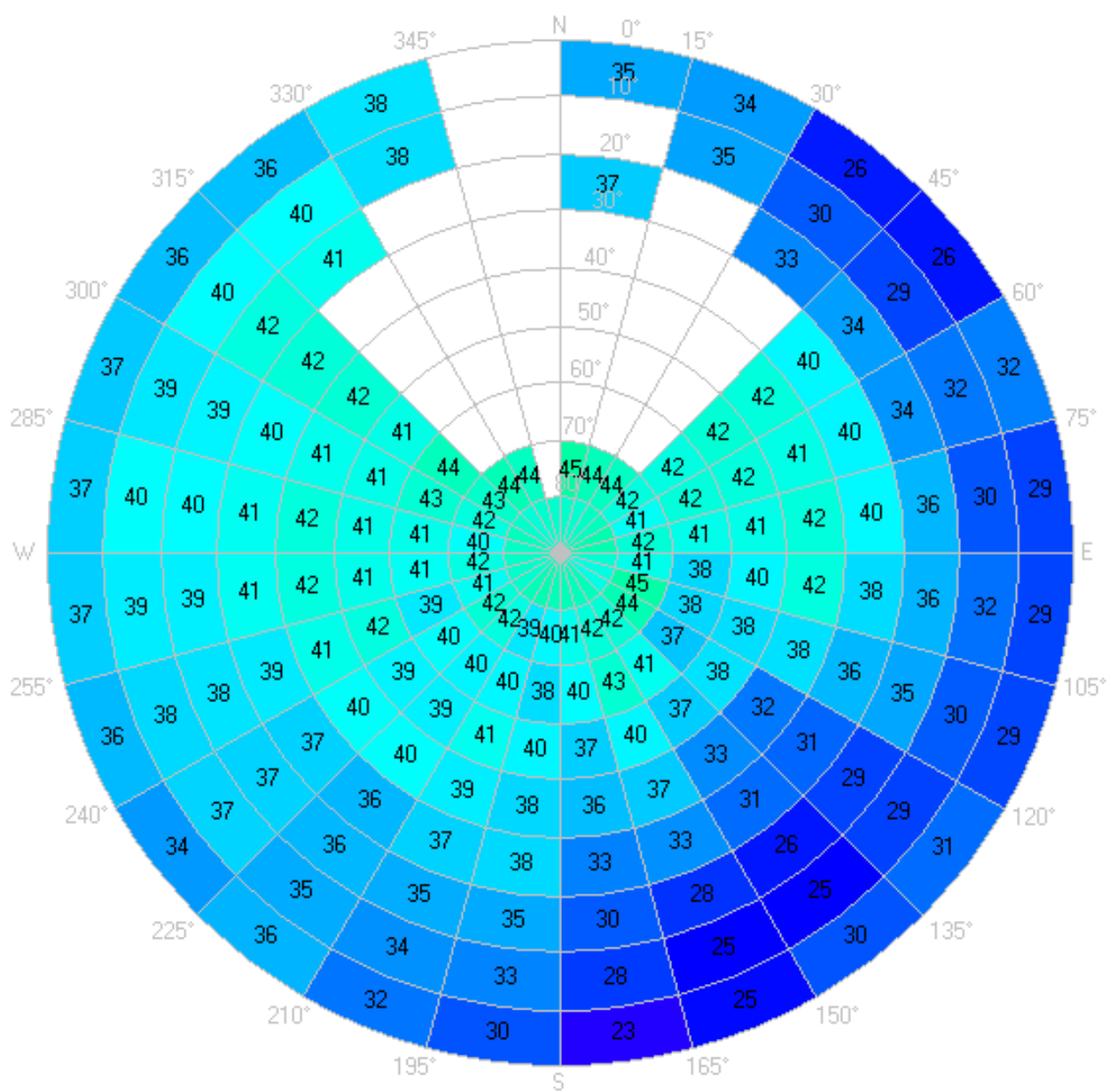
Příloha A: Měření č.4 (2/3)



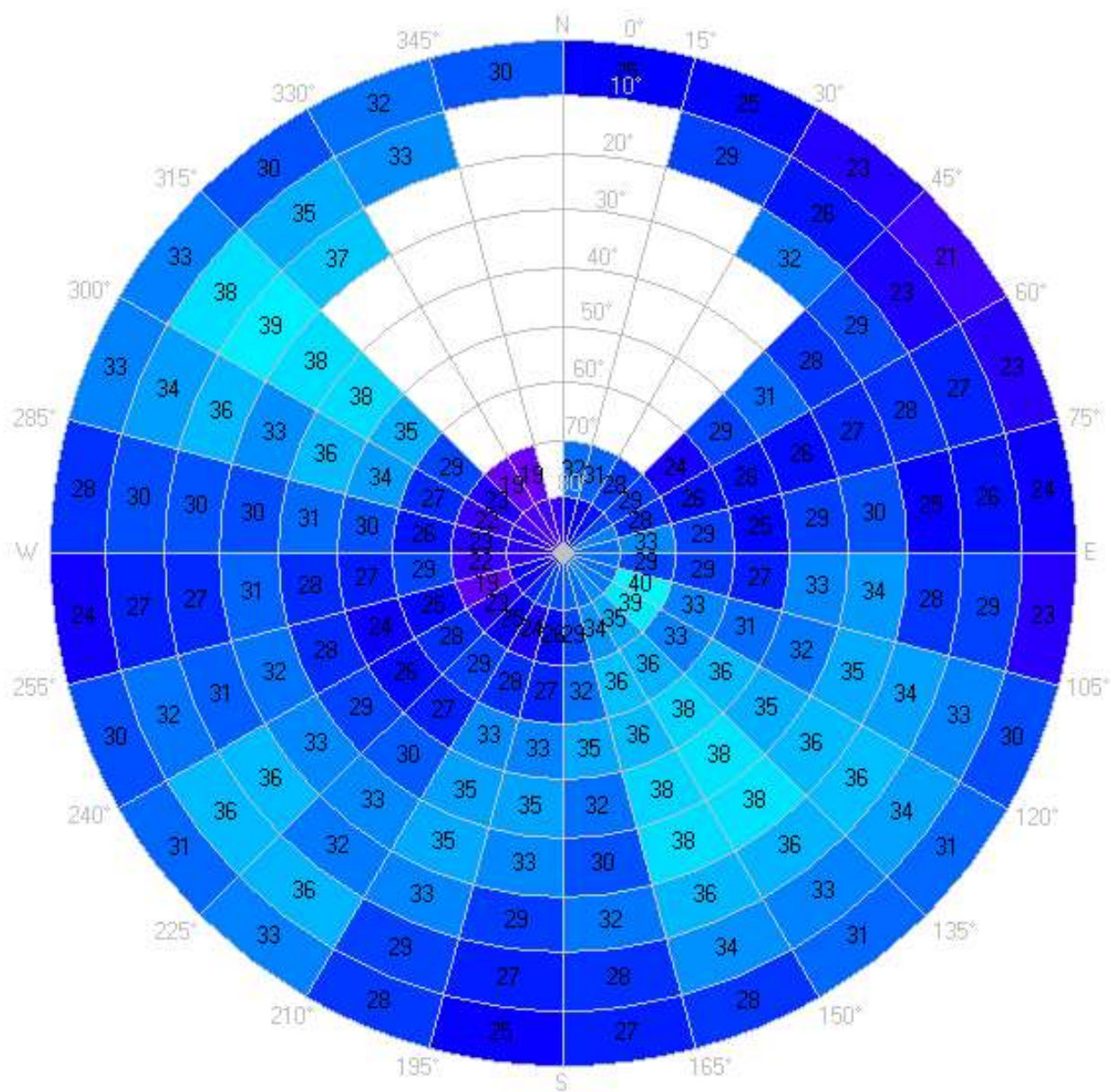
Příloha A: Měření č.4 (3/3)



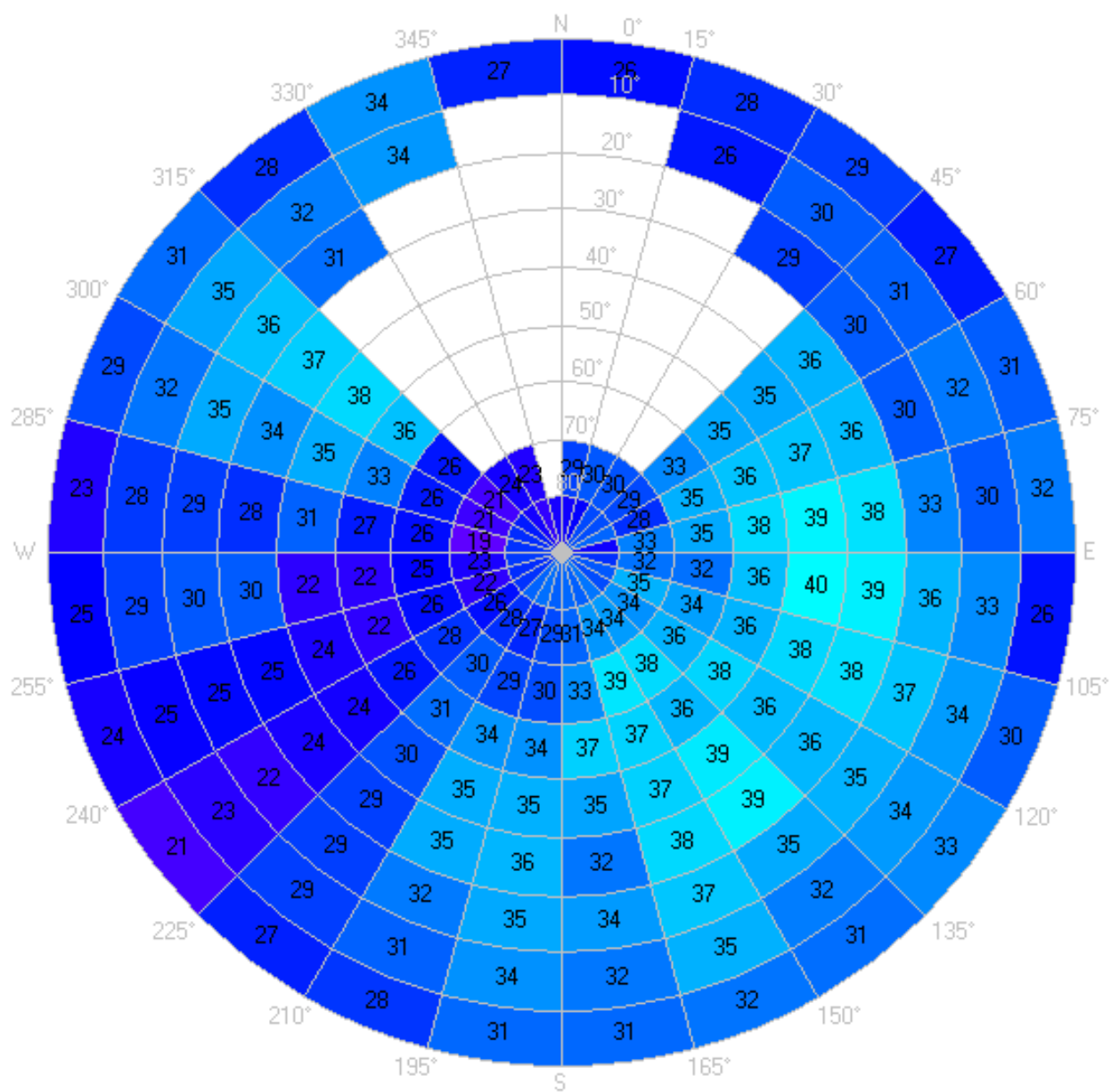
Příloha B: Skyview NVS08



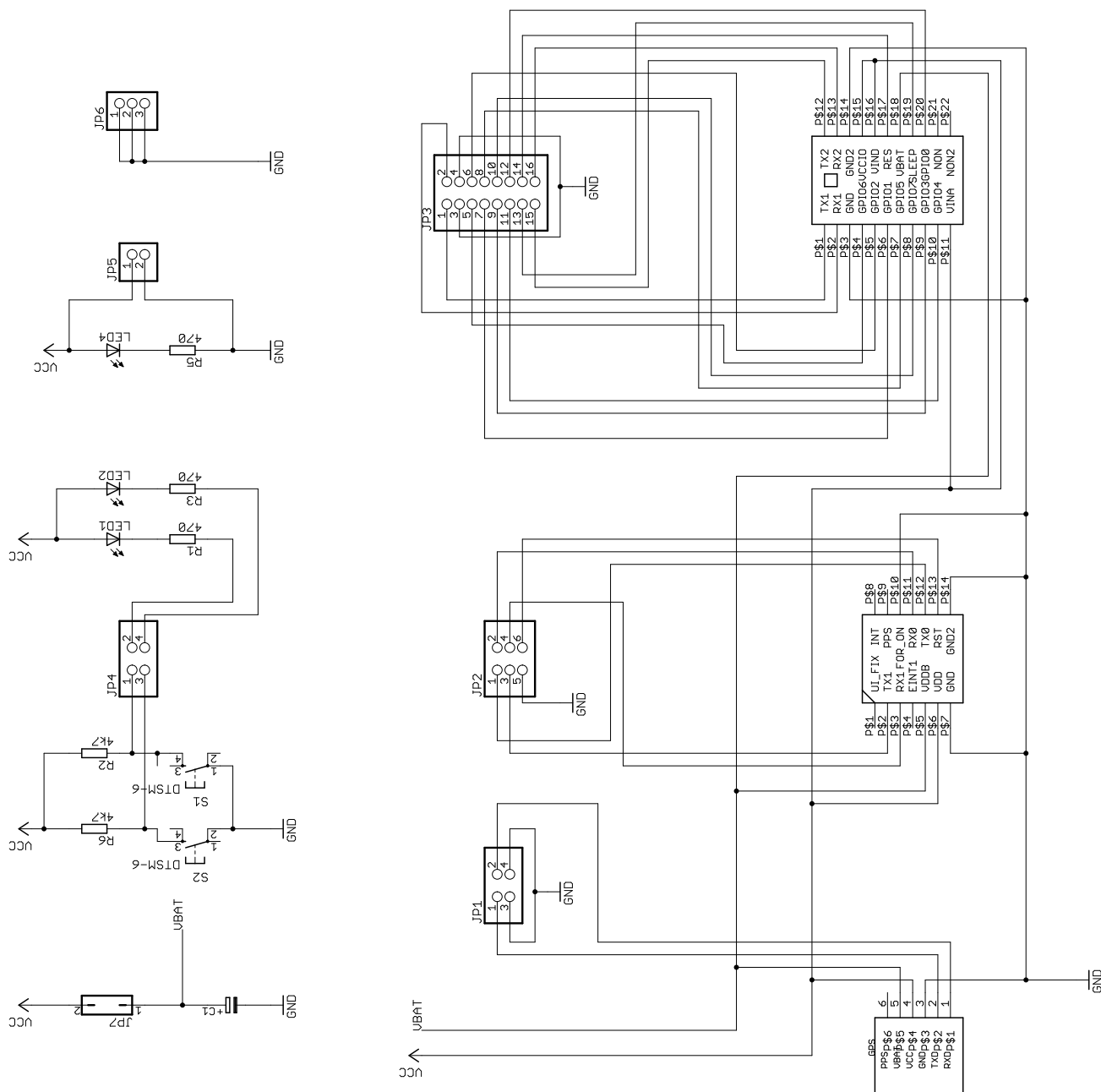
Příloha B: Skyview UC530



Příloha B: Skyview UP500

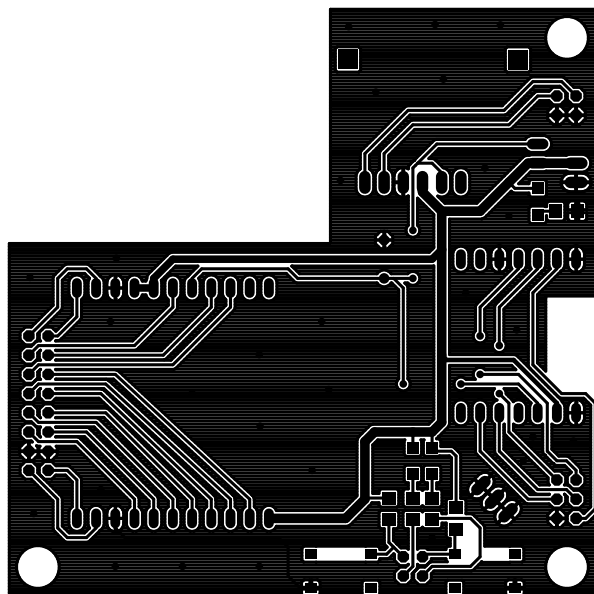


Příloha C: Testovací deska, schéma

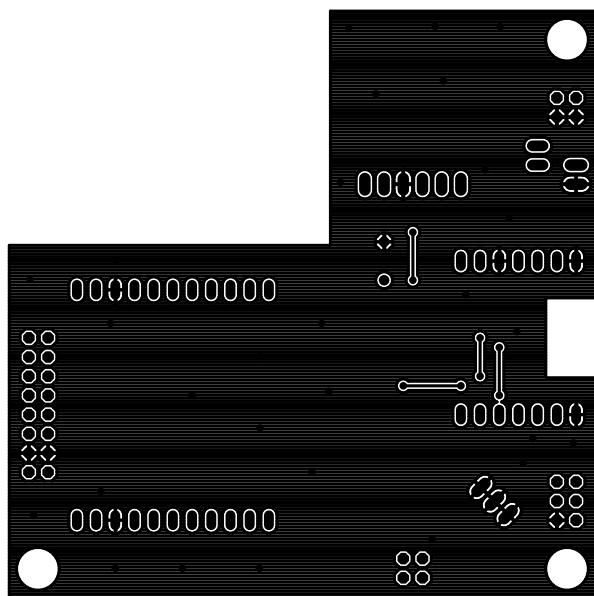


Příloha C: Testovací deska, DPS

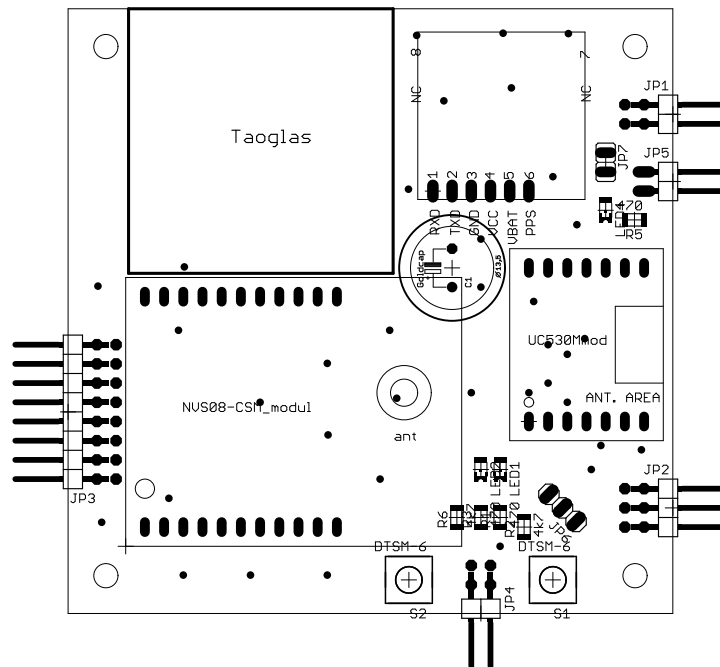
Top



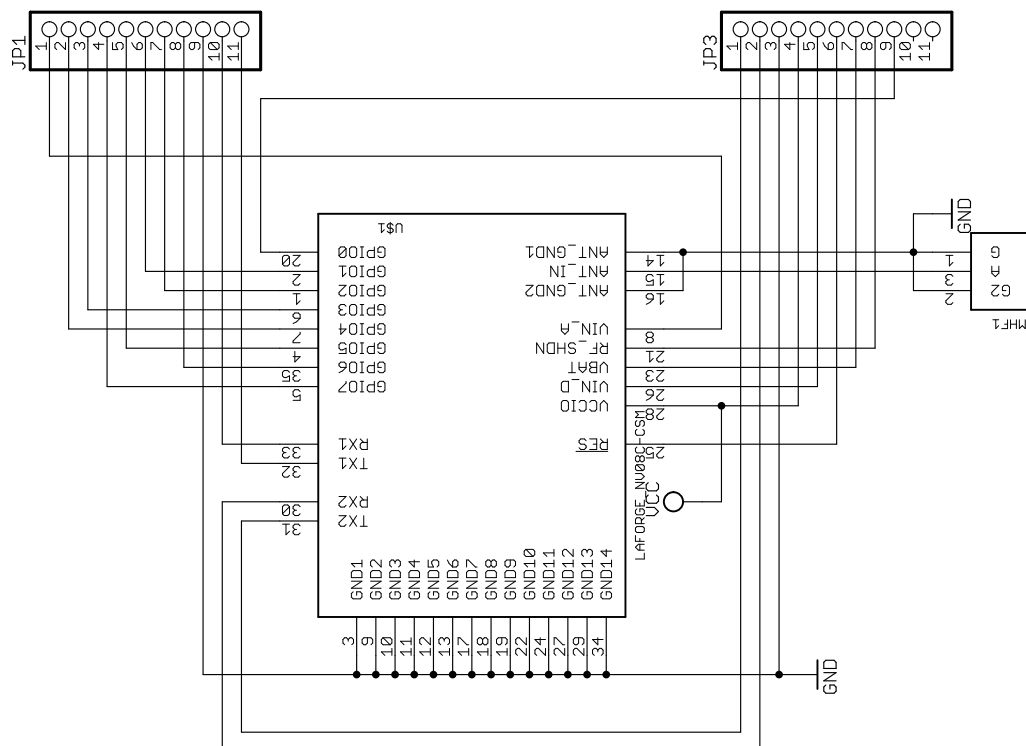
Bottom



Top

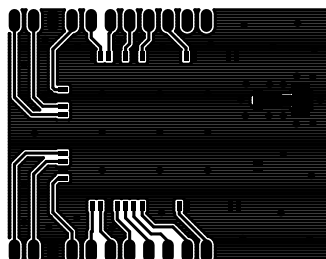


Příloha D: Vývojový modul NVS08, schéma

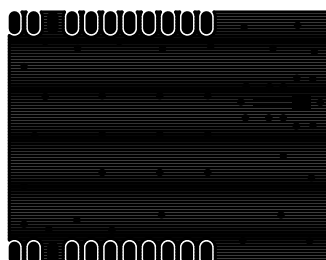


Příloha D: Vývojový modul NVS08, DPS

Top

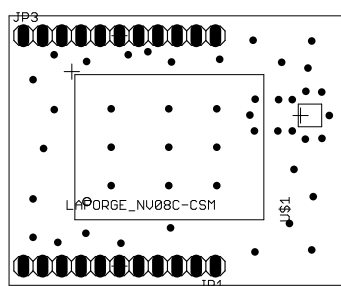


Bottom

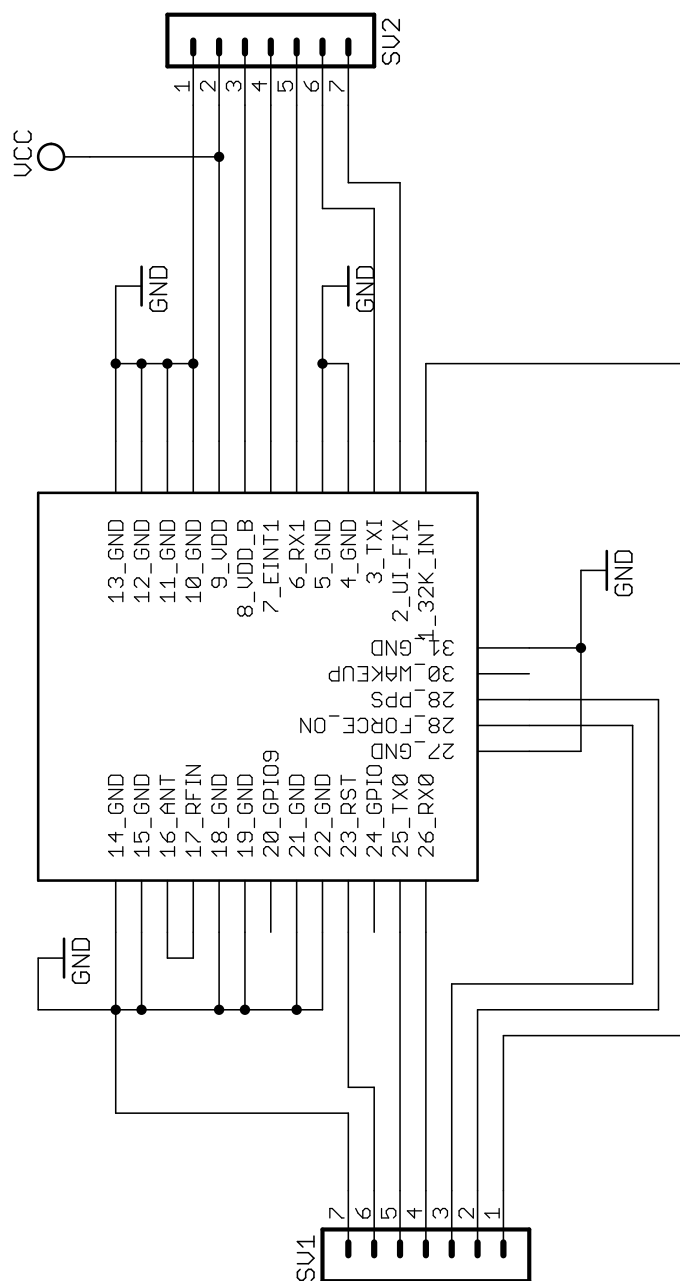


Osazovací plán

Top

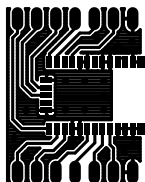


Příloha E: Vývojový modul UC530M, schéma

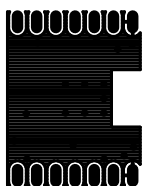


Příloha E: Vývojový modul UC530M, DPS

Top

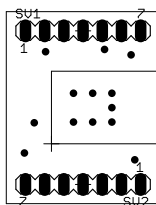


Bottom



Osazovací plán

Top



Příloha F: NMEA věty pro nastavení přijímačů

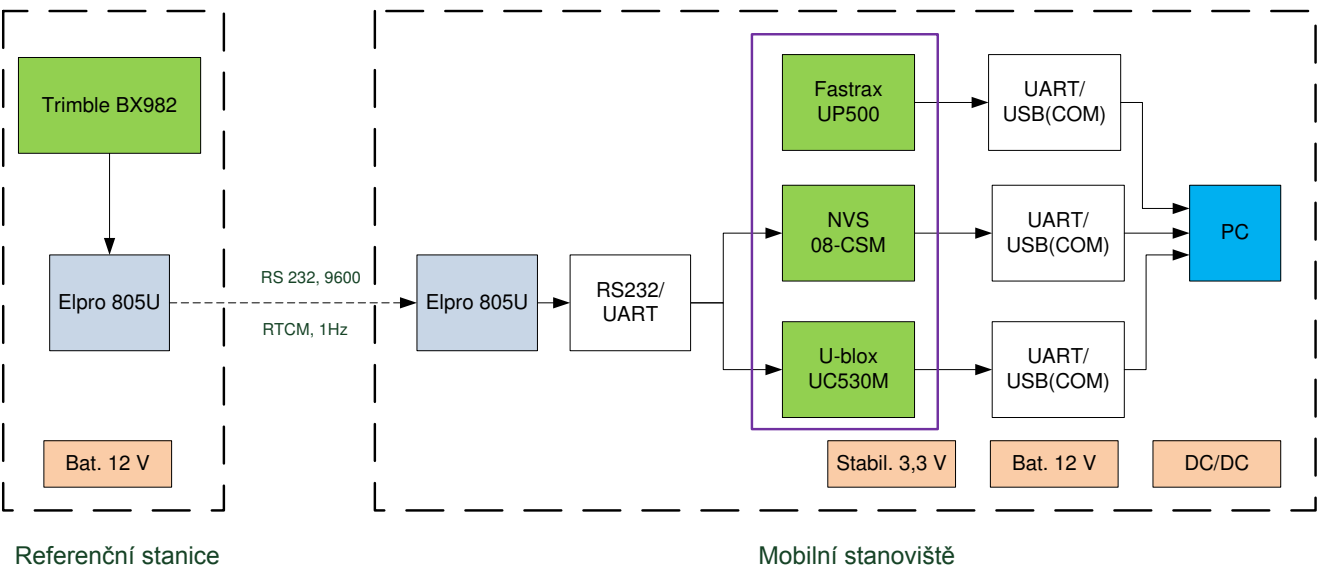
UC530 a UP500

No corections: \$PMTK301,0*2C<CR><LF>
S_RTCM: \$PMTK301,1*2D<CR><LF>
S_SBAS: \$PMTK301,2*2E<CR><LF>
S_GLONASS: \$PMTK353,0,1*36 <CR><LF>
S_GPS: \$PMTK353,1,1*36 <CR><LF>
S_GPS+GLONASS: \$PMTK353,1,1*37 <CR><LF>
S_enable SBAS: \$PMTK313,1*2E<CR><LF>
S_Reset UC530: \$PMTK104*37<CR><LF>
Q_1-RTCM, 2-SBAS: \$PMTK401*37<CR><LF>
Q_SBAS, 1-enable: \$PMTK413*34<CR><LF>
Q_Firmware info: \$PMTK605*31<CR><LF>

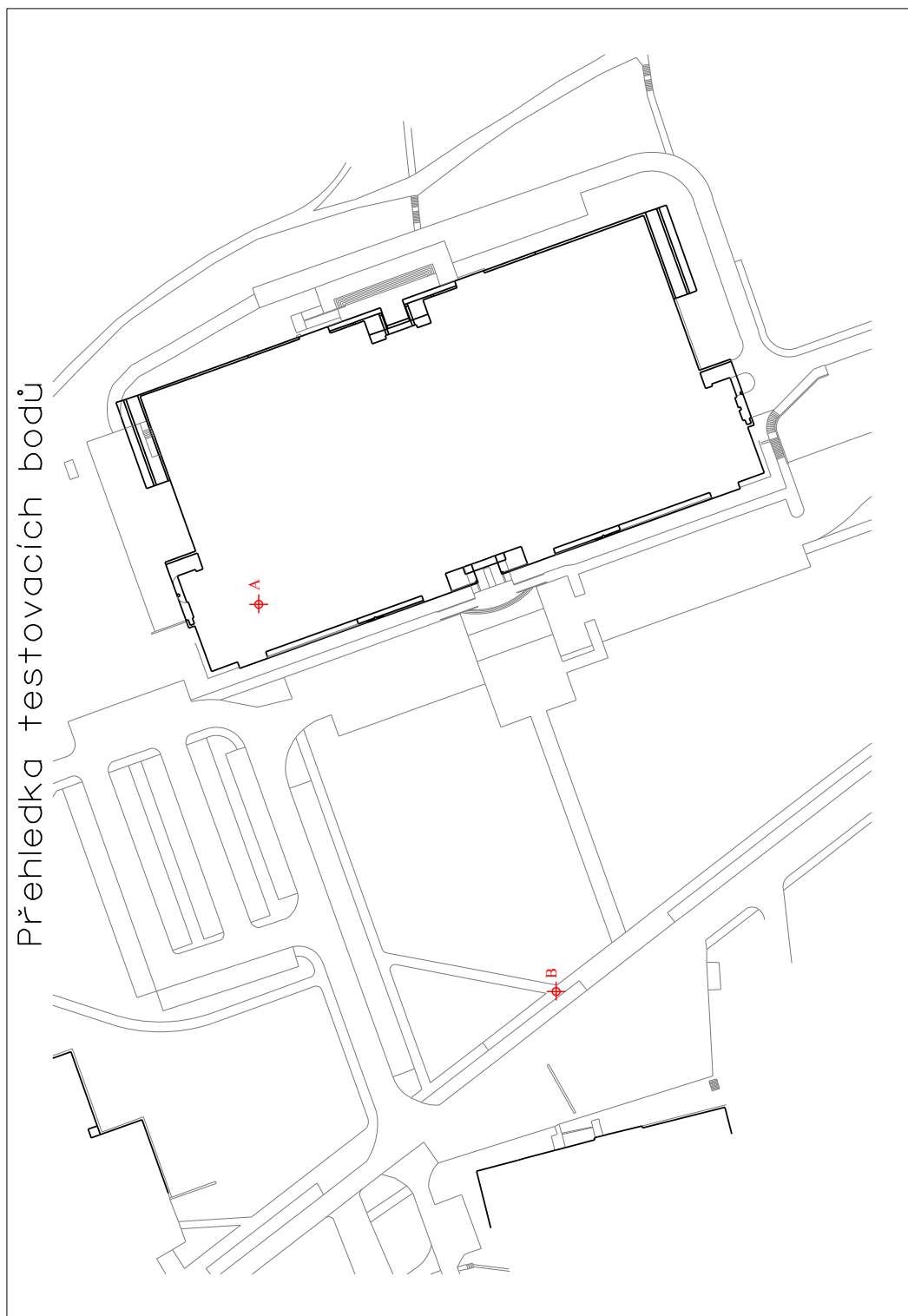
NVS08

S_Port B RTCM: \$PORZA,2,9600,2*75 <CR><LF>
S_RTCM: \$PONAV,0,05,01,12,30*5E<CR><LF>
S_SBAS: \$PONAV,1,05,01,12,30*5F<CR><LF>
S_no corections: \$PONAV,2,05,01,12,30*5C<CR><LF>
S_SBAS+RTCM: \$PONAV,3,05,01,12,30*5D<CR><LF>
S_GPS+GLONASS \$PKON1,0,0,,0000,A*6A<CR><LF>
S_GPS: \$PKON1,0,1,,0000,A*6B<CR><LF>
S_GLONASS: \$PKON1,0,2,,0000,A*68<CR><LF>
Q_Active system: \$GPGPQ,PORZX*32<CR><LF>
Q_Manufacturer: \$POVER*5E<CR><LF>
Q_Internal test: \$GPGPQ,TST*2E<CR><LF>
Q_Tone test: \$POCWT,8,1*56 <CR><LF>
S_PORZE output: \$PORZB,GGA,1,RMC,1,GSV,1,GSA,1,RZD,1,GBS,10*9 <CR><LF>
Q_korekce: \$XXGPQ,PONAV*2C<CR><LF>
S_Reset NVS: \$PORST,F*20<CR><LF>

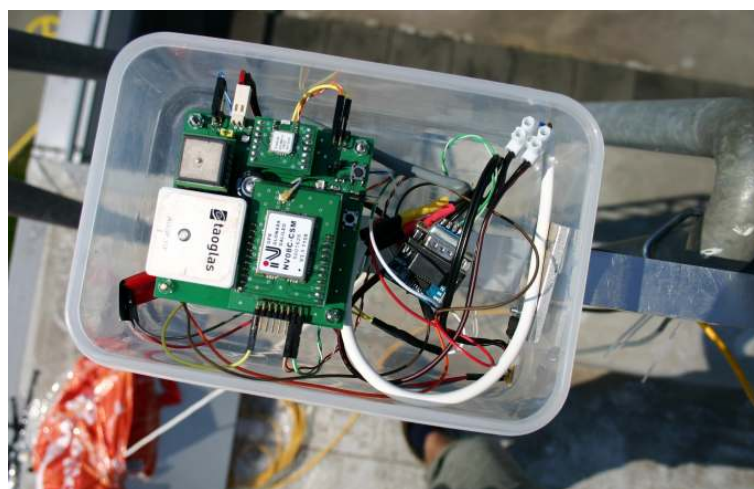
Příloha G: Orientační schéma měřicí aparatury, bezdrátové spojení



Příloha H: Přehledka referenčních bodů



Příloha I: Obrazová dokumentace (1/2)

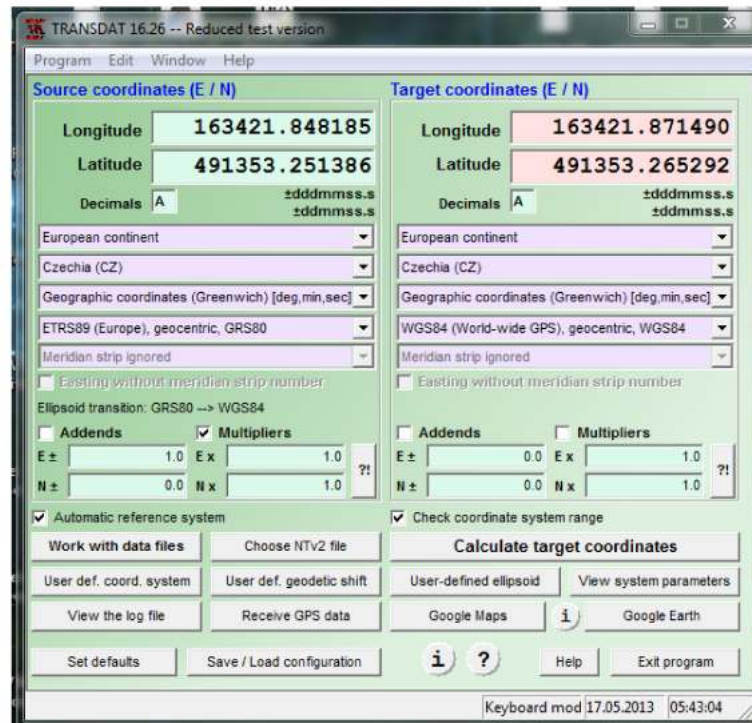


Příloha I: Obrazová dokumentace (2/2)

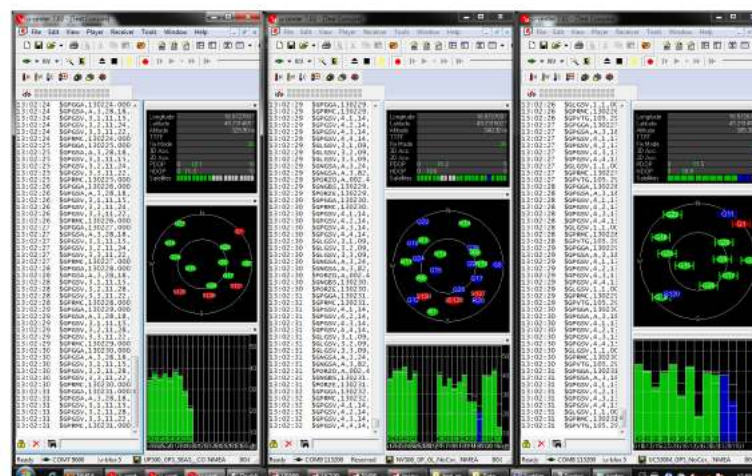


Příloha J: Speciální software

Transdat



u-center



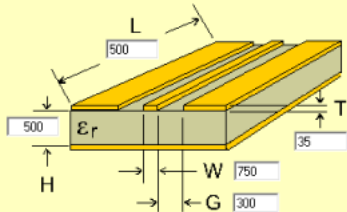
AppCAD

AppCAD - [CPW]

File Calculate Select Parameters Options Help

Coplanar Waveguide ☒ With Groundplane ☐ No Groundplane

Calculate Z0 [F4]



500 500 35 750 300 4.6

Dielectric: $\epsilon_r = 4.6$

FR-4

Frequency: 1 GHz

Length Units: μm

Elect Length = 0.003 λ

Elect Length = 1.0 degrees

1.0 Wavelength = 174237.125 μm

Vp = 0.581 fraction of c

$\epsilon_{eff} = 2.96$

Shape factor = 0.556

Z0 = 49.9 Ω

Normal Click for Web: APPLICATION NOTES · MODELS · DESIGN TIPS · DATA SHEETS · S-PARAMETERS